

ИЗДАТЕЛЬСТВО



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ и **ТЕХНОЛОГИИ**

Михайлин Ю.А.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ и ТЕХНОЛОГИИ

Санкт-Петербург, 2009

УДК 66.022
ББК 35.719
М49

М69 Михайлин Ю.А. **Специальные полимерные композиционные материалы.** – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 664 стр., ил.

ISBN 978-5-91703-011-1

В книге приведена информация о принципах создания, составах, структуре, свойствах, ассортименте некоторых типов полимерных композиционных материалов (ПКМ) функционального (специального) назначения: интеллектуальных ПКМ, радиоэкранирующих и радиопоглощающих ПКМ (магнитодиэлектрических, токопроводящих материалов технологии *Stealth*), полимерных материалов для защиты от высокоскоростного инденторного воздействия (броневые материалы и конструкции), теплозащитных (абляционных) полимерных материалах, полимерных наноматериалах.

Книга адресована специалистам полимерных предприятий: материаловедам, технологам, конструкторам, исследователям, связанным с разработкой, совершенствованием и переработкой полимерных материалов специального назначения.

УДК 66.022
ББК 35.719

Издание осуществлено при поддержке
НП «Объединение переработчиков пластмасс»



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-91703-011-1

© Михайлин Ю.А. 2009
© Изд-во «Научные основы и технологии», 2009

Содержание

| | |
|---|-----|
| Введение | 11 |
| 1. Интеллектуальные полимерные материалы (ИПМ) | 19 |
| 1.1. Принципы создания и типы ИПМ | 21 |
| 1.2. Материалы и технологии изготовления микрокомпонентов ИПМ | 23 |
| 1.2.1. Материалы и технологии микросенсорики | 24 |
| 1.2.2. Материалы и технологии волоконной оптики | 34 |
| 1.2.3. Материалы и технологии микроэлектроники и микропроцессорной техники | 46 |
| 1.2.4. Материалы и технологии микромеханики | 49 |
| 1.2.4.1. Актюаторы с использованием металлов с «памятью» формы | 51 |
| 1.2.4.2. Актюаторы на основе пьезокерамики | 53 |
| 1.2.4.3. Технологии изготовления изделий микромеханики | 55 |
| 1.3. Материалы и технологии изготовления компонентов ИПМ молекулярного уровня (нанокомпонентов ИПМ) | 61 |
| 1.3.1. Полимеры для производства нанокомпонентов ИПМ | 61 |
| 1.3.1.1. Электропроводящие полимеры с «внутренней» (собственной) электропроводимостью | 61 |
| 1.3.1.2. Пьезоэлектрические (электроактивные) полимеры | 85 |
| 1.3.1.3. Жидкокристаллические полимеры | 94 |
| 1.3.1.4. Дендримеры | 111 |
| 1.4. Тенденции развития и совершенствования компонентов ИПМ и технологий их производства | 113 |
| Наноэлектроника | 119 |
| Наносенсорика | 142 |
| Наномеханика | 142 |
| Нанобионика | 143 |
| 1.5. Интеллектуальные полимерные композиционные материалы (ИПКМ) | 144 |
| 1.6. Применение компонентов ИМ | 151 |
| Литература | 161 |
| 2. Радиоэкранирующие и радиопоглощающие полимерные материалы | 171 |
| 2.1. Теоретические представления о принципах создания магнитоэлектрических и токопроводящих (экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию) полимерных материалов | 172 |
| 2.1.1. Характеристики электромагнитного поля | 172 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 2.1.2. | Поведение материалов в электрическом поле | 174 |
| | Электрическая прочность ($E_{\text{пр}}$) | 177 |
| | Удельное объемное электрическое сопротивление (ρ_v) | 178 |
| | Удельное поверхностное электрическое сопротивление (ρ_s) | 178 |
| | Диэлектрическая проницаемость (ϵ) | 178 |
| | Тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta_\epsilon$) | 180 |
| 2.1.3. | Поведение материалов в магнитном поле | 182 |
| 2.1.4. | Электрофизические параметры, обеспечивающие экранирующие и поглощающие свойства материалам, взаимодействующим с электромагнитной энергией радиодиапазона | 191 |
| | 2.1.4.1. Магнитодиэлектрики | 195 |
| | 2.1.4.2. Типы экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию материалов. Узкодиапазонные и широкодиапазонные магнитодиэлектрики | 197 |
| 2.2. | Компоненты и составы материалов, экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию | 205 |
| 2.2.1. | Полимеры и полимерные материалы | 206 |
| | 2.2.1.1. Физическое состояние и диэлектрические свойства полимеров | 206 |
| | 2.2.1.2. Зависимость диэлектрических свойств от строения полимеров | 207 |
| | 2.2.1.3. Зависимость диэлектрических свойств от внешних факторов | 212 |
| | 2.2.1.4. Диэлектрические свойства полимерных связующих и пластификаторов, используемых в качестве компонентов магнитодиэлектриков | 213 |
| 2.2.2. | Электропроводящие полимеры | 245 |
| 2.2.3. | Углеродные материалы | 246 |
| | 2.2.3.1. Углеродные и графитизированные волокна (УВ) | 247 |
| | 2.2.3.2. Сажи | 248 |
| | 2.2.3.3. Углеволоконистые материалы | 254 |
| 2.2.4. | Материалы с особыми магнитными свойствами | 264 |
| | 2.2.4.1. Низкочастотные магнитомягкие материалы [18, 100] | 266 |
| | 2.2.4.2. Высокочастотные магнитомягкие материалы. Ферриты | 280 |
| 2.2.5. | Аморфные металлы (металлические стекла) | 294 |
| 2.3. | Радиоэкранирующие материалы, покрытия и конструкции | 307 |
| 2.4. | Радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции | 325 |
| | 2.4.1. Радиоэкранирующие радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции | 326 |
| | 2.4.2. Материалы для создания радиопоглощающих элементов в волноводах и коаксиальных линиях [26, 105] | 337 |
| | 2.4.3. Радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции безэховых камер | 340 |
| | 2.4.4. Принципы и способы уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ) объектов. Технология <i>Stealth</i> | 361 |
| | 2.4.4.1. Характеристики радиолокационных систем | 362 |
| | 2.4.4.2. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР, $\sigma_{\text{ц}}$) | 369 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 2.4.4.3. | Концепции технологии <i>Stealth</i> . Методы снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) | 375 |
| 2.4.4.4. | Материалы, покрытия и конструкции, уменьшающие радиолокационную заметность (УРЗ) объектов | 386 |
| | Литература | 445 |
| 3. | Полимерные материалы для защиты от высокоскоростного инденторного воздействия (броневые материалы и конструкции) | 451 |
| 3.1. | Критерии оценки защитных свойств материалов при высокоскоростном динамическом нагружении | 451 |
| 3.2. | Полимерные текстильные (тканые) броневые материалы | 454 |
| 3.3. | Полимерные композиционные броневые материалы | 460 |
| 3.3.1. | Броневые материалы на основе ВПКМ с полиарамидными волокнами | 461 |
| 3.3.2. | Броневые материалы на основе ВПКМ с волокнами из СВМПЭ | 462 |
| 3.4. | Комбинированные (супергибридные) полимер-металлические и полимер-керамические броневые материалы и конструкции | 466 |
| 3.4.1. | Полимер-металлическая броня | 467 |
| 3.4.2. | Полимер-керамическая броня | 469 |
| | Литература | 475 |
| 4. | Сотовые материалы и конструкции | 477 |
| 4.1. | Механические свойства сотовых конструкций | 481 |
| 4.2. | Материалы сотовых конструкций | 485 |
| 4.2.1. | Материалы, используемые в качестве оболочек сотовых конструкций | 486 |
| 4.2.2. | Материалы для заполнителей сотовых конструкций | 488 |
| 4.3. | Технология изготовления сотовых заполнителей | 489 |
| 4.3.1. | Сотовые заполнители из металлической фольги | 489 |
| 4.3.2. | Сотопласты | 489 |
| 4.3.3. | Сотовые материалы и конструкции с заполнителями на основе бумаги из ароматических полиамидов (ПСП, <i>Nomex</i>) | 496 |
| 4.3.3.1. | Полимерная бумага (фенилоновая, БФСК, <i>Nomex</i>) | 496 |
| 4.3.3.2. | Сотопласты ПСП, <i>Nomex</i> | 503 |
| 4.4. | Технология изготовления сотовых конструкций (СК) | 505 |
| 4.5. | Эксплуатационные свойства сотовых заполнителей и конструкций (панелей) с сотовыми заполнителями | 510 |
| 4.5.1. | Сотовые заполнители | 511 |
| | Металлические соты | 513 |
| | Стеклосотопласты | 513 |
| | Углеродные соты | 516 |
| | Полимерные сотопласты (ПСП, <i>Nomex</i>) | 516 |
| 4.5.2. | Сотовые панели | 527 |
| 4.6. | Применение сотовых материалов в современной технике | 530 |
| | Литература | 544 |
| 5. | Теплозащитные полимерные материалы (ТЗМ) | 549 |
| 5.1. | Условия эксплуатации «горячих» конструкций | 550 |
| 5.2. | Системы и способы тепловой защиты | 560 |

| | | |
|--|---|-----|
| 5.3. | Абляция. Критерии эффективности абляционных ТЗМ | 575 |
| 5.4. | Типы полимерных абляционных теплозащитных материалов | 587 |
| 5.4.1. | Сублимирующиеся ТЗМ | 588 |
| 5.4.1.1. | Низкотемпературные низкоэнтальпийные сублимирующиеся полимерные ТЗМ | 588 |
| 5.4.1.2. | Высокотемпературные высокоэнтальпийные сублимирующиеся ТЗМ | 591 |
| 5.4.2. | Теплозащитные материалы, аблирующие через стадию плавления | 599 |
| 5.4.3. | Теплозащитные материалы, аблирующие по смешанному механизму | 601 |
| 5.5. | Взаимосвязь состава и структуры ТЗМ с их абляционными свойствами | 619 |
| 5.6. | Применение ТЗМ | 629 |
| | Литература | 632 |
| Приложение 1. Характеристики пьезокерамических материалов | | 635 |
| | Литература | 637 |
| Приложение 2. Магнитодиэлектрики (дефиниции) | | 638 |
| | Литература | 641 |
| Приложение 3. Методики определения диэлектрических свойств | | 642 |
| 3.1. | Методика определения удельного объемного электрического сопротивления полимеров | 642 |
| | Образцы для испытаний | 642 |
| | Испытательная аппаратура | 643 |
| | Проведение эксперимента | 644 |
| | Обработка результатов | 644 |
| 3.2. | Методика определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частотах от 50 до 10^8 Гц | 644 |
| | Образцы для испытаний | 644 |
| | Испытательная аппаратура | 645 |
| | Проведение эксперимента | 645 |
| 3.3. | Определение диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ и проводимости γ методом волноводных линий | 646 |
| 3.4. | Определение ϵ' , ϵ'' и γ методом «тонкого стержня» | 648 |
| 3.5. | Измерение контактных сопротивлений в системе электропроводный полимерный материал–металл | 649 |
| Приложение 4. Методики определения магнитных свойств | | 651 |
| 4.1. | Магнитная проницаемость (μ , баллистический метод) | 651 |
| 4.2. | Магнитная восприимчивость (метод магнитных весов) | 652 |
| 4.3. | Индукция насыщения. Метод вибрационного магнитометра | 653 |
| 4.4. | Комплексная магнитная проницаемость в переменном магнитном поле (метод одного витка) | 654 |
| | Литература | 655 |
| Приложение 5. Радиотехнические характеристики магнитодиэлектриков | | 656 |
| 5.1. | Коэффициент отражения R магнитодиэлектриков | 656 |
| 5.1.1. | Метод замещения в свободном пространстве | 656 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.2. Метод замещения в волноводных линиях | 657 |
| 5.2. Экспериментальное исследование ЭПР целей ($\sigma_{ц}$) | 658 |
| Система с непрерывным излучением | 659 |
| Импульсная система | 660 |
| Доплеровские измерительные системы | 661 |

Введение

Полимерные материалы (ПМ), полимерные композиционные материалы (ПКМ) — многофункциональные материалы, свойства которых являются функцией свойств компонентов, входящих в их состав. На основе полимеров разработаны разнообразные типы полимерных материалов — конструкционные материалы для работы в области упругих (с определенной долей эластических) деформаций (пластики, наполненные, армированные пластики, композиционные полимерные материалы с непрерывными волокнами с планируемой анизотропией свойств, ВКПМ), материалы для работы в области эластических деформаций (резины на основе высокомолекулярных и низкомолекулярных, «жидких» каучуков, реактоэластопластов и термоэластопластов), лаковые и эмалевые покрытия, пено- и поропласты и эласты, клеи, герметики, компаунды. Многообразие типов полимеров, используемых в производстве ПМ, связующих (матриц) ПКМ, наполнителей из веществ различной природы (минеральной, углеродной, органической), дисперсных, в виде волокон и текстильных (нити, жгуты, ленты, ткани) и нетканых (войлоки, маты, бумага) форм из них позволяет создавать материалы с требуемым комплексом эксплуатационных свойств (конструкционных, диэлектрических, токопроводных, химически стойких, радиационно стойких, тепло-, термо-, огнестойких, триботехнических, вибродемпфирующих, вибропоглощающих и других).

Среди многочисленных типов ПМ, ПКМ функционального (специального) назначения интеллектуальные, радиозащитные и радиопоглощающие материалы, полимерные материалы для защиты от высокоскоростного инденторного воздействия (броневые материалы и конструкции), теплозащитные материалы, полимерные сотовые материалы позволяют существенно расширить использование ПМ и ПКМ в изделиях современной техники, отвечающих специфическим условиям их эксплуатации.

Интеллектуальные материалы (ИМ, *Smart Materials*, глава 1) способны активно противодействовать внешним факторам и адаптироваться к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния. Интеллектуальные ПКМ, прежде всего, ПКМ с непрерывными волокнами в качестве наполнителей (ВПКМ), способны «анализировать» и «управлять» своими эксплуатационными характеристиками. ИМ активно реагируют на изменение внешних условий и воздействий. Основными типами ИМ являются самодиагностирующиеся ИМ (пассивные) и адаптирующиеся ИМ (активные). Совершенствование ИМ предполагает оптимизацию их состава и свойств путем «обучения» (интеллектуальные конструкции, ИК), использование принципов, реализуемых в робототехнике, достижений молекулярной электроники, нано- и биотехнологий. Интеллектуализация ПМ, ПКМ, ВПКМ, которым «передан» интеллект ученого и инженера, направлена на обеспечение стабильности их эксплуатационных свойств за счет модификации компонентами, использующими достижения микро- и нанотехнологий, переводящими материалы в самодиагностирующиеся и адаптирующиеся к внешним воздействиям интеллектуальные ИПМ, ИПКМ, ИВПКМ, за счет введения датчиков (конформные датчики, микро- и наносенсоры, материалы и процессы микро-, наносенсорики), исполнительных механизмов (актюаторы, материалы и процессы микромеханики), систем анализа, связи и управления (оптоволоконная техника, микро-, наноэлектроника, микро-, нанооптоэлектроника, микро-, нанопроцессорная техника). В качестве материалов

сенсоров, актюаторов, изделий микро-, нано-, оптоэлектроники и материалов, используемых в технологиях их производства, широко применяются полимеры специфического строения и состава (электроизоляционные, токопроводящие, электроактивные, жидкокристаллические, гиперразветвленные, фотоактивные, люминисцирующие и другие).

В электротехнике, электронике, радиоэлектронике (РЭ) полимерные материалы применяются в качестве электроизоляционных, конструкционных, специальных (диэлектрики, магнетодиэлектрики, полупроводники, токопроводящие полимеры и полимерные композиции, глава 2). При работе ПМ при сравнительно невысоких напряжениях в слаботочных высокочастотных и импульсных цепях РЭ устройств к ним предъявляются жесткие требования к показателям удельного поверхностного (ρ_s), удельного объемного (ρ_v) сопротивлений, тангенсу угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta_\epsilon$) и диэлектрической проницаемости (ϵ). Полимерные материалы, предназначенные для применения при высоком напряжении (в высокочастотной аппаратуре, в высоковольтных устройствах), должны иметь малые значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ и высокие значения ρ_v и ρ_s , так как в противном случае мощность, рассеиваемая в материале, может достигнуть недопустимо больших значений. Если полимерный материал используется в колебательном контуре, большие диэлектрические потери нежелательны в связи с увеличением активного сопротивления, а следовательно, и значения затухания контура. В радиопоглощающих полимерных композициях большие диэлектрические и магнетодиэлектрические потери, интерференция и дифракция обеспечивают минимальные отражательные характеристики. Параметры РЭ устройств в большой степени зависят от свойств ПМ (определяемых типом полимера и составом композиции) — механических (прочность и модули упругости при различных нагружениях, вибропрочность, твердость и т. п.), теплофизических, диэлектрических, магнетодиэлектрических, их тепло-, термо- и огнестойкости, уровня водопоглощения.

Существенно менее подвержены воздействию факторов, изменяющих свойства ПМ (повышение температуры, влага, радиация, озон), полимерные материалы на основе полиариленов (полифениленоксиды, полисульфоны, ПЭЭК и др.) и полигетероариленов (поли- и сополиимиды). Многие важные достижения в радиоэлектронике тесно связаны с применением новых ПМ и технологических процессов. Ассортимент ПМ, применяемых в РЭ, весьма разнообразен: пресс-материалы, слоистые пластики, пенопласты и пенорезины, пленки, клеи, компаунды.

Электромагнитное поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами, характеризующая напряженностями (индукциями) электрического и магнитного полей.

При разработке различных систем и способов экранирования и поглощения электромагнитных излучений используют теоретические представления о взаимодействии электромагнитных излучений с веществом.

При разработке экранирующих и поглощающих материалов, покрытий и конструкций используют комплексный подход, обеспечивающий эксплуатационную эффективность и предполагающий проведение анализа физических явлений в материалах при действии на них электромагнитных полей и установление влияния состава и структуры материалов на показатели их диэлектрических и магнитных свойств.

В электрическом поле (частная форма проявления электромагнитного поля) диэлектрики поляризуются. В обобщенной диэлектрической проницаемости ($\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$) активная вещественная часть ϵ' обусловлена деформационной и ориентационной поляризацией, а ϵ'' (мнимая часть) характеризует кинетику процесса установления ориентационной дипольной поляризации. С макроскопической точки зрения ϵ'' (и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$) является мерой диэлектрических потерь, обеспечивает определенный уровень экранирования и поглощения электрической составляющей электромагнитного поля, необратимо преобразующейся в диэлектрике в тепло.

Для всех полимерных диэлектриков температурно-частотные зависимости ϵ' и ϵ'' обусловлены дипольной природой полимера или его примесей и релаксационным характером установления поляризации.

В магнитном поле материалы намагничиваются. Магнитомягкие ферромагнетики (ферриты, аморфные металлические сплавы) имеют высокие значения магнитной проницаемости μ' , в переменных магнитных полях $\mu^* = \mu' + i\mu''$ и они при перемагничивании имеют значительные энергетические потери μ'' ($\text{tg } \delta_\mu$) как результат сдвига по фазе на угол δ индукции и напряженности магнитного поля. μ'' и $\text{tg } \delta_\mu = \mu''/\mu'$ являются мерой магнитных потерь и обеспечивают определенный уровень экранирования и поглощения магнитной составляющей электромагнитного поля. Магнитные потери — часть энергии переменного магнитного поля, преобразующейся необратимо в магнетике (веществе, обладающем магнитными свойствами) в тепло.

Неметаллические материалы полупрозрачны для электромагнитной энергии, которая, в зависимости от свойств полимеров и композиций на их основе, может легко проникать в них на большую глубину. Взаимодействуя со средой на атомном и молекулярном уровне, электромагнитные поля влияют на движение электронов (ионы из-за своей большой массы не в состоянии взаимодействовать с полем СВЧ). Если движение электронов выходит за предел упругости, характерного для материала, то происходит преобразование электромагнитной энергии в тепло через гистерезис, то есть ее поглощение.

Возможность поглощения электромагнитной энергии повышается в магнитодиэлектрических полимерных композициях за счет уже не только диэлектрических потерь в типичных полимерных диэлектриках, но и за счет магнитных потерь. Магнитодиэлектрики — композиции из диэлектрических (полимеры, керамика) и ферромагнитных компонентов — имеют большие значения удельного электрического сопротивления и магнитной проницаемости. Полимерные композиции, содержащие токопроводящие компоненты (сажи, углеродные и металлические волокна и порошки), эффективно экранируют электромагнитные излучения. Магнитодиэлектрическими свойствами обладают аморфные металлы и электропроводящие полимеры (допированные полиетиофен, полипиррол, полиацетилен, полишиффовые основания и др.)

Анализ поведения материалов в электрическом и магнитном полях и механизмов их взаимодействия с этими полями позволяет выделить определяющие показатели свойств диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов (ϵ , $\text{tg } \delta_\epsilon$, μ , $\text{tg } \delta_\mu$ и другие) для решения задач экранирования и поглощения электромагнитной энергии радиодиапазона, в том числе высокочастотного ВЧ и сверхвысокочастотного СВЧ.

В связи с необходимостью защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) радиодиапазона большого числа конструкций (см. раздел 2.3, 2.4) проблема экранирования и поглощения ЭМИ предполагает комплексный подход с использованием электрофизических и геометрических параметров материалов, покрытий и конструкций. В полной мере это относится и к проблеме уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ) объектов.

Принцип работы экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию материалов заключается в том, что при прохождении энергии через материалы она преобразовывается. При этом имеют место явления поглощения, отражения, рассеивания, интерференции, дифракции электромагнитных волн.

Общая эффективность экранирования L , дБ любого замкнутого объема определяется как

$$L = A + R + B,$$

где A — потери, обусловленные поглощением электромагнитной энергии материалом; R — потери, связанные с отражением энергии от обеих поверхностей материалов; B — потери из-за внутренних переотражений в материале; B , бел — логарифмическая единица отношения двух величин, десятичный логарифм отношения двух одноименных физических величин, например, мощностей, токов; в данном случае, потерь, обусловленных процессами A , R , B ; обычно используют 0,1 долю B — децибел, дБ.

Основными требованиями, предъявляемыми к радиопоглощающим материалам, являются максимальное поглощение электромагнитных волн и минимальное их отражение в широком диапазоне длин волн. При разработке радиоэкранирующих материалов учитываются явления

и процессы, обеспечивающие как поглощение, так и отражение электромагнитных волн, минимальное прохождение ЭМЭ за экран.

Диэлектрические и магнитодиэлектрические материалы, поглощающие электромагнитную энергию радиодиапазона, являются радиопоглощающими.

Принцип работы таких материалов заключается в том, что поглощенная энергия преобразовывается в различные виды энергии в самом радиопоглощающем материале. При взаимодействии с такими материалами радиолокационных сигналов имеют место процессы поглощения, рассеяния, дифракции и интерференции электромагнитных волн. Поглощение электромагнитных волн представляет собой их ослабление при распространении в радиопоглощающем материале, энергия волн частично переходит в теплоту. Процесс рассеяния является преобразованием распространяющегося потока электромагнитной энергии определенного направления в потоки всевозможных направлений, что обусловлено структурной неоднородностью материала. Такая неоднородность создается вкраплением одного вещества в другое. Процесс интерференции электромагнитных волн является полной аналогией оптической интерференции. Интерференция электромагнитных волн обуславливает величину отражательной способности материала и направление его вторичного излучения.

Реализация условий, обеспечивающих минимальный коэффициент отражения R и максимальное поглощение электромагнитной энергии, достигается в магнитодиэлектриках сочетанием полимеров, керамик (связующее), обеспечивающих требуемый уровень диэлектрических свойств и магнитных компонентов (наполнитель — ферриты, карбонильное железо, сажи, углеродные материалы и др.). Для снижения магнитного сопротивления полимерных связующих перспективно использование токопроводящих и металлосодержащих полимеров. Магнитодиэлектрические материалы поглощают ЭМЭ за счет наведения рассеянных слабых токов, магнито- гистерезисных, диэлектрических ($\text{tg } \delta_\epsilon$) и магнитных потерь ($\text{tg } \delta_\mu$).

В зависимости от электрических и магнитных свойств поглощающие и экранирующие материалы делятся на диэлектрические и магнитодиэлектрические, в зависимости от механизма взаимодействия с ЭМЭ — на интерференционные и поглощающие ЭМЭ за счет магнитодиэлектрических потерь, по принципу работы — на узко- и широкодиапазонные, по конструкционному выполнению и назначению — на экранирующие и поглощающие ЭМЭ покрытия и многофункциональные материалы.

В качестве узкодиапазонных поглощающих ЭМЭ материалов используются диэлектрики и магнитодиэлектрики, для которых толщина поглощающего покрытия h связана с λ , ϵ и μ соотношением $h = \lambda / 4\sqrt{\epsilon\mu}$. В качестве широкодиапазонных поглощающих используются многослойные материалы, в которых величина электрических потерь возрастает по толщине («электрическое болото»), но в основном магнитодиэлектрики, в которых ЭМЭ преобразуется в тепловую благодаря специфическим электрическим и магнитным свойствам магнитодиэлектриков, за счет наведения рассеянных слабых токов, магнитогистерезисных и диэлектрических потерь.

Уменьшение радиолокационной заметности объектов (снижение эффективной поверхности рассеяния, ЭПР) достигается применением малоотражающих форм конструкций, применением радиотехнических средств (диполи), радиолокационных отражателей (ложные цели), использованием плазмы как радиопоглощающей среды, применением магнитодиэлектрических материалов.

В качестве диэлектрических компонентов в магнитодиэлектриках используют полимерные связующие на основе термо- и реактопластов, пенопласты, пенорезины, сферопласты и резины (синтактные пены с полыми микросферами) с широким диапазоном диэлектрических свойств. Во многофункциональных конструкциях для работы под воздействием высокоэнергетических потоков ЭМЭ используют ПКМ (стекло- и органопластики) на основе теплостойких термо- и реактопластов.

В качестве поглощающих магнитную составляющую электромагнитной энергии в поглощающих и экранирующих материалах, покрытиях и конструкциях используют токопроводящие

(металлы, углеродные материалы — волокна, сажи, порошки, фуллерены, нанотрубки) и магнитные (допированные металлами электропроводящие полимеры, магнитомягкие ферриты, аморфные металлы) компоненты. Большой ассортимент ферритов позволяет использовать их в широкодиапазонных магнитодиэлектриках, а использование полимерных магнитодиэлектриков существенно снижает весовые характеристики поглощающих покрытий.

Для поглощения ЭМИ частот в диапазоне 10^7 – 10^{11} Гц используют графит и ацетиленовую сажу, для поглощения частот более 10^{11} Гц — печные сажи. Введение графита или углеродных волокон вместе с сажой снижает электросопротивление полимерных композиций. Большой ассортимент углеродных волокнистых материалов с регулируемыми электрофизическими свойствами способствует их широкому использованию в экранирующих и поглощающих ЭМЭ, в том числе радиодиапазона, материалах.

Низкочастотные магнитомягкие материалы находят применение в различных областях техники, в том числе в поглощающих и экранирующих ЭМЭ композициях. Материалы с высокой индукцией насыщения благодаря большой магнитной индукции ($B_s \leq 2,15$ Тл), малой коэрцитивной силы ($H_c \leq 100$ А/м), достаточно высокой магнитной проницаемости ($\mu'_{\max} \leq 63 \cdot 10^3$) используют для магнитных полей напряженностью от 10^2 до $5 \cdot 10^4$ А/м.

Материалы с высокой магнитной проницаемостью позволяют получить большие значения индукций в слабых магнитных полях ($H \leq 10^2$ А/м).

Высокочастотные магнитомягкие материалы (ферриты) используются для поглощения радиочастот при высоких (до 800 МГц) и сверхвысоких (от 800 МГц) частотах. Применение ферритов в СВЧ основано на эффекте Фарадея и ферромагнитного резонанса. Ширина интервала ΔH_0 (ширина резонансной кривой на уровне половины высоты резонансного максимума) — основная характеристика СВЧ-ферритов.

Ферриты для СВЧ выбирают с учетом частотного диапазона, уровня мощности и других факторов. Для длин волн λ 1–3 см применяют никелевые ферриты, содержащие оксиды магния и марганца, никеля и магния и др. ($\Delta H_0 \leq 10 - 100$ кА/м); для длин волн λ 4–10 см тройные ферриты, содержащие MgO, MnO, ZnO и полиферриты (с CuO и CoO); для длин волн $\lambda > 10$ см применяют ферриты — гранаты («серый чугун», СЧ) типа $2Me_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$, где Me — иттрий, гадолиний, лантаноид ($\Delta H_0 = 4$ кА/м).

В полимерных магнитодиэлектриках используют ферромагнитные порошки и диэлектрические полимеры, плитки, размещаемые в диэлектрике, напыляемые покрытия на слоистые носители (пленки, ткани, сетки).

По показателям магнитных свойств аморфные металлические сплавы Fe-Ni-Co близки к магнитомягким ферритам и могут рассматриваться как компоненты магнитодиэлектриков. Температурные изменения ρ_V аморфных сплавов в 200–900 раз меньше, чем у кристаллических аналогов.

Экранирующие и поглощающие ЭМЭ магнитодиэлектрические материалы широко используются в качестве материалов безэховых камер, для защиты техники, оборудования и людей от воздействия ЭМИ; для создания поглощающих элементов в волноводах и коаксиальных линиях; уменьшающих радиолокационную заметность УРЗ объектов.

Благодаря использованию полимерных магнитодиэлектриков в теплозащитных радиопоглощающих материалах с магнитными и токопроводящими наполнителями (многослойные радиопоглощающие конструкции РТК-Р, С, Ф; многофункциональные ПКМ, сочетающие конструкционные, теплозащитные и радиопоглощающие свойства), эффективная площадь рассеивания (ЭПР) ГЧ БРДД снижается по сравнению с исходной (ЭПР около $0,2$ м²) в 1000 раз.

Достижения при создании объектов малоотражающих форм (архитектуры) с использованием поглощающих материалов стимулировали комплексный подход к проблеме УРЗ в программе *Stealth*, который используется для уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ) разнообразных объектов техники (оборудования, транспорта, подводных и надводных кораблей, объектов авиаракетной техники).

Широко использование в конструкциях ВПКМ (прежде всего, углепластиков с показателями μ и $\text{tg } \delta_\mu$ оптимальными для значений Z_0 , определяющих радиопоглощение), оптимизация архитектуры и радиотехнических характеристик, использование радиопоглощающих широкодиапазонных покрытий с использованием гофр, сот, пирамидальных «шахтных» структур привело к снижению ЭПР (усредненной по ракурсу) до 0,01–0,001 м² для F-117 А; 0,01–0,049 м² для B-2 (самолеты *Stealth* по возможности обнаружения сравнимы с птицей).

Совершенствование авиационной техники, разработка истребителей 5-го поколения (СУ-35, F/A-22 *Raptor*) стимулировали разработку интеллектуальных радиопоглощающих ВПКМ.

Для самодиагностирования и адаптации в конструкции таких самолетов (силовой набор, оболочка) наряду с конформными сенсорами, актюаторами, волоконно-оптическими системами, микропроцессорами, анализирующими и корректирующими конструкционными свойствами, введены конформные системы сенсоров, микропроцессоров, фазированных антенных решеток, обеспечивающих радиопротиводействие и УРЗ.

Разработаны и производятся в промышленном масштабе материалы, обеспечивающие поглощение 99,99% падающего излучения. Стоимость радиозакрывающих и радиопоглощающих материалов, обеспечивающих ослабление электромагнитной энергии радиодиапазона в 10 000 раз (30–40 дБ), находится на уровне 100 долл США за кг (июнь 2003 г.). Стоимость радиопоглощающих материалов типа Эмистоп, Спецпласт-М (Россия), ослабляющих энергию радиодиапазона в 100–500 раз — 10 долл США/кг.

Защита людей, техники, сооружений (бронезащита) от высокоскоростного высокоэнергетического проникающего (инденторного) воздействия (такое воздействие характеризуют также как «баллистический» удар) является актуальной задачей (глава 3).

Летающая со скоростью 200–900 м/с пуля обладает огромной энергией, которую нужно погасить за очень короткий промежуток времени (250 мкс). В точке ее контакта с преградой быстро нарастают силы растяжения — сжатия. Когда они достигают предела прочности материала, пуля его «прокалывает», происходит пенетрация материала, внедрение в него индентора (пули, осколков).

Первые бронезилеты практически ничем не отличались от доспехов средневековых рыцарей. Металлические пластины вшивались в плотную ткань бронезащиты. Выпущенная с расстояния в 5 м винтовочная пуля не пробивает такую броню, но и не обеспечивает легкость (бронезащита участников десантно-штурмовых групп с титановыми или стальными бронезащитами весит более 12 кг) и маневренность. Тяжелая многослойная броня из клеенных слоев «хрупкой» керамики и «мягких» алюминиевых сплавов устойчива к автоматным пулям диаметром 7,62 мм, выпущенным с расстояния 11 м.

Существенно снижается масса бронезащиты при использовании тканей из волокон алифатических полиамидов (например, волокон из *Nylon*). Многослойный (10–15 слоев) пакет из таких тканей, благодаря прочности и вязкости разрушения полиамидных волокон, «гасит» энергию пули, летящей со скоростью больше 450 м/с. При ударе пули в нитях ткани возникают продольные волны, перераспределяющие растягивающее и сжимающие нагрузки на нити, не подвергающиеся высокоскоростному ударному воздействию, что приводит к поглощению и рассеиванию энергии пули. Бронезилеты из *Nylon* (вес 4–4,5 кг, длительность применения при 25 °С и влажности более 60% 40–100 мин, пенетрация пулями, летящими со скоростью более 450 м/с) используют с 1950 г.

Разработка волокон из ароматических полиамидов (*Kevlar* 29, 1965 г., *Du Pont*, США; СВМ, Русар, Россия) позволила снизить толщину и массу бронезащиты, создать легкую бронезащиту, в том числе для скрытного ношения.

С конца 1980-х гг. армией США использовался комплект *PASGT*, состоящий из противоосколочного жилета (3,1 кг) и шлема (1 кг) на основе волокон *Kevlar* 29, защищающих от пуль и осколков, летящих со скоростью до 600 м/с. Защитные свойства касок на 25% выше по сравнению с касками М-1, а бронезилета на 50% выше по сравнению с бронезилетами на основе тканей с волокнами из алифатических полиамидов.

Современная броня для индивидуальной защиты представляет собой комбинированные конструкции, сходные с многофункциональными композиционными панелями, разработанными для изделий авиакосмического комплекса (например, с многослойными конструкциями со слоями из материалов с высоким поглощением энергии гиперсверхзвуковых микрометеоритов, металлической фольги, полимерных пленок, органопластиков, тканей из высокопрочных волокон со слоями демпфирующих материалов, предотвращающих пенетрацию конструкционных стенок ДОСов, защита конструкции от ударного импульса ядерного взрыва).

Совершенствование защитных средств противодействия высокоскоростному инденторному удару связана с разработкой новых типов материалов: 1) на основе волокон из СВМПЭ; 2) «жидкая» броня со структурой аэрогеля (твердые наночастицы + жидкость), в которой наночастицы кварца связываются друг с другом, превращая гель в твердую композицию); 3) броня на основе электроактивных полимеров (*EAP, Electroactive Polymer*), многослойные структуры из лент *EAP*, наполненных магнитными дисперсными частицами и керамическими частицами особой конфигурации. Высокоскоростное ударное воздействие деформирует *EAP*, вызывая резкое смещение магнитных частиц в его объеме. За счет индукции возникает электрический импульс, вызывающий сжатие *EAP* и сцепление керамических частиц с образованием высокопрочного защитного слоя, обеспечивающего равномерное распределение поглощенной материалом кинетической энергии индентора по объему брони без ее пенетрации (разработки *NASA, BAE Systems, H.P. White Laboratory*, США, Великобритания) так и с использованием новых подходов.

Современная противотанковая управляемая ракета (ПТУР) пробивает лобовую броню любого танка с расстояния 8 км.

Для защиты бронетехники используются активные системы (с 1983 г. на танках Т-55 системы «Дрозд», «Дрозд-2», «Арена», КБ машиностроения, Коломна). Комплекс «Арена» включает всеракурсную РЛС и «пояс безопасности» вокруг башни танка из 32 касет с осколочно-фугасными боеприпасами (в сторону ПТУР выстреливаются боевые касеты и атакующий снаряд разрушается облаком осколков, перехват до 70% ПТУР). Аналогично защищаются комплексы «Тополь-М».

В 2004 г. на околоземной орбите находилось более 9300 аппаратов, из них только 6% в рабочем состоянии. Общая масса космического мусора — около 6000 т (целые спутники, вышедшие из строя, обломки размером не более 1 мм, до 70 000). Специальные службы отслеживают местонахождение более 9000 объектов размером более 10 см. Осколки техногенного происхождения (скорость до 16 км/с) представляют угрозу космическим аппаратам различного назначения. Для их защиты разрабатываются сплошные и сетчатые экраны из материалов различного типа, обеспечивающих сохранность конструкции при высокоскоростных высокоэнергетических ударных воздействиях.

В традиционных броневых конструкциях используются материалы с высокой устойчивостью к зарождению и развитию трещин. Локальные повреждения таких материалов не приводят к быстрому развитию трещин, процесс прорастания трещин сопровождается вязким разрушением материала и может продолжаться сотни часов без вторичного разрушения, исключается возможность образования осколков с внутренней стороны стенки конструкции. Имеются сотни вариантов конструкций и типов бронезащиты. Средства индивидуальной защиты от высокоэнергетического ударного воздействия имеют несколько классов с различной устойчивостью к пенетрации.

Сотовые материалы в качестве заполнителей слоистых панелей обеспечивают разнесение оболочек (несущих слоев) интегральных конструкций, обладающих высокими показателями жесткости, удельной прочности, вибростойкости, хорошими тепло-, звукоизоляционными и специальными (диэлектрическими, радиопрозрачными, радиопоглощающими и др.) свойствами, весовым совершенством (глава 4).

Условия работы многих конструкций ракетно-космической техники (РДТТ, ГЧ БРДД, возвращаемые КА) требуют использования теплозащитных материалов (ТЗМ), покрытий

(ТЗП) и конструкций (ТЗК). При воздействии высокоскоростных (гиперзвуковых) высокотемпературных газовых потоков в полимерных ТЗМ проходят многочисленные энергоемкие физико-химические превращения их компонентов (плавление, кипение, сублимация и другие), что делает их эффективными в качестве абляционных (одноразовых, «жертвенных») ТЗМ. В главе 5 рассмотрены механизмы абляции ТЗМ различного состава и структуры, критерии, определяющие эффективность абляции, типы ТЗМ в зависимости от преобладающего механизма физико-химических превращений компонентов ТЗМ: абляционные материалы сублимирующиеся, разрушающиеся при абляции через стадию плавления, аблирующие по смешанному механизму.

1. Интеллектуальные полимерные материалы (ИПМ)

Одним из важнейших направлений развития полимерного материаловедения является разработка на основе достижений наукоемких технологий полимерных материалов 3-го поколения (после однофазных, изотропных и гетерофазных, композиционных), способных активно противодействовать внешним факторам (нагрузки, излучения и др.) и адаптироваться к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния, конструкционных материалов, способных анализировать и управлять своими эксплуатационными характеристиками, радиопоглощающих материалов, адекватно реагирующих на внешние электромагнитные воздействия РЛС, материалов, которыми «передан» интеллект ученого и инженера, — «интеллектуальных» материалов [1–11, 149, 150].

Прогресс в различных областях техники, прежде всего в авиакосмической и робототехнике, электронике, медицине связан с широким использованием наукоемких технологий.

В авиакосмической промышленности развитие конструкционных и специальных материалов, наиболее полно отвечающих современным требованиям, стимулировало переход от однофазных изотропных материалов (конструкционные сплавы на основе алюминия, титана и др., изделия из объемной керамики, изотропные полимерные материалы со специальными свойствами диэлектрики, химически стойкие и др. в малонагруженных конструкциях), разработку и широкое использование композиционных материалов (КМ), прежде всего, полимерных композиционных материалов (ПКМ), особенно ПКМ с наполнителями в виде непрерывных волокон-нитей, жгутов, однонаправленных лент, тканей волокнитов и текстолитов, волокнистых ПКМ (ВПКМ).

Наполнение полимеров дисперсными частицами (порошки, короткие волокна) хотя и позволяет получать ПКМ с более высоким уровнем свойств (особенно при использовании волокон длиной l в 10–100 раз больше критической длины волокна $l_{\text{крит}}$, $l \gg l_{\text{крит}}$, когда реализуется механизм перераспределения напряжений с матрицы на упрочняющие волокна), получать материалы со специальными свойствами (токопроводящие, магнитодиэлектрические, электроактивные и др.), но не дает возможности реализовать главное преимущество композиций с непрерывными волокнами (*Composite Materials, FKV, Faser-Kunststoff-Verbunde*, ВПКМ, армированные КМ) — возможность конструирования структуры материалов с планируемой анизотропией свойств. Оптимальное армирование ВПКМ выделяет их в самостоятельную группу наполненных полимерных материалов (при наполнении порошками и короткими волокнами эффект анизотропии отсутствует, такие гетерофазные материалы сохраняют изотропность). В отечественной практике термины «армирующие наполнители», «армированные пластики» применительно к материалам, наполненным порошками и короткими волокнами используются неправомерно (их относят к композиционным не с точки зрения механики и физики гетерофазных систем, а исходя из конъюнктурных соображений, с использованием привлекающей потребителя терминологии). Иногда композиционными называют материалы, которые к КМ не имеют отношения (смеси термодинамически совместимых полимеров; полимеры, модифицированные с помощью добавок низкомолекулярных веществ и др.).

В зарубежной науке и технике к композиционным материалам (*Composite Materials*) чаще всего относят материалы, использующие в качестве наполнителей непрерывные

высокомодульные волокна и некоторые текстильные формы из них (нити, жгуты, ленты), позволяющие конструировать структуры ($[0, \pm 45]$, $[0, \pm 45, 90, 0]$ и другие) композиционных материалов, обеспечивающих оптимальные свойства при различных видах нагружения.

ВПКМ — гетерофазные композиции, структура которых при использовании современного расчетного аппарата может быть оптимизирована по отношению к характеру внешних воздействий и сконструирована с требуемым уровнем анизотропии свойств. Материалы 2-го поколения — ВПКМ (1-е поколение — изотропные материалы), материалы многофункционального назначения, которые, в зависимости от свойств компонентов, могут сочетать конструкционные свойства с радиопрозрачностью, химстойкостью, радиационной стойкостью, экранирующей ионизирующее воздействие способностью, радиоэкранированием, радиопоглощением (использование 2-х последних типов для уменьшения радиолокационной заметности, УРЗ, объектов в технологии *Stealth*).

При оптимизации структур ВПКМ им придается определенный уровень «интеллектуальности», в частности, хотя и пассивной, но эффективной реакции материала на внешнее воздействия (диссипация энергии при разрыве волокон, вязкоупругое поведение и гашение колебаний при вибрациях, остановка роста трещин стопперами и т. д.). Интеллектуализация материалов (переход к материалам 3-го поколения) направлена на обеспечение стабильности свойств конструкционных ВПКМ за счет модификации их компонентами, использующими достижения микро- и нанотехнологий, переводящие ВПКМ в самодиагностирующиеся и адаптирующиеся к внешним воздействиям интеллектуальные ВПКМ (ИПКМ) за счет введения датчиков (конформные датчики, микросенсоры), исполнительных механизмов (актюаторы, материалы и процессы микромеханики), систем анализа, связи и управления (микрооптоэлектроника, микроэлектроника, микропроцессорная техника). Разработка ИМ и интеллектуальных систем (ИС) направлена на использование чувствительных и активных компонентов, обеспечивающих миниатюрность, многофункциональность, легкую встраиваемость в материал и конструкцию из него сенсоров, микропроцессоров, актюаторов, их соединений (без использования чувствительных к различным физическим воздействиям стандартных сенсоров, микропроцессоров, механических приводов). Компоненты ИПКМ разрабатывают с использованием достижений микроэлектроники, микромеханики, микросенсорики.

Микроэлектроника — область техники, которая изучает, разрабатывает и обеспечивает производство устройств (интегральные схемы, микропроцессоры и др.) в микроминиатюрном исполнении.

Микромеханика — область техники, которая изучает, разрабатывает и обеспечивает производство устройств (актюаторы, микродвигатели, микроклапана, микровентели и др.), преобразующих различные виды энергии (электрическую и др.) в механическую (и наоборот) в микроминиатюрном исполнении.

Микросенсорика — область техники, в том числе микроэлектронных устройств, преобразующих не электрические явления (процессы) в электрические.

ВПКМ, армированные пластики — основа конструкционных и специальных ИМ. При разработке самодиагностирующихся и адаптирующихся ИПКМ широко используют полимеры различных типов (электроизоляционные, токопроводящие, электроактивные, жидкокристаллические, гиперразветвленные, фоторезисторные, люминесцирующие и др.) в качестве материалов сенсоров, актюаторов, изделий оптоэлектроники, материалов, используемых в технологиях изготовления изделий микросенсорики, микромеханики, микроэлектроники.

Предельная миниатюризация компонентов ИМ достигается при переходе от микротехнологий к нанотехнологиям с использованием достижений наносенсорики, наномеханики, наноэлектроники. Наноэлектроника (молекулярная электроника), наномеханика, наносенсорика с широким привлечением нанотехнологий области техники, которые разрабатывают и обеспечивают производство различных компонентов ИМ в наноминиатюрном исполнении.

В качестве компонентов ИМ и ИС в зависимости от типа проявляемых эффектов используют чувствительные и активные элементы:

- 1) преобразующие энергию (материалы, проявляющие пьезоэффекты, электро- и магнетострикцию, электроактивные, люминисцирующие, оптическиактивные, с эффектом теплового расширения, сжатия, ионного обмена и др.);
- 2) запасающие и освобождающие энергию (сплавы и полимеры с «памятью» формы);
- 3) изменяющие коэффициенты проводимости энергии (оптические волокна, углеродные волокна, электро- и магнитореологические жидкости, полимерные гели, материалы, проводящие различные виды энергии).

В ноябре 1988 г. на совещании технологического комитета аэрокосмической и электронной промышленности агентства науки и техники Японии сообщено об исследованиях в области ИМ и создана международная группа по ИМ. В мае 1990 г. образован форум по ИМ (координация исследований и обмен информацией в области ИМ). В марте 1991 г. состоялся 1-й симпозиум по ИМ (20 докладов), в июле 1991 г. — 5-я Международная конференция по прогрессивным роботизированным системам (секция по ИМ) [4]. 23–25 июня 2004 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана состоялся Первый российский научно-технический симпозиум «Интеллектуальные композиционные материалы и конструкции в авиакосмической технике» (ИКМК-2004), на котором рассмотрены проблемы материаловедения (адаптирующиеся, активные, управляемые, сенсорные ИКМ), технологии изготовления, сборки и испытании конструкций из ИКМ, проектирования и расчета конструкций авиационной и ракетно-космической техники из ИКМ [10]. Разработки ИМ с использованием нанотехнологий представлены на 10-м Международном форуме «Высокие технологии XXI века» (Москва, апрель 2009 г.).

1.1. Принципы создания и типы ИПМ

Технологические и эксплуатационные особенности ПМ, эффективность и все более широкое использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) многофункционального назначения стимулировали разработку интеллектуальных полимерных (ИПМ) и полимерных композиционных материалов (ИПКМ).

Разработка ИПМ, ИПКМ — закономерный этап развития материаловедения, причем «интеллектуальность» материала трактуется как способность самодиагностирования своего состояния, способность к противодействию внешним факторам и адаптивному к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния.

ПМ, ПКМ, ИПКМ — типичные вязкоупругие материалы. Их конструкционные, демпфирующие свойства, параметры динамических вязкоупругих свойств определяются составом и структурой, типом армирования и эффективно направленно регулируются в гетерофазных системах ПКМ с резко различными временами релаксации фаз матрицы и наполнителя.

Основными типами ИПМ, ИПКМ являются самодиагностирующиеся ИМ (пассивные конструкции) и адаптирующиеся ИМ (активные конструкции с исполнительными устройствами — актюаторами). Совершенствование ИМ предполагает оптимизацию их свойств путем «обучения» для достижения наилучшей реакции на изменяющиеся условия (интеллектуальные конструкции, ИК). Разработка ИМ и ИК предполагает использование принципов, реализуемых в робототехнике, достижений молекулярной электроники, нанотехнологии, биотехнологии.

Самодиагностирующиеся ИМ осуществляют самоконтроль своего состояния по схеме: получение сигнала от конформного датчика о возникших в материале изменениях, идентификация сигнала, анализ сигнала, принятие решения человеком. Их основой является технология размещения конформных датчиков в структуре ПКМ, передача информации по волоконно-оптической системе для анализа в микропроцессор. В самодиагностирующихся ИМ конструкционного назначения осуществляется самоконтроль процесса возникновения усталостных трещин при помощи введенных в ИМ конформных компонентов и датчиков:

- 1) оптических волокон (их разрушение легко фиксируется);
- 2) датчиков сопротивления, диэлектрических датчиков (разрывы волокон наполнителя увеличивают сопротивление датчика);
- 3) пьезодатчиков, улавливающих акустические волны, появляющиеся в момент возникновения дефекта (акустическая эмиссия).

Для самодиагностики эффективно применение волоконных оптических волноводов, непосредственно встроенных в сформированную конструкцию из ПКМ. Волноводы позволяют получить информацию о возможных повреждениях и дефектах (трещинах) в конструкции, возникающих в процессе эксплуатации. Световые сигналы, передаваемые по волоконным волноводам, обрабатываются с помощью микропроцессоров. Информация воспроизводится на дисплее или с помощью речевого синтезатора.

Адаптирующиеся ИМ используют компоненты из материалов, способных изменять свойства (параметры деформации) или геометрию конструкции контролируемым образом. В конструкционных ИПКМ осуществляется анализ и управление их эксплуатационными характеристиками (регулирование конструкционной жесткости, демпфирующих свойств). Изменение свойств фиксируют по частотам собственных колебаний структуры. Оптимизация свойств достигается за счет введения исполнительных механизмов (актюаторов, *end effektor* – конечное действие), реагирующих на изменение собственных колебаний ПКМ и выводящих их на требуемый уровень (металлы и полимеры с памятью, магнито- и электрореологические жидкости и др.). Это дает возможность контролировать вибрацию, регулировать размеры элементов конструкции, осуществлять акустический контроль, регулировать термическое расширение (сжатие), предотвращать образование и распространение трещин. Оптические волокна в составе адаптирующихся ИМ являются элементами адаптивной системы, обеспечивающей не только контроль деформаций, разрушений, вибраций, но и их компенсирование соответствующим изменением характеристик ИПКМ.

Основными направлениями, связанными с разработкой ИМ и интеллектуальных конструкций (ИК), являются:

- 1) разработка сверхбыстродействующих интегральных схем и совершенствование элементов базы (переход от БИС к СБИС с уменьшением размеров элементов от 1–1,5 мкм до 0,17 мкм, использованием кремневых пластин, диаметром 150–200 мм; каждые 2 года плотность упаковки элементов на кремневом кристалле увеличивается вдвое, соответственно возрастает и мощность микропроцессоров (стоимость 1 кг СБИС аналогична стоимости 3 кг золота);
- 2) использование достижений фотоники, изучающей и позволяющей создать компоненты и средства приема, усиления, преобразования и индикации сигналов, несущих информацию в световом диапазоне;
- 3) совершенствование технологий, позволяющей встраивать требуемые элементы в объем ПКМ (конструкционного и специального назначения);
- 4) совершенствование и разработка новых типов ПКМ, термоустойчивых ПКМ на основе полиариленов и полигетероариленов (полиимидов) для конструкций с высоким тепловыделением (до 6 Вт/см²) при эксплуатации, например, радиопоглощающих ПКМ;
- 5) анализ и управление эксплуатационными характеристиками конструкционных и специальных ПКМ;
- 6) разработка молекулярных электронных и оптических материалов (полимерная молекулярная электроника, оптоэлектроника);
- 7) совершенствование микросенсорики, микромеханики, микропроцессорной техники; обеспечение микроминиатюризации датчиков, исполнительных механизмов, актюаторов, систем связи и управления, в том числе за счет использования полимеров;
- 8) использование нанотехнологии для предельной миниатюризации компонентов ИМ (наносенсорика, наномеханика, наноэлектроника и нанооптоэлектроника).

1.2. Материалы и технологии изготовления микрокомпонентов ИПМ

При разработке ИПМ широко используют полимеры и полимерные материалы в качестве связующих (матриц) конструкционных и специальных ИПКМ (полиэпоксидные и полиимидные реактопласты, термопластичные теплостойкие полиарилены-полифениленсульфиды, полисульфоны, полиэфирэфиркетоны и полигетероарилены-полиэфиримиды, полиамидимиды, термопластичные полиимиды и др.) в качестве материалов сенсоров, актуаторов (электроактивные полимеры), оптоэлектроники (полимерные оптические волокна), в качестве материалов, используемых в технологиях изготовления изделий микромеханики, микроэлектроники (например, фоторезисторные полимеры).

В качестве компонентов ИМ и в технологических процессах их получения используют полимеры с «необычными» свойствами:

- 1) полимеры, изменяющие цвет при нагреве;
- 2) полимеры, приобретающие электропроводность после воздействия УФ;
- 3) полимеры, изменяющие размеры и форму под воздействием видимого света и принимающие первоначальную форму в темноте;
- 4) полимеры, объем которых мгновенно уменьшается при погружении в кипящую воду;
- 5) электропроводящие и сверхэлектропроводящие полимеры (в виде тонких пленок и волокон) [14];
- 6) люминисцирующие, флуоресцирующие полимеры (активные среды твердотельных лазеров, сцинтилляторы) [13];
- 7) фоторефрактивные полимеры (с непрерывно изменяющимся показателем преломления);
- 8) вибродемпфирующие, вибропоглощающие полимеры и полимерные композиции;
- 9) фотоотверждаемые, фоточувствительные полимеры (их фотохимические превращения используют в полимерных фоторезисторах, при фотолитографической записи информации на дисках);
- 10) высокогигроскопичные полимерные гели, полиэлектролитные гели (хемомеханические системы);
- 11) электретные полимеры;
- 12) электроактивные [22], пьезоэлектрические полимеры (поливинилиденфторид; пористый ПТФЭ, жидкокристаллические эластомеры, например, на основе полидиметилсилоксановых каучуков, изменяющие объем при нагреве; полиамиды и др.). В кристаллических термопластах пьезоэлектрические свойства обусловлены плотностью диполей в кристаллах, у нечетных полиамидов диполи ориентированы перпендикулярно оси цепи в одном направлении. *Nylon-9*, *Nylon-11* обладают спонтанной поляризацией кристаллов псевдогексагональной γ -формы, получаемых при быстром охлаждении расплава (пьезомодуль d'_{31} ориентированной пленки *Nylon-9* 1,1 пКл/Н, константа e'_{31} 2,1 мКл/м²);
- 13) механохимические (преобразующие химическую энергию в механическую);
- 14) полимеры, изменяющие свой объем при пропускании электрического тока;
- 15) молекулы с регулярно расположенными короткими боковыми ответвлениями;
- 16) плоские (пленочные) полимеры (при 20 °С пленки складываются, образуя прозрачный кристалл, удваивающий частоту лазера; при облучении ИК переизлучают зеленый цвет);
- 17) звездчатые и гиперразветвленные (древовидные, дендримеры, арболы) полимеры (исходные блоки для биомолекул, калибровка отверстий в наномембранах, биомембранах, контролируемое выделение молекул — «шариков» из свободного объема, применение в молекулярной электронике);
- 18) фоторезисторные (изменяющие электрическое сопротивление под действием света);

- 19) полимеры с «памятью» (восстановление сдеформированным полимерным телом своей исходной конфигурации благодаря инверсии высокоэластической деформации при охлаждении ниже температуры стеклования). Среди полимеров эффектом памяти обладают некоторые полициклические стержневидные макромолекулы, например, полициклоктен, «запоминающий» форму, а после модификации фениленвиниленовым красителем обратимо меняющий цвет при изменении формы. Оранжевая спираль из модифицированного полициклоктена, сформированная из прутка при 75 °С с последующим охлаждением до 5 °С, после нагрева до 80 °С восстанавливает исходную стержнеобразную форму, принимая зеленую окраску. Изменение формы позволяет использовать полимеры на основе стержневидных макромолекул с высокой жесткостью в устройствах, аналогичных тем, в которых используются металлические сплавы с памятью формы (актюаторы и др.), а изменение окраски, связанные с обратимыми процессами агрегации и деагрегации молекул красителя — для слежения за многократными циклическими изменениями температуры [164];
- 20) жидкокристаллические полимеры (изменение свойств под действием внешних факторов — температуры, электрического и магнитного полей, см. раздел 1.3.1.3);
- 21) термочувствительные ВПКМ с анизотропными термоупругими свойствами [108, 109].

При разработке ИМ используют компоненты с памятью формы, пьезоэлектрические и магнитные сплавы, электроореологические жидкости, волоконную оптику с объединением элементов электроники, оптоэлектроники и силовых компонентов ПКМ. Разработки базируются на технологиях полупроводниковых приборов на основе арсенида галлия As_3Ga_5 (мышьяк и галлий — р-элементы, у которых заполняются р-оболочки, транзисторы обеспечивают 113 млрд переключений в секунду), в радиопоглощающих ИПКМ — конформных фазированных антенных решеток [1, 7–9, 12].

За счет введения в ПКМ датчиков (сенсоров, использование разработок микросенсорик), исполнительных компонентов и механизмов (актюаторов, использование разработок микромеханики), систем связи, обработки информации и управления (оптические волокна, микропроцессоры, использование разработок оптоэлектроники, микроэлектроники) в ИПКМ реализуются возможности самодиагностики и адаптирования. В качестве датчиков, исполнительных механизмов и систем управления в ИМ используют различные материалы и процессы.

1.2.1. Материалы и технологии микросенсорики

Датчики (сенсоры) на основе различных материалов и процессов уже длительное время используются в различных областях техники. Сенсоры — устройства, преобразующие неэлектрические сигналы в электрические. Применительно к ИМ разработаны миниатюрные сенсорные устройства (микросенсорика), внедряемые в объем материала и конструкции [15,16].

ИМ потребовали изменения методов контроля дефектности материалов и перехода от традиционных методов неразрушающего контроля (сканирование ультразвуком, томография, акустические, рентгеноструктурные и другие) к методам контроля, системе самодиагностики с использованием микродатчиков (сенсоров), встроенных в структуру материала (конформных, капсулированных), к методам детектирования (контроль и идентификация сигналов, исходящих из самого материала, например, по электромагнитной эмиссии, возникающей при механических воздействиях).

Простые датчики контактного типа работают на разрыв электрической (оптической) цепи или замыкания двух отдельных электро- и оптолиний.

Микроэлектрические датчики позволяют определить степень влияния среды, температуры, излучений на полимерный материал, оценивая изменение его электрических характеристик (γ , ρ_v , ϵ , $\text{tg } \delta$), проводимости γ — по движению заряженных частиц при постоянном токе, эффекты поляризации — при переменном токе [137].

Система датчиков позволяет регистрировать внешнее воздействие, определить его местоположение методом трансгуляции или по временной разнице между возбуждениями различных датчиков. Частота и амплитуда возбуждающих волн давлений сравниваются с типовыми значениями, информация о которых заложена в памяти микропроцессора (все типы датчиков объединяются с микропроцессорами обработки сигналов). Полученная информация о местоположении повреждения, характере воздействия и степени опасности повреждения выводится на дисплей или сообщается речевым синтезатором.

Для локации дефектов используют системы датчиков в объеме материала. Активные датчики излучают и принимают сигналы, пассивные — регистрируют и анализируют изменения без использования излучений.

Емкостные системы датчиков фиксируют изменения величины и фазы переменного тока, индукционные датчики фиксируют изменение индуктивности при внесении в контролируемый объем ферромагнитных и электропроводящих компонентов (при изменении магнитных и электрических свойств). Используются электрические схемы, чувствительные к изменению емкости, магнитных свойств, в которых дифференциальные измерители на микропроцессорах формируют зондирующие сигналы и обрабатывают поступающую информацию.

Активные индукционные системы (обычно из 2-х протяженных электрических контуров) создают зондирующее электромагнитное поле, пассивные — генерируют сигнал благодаря вибрации токопроводов в магнитном поле. Широко используются индукционные датчики в виде колебательных контуров (разрушение электрической цепи колебательного контура проходит при воздействии сильного переменного магнитного поля), настроенных на определенный радиочастотный, электромагнитный, акустикомагнитный параметр (например, рабочую частоту системы).

Датчики (сенсоры), получающие и обрабатывающие сигналы, возникающие при механическом воздействии на материал, используют процессы акустической, электронной, молекулярной, электромагнитной эмиссии.

Электромагнитная эмиссия (ЭМЭ) — явление генерации электромагнитных или электрических полей при механическом воздействии на неметаллические материалы. Импульсы электромагнитного поля регистрируются при зарождении и развитии трещин, разрыве волокон, расслоении материала. Характеристики ЭМЭ позволяют прогнозировать с высокой точностью прочность ПКМ, предельные нагрузки, остаточный ресурс работы изделий, эксплуатируемых в условиях статического, динамического, вибрационного нагружения. При действии на материал динамических нагрузок (удар, импульсное акустическое или тепловое воздействие) эмиссия возникает как в точке воздействия, так и в направлении распространения акустических волн, и несет информацию о внутреннем строении материала. Методы ЭМЭ, молекулярной и электронной эмиссии требуют аппаратуры высокой чувствительности со сложной расшивкой сигналов.

Поведение материалов в электрических полях определяется сложной связью между деформационными, тепловыми свойствами и индукцией (мерой смещения зарядов). При этом возможно возникновение пьезоэффекта (механическая деформация ↔ электрическая индукция) и пирозффекта (тепловое расширение ↔ электрическая индукция).

Активные (формирующие электрические и звуковые поля) СВЧ- и ультразвуковые датчики регистрируют изменения электромагнитного и звукового поля (принцип локации), фиксируют изменение величины, частоты, амплитуды отраженного сигнала. ИК-излучатели и пироприемники, использующие линзы Френеля, формирующих многолучевую зону чувствительности, регистрируют изменения теплового поля.

На вибрации и разрушающий импульс реагируют пьезокерамические, электромагнитные, магнитометрические, инерционно-механические, трибоэлектрические (эффект контактной электролокации) вибродатчики.

Пьезоэлектрические датчики (сенсоры) — измерительные преобразователи, действие которых основано на пьезоэлектрическом эффекте, служат для преобразования механического

усилия в электрический сигнал. Простейший пьезоэлектрический датчик — пластина пьезоэлектрика, зажатая между токопроводящими поверхностями, к которым прикладываются измеряемые усилия (ЭДС, возникающая между токопроводящими слоями, обкладками пьезопластины, пропорциональна усилию).

Наибольшее применение нашла сегнетоэлектрическая керамика (пьезокерамика) благодаря большому пьезоэлектрическому эффекту, высокой точке Кюри, стабильности свойств в широком диапазоне температур, механической прочности, относительно простой технологии изготовления с возможностью получения пьезоэлементов требуемой конфигурации.

Сегнетоэлектрические материалы — твердые растворы оксидов со структурой перовскита, получаемые методом твердофазных реакций исходных компонентов при нагреве (спекание), соосаждения, зольгельным методом, методом сушки при распылении растворов компонентов, вибрационным перемешиванием капсулированных порошков (при 600–900 °С).

При производстве пьезокерамики применяют более 10 сегнетокерамических материалов, из которых изготавливают сотни типоразмеров пьезоэлементов с использованием более 15 конструкций поляризационного оборудования (установки камерного типа УПЖ-150, ПЖ-3, ПСВ-1; конвейерного типа УПЖ-100, ППВ, АПВ-3, Вольт-1,2 с применением микропроцессорной техники и компьютерных программ). Поляризация определяет пьезоэлектрические параметры и проводится с применением жидких диэлектриков (кремний-органические жидкости) и в воздушной среде (например, нагрев до 270 ± 20 °С, подключение к высоковольтному источнику постоянного тока, обеспечивающему напряженность электрического поля на заготовке 10 000–12 000 В/см, охлаждение под напряжением, отключение напряжения).

Пьезоэлектрический эффект в сегнетокерамике появляется после ее поляризации сильным постоянным полем. По окончании его воздействия сохраняется остаточная поляризация, так как произошли процессы доменной переориентации. При этом сегнетокерамика становится одноосной пьезоэлектрической текстурой.

Все сегнетоэлектрики — сильные пьезоэлектрики и используются как пьезоэлектрические материалы.

Электрические заряды (пьезоэлектричество) возникают при деформации кристалла (прямой пьезоэлектрический эффект), деформация кристалла происходит под действием электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект). Разработана серия пьезоэлектрических материалов, предназначенных для использования в преобразователях различного назначения (датчиках вибрации, давления, акселерометрах и др.). При конструировании датчиков используют монокерамические модули, совмещающие в едином блоке активную зону (в том числе виброкомпенсирующие системы), изоляторы, электроды, токосъемники [17, 18].

Большое распространение получила пьезокерамика (см. приложение 1) на основе цирконата и титаната свинца ЦТС или $PZT \text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$, обладающая высокой электромеханической активностью. Для твердых растворов $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ характерно существование морфотропной фазовой границы у состава, содержащего 53 %мол. PbZrO_3 . Это почти вертикальная граница на фазовой диаграмме, отделяющая область тетрагональной сегнетоэлектрической фазы от области ромбоэдрической сегнетоэлектрической фазы. В материале без модификаторов вблизи морфотропной границы максимальны значения пьезомодулей, а коэффициент электромеханической связи равен 0,6. Эти величины увеличиваются при введении модификаторов Bi^{3+} , La^{3+} , Nb^{5+} , W^{6+} . Распространенным составом ЦТС является пьезокерамика ЦТС-19 $\text{Pb}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}(\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47})\text{O}_3 + \text{Nb}_2\text{O}_5$, имеющая следующие свойства: 1) пьезомодули $d_{33} = (4-5) \cdot 10^{-10}$ м/В, $d_{31} = (1,5-2,5) \cdot 10^{-10}$ м/В; 2) коэффициент электромеханической связи $k_{33} = 0,6-0,7$; 3) модуль Юнга $E = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м²; 4) плотность $\rho = 7,3 \cdot 10^3$ кг/м³; 5) диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1,760-1,800$; 6) механическая добротность $Q = 70$; 7) коэффициент Пуассона $\nu = 0,27$; 8) температура Кюри $T_K = 305$ °С.

В пьезометрическом датчике (ПКД) вибрации приложенная сила равна произведению массы инерционного элемента на ускорение, действующее в точке установки датчика. Пропорциональность заряда и ускорения сохраняется в широком динамическом диапазоне (до 100 дБ и более).

В зависимости от конструкции ПКД используют пьезопластины, работающие на растяжение–сжатие (компрессионные), изгиб, сдвиг. В датчиках (акселерометрах с массой 5–40 г), измеряющих вибрации высокой интенсивности, используются компрессионные пьезоэлементы (высокочастотные датчики АВС), в высокочувствительных датчиках — изгибные преобразователи (низкочастотные датчики АНС). Для повышения помехоустойчивости виброизмерительного канала разработаны миниатюрные преобразователи сигналов П120 на диапазон частот 1–16 000 Гц. Акселерометры АВС имеют диапазоны измерений при вибрации 600–2000 г, при ударе 1500–100 000 г [17].

Несмотря на внешнюю простоту и миниатюрность, датчик — сложное приборное устройство, чувствительный элемент (ЧЭ) которого должен работать в жесточайших эксплуатационных условиях: широкие диапазоны температур (-253 ± 1000 °С), давлений ($\sim 0,001\pm 300$ Па), уровней вибрации ($10^{-5}\div 10^5$ г в диапазоне частот от единиц герц до сотен килогерц), акустических шумов ($1\div 10^9$ Па), линейных ускорений (от единиц до десятков тысяч г); воздействие механических и гидравлических ударов, агрессивных и криогенных сред.

ЧЭ датчика должен иметь механическую прочность выше механической прочности конструкции изделия, на котором он установлен, поскольку для выявления предельных нагрузок в аномальной ситуации датчик должен «жить дольше», чем конструкция, иметь минимальные массу и токопотребление.

Параметры, измеряемые с помощью ПКД: быстропеременные акустические давления, ускорения, усилия, вибрации, ударные нагрузки, расходы и др.

При создании ПКД определяющим конструктивным элементом является пьезоэлемент или пьезомодуль, который в процессе изменения физических параметров, будучи основным преобразующим элементом, определяет надежность и точность датчика. Из пьезокерамических материалов разработаны монокерамические многослойные пьезопреобразователи изгибного и компрессионного типа, обладающие объемной чувствительностью (малое значение пьезоконстанты d_{31} , объемный пьезомодуль $d_v = d_{33}$, основной параметр пьезоэлемента — чувствительность) [19].

Кварцевые резонаторы используют пьезоэффект и изготавливаются по полупроводниковой технологии, интегрируются в состав электронных микросхем. Разработаны микровибраторы, в которых электростатические силы вместе с емкостными датчиками обеспечивают устойчивую автогенерацию электрических колебаний, а механическая консольная конструкция вибратора стабилизирует генерируемые частоты. Подобные тактовые генераторы подключаются к микропроцессорам на монтажной плате (внешние элементы) или интегрируются внутрь. Возбуждение колебаний происходит не за счет пьезоэффекта, а благодаря электростатическому притяжению с долговременной стабилизацией частоты [20].

Совершенствование средств пьезоэлектрического приборостроения привело к разработке тонкопленочных чувствительных элементов на основе гетероэпитаксиальных или почти аморфных пленок с использованием электрооптического и акустико-оптического эффектов. Сегнетоэлектрические с пьезоэлектрическими свойствами пленки способны работать в области СВЧ (высокая диэлектрическая проницаемость упрощает согласования с СВЧ-трактами) и перспективны для ячеек памяти высокого быстродействия.

Сегнетоэлектрические пленки получают зольгельвым методом и методом ВЧ катодного распыления. Они имеют широкий диапазон применений: фазовращатели и усилители СВЧ, интегральные пироэлектрические сенсоры, модуляторы света в оптоволоконных системах, приемники электромагнитного излучения.

Для сегнетоэлектрических пленок (толщина 2–5 мкм) характерна малая инерционность пироэлектрического эффекта (наносекундный диапазон).

Пленочные сенсоры динамической деформации эффективнее тензорезистивных датчиков в условиях циклического нагружения (высокая чувствительность до $40\cdot 10^6$ циклов [21]). Датчики на основе электроактивных полимеров (диэлектрических эластомеров, см. далее) генерируют электрический сигнал в ответ на изгиб или растяжение [22].

Датчики механических свойств, использующие пьезоэффект — устройства из оксидных материалов с пьезоэлектрическим наполнителем — цирконатом титаната свинца. Акустические датчики с высокой чувствительностью в диапазоне 1–10 МГц — устройства из наполненных титанатом свинца полиэпоксидов и резин (система акустической пеленгации на подводных лодках) [23, 24].

Датчики, использующие принцип акустической эмиссии, изготавливают из полимеров (например, из поливинилиденфторида), в которых при изменении внешней нагрузки генерируются электрические заряды (см. раздел 1.3.1.2).

Пьезоэлектрический датчик (ПЭД) механических напряжений обладает избирательностью на определенную компоненту механического напряжения (например, нормальную компоненту вдоль оси Z). Избирательность ПЭД достигается за счет того, что направление вектора электрического поля, возбуждающего пьезоэлемент, совпадает с направлением изменяемой компоненты механического напряжения. Нижний пьезоэлемент возбуждается электрическим способом и вынуждает колебаться верхний, который возбуждается измеряемой компонентой механического напряжения.

Ультразвуковые пьезопреобразователи, чувствительные элементы которых изготовлены в виде монолитных блоков в сочетании с демпферами с переменными акустическими характеристиками, используются в качестве сенсоров, информирующих о состоянии, сплошности, расслоениях, трещинах, пористости, расположениях дефектов в объеме конструктивных ПКМ.

Для контроля напряженного состояния используют ультразвуковые методы и применяют тензорезисторы. На рис. 1.1 приведена схема датчика с основным и вспомогательными пьезоэлементами, обеспечивающего прямое измерение механических напряжений внутри конструкции из ПМ, ПКМ.

Цилиндрический датчик контролируемо нарушает сплошность материала, изменяя значение упругопрочностных свойств. Датчик содержит основной, вспомогательный и дополнительный пьезоэлементы. За счет измерения деформации основного и дополнительного пьезоэлементов (обратный пьезоэффект), измерения относительных изменений ширины и длины пьезоэлементов, фиксируется изменение упругопрочностных свойств [26].

Ультразвуковые преобразователи (фирма *Imasonic*, Франция) на частотах 0,3–12 МГц с хорошим электроакустическим сочетанием между элементами обеспечивают высокий уровень дисплейных изображений.

Датчики давления на основе магнитострикционных материалов (магнитострикция — изменение размеров и формы кристаллического тела при намагничивании из-за изменения расстояний между узлами решетки в ферро- и ферромагнетиках) — измерительные преобразователи, действие которых основано на магнитострикционном эффекте, переходе электромагнитной энергии в механическую, и эффекте Виллари, обратном магнитострикции, изменении намагниченности материала при его деформации. Магнитострикция используется при разработке датчиков (и микродвигателей) из пьезомагнитных (изменение длины стержня под влиянием

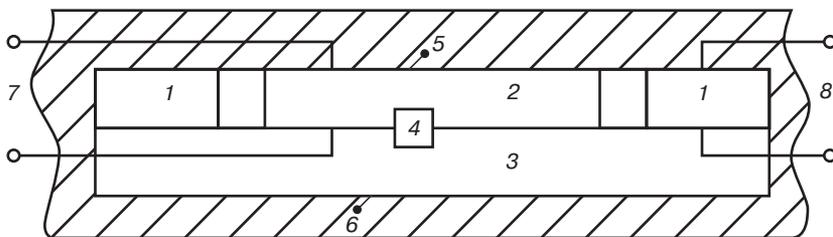


Рис. 1.1. Схема тензорезисторного датчика для прямого измерения механических напряжений внутри сплошных сред из ПМ, ПКМ [26]:

1 — вспомогательный элемент; 2 — основной пьезоэлемент; 3 — дополнительный пьезоэлемент; 4 — тензодатчик; 5, 6 — клеммы к источнику постоянного напряжения; 7, 8 — электрические выводы

внешнего магнитного поля) и пьезоэлектрических (обратный пьезоэффект) материалов. Пьезомагнетизм (намагничиваемость антиферромагнетиков CoF_2 , MnF_2 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) обусловлен упругой деформацией кристаллических решеток.

Кремневые сенсоры давления обычно состоят из 4-х резисторов и чувствительны только к одностороннему сжатию или расширению, диапазон измеряемых давлений (до 200 МПа, собственная частота ≤ 250 кГц) зависит от толщины диафрагмы.

Первичные преобразователи давления (резисторы) толщиной 15–30 мкм с размерами датчиков от $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ мм до $3,5 \times 1,0 \times 0,3$ мм на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (твердые растворы GaAs и AlAs) на подложке из GaAs (резисторы формируют методом фотолитографии) предназначены для измерения давления при непосредственном размещении в измеряемой среде. Так как сопротивление датчика является функцией температуры, сопротивление линейно увеличивается под воздействием всестороннего сжатия. Датчики на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ используют для измерения больших быстроизменяющихся гидростатических давлений в условиях всестороннего сжатия [27, 28].

Акустические датчики с высокой чувствительностью в диапазоне 1–10 МГц созданы с использованием цирконат-титана свинца (получение УЗ-изображений).

Электропьезокерамические полимерные материалы получают наполнением эпоксидных полимеров, полиуретанов, термопластов, резин (для покрытий подводных лодок) керамическими порошками и волокнами [24]. В керамических пьезоматериалах напряжения и деформации приводят к появлению электрического заряда. Он же преобразует электрическое поле в механическое напряжение, возбуждая ультразвуковую волну. Аналогичными свойствами обладают пьезополимеры (см. раздел 1.3.1.2) и полимерные материалы, наполненные пьезокомпонентами.

Пьезоэлектрические полимеры (ПВДФ) наносят на поверхность наполнителей (волокон) ВПКМ для измерения величины электрического поля.

При деформации пьезоволокон, волокон с покрытием из пьезополимеров, углеродных волокон изменяется их электросопротивление, что используется для контроля уровня деформации (например в углепластиках), степени повреждения материалов [150].

Пьезоэлектрические устройства в виде гибких пьезоэлектрических сенсорных полимерных пленок позволяют проводить измерения сразу во множестве точек, имеют микроканалы связи, дают интегральную информацию о состоянии материала конструкции, о давлении во многих точках поверхности изделия.

В качестве ударных датчиков, сенсорных переключателей (а также в электроакустических — электретные микрофоны, сурдотелефоны, гидрофоны и электромеханических — электретные звукосниматели и др. преобразователей, электретных воздушных фильтрах; в медицине в качестве антитромбогенных имплантантов, в машиностроении — в узлах трения, уплотнениях, системах защиты от коррозии) применяются полимерные электреты-диэлектрики, создающие в окружающем пространстве сильное электрическое поле. В производстве полимерных электретов наиболее часто используется метод коронного заряда, в основе которого лежит перенос носителей заряда из области электрического разряда в воздушном (газовом) зазоре на поверхность диэлектрика. При этом ионы либо передают свой заряд диэлектрику и возвращаются обратно в газовую среду, либо проникают в поверхностный слой диэлектрика, где фиксируются энергетическими ловушками (ловушками могут служить ионы примесей, граница раздела фаз, свободный объем полимеров, специфические поверхностные дефекты, вызванные процессами окисления, адсорбированные вещества, различия в ближнем порядке расположения молекул на поверхности и в объеме) [29].

Датчиками для оценки степени вибрации являются магнитоэластичные аморфные материалы с высоким (до 95%) коэффициентом прямого и обратного преобразования электрической энергии в механическую (см. далее, эффективны и как актюаторы), например, на основе полимерных магнитов. Полимерные магнитные материалы — композиции на основе полимерных связующих (термореактивных эпоксидных, фенолоальдегидных, ненасыщенных олигоэфирных; термопластичных — пластифицированный ПВХ, ПЭ, сульфохлорированный

ПЭ, полиамиды, полистиролы, сополимеры типа сэвилен; эластичных — резиновые смеси с каучуками различных типов, в том числе олигомерных «жидких», термоэластопласты) и магнитных порошков (ферриты, порошки сплавов с редкоземельными элементами самарий–кобальт, самарий–железо) (табл. 1.1).

Постоянные магниты на полимерной основе с наполнителями в виде дисперсных магнитных частиц (*Polymer Bonded Magnets*, PBM) используют в производстве датчиков и исполнительных устройств, электронных систем управления, приводных механизмов и электродвигателей. Преимуществом использования PBM в качестве генераторов сигналов в датчиках является возможность придания разнообразных магнитных функций компактному устройству путем создания различных магнитных направляющих полей при формировании в литьевой форме (фирма *Oechsler AG*, Германия). PBM позволяют создавать в малых объемах различные «магнитные узоры» — ориентированные с высокой точностью магнитные поля, используемые в качестве источников сигналов в системах управления тахометрами и счетчиками в приборах, электродвигателях, тормозных системах. PBM легко встраиваются в различные устройства, соединяются с различными компонентами сложных узлов (зубчатыми колесами, валами, фиксаторами), имеют высокую прочность и стабильность размеров, коррозионную стойкость [151].

Магнетизм полимерных магнитов (без магнитных компонентов в качестве наполнителей) слабее, чем у обычных магнитов, но такие магниты разработаны и проявляют магнетизм уже не только при сверхнизких температурах, но и при 20 °С [30].

Принцип работы датчиков с магнитными элементами основан на изменении магнитных свойств под воздействием возникающих в системе механических напряжений. Наиболее эффективны композиции с частицами анизотропической формы (игольчатой, пластинчатой) — анизотропные магнитоласты, уровень магнитных свойств которых в 3–3,5 раза выше, чем у изотропных, и на основе самарий–кобальтовых сплавов, обеспечивающих высокие магнитные характеристики [31].

Датчиками слабых магнитных полей могут служить магнитооптические пленки. Когда пленка с лабиринтной доменной структурой оказывается во внешнем магнитном поле, в ней увеличивается объем доменов с намагниченностью, параллельной этому полю. В результате благодаря эффекту Фарадея возникает вращение плоскости поляризации светового луча, проходящего вдоль пленки, что и регистрируется электрической схемой прибора. Такие датчики способны регистрировать поля, которые в миллион раз слабее магнитного поля Земли. Их можно использовать и для бесконтактного измерения токов.

Использование магнитооптических пленок в дефектоскопии позволяет обнаруживать тонкие скрытые дефекты, микротрещины, образующиеся в нагруженных деталях. Пленки делают

Таблица 1.1. Магнитные характеристики полимерных магнитов [31].

| Вид магнита ¹ , способ формования | Магнитная компонента ² | Магнитные характеристики | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| | | Коэрцитивная сила, Э | Остаточная индукция, Гс | Энергетическое про- изведение, МГсЭ |
| Жесткие магниты; литье, литье под давлением, экстру- зия, прессование | Феррит Ba, | 2700–5000 | 2100–2800 | 1,4–2,0 |
| | Sm ³ | 16000 | 6100 | 8,5 |
| | CoNdFeB | 4300–16000 | 4900–7000 | 4,8–10,3 |
| Эластичные магни- ты; каландрование, экструзия | Феррит Ba, | 2100–3600 | 2100–2700 | 1–1,8 |
| | NdFeB | 10000 | 5300 | 6 |

¹ Магнитные профили с сечением сложной конфигурации, формы, с отверстиями, листовые магниты; ² Для постоянных полимерных магнитов, для магнитомягких магнитоластов используют карбонильное железо, никель–цинковые и другие ферриты; ³ Sm — лантаноид самарий, элемент № 62, атомный вес 150,4.

видимыми малейшие изменения магнитного поля из-за искажения его в зоне дефекта магнитного материала. На основе магнитооптических пленок создаются запоминающие устройства большой емкости для ЭВМ, диски для аудио- и видеозаписи, информация на которых можно многократно обновлять, считывающие головки, дефектоскопы, устройства для управления световым лучом (модуляторы, коммутаторы, транспаранты).

Общая концепция оптико-волоконных датчиков (волоконно-оптические распределенные сенсорные системы) для диагностики ИПКМ заимствована из техники связи. Использование оптоволоконных датчиков позволяет объединить датчики со структурой ВПКМ, обеспечить контроль параметров по всему объему изделия, провести множественные измерения при помощи одного оптического волокна без использования других систем датчиков и средств транспортировки сигналов.

В качестве датчиков используют периодические дифракционные решетки (Брэгговские дифракционные сенсоры с длиной до 10 000 длин световой волны) со штрихами на поверхности оптических волокон вдоль их оси, что приводит к интерференционным явлениям, обусловленным отражением света от штрихов (изменение положения интерференционных максимумов, периода решетки, зависящих от температуры, деформации; изменение длины отражений волны при динамических деформациях) [150].

Если по длине волокна нанесено несколько решеток с различными расстояниями между штрихами, то получают информацию о деформации в нескольких участках материала (в волокно вводят широкий спектр ЭМЭ, регистрируют отраженную ЭМЭ; каждой точке соответствует определенная длина волны). Для анализа деформаций в объеме материала используют системы волокон с переключением оптоволоконной системы «опроса» на разные оптоволоконка. Информация, основанная на интерференции, позволяет определить (метод романовского рассеяния) и распределение температур в объеме материала.

Изменения в окружающем оптическое волокно (рис. 1.9) материале приводят к изменению характеристик передачи или отражения оптического сигнала. При использовании одномодовых волноводов регистрируется амплитуда и фаза сигнала (функции длины волны), в многомодовых — фиксируется пространственное распределение этих параметров (места дефектов, трещин).

Измерение напряжений в ПКМ проводят по анализу интерференционных картин при взаимодействии мод оптического волокна, по анализу вида выходного сигнала (поляризметрические датчики, линейная зависимость от величин напряжения), что позволяет обнаружить микротрещины.

Метод рефлектометрии с применением оптических временных интервалов (интенсивность отраженного сигнала — функция времени задержки сигнала при его возвращении ко входному концу волокна, линейно связана при данной скорости светового сигнала с расстоянием между вводом сигнала и точкой его отражения) эффективен для точного определения местоположения дефекта [32, 33].

Для фиксации микровибраций используют датчики микроперемещений — световолоконные преобразователи перемещений, СВПП (рис. 1.2).

Датчик СВПП для регистрации относительных виброперемещений состоит из электронной схемы и 2-х световодов. Свет от инфракрасного ($\lambda = 1070$ нм) светодиода Д1 передается на отражающую поверхность световодом и отразившись от нее поступает на фотодиод Д2, работающий в режиме фотосопротивления.

Изменение (колебание) зазора между поверхностью и концом световода вызывает изменение (колебание) интенсивности светового пучка отраженного света, поступающего на фотодиод, что приводит к формированию сигнала, пропорционального виброперемещению относительно фиксированного положения датчика [33].

Датчики на основе фоточувствительных полупроводниковых элементов (РМД, *Photonic Mixer Devices*) обрабатывают сигналы, отраженные от множества точек, формируют трехмерные изображения на основе получения температурных данных по их ИК-излучению.

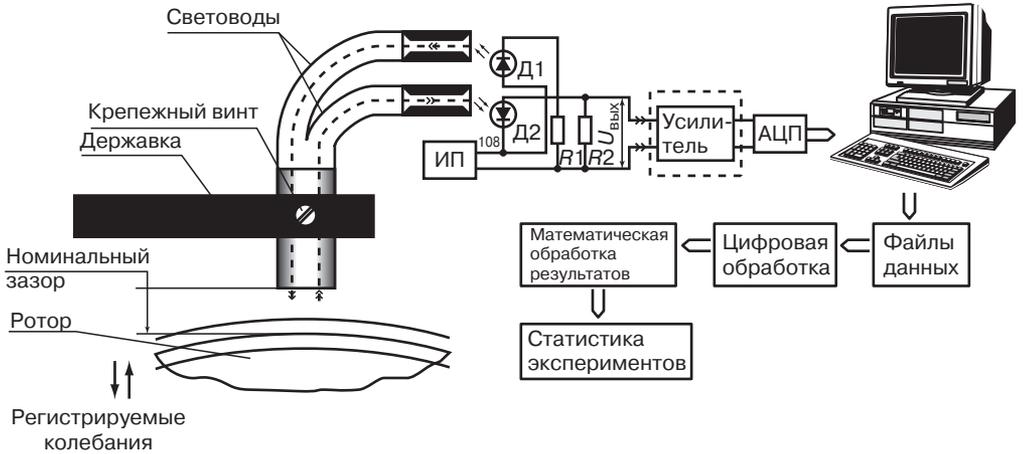


Рис. 1.2. Виброизмерительная оптоэлектронная система [33]

В качестве чувствительных и активных материалов для датчиков температуры могут быть использованы термочувствительные волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ), состав, структура, схема армирования которых влияет на величину удельных сил, генерируемых при изменении температуры.

Термочувствительными ВПКМ со стабильными и обратимыми деформационно-силовыми характеристиками при $T < T_c$ являются ортотропные неуровновешенные пластины, ВПКМ с цилиндрической (криволинейной) анизотропией термоупругих свойств, ВПКМ с наполнителями в виде крученых нитей, жгутов. Устройства из ВПКМ таких структур проявляют при изменении температуры перемещения и силы, достаточные для термочувствительных элементов, выполняющих функции сенсоров и актюаторов, за счет преобразования тепловой энергии в механическую работу.

Причиной термочувствительности ВПКМ является анизотропия их термоупругих свойств. Причиной термического деформирования ВПКМ является полимерная матрица с КЛТР, равным $(40-80) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, а структура композиции и конфигурации элементов, изготовленных из ВПКМ, определяют форму преобразования термического деформирования.

В качестве сенсоров (и актюаторов) ИМ и ИС можно использовать двухслойные ортотропные плоские неуровновешенной структуры пластины, незамкнутые кольца, пружины прямоугольного сечения, армированные в окружном направлении, стержни и пластины, армированные кручеными жгутами (рис. 1.3).

Концевые перемещения при изгибе и кручении элементов из ВПКМ соизмеримы с их габаритами (до 100 мм), а генерируемые ими силы могут достигать 10 Н. Максимальные деформации термочувствительных элементов из ВПКМ проявляются при содержании 50–60 % об. матрицы, максимальные силы — при 40–50%. Максимальную термочувствительность имеют элементы из поливолоконистых ВПКМ (органоглепластики, органостеклопластики) [108,109].

Своими достижениями сенсорная техника обязана быстродействующим электронным схемам, новым методам обработки сигналов. Разрабатываются структуры датчиков, обеспечивающие их самоконтроль и самокалибровку. Новые подходы к улучшению свойств датчиков представляет цифровая обработка сигналов, разработка многосенсорных систем. Для точного определения значений измеряемых величин и принятия решений эффективны сложные алгоритмы обработки сигналов. Растет количество сенсорных систем и разнообразных их применений.

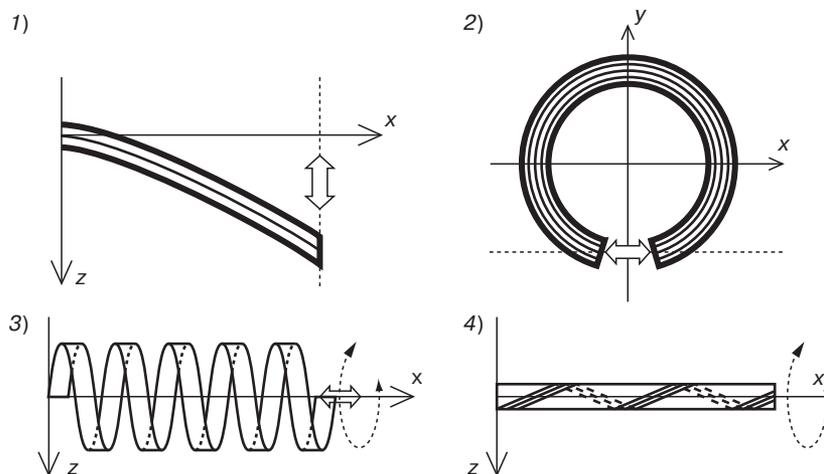


Рис. 1.3. Типы термочувствительных элементов из ВПКМ [108, 109]:

1 — двухслойная (биморфная) пластина; 2 — незамкнутое кольцо; 3 — пружина прямоугольного сечения; 4 — стержень, пластина (армированы кручеными жгутами, 2 и 3 — армированы в окружном направлении)

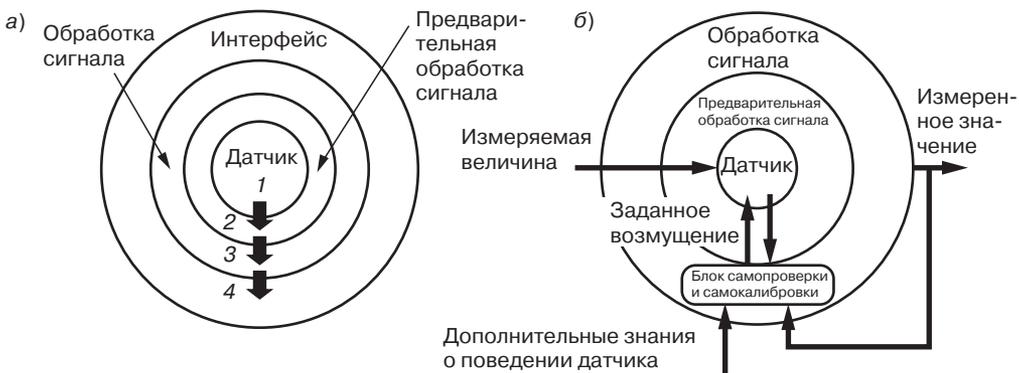


Рис. 1.4. Структура типового датчика (а) и датчика с самопроверкой или самокалибровкой (б) [16]:

1 — измеряемая величина; 2 — аналоговый сигнал; 3 — цифровой сигнал; 4 — сигнал, совместимый с шиной

Датчики и сенсорные системы эффективны благодаря тесному взаимодействию структуры датчика, технологии производства и алгоритмов обработки сигналов. Ядром сенсорной системы является чувствительный элемент (сенсор), выходной сигнал которого изменяется в зависимости от измеряемой величины. В блоке предварительной обработки выходной сигнал сенсора преобразуется с помощью методов аналогового преобразования сигналов. Важным компонентом сенсорной системы является интерфейс связи с системами более высокого уровня. Сенсорные системы с самоконтролем и самокалибровкой повышают надежность и снижают затраты на установку и обслуживание (рис. 1.4).

Тенденция к встроенным функциям самоконтроля и самокалибровки ведет к созданию сенсорных систем, не требующих проверки. Многие достижения в области датчиков стали возможными благодаря микротехнологиям с использованием влажного или сухого травления.

Системы, состоящие из одного датчика, могут давать лишь ограниченную информацию. При использовании системы сенсоров в ИМ возникает проблема обработки огромного количества данных. Для фиксации параметров конструкции небольшого самолета в течение одной секунды необходим объем памяти нескольких *CD*. Это требует введения ограничений как типов и количества датчиков (системы реагирования), так и в выборе контролируемых параметров для обеспечения адекватной оценки состояния материала и конструкции. От системы сенсоров необходимо получать сигналы (прежде всего электрические) и передавать их в систему анализа данных без изменения параметров сигнала при передаче его через поверхность раздела. В многосенсорных системах создаются синергические эффекты, повышающие количество и доступность информации о состоянии измеряемого объекта. Основными направлениями развития сенсорной техники являются миниатюризация, применение беспроводных и многосенсорных систем.

Миниатюризация (уменьшение характеристических размеров до 1 мкм^3 , *mote*-системы, *mote*, англ. — пылинка) приводит к уменьшению времени отклика, более высоким резонансным частотам, благодаря чему удается достичь более высокого быстродействия при генерировании и обработке сигнала, самоорганизации в сети (накопление информации, анализ, обработка, сброс на головной сервер). Тенденция развития миниатюризации переходит в область нанотехнологий.

Достоинство многосенсорных систем — достижение высокого уровня точности и надежности (слияние данных, поступающих от многих сенсоров, осуществляют животные и человек для точной оценки окружающей обстановки, увеличивая свои шансы на выживание). Тенденция развития многосенсорных систем (например, построение сенсорных сетей с разработкой операционных систем, программных приложений, сетевых технологий компании *Intel*) направлена на развитие модульных систем, позволяющих добавлять новые блоки и обновлять старые без нарушения функций всей системы.

При наличии большого числа компонентов их соединении электрическими проводами создает значительные трудности. Беспроводные системы датчиков размещаются без пространственных ограничений, измеряемый параметр может регистрироваться вблизи источника. Беспроводные датчики могут взаимодействовать с помощью ультразвуковых или инфракрасных сигналов. В воспринимающих элементах (транспондерах) — устройствах на поверхностных акустических волнах (ПАВ-устройства), радиочастотный импульс, передаваемый трансивером, принимается антенной ПАВ и передается на приемник трансивера. Амплитуда, частота, фаза и время отклика несут информацию о поверхностном акустическом отражении, которая относится к измеряемому явлению (температура, давление и т. д.). Для энергетически автономных беспроводных датчиков не требуется токопроводов даже для электропитания [16].

1.2.2. Материалы и технологии волоконной оптики

В ИМ волоконная оптика используется не только в качестве оптико-волоконных датчиков, но, главным образом, для обеспечения связи и передачи информации от датчиков различных типов, команд от микропроцессоров к исполнительным механизмам (актюаторам).

В волоконно-оптических системах информация передается с помощью лазерного излучения по волновым световодам [8, 34–37, 147].

Лазер (оптический квантовый генератор, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, усиление света при помощи индуцированного излучения) — источник оптического (УФ, видимого, ИК) когерентного (одинакового по фазе) монохроматического (одной длины волны) излучения, характеризующегося высокой направленностью и большой плотностью энергии (от микроватта, рубиновый лазер, $\lambda = 0,69 \text{ мкм}$, импульс $0,5 \text{ мДж}$; азотный лазер, $\lambda = 0,34 \text{ мкм}$, импульс $0,5 \text{ мДж}$; до 10^{15} Вт). Молекулы или атомы рабочего вещества (в газовых лазерах — He-Cd , CO_2 , ионы Ar , He-Ne ; в жидкостных — растворы органических красителей, в твердотельных — диэлектрические кристаллы, стекла, полупроводники, рубин,

стекла и кристаллы с ионами Cr, Nd, арсенид галлия As_3Ga_5 , теллурид кадмия, фосфид галлия $Ga_2(НРО_3)_3$, флюоресцирующие полимеры [13]) возбуждают, а затем создают условия для их одновременного возвращения в исходное состояние. При этом испускается импульс, мощность которого значительно выше, чем у исходного воздействия (в Массачусетском технологическом институте разработан атомный лазер, испускающий когерентный поток атомов). Рабочее вещество (главный элемент лазера) — активная среда, для образования которой используют: воздействие света нелазерных источников, электрический разряд в газах, химические реакции, бомбардировку электронным пучком и другие методы «накачки». Активная среда расположена между зеркалами, образующими оптический резонатор.

Лазерные диоды, излучающие на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм (окна прозрачности оптических волокон) являются ключевыми элементами высокоскоростных волоконно-оптических линий связи. Полупроводниковые лазеры с квантовыми точками (КТ, InAs в матрице GaAs, поверхностная плотность островков InAs в матрице $4-5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, пирамиды высотой 3–5 нм, квадратом основания со стороной 10–15 нм) перспективны для:

- 1) лазеров на основе гетероструктур с КТ из InAs, формируемых зарастиванием слоя InAs тонким слоем твердого раствора $In_xGa_{1-x}As$;
- 2) метаморфных лазеров с метаморфным слоем InGaAs на поверхности GaAs-подложек;
- 3) вертикально-излучающих лазеров (традиционные лазеры — инжекционные) полосковой конструкции.

Длина волны излучения КТ InAs зависит от состава матрицы: 0,8 мкм (матрица AlGaAs) — 1,95 мкм ($In^{0,53}Ga^{0,47}As$) [110].

В волоконной оптике источники светового сигнала — полупроводниковые (инжекционные) лазеры и светоизлучающие диоды; изготавливаются на основе арсенида галлия. Такие системы позволяют передавать информацию со скоростью в сто тысяч раз большей, чем скорость систем радиосвязи, включая спутниковую связь. Модификация оптоэлектроники (введение на пути светового потока призм особой конструкции, разработка Йенского института оптики и микромеханики, другие методы) значительно увеличивают пропускную способность оптических волокон. К 2025 г. скорость передачи информации будет составлять сотни Тб/с.

Лазеры непрерывного и импульсивного действия получили широкое применение в научных исследованиях, в лазерной спектроскопии, измерительной техники, геодезии, медицине, техники (лазерные гироскопы), лазерной стереолитографии (SL-технология), LOM-технологии (лазерная обработка материалов), в системах записи и чтения информации.

Основные современные формы хранения информации и доступа к ней — цифровая запись на магнитных или оптических дисках (жесткие диски, винчестер, НЖМД — накопители на жестких магнитных дисках, объем памяти 75–500 Гб, объем кэш-памяти, определяющей скорость доступа к данным, 8–16 Мб). В четырех информационных средах (печать, видео- и кинолентки, магнитные и оптические носители) в 2002 г. сохранено 5 экзбайт, 10^{18} байт информации (92% — на жестких электронных дисках, 7% — видеоленки, 0,01% — бумага, 0,002% — оптические диски). Емкость дисков возрастает ежегодно на 70% в течение 10 лет. Плотность хранения растет со скоростью не менее 1 мур (1 мур — это удвоение за 1,5 года).

Широкое распространение (с 1979 г., фирмы *Philips, Sony*) получили *CD-R (Recordable* — записываемые) и *CD-RW (Rewritable* — перезаписываемые) оптические диски в качестве носителей информации.

Носители оптической памяти работают на принципе отражения. Плотность информации увеличивается при переходе от волны 860 нм (*CD*, ИК-диапазоны) к волнам 660–635 нм (*DVD*, красный диапазон).

Фирма *Intel* разработала лазер, использующий эффект Рамана (усиление ИК-излучения, проходящего сквозь кристалл кремния) и перспективный для фотонных компьютеров, в которых терабайты информации будут передаваться со скоростью света.

На смену *CD*-дискам пришли *DVD*. Дальнейшее развитие цифровых оптических методов увеличивает емкость с 4,7 Гб (односторонний стандартный диск) до 1,5 Тб (к 2020 г.) за счет

уменьшения размера одного бита информации, увеличения количества информационных слоев внутри диска, использования вместо красных лазеров голубых (длина волны 400–405 нм) полупроводниковых лазеров (*BluRay*-диски).

На обычном *DVD*-диске цифровая информация (единицы и нули) сохраняется в виде углублений (так называемых питов) и считывается красным лазером (рис. 1.5). Размер питов и длина волны лазерного излучения определяет емкость одного слоя — 4,7 Гб. Форматы записи информации с использованием лазеров голубого цвета (уменьшение размера питов, повышение плотности их расположения на диске) *BluRay* и *HD-DVD* обеспечивает емкость информации соответственно 25 и 15 Гб на слой (20–25 Гб для многослойных дисков).

Структура диска *BluRay* (основа 1,1 мм, защитный слой 0,1 мм) не совпадает со структурой диска *DVD* и для обеспечения совместимости необходим привод со второй головкой (красный лазер).

Переход к цифровому телевидению высокой четкости *HDTV* (*High Definition TV*) стимулирует разработку цифровых носителей видео-записи новых стандартов. В 2005 г в США более 50 каналов вещали в стандарте *HDTV 1080i*, в Европе — более 10 каналов (*1080p*). Одновременно прекращается выпуск плазменных и ЖК-панелей, неспособных принимать и отображать телевидение высокой четкости. Сигнал в формате *HDTV* кодируется из расчета 256 оттенков на каждый цвет, то есть 16 млн оттенков, что является пределом для ЖК-панелей и плазменных *PDP*-панелей. Сравнительные характеристики параметров цифровых видеодисков приведены на рис. 1.7.

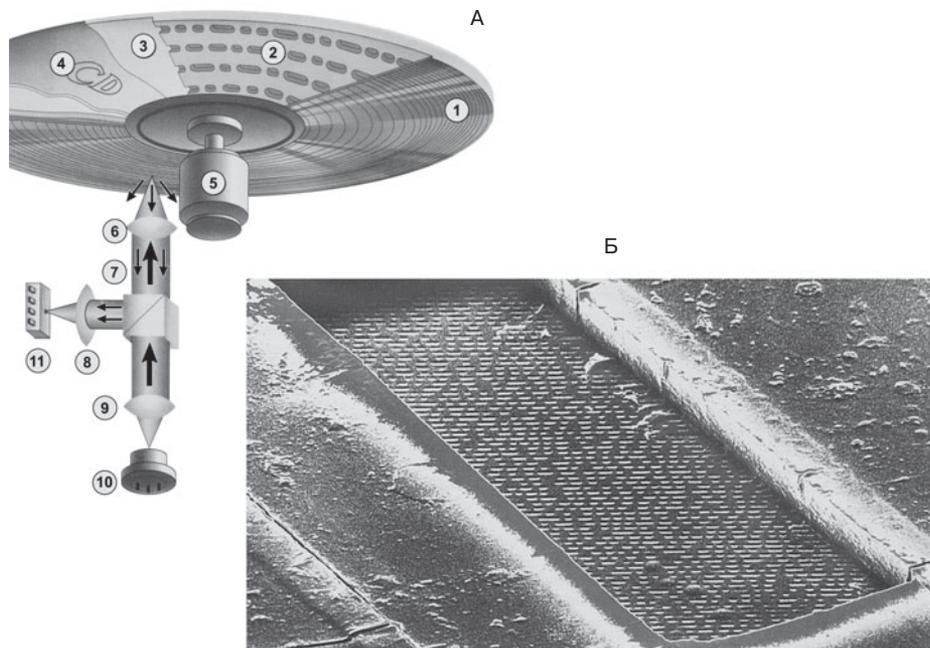


Рис. 1.5. Схема считывания информации с носителей оптической памяти (жесткие компакт-диски *CD*, *DVD*, *A*) и отражающий слой с информационными питами (Б, электронный микроскоп):

А: 1 — полимерный защитный прозрачный слой (поликарбонат); 2 — отражающий слой (см. Б); 3 — защитное полимерное покрытие; 4 — этикетка; 5 — мотор; 6 — фокусирующая подвижная линза (в том числе, для перефокусировки в многослойных дисках); 7 — светоделитель; 8 — собирающая линза; 9 — коллимирующая линза; 10 — лазер для бесконтактного считывания информации; 11 — фотоприемник.

Оптические носители объемом в сотни гигабайт требуют перехода на использование лазеров, работающих на все более коротких волнах, но защитный полимерный слой обычных дисков не прозрачен для УФ. Способ записи с использованием асимметричных питов («ко-собокие» кратеры) повышает объем информации до 1 Тб в 4- слойном диске стандартного размера (технология *MODS, Multiplexed optical data storage* — уплотненное оптическое хранение данных). Оптический квадратный детектор способен устойчиво распознавать по крайней мере 10 различных вариантов отражения луча, в одном пите можно хранить не двоичную информацию, а десятичную, и плотность хранения возрастает более чем в три раза. Необходимость сохранения информации в электронной форме в течение длительного времени, увеличения объема памяти (емкости) носителей информации и скорости считывания информации с них стимулирует разработку альтернативных носителей информации на основе голограмм.

Голограммы (объемное изображение) в зависимости от угла зрения показывают наблюдателю различные ракурсы изображения трехмерного объекта, что делает возможным размещение на голографических материалах большого объема числовой информации, сохраняющейся в форме комбинаций темных и светлых точек (бинарные носители, соответствуют нулям и единицам, каждому углу зрения соответствует свой набор комбинаций темных и светлых точек).

Система записи, хранения и считывания информации с голографических дисков разработана компанией *In Phase Technologies* (США, записывающе-считывающая аппаратура, трехслойные голографические диски толщиной 1 мм) и *Bayer Material Science* (Германия, носитель информации — пленки из светочувствительной полимерной композиции, защита носителя — диски из поликарбоната *Makrolon*, используемого и для *CD* и *DVD*).

Запись информации на пленке голографической полимерной композиции *Tapestry* из высокомолекулярного (базовый компонент) и низкомолекулярного (с группами, активными при лазерном воздействии) термопластов проводится с использованием лазерного луча высокой когерентности, позволяющего создать компактный и контрастный интерференционный рисунок.

В процессе записи данных лазерный луч освещает те участки пленки *Tapestry*, которые должны содержать информацию; молекулярная масса и коэффициент преломления реакционноспособного компонента возрастают, что приводит к преломлению падающих на эти участки световых лучей.

В записывающем устройстве лазерный луч разделяется на сигнальный и эталонный (рис. 1.6). Эталонный пучок света остается без изменений и направляется непосредственно на диск из пленки *Tapestry*. Сигнальный световой пучок проходит сквозь ЖК-дисплей, от него отделяются отдельные лучи (запись числовых нулей), а оставшиеся лучи соответствуют числовым единицам.

В результате соединения сигнального и эталонного световых пучков образуется интерференционный рисунок записываемых на поверхности и по всему объему диска из голографического полимера *Tapestry* в виде голограммы.

Для считывания информации лазерный луч направляется на диск под тем же углом, что и эталонный световой пучок. Интерференционный рисунок на голограмме отклоняет световой поток и создает копию первоначального сигнального светового пучка, которая преобразуется в фоточипе: если луч попадает на пиксель детектора, то чип регистрирует числовую единицу, если пиксель неосвещен — числовой ноль.

Голографические носители информации имеют существенно более высокие эксплуатационные характеристики [156]:

| Носитель информации | Емкость, Гбайт | Срок службы, лет | Скорость передачи информации, Мбайт/с | Год начала практического использования |
|---------------------|----------------------|------------------|---------------------------------------|--|
| Дискета 3,5" | $1,45 \cdot 10^{-3}$ | До 5 | 0,0625 | 1981 |
| Магнитная лента АТТ | 36 | 5–10 | 4 | 1989 |

Окончание табл.

| Носитель информации | Емкость, Гбайт | Срок службы, лет | Скорость передачи информации, Мбайт/с | Год начала практического использования |
|---------------------|----------------|------------------|---------------------------------------|--|
| CD | 0,7 | 5–20 | 0,150 | 1983 |
| DVD | 4,7 | 5–20 | 1,4 | 1996 |
| Диск BluRay | 25 | 5–20 | 4,5 | 2005 |
| Tapestry | 300 | до 50 | 20 | 2006 |

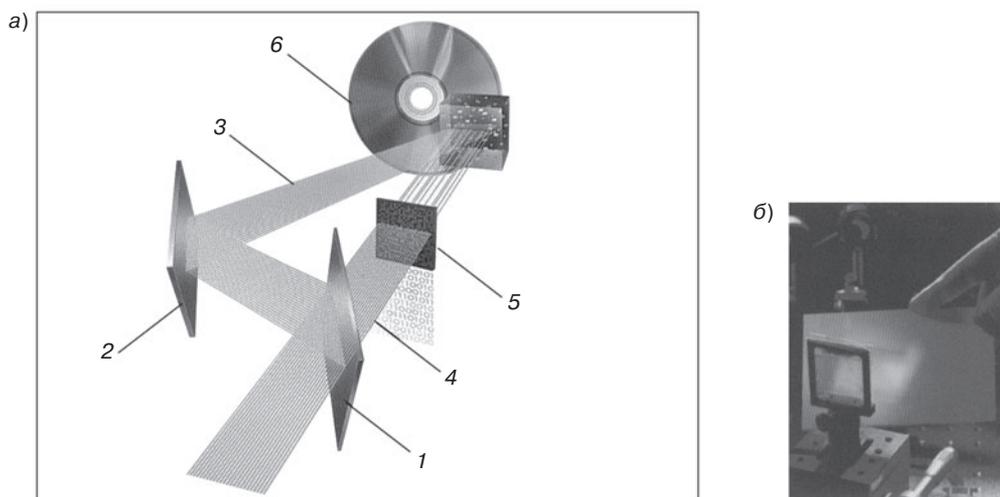
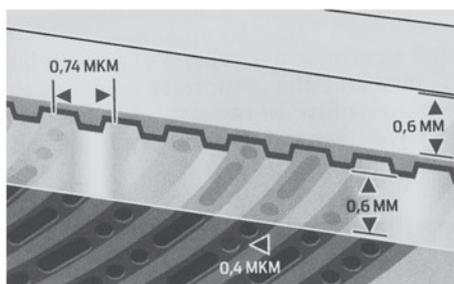


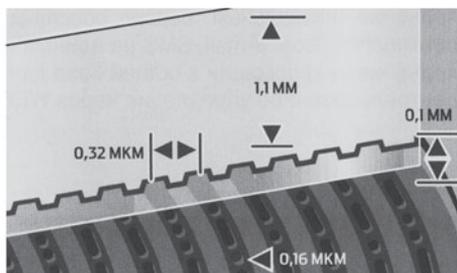
Рис. 1.6. Схема голографической записи информации [156]: а) 1 — светоделитель (полупрозрачное зеркало); 2 — зеркало; 3 — эталонный световой пучок; 4 — сигнальный световой пучок; 5 — жидкокристаллический дисплей; 6 — диск, изготовленный из ПМ марки *Tapestry*TM; б) — голограмма на пленке *Tapestry* в виде узора из светящихся точек



DVD

Разработчики *Hitachi, IBM, Intel, LG, Matsushita (Panasonic), Microsoft, Mitsubishi Electric, NEC, PIONEER, Philips, SAMSUNG, SANYO, SHARP, Sony, THOMSON, Toshiba, JVC*
 1(4,7 Гб) – 2(8,5 Гб) слоя
 Длина волны 650 нм (красный лазер)
DVD-ROM, DVD+/-R/RW
 Не подходит для *HDTV*

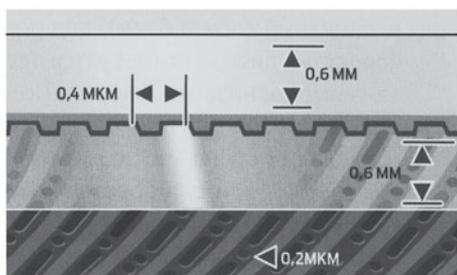
Рис. 1.7. Сравнительные характеристики параметров цифровых видеодисков [113]



BluRay

Разработчики *Sony, Philips, Pioneer, Sharp, Matsushita, Samsung, Mitsubishi Electric, Hitachi, LG Electronics, HP, Dell, TDK.*

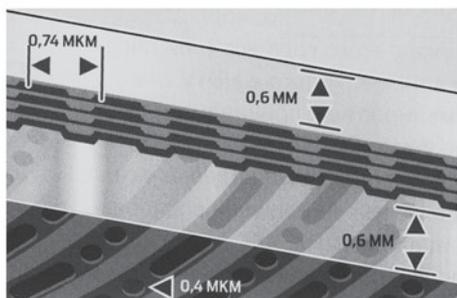
1(25 Гб) – 2(50 Гб) слоя
 Длина волны 405 нм (синий лазер)
BD-RE, BD-ROM (2007 г.), *BD-R* (2009 г.)
 Для *HDTV*, не совместим с *DVD*



HD-DVD

Разработчики *NEC, Toshiba.*

1(15 Гб) – 2(30 Гб) слоя
 Длина волны 405 нм
HD DVD-ROM, HD DVD-ARW (2008 г.)
 Совместим с *DVD*



VMD (*versatile Multilayer Disk* — универсальный многослойный диск)

Разработчик *NME (New Medium Enterprises)*
 8(40 Гб) – 20(100 Гб) слоя
 Длина волны 650 нм
VMD-ROM, VMD-R
 Совместим с *DVD*

Окончание рис. 1.7

Альтернативная технология *MODS*-голография, основанная на считывании лазером информации, голографически зашифрованной в объеме полимера (голографический провод сочетает терабайтную емкость носителей с высокой скоростью считывания данных) [112].

В голографическом диске однократной записи с емкостью 200–300 Гб (фирма *In Phase Technologies*) информация сохраняется в трехмерном объеме, носителем которого является прозрачная полимерная среда, а информация наносится расщепленным надвое лазерным лучом. Лазер считывает информацию, нанесенную в виде «темных» точек с отличными от полимерной среды коэффициентами преломления и отражения.

Память, основанная не на электрических, а на магнитных свойствах носителя *MRAM* (*Magnetic Random Access Memory*), использует магнитные туннельные переходы. Каждый переход может хранить один бит информации, что позволяет создавать электронную полупроводниковую память (информация сохраняется при отключении питания, так как в основе лежит не заряд, а магнетизм) с высокой скоростью записи и вывода, с высокой плотностью записи.

Оптическая память, основанная на эффекте флуоресценции, использует диски с более глубокими, чем у *DVD*-дисков, питаями, которые заполняются полимером с флуоресцентными

красителями, флуоресцирующим полимером, в котором лазерный луч инициирует флуоресцентный некогерентный сигнал, длина волны которого на 10% длиннее начального импульса, распространяющийся во всех направлениях. По сравнению с отражательной технологией в *CD*, *DVD* уровень шума постоянен, что упрощает реализацию многослойных дисков — шести-, восьмислойных с плотностью записи информации в слое 3,75–4,25 Гб (соответственно у *ROM*-диска 22,5 Гб, емкость *ROM*-дисков в системе *HD DVD* фирмы *Toshiba*, метод репликации, *BluRay* фирмы *Sony* — 12 Гб).

Технология изготовления восьмислойных дисков на 34 Гб, основанных на эффекте флуоресценции, реализована в 2005 г. фирмами «Констелейшн 3D Восток» и «Элара», Чебоксары, Россия [111].

Волоконные световоды (к 2002 г. произведено 70 млн км, ежегодно вводится в России — 120 тыс. км, в США — 14 млн км, в мире — 60 млн км), имеющие сложную внутреннюю структуру, определяющую их оптические свойства, постоянно совершенствуются, чтобы обеспечить непрерывно возрастающую скорость передачи информации, особенно с развитием Интернета. Использование оптоволокон позволяют повысить скорость передачи информации до 100 Мб/с (реализация широкополосного доступа). Пропускная способность мобильного Интернета через модем — стандарты *2G*, *3G*, *GPRS*, *EDGE*, *WiFi*, *WiMAX*, *DSL* и др. — в разы хуже.

Оптические волоконные элементы служат для передачи световой энергии и изображения и позволяют значительно повысить качество оптических и электронно-оптических систем.

Действие волоконно-оптических элементов основано на способности лучей света, многократно отражаясь на границе раздела двух сред, распространяться по ним на большое расстояние, даже в том случае, когда волокна изогнуты самым произвольным образом. Оптическое волокно может быть использовано для передачи света без применения оптических деталей — зеркал, призм и линз.

Для получения оптических волокон с высоким светопропусканием применяют особо чистые стекла (свинцовосиликатное, барийсиликатное, натрийкальцийсиликатное и другие стекла с заданным значением показателя преломления). В научном центре волоконной оптики при ИОФ РАН (совместно с ИХВВ) разработаны активные висмутовые волоконные световоды. Из оптического волокна изготавливают различные оптические элементы: волоконные диски, жгуты, фоконы и преобразователи.

Волоконные диски (планшайбы) представляют собой плоско-параллельные изделия, состоящие из большого числа параллельно уложенных стеклянных двух- и трехслойных волокон. Волокна между собой спекаются и диски становятся вакуум-плотными.

Волоконные жгуты (гибкие световоды) состоят из длинных волокон, концы которых уложены с очень высокой точностью, проклеены, отшлифованы и отполированы по торцам. Изображение, спроектированное на один конец, передается дискретно по жгуту на другой конец. Разрешающая способность жгутов зависит от диаметра волокна и степени когерентности его усадки.

Фоконы используются для изменения передаваемого изображения, увеличения или уменьшения его. Волоконно-оптические детали могут изготавливаться с прозрачной и поглощающей оболочкой. При применении поглощающей оболочки повышается функция передачи контраста изображения, переданного волоконной деталью.

Преобразователи формы светового потока и изображения применяются для автоматического сканирования, для сканирующих оптико-логических систем, в космическом приборостроении и в других отраслях техники (передача, хранение, воспроизведение информации, сканирование, разделение информации на элементы по заданному закону, кодирование и декодирование информации, ввод и вывод информации в компьютеры, преобразователи высокого пространственного разрешения для многоканальной фотометрии, многоканальные преобразователи матричного типа с ортогональным распределением элементов).

Применение преобразователей изображения для телевизионного координатора дает возможность получать высокоточную координатную информацию, повысить разрешающую

способность телевизионно-оптических систем, рассчитать геометрическое искажение передаваемого изображения.

Активные волоконные элементы используются в оптико-механическом приборостроении как генераторы, усилители, рефлекторы и модуляторы. Они изготавливаются из стекол, активированных неодимом, что обеспечивает возможность генерирования лазерного излучения с длиной волны λ , равной 1,06 мкм. Они используются не только в волоконных лазерах, но и в качестве усилителей излучения от лазера или другого источника. Основной характеристикой активных волокон является коэффициент усиления, который для различных видов волокон составляет 10^3 – 10^5 (или 30–40 дБ). Одним из важнейших требований, предъявляемых к волоконно-оптическим элементам, является обеспечение низких шумовых характеристик, передача с усилением не только светового сигнала, но и изображения на участке 40–50 лин/мм, а также расширение спектральной области, в которой работают световоды для УФ-области спектра до $\lambda = 0,2$ – $0,3$ мкм и дальней ИК-области — до $\lambda = 10,6$ мкм.

Оптические волокна для линий связи (ВОЛС) предназначены для передачи информации в виде модулированных световых импульсов. Преимущества ВОЛС заключаются в увеличении объема передаваемой информации за счет освоения более высоких частот спектра электромагнитных колебаний, что позволяет создавать сверхширокополосные информационные системы с защитностью от помех и высокой степенью надежности волоконно-оптической связи.

При изготовлении волоконных световодов (ВС) в качестве защитно-упрочняющих покрытий используют различные типы реакто- и термoplastов, от которых зависят прочность ВС и оптические потери при эксплуатации [38].

Если диаметр световедущей жилы соизмерим с длиной волны проходящего света и характеристический параметр $R < 2,4$, то для волокна выполняются условия отсечки мод (типов колебаний) высшего порядка и распространяется только мода низшего порядка. В этом случае обеспечивается малая дисперсия сигнала, что является одним из основных условий применения оптических волокон в линиях дальней или внутриобъектовой связи (например, в ИМ).

Волокна типа селфок (или граданы) представляют собой одножильные световоды без оболочки с осесимметричной формой поперечного сечения и с непрерывно уменьшающимся показателем преломления от центра к периферии волокна по параболическому закону. Луч в таком волокне распространяется не по ломаной, а по синусоидальной кривой.

Скачок показателя преломления достигается легированием кварцевого стекла германием. В сердцевине волокна наряду с SiO_2 присутствует некоторое количество двуокиси германия, что приводит к повышению показателя преломления и меньшей скорости распространения света.

Селфоки способны самостоятельно формировать изображение объекта, обладают фокусирующими свойствами и также обеспечивают малую дисперсию фазовых скоростей. Область применения селфок: линии дальней оптической связи, микрофокусирующие оптические элементы, микрооптоэлектроника, миниатюрные оптические интегральные схемы, лазерная техника, медицина и т. д.

При получении селфок из пароговой фазы достигается хорошее сочетание энергетических и информационных характеристик (искажение сигнала — 1 нс на 1 км длины).

Принцип действия оптического волокна основан на полном внутреннем отражении луча на границе двух сред с высоким и более низким показателем преломления.

Предельный угол, под которым происходит полное внутреннее отражение луча, называется апертурным.

Главный принцип работы оптического волновода — многократное внутреннее отражение захваченного светового луча. Полностью отражаются только те лучи, которые падают на границу раздела под достаточно малым углом.

Основным элементом волоконной оптики первого поколения является одножильный световод — световедущая жила с высоким показателем преломления, окруженная светоизолирующей оболочкой с низким показателем преломления, причем диаметр световедущей жилы (19–20 мкм) в несколько раз превышает длину волны проходящего света (видимая область

$\lambda = 0,4-0,76$ мкм). В этом случае закономерности распространения света через световоды описываются законами геометрической оптики.

Основные оптические характеристики одножильного световода: светопропускание, апертура, спектральная область пропускания. Пучок некогерентно уложенных световодов характеризует те же показатели, а также такие параметры, как неравномерность светопропускания по сечению торца, коэффициент заполнения и др. Такие пучки волокон применяются для подсветки труднодоступных и взрывоопасных мест; при передаче световой информации из одной точки в другую, отделенную сложными конструктивными элементами (по резко искривленному пути); для подсветки полостей холодным светом и в других целях.

Оптические волокна, уложенные когерентно, могут передавать изображение. При этом изображении передается поэлементно и имеет мозаичную структуру.

Гибкие жгуты когерентно уложенных волокон применяются для наблюдения за труднодоступными местами (например, полостей атомных реакторов, турбин, моторов), для пилотажно-посадочной индикации, для различных оптико-механических и оптико-электронных устройств и медицинских эндоскопов.

Стандартный пролет волоконно-оптической линии связи имеет длину не менее 10 км (а иногда и более 1000 км), следовательно, в волокне происходит не меньше миллиарда отражений, прежде чем свет дойдет до другого конца.

Большинство волокон, используемых в линиях связи, являются одномодовыми, то есть распространяться по световедущей жиле могут колебания только одного вида. пятимикронная сердцевина 50-микронного стеклянного волокна имеет несколько больший показатель преломления, чем оболочка, благодаря чему и возникают благоприятные условия для волноводного (нерасходящегося) распределения световой волны внутри стеклянной нити.

Полимерная, углеродная или металлическая оболочка защищает световод не только от механических повреждений, но и от диффузии воды, кислорода и водорода в толщу стекла.

Волоконная оптика легла в основу разработки волоконно-оптических линий связи телекоммуникационных систем с использованием оптических волокон. Высокая несущая частота лазерного излучения позволяет передавать информацию в широкой полосе частот, один лазерный луч может нести несколько тысяч телевизионных каналов и сотни тысяч телефонных сообщений. Материалы и конструкции излучателей и приемников оптического излучения (рис. 1.8) непрерывно совершенствуются [8, 34–37]. Сравнительные характеристики основных типов волоконных световодов приведены на рис. 1.9.

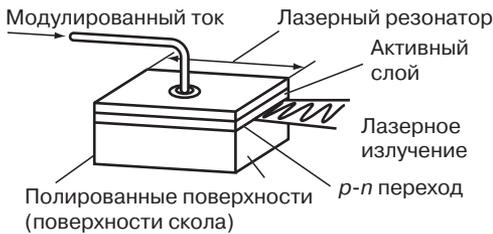
На стыках между отдельными фрагментами световодов часть света отражается в обратном направлении. Особенно вредно отраженный луч действует на лазеры, нарушая в них процесс генерации и ухудшая их характеристики. Перед лазерами устанавливают магнитооптические вентили, которые пропускают свет в прямом направлении, но почти полностью гасят его в обратном. Такой вентиль представляет собой поляризатор и помещенную за ним магнитооптическую пленку, поворачивающую плоскость поляризации проходящего света на 45° . Прямой луч проникает через вентиль без помех, а у отраженного при повторном движении через пленку плоскость поляризации поворачивается еще на 45° , так что поляризатор его не пропустит [39].

Другая важная задача, которую решают пленки в волоконной оптике, — коммутация световых пучков, то есть переадресация луча из одного световода в другой. Для этого используют дифракцию — отклонение луча света при прохождении сквозь дифракционную решетку, которая представляет собой систему полосовых доменов, возникающую на пленке под действием магнитного поля. Меняя напряженность поля, нетрудно увеличить или уменьшить период решетки, а значит и угол отклонения луча. Если же изменить ориентацию поля (например, с вертикальной на горизонтальную), можно изменить плоскость отклонения луча, отклонить его почти в любом направлении.

Используются и магнитооптические управляемые транспаранты. Транспаранты — это специально обработанные пленки, на которых сформированы сравнительно крупные ячейки-

ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

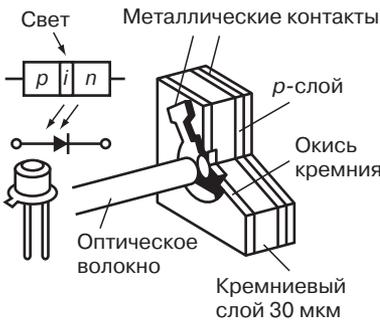


СВЕТОДИОДЫ

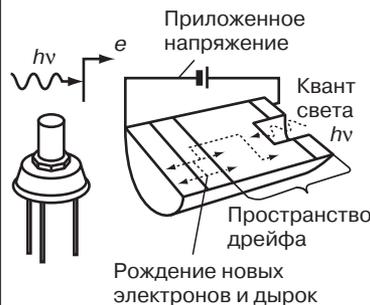


ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ФОТОДИОДЫ



ЛАВИННЫЕ ДИОДЫ



ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

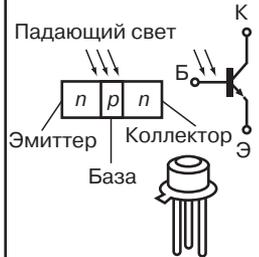


Рис. 1.8. Схемы излучателей и приемников оптического излучения [35]

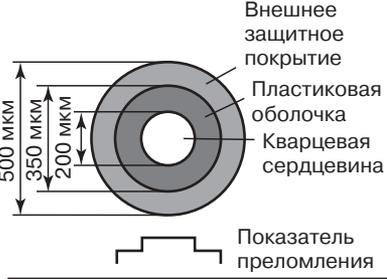
домены и нанесены тончайшие проводники, чтобы можно было импульсами тока переводить эти ячейки из прозрачного в непрозрачное состояние и наоборот. Подавая на транспарант нужный набор импульсов, можно за миллионные доли секунды формировать на нем мозаичное изображение. Благодаря «памяти» магнитооптических пленок «картинка» может сохраняться даже при отключении питания.

Транспаранты используются и в оптических компьютерах для распознавания образов (на основе преобразования Фурье). Если в переднюю фокальную плоскость линзы поместить транспарант с изображением, которое нужно расшифровать, и направить на него пучок света от лазера, то в задней фокальной плоскости линзы возникнет Фурье-спектр — двумерный образ исходной картинке. Сравнивая этот образ с эталонными спектрами различных объектов, можно очень быстро установить, что изображено на картинке. На этом принципе была построена действующая нейроподобная сеть с ассоциативным запоминающим устройством. Транспаранты использовались в качестве программируемой оптической памяти, а сложные связи между ее ячейками осуществлялись благодаря взаимодействию разных световых лучей.

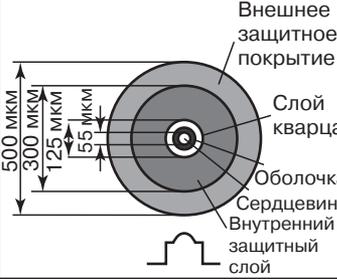
Накопители информации на магнитооптических дисках, отличающихся высокой плотностью и качеством воспроизведения информации, применяют в запоминающих устройствах компьютеров, системах цифровой записи и хранения информации.

С разработкой эрбиевых оптических усилителей, используя волоконно-оптический кабель, легированный эрбием, и лазер накачки, стало возможно усиливать ослабшие в пути оптические сигналы, не проводя никаких преобразований света в электричество и обратно.

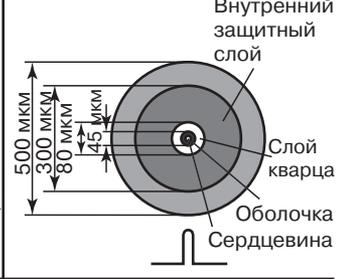
Волокна со скачкообразным изменением показателя преломления



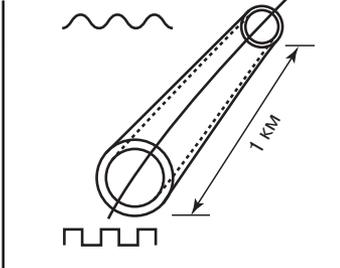
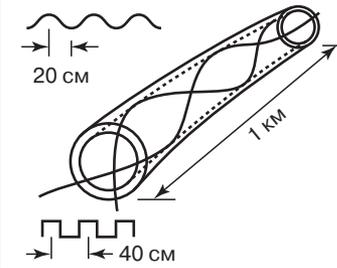
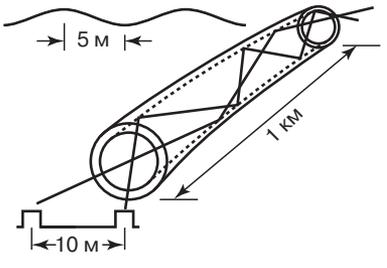
Волокна с плавным изменением показателя преломления



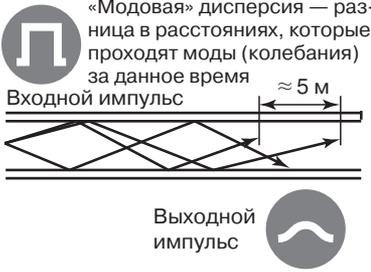
Одномодовые волокна



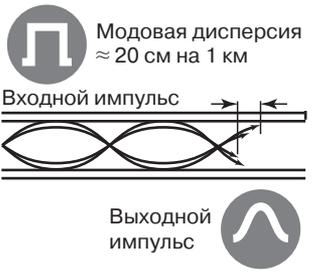
РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ



Световые импульсы, несущие информацию, расплываются и это приводит к ограничению скорости передачи данных. В одномодовом волокне расплывание минимально



Преимущества: дешевизна; хорошо собирает свет (большая числовая апертура); легко сопрягается с устройствами ввода и вывода излучения.
Недостатки: большая дисперсия; сравнительно узкая полоса передаваемых частот — малая скорость передачи информации



Преимущества и недостатки: многомодовое градиентное волокно занимает промежуточное положение между двумя другими типами

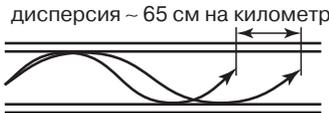


Преимущества: минимальная дисперсия; широкая полоса передаваемых частот — большая скорость передачи информации.
Недостатки: дороговизна; плохо собирает свет (малая числовая апертура); трудно сопрягать с устройствами ввода и вывода излучения; требуется лазерный источник

Показатель преломления — величина, которая характеризует скорость распространения света в веществе. Показатель преломления зависит от длины волны света — лучи разных цветов распространяются с разной скоростью (хроматическая дисперсия)



Светодиод:
ширина спектра $\approx 35 \text{ нм}$
($1 \text{ нм} = 10^{-7} \text{ см}$)



Лазер:
ширина спектра $\approx 2 \text{ нм} = 20 \text{ \AA}$

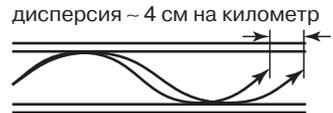


Рис. 1.9. Оптические волокна для передачи информации [35]

Потребление полимерных материалов в производстве оптических волокон за последние десятилетия в 1,5 раза превысило потребление неорганических (стекло, кварц) материалов. 80% рынка полимерных оптических волокон контролирует японская фирма *Mitsubishi rayon*. В этих типах оптических волокон (длина ≤ 100 м, передаваемая информация ≤ 50 Мб, дешевле и легче на 50%) сердцевинки и оболочки световодов изготавливаются из полимеров (рис. 1.10)

Среди оптически прозрачных полимеров в оптоэлектронике используют большой ассортимент фторсодержащих термопластов оптического назначения на основе аморфных, оптически прозрачных (коэффициент светопропускания $> 95\%$ в интервале 500–2000 нм с некоторым уменьшением в интервале 200–500 нм), растворимых (для изготовления пленок и покрытий), перерабатываемых из расплава полимеров и сополимеров (низкие значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла электрических потерь стабильные до 100 МГц, низкое водопоглощение, высокая стабильность размеров, химстойкость, температура деструкции 350–450 °С, плотность 1,67–1,84 г/см³, прочность 25–33 МПа, показатель преломления 1,29–1,34):

- поли-2,3,4-трифторметилстиролы и сополимеры (*Bayer*, ФРГ);
- полиимиды на основе диаминов и диангидридов с перфторизопротильной группой $-\text{C}(\text{CF}_3)_2-$ (*IBM T.J. Watson*);
- сополимеры винилиденфторида (*Central Glass*); сополимер тетрафторэтилена и пер-

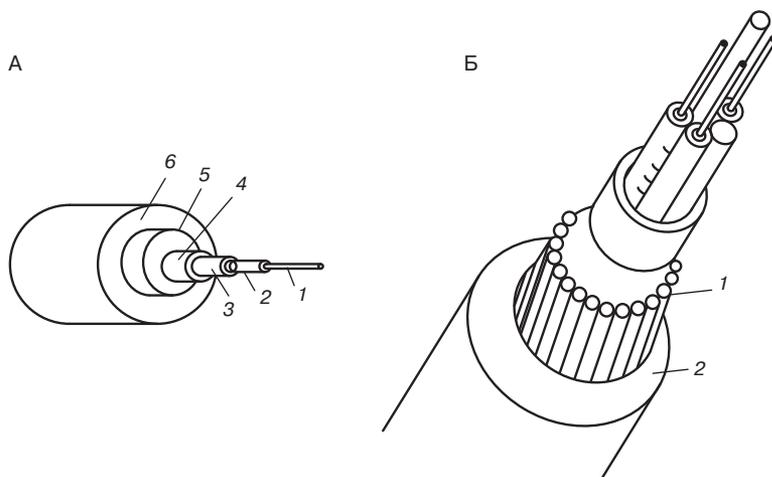
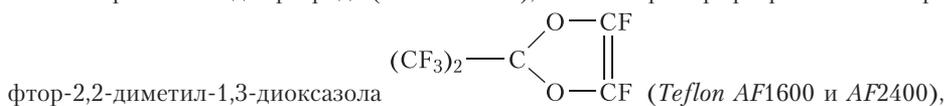


Рис. 1.10. Конструкция и материалы оптоволоконных кабелей (длина до 3 км, передаваемая информация 300 Мб, сохранение свойств после γ -облучения с уровнем до 1 млн рентген, стоимость 1000 км, 2003 г., 6000 USD) [42]:

А: 1 — сердцевина с высоким n_D^{20} ; 2 — оболочка с низким n_D^{20} (1 и 2 — оптическое волокно, стекло, полимеры); 3 — покрытие из кремнийорганического полимера; 4 — внутренняя (буферная) оболочка; 5 — упрочняющая оболочка (*Kevlar*, СВМ); 6 — внешняя оболочка (полимерная).

Б: 1 — упрочняющая оболочка из *Kevlar Hp(68)*, *T 968B*, *Kevlar 49T 989*; 2 — полибутилентерефталат *Celanex 2001 (Ticona)*, ФРГ для модулей оптических кабелей (для защитной оболочки используется экструзионный ПБТ ($\rho = 1,31$ г/см³, $\alpha -40 \div 40$ °С = $1,1 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, удлинение при разрыве 200%, твердость по Роквеллу 72, ударная вязкость по Изоду при 23 °С без разрушения, при -40 °С составляет 195 кДж/м)

перерабатывается экструзией, литьем под давлением, для световодов, диэлектрических покрытий в интегральных схемах (*DuPont*, США); фторсодержащие сополимеры *Cantony* перерабатываются литьем под давлением, экструзией (в том числе используются при соэкструзии материалов сердечника и оболочки оптоволокна, при изготовлении линз — устройств считывания с оптических дисков) при 200–300 °С, используют для нанесения покрытий толщиной до долей мкм (сополимеры растворимы в перфторированных растворителях) — оболочек оптических волокон; смесь олигомеров с акриловыми группами (отверждается УФ) *Difensa (Dainippon Ink and Chemicals, Япония)*, для безусадочных оболочек оптических волокон [9].

Полимерные оптические волокна (ПОВ, «степ-волокна» со ступенчатым профилем изменения показателя преломления n в поперечном сечении сердечника и градиентные ПОВ с плавным близким к параболе профилем n) имеют по сравнению с кварцевыми меньшую стоимость, высокую гибкость, меньшую массу, а при диаметре около 1 мм упрощаются операции по подготовке волокон к соединению с другими элементами оптоволоконного тракта (окольцовывание), а сами коннекторы изготавливаются из полимеров. ПОВ используется в сетях связи с небольшим (до 1 км) радиусом передачи сигналов.

Микроструктурированные ПОВ (МПОВ) со сплошным и с полым сердечником, заполненным воздухом отличаются процессами прохождения по ним света. В первом случае значительно увеличивается световой поток, проходящий по волокну, во втором — реализуются нелинейные эффекты, практически нулевая дисперсия оптического сигнала, а оптические характеристики не зависят от свойств полимера (99% светового потока распространяется по воздушному сердечнику).

МПОВ с двумя сердечниками эффективны для регистрации сигналов в тензодатчиках.

ПОВ с сердечником из ПММА и оболочкой из полифторакрилатов (со ступенчатым профилем n , многослойные с широкой полосой пропускания) производит Инженерный центр полимерного оптического волокна (Россия, ИЦ ПОВ, Тверь) [147].

1.2.3. Материалы и технологии микроэлектроники и микропроцессорной техники

Система анализа и управления в ИМ основана на использовании микроэлектроники и микрооптоэлектроники, элементной базой которых является микропроцессорная техника [44–47].

Микропроцессоры, интегральные схемы (ИС) — функционально законченные устройства в миниатюрном исполнении, выполненные по групповой технологии и содержащие активные (диоды, фотодиоды, транзисторы) и неактивные (резисторы, электрические емкости, индуктивности, межэлементные соединения) элементы.

Полупроводниковая микросхема (планарная технология с Al-межсоединениями) была почти одновременно изобретена в 1959 г. Д. Килби (*Texas Instruments*) и Р. Нойсом (*Fairchild Semiconductor*, основатель корпорации *Intel*). В 2000 г. Д. Килби и Ж. Алферов получили Нобелевскую премию.

В полупроводниковых ИС все элементы распределяются на полупроводниковой подложке, в гибридных ИС с различной степенью (количеством элементов) интеграции (малая, средняя, большая, БИС, сверхбольшая, СБИС, ультрабольшая) активные элементы монтируются на диэлектрической подложке, а пассивные элементы формируются методами толстостенной, толстопленочной (последовательное формирование топологического рисунка в функциональных слоях толщиной до 12 мкм методами шелкографии, сеткографии) или тонкопленочной (функциональные слои толщиной до 1 мкм формируют гальваническим методом, методами вакуумного электронно-лучевого, ионного напыления, легирования, диффузии, а топологический рисунок — методами литографии) технологии.

В зависимости от длин волн, обеспечивающих формирование топологического рисунка с использованием фотошаблонов, различают фотографию (используются фоточувствительные

композиции, в том числе полимерные-фоторезисторы), электронографию (электронный луч рисует по компьютерной программе), рентгенографию (используется рентгеновское излучение, рентгеношаблоны, рентгенорезистры), УФ-графию, эпоксидирование (воздействие излучений). Внедрение добавок для оптимизации свойств проводят ионным легированием (имплантацией).

Нанесение рисунка проводников в сверхминиатюрных микросхемах с помощью электронного луча позволяет создавать трехмерные электронные схемы, обеспечивающие значительно большую плотность записи информации по сравнению со схемами, изготавливаемыми плоскостной фотолиграфией.

Сублимационная технология (*Lely Method*, пары SiC) позволяет изготавливать пластины диаметром 1 см из монокристаллов карбида кремния, полупроводника, изделия из которого по многим параметрам лучше аналогичных из кремния.

Для работы при повышенных температурах и воздействии ионизирующих излучений эффективны для формирования микросхем трехслойные подложки кремний-диэлектрик-кремний, что позволяет снизить толщину слоя кремния, на котором формируется микросхема до 10–20 мкм (в подложках, толщиной в сотни мкм высока концентрация носителей зарядов-электронов и «дырок», дефектов, создающих помехи и снижающие быстродействие).

В плазменных высокочастотных индукционных установках на поверхности кремниевых пластин осаждают покрытия из легированного оксида кремния (диэлектрик с КЛТР близким к КЛТР кремния) толщиной 50–100 нм, соединяют пластины с диэлектрическим покрытием термообработкой, утончая затем шлифовкой и полировкой слой, на котором формируется микросхема (МГИ электронной техники).

В более широком диапазоне температур работают микропроцессоры со слоями из поликристаллического алмаза (рассеивание тепла в 100 раз больше, чем у кремния) на поверхности кремниевого чипа, нанесенных с использованием плазмы (смесь H_2 , метана, ацетилена, 2000 °С) из ионизированного углерода. Производительность процессоров характеризуют значениями рабочих частот, которые (по данным компании *Intel*) к 1991 г. возросли с 0,5 до 50 МГц, к 2008 г. — до 4 ГГц (прогноз на 2010 г. 10 ГГц).

Число транзисторов на кристалле постоянно растет, а технологии производства микросхем развиваются от 0,50 мкм (1993 г.) — 0,25 мкм (1997 г.) до 0,03 мкм (30 нм, 2006 г., микропроцессоры с 40 млн транзисторов с тактовой частотой 10 ГГц).

При использовании в технологии нанесения на кремниевые пластины токопроводящих линий УФ-лучей с длиной волны 193–157 нм можно формировать элементы размером 50 нм, с длиной волны 13,4 (УФ-вакуумное излучение *EUV*) — менее 30 нм. На микросхемах *Intel Itanium* размещается 1,7 млрд кремниевых элементов (апрель 2005 г.).

Процессор *Intel Pentium 4* содержит около 200 млн транзисторов, подключенная к нему оперативная память имеет объем до 4 Гб, на логическую или арифметическую операцию затрачивается меньше миллиардной доли секунды.

В 1996 г. произведено 151 млн кремниевых пластин диаметром 159 и 200 мм для использования в БИС и СБИС (при уменьшении размеров элементов с 1–1,5 мкм до 0,18 мкм), а объем продаж изделий микроэлектроники в 2000 г. составил 1 трлн долларов США (стоимость одного кг СБИС в 3 раза дороже 1 кг золота).

СБИС являются основой современных военных электронных систем. Программы, загруженные в них, не поддаются полной расшифровке и по командам, известным только производителям, система может быть выведена из строя или изменить свое функционирование.

К 2005 г. за рубежом основным технологическим процессом изготовления микропроцессоров при использовании кремния является 90-нанометровый (0,09 мкм; минимально возможная величина — 4 нм).

В 2008 г. на заводе «Микрон» (г. Зеленоград) организовано производство микрочипов по технологии 0,18 мкм (совместно с *Meissner+Wurst Zander*, Германия), с последующим переходом на уровень нанотехнологий — 0,09 мкм (90 нм).

Дальнейший рост производительности микропроцессоров связывают с использованием нанотрубок, нанонитей (см. раздел 1.4), материалов с изменяющейся фазой и разработкой микропроцессоров из гибридных материалов (к 2015–2020 гг.).

Совершенствование элементной базы, архитектуры, принципов управления, программного обеспечения способствует повышению производительности (быстродействие, количество операции в секунду, о/с, флопсы).

К середине 2005 г. самые мощные суперкомпьютеры имели производительность (вычислительную мощность в Тфлопс, $\times 10^{12}$ операций двойной точности с плавающей точкой в секунду); 136,8 (*IBM Beue Gene/L*, Национальная организация по ядерной безопасности, США); 91,29 (*IBM BGW*, Исследовательский центр *IBM*, США); 51,87 (*SGI Columbia, NASA*, США); 35,86 (*NEC Earth-SIMULATOR*, центр изучения Земли, Япония); 27,91 (*IBM Mare Nostrum*, суперкомпьютерный центр Барселоны, Испания); 2,03–2,5 (СКИФ К-1000, 2004 г., 576 процессоров *AMD Opteron*, Россия, Белоруссия); 8–15 (МВС-15000 ВМ, 2005 г., технология *Blade*, 924 микропроцессора *Power PC 970*, межведомственный суперкомпьютерный центр РАН, Москва, Россия) [114].

Уровень микроэлектронных технологий определяется минимальным размером элементов, которые можно воспроизвести на кристалле. Компании США и Японии воспроизводят на кристалле размеры в 0,13 мкм, к 2007 — 0,07 мкм, что позволяет достичь тактовой частоты в 20 ГГц (0,1 мкм — 10 000 линий на 1 мм). Самая маленькая ячейка памяти пока занимает площадь 1 мкм², на 1 см² располагается 100 млн ячеек и 100 млн бит информации.

Интегральные микросхемы (ИМС) производятся по многослойной технологии литографии (фотолитография, литография с использованием УФ-лучей, электронная литография, рентгеновская литография) и капсулирования (оболочки интегральных микросхем) с одновременным изготовлением большого количества однотипных элементов (сотни кремниевых пластин с десятками микросхем на каждой). Технология состоит из десятков стадий: окисление верхнего слоя кремниевой пластины (основа микросхемы), нанесение на окисленную диэлектрическую поверхность полимерного покрытия (тип полимера определяется механизмом воздействия на покрытие при конкретном варианте литографического процесса; при фотолитографии используют полимерные фоторезисты), облучение (УФ, рентген, поток электронов) через шаблон, маску с прорезанной микросхемой (формирование полимерной структуры с требуемой химической стойкостью, растворимостью, отверждение фоторезиста), удаление полимерного диэлектрика из покрытия там, где есть элементы микросхемы.

Подложками микросхем являются тонкие полупроводниковые пластины из кремния ювелирного качества (получают разрезкой цилиндрического кристалла, выращенного на кристалле-затравке, погруженным в ванну с расплавленным кремнием). Круглая кремниевая пластина — исходный материал для многоступенчатого процесса изготовления чипов. Стадиями процесса являются (рис. 1.11):

- 1) окисление паром поверхности пластины (подложки); нанесение на окисленную поверхность пластины фоторезиста;
- 2) нанесение на подложку литографическим способом изображения схемы (используются маски);
- 3) закрепление неэкспонированного фоторезиста химической и термообработкой; удаление экспонированного фоторезиста;
- 4) вытравливание окисленной поверхности микросхемы, которая не была защищена фоторезистом; удаление остатков фоторезиста;
- 5) формирование переходов стока и истока ионами, внедряемыми в протравленные участки;
- 6) литографическое формирование токопроводящих (металлических) контактов.

При изготовлении сложных многослойных структур процесс повторяется необходимое число раз.

К полимерам, используемым в литографии, предъявляется ряд требований: возможность получения с использованием растворов и расплавов тонких, прочных, химически устойчивых

покрытий с хорошей адгезией; высокая чувствительность к энергетическим воздействиям (УФ, электроны, рентген), формирующим временную полимерную маску (фоторезисторность), определяющая продолжительность процесса изготовления ИМС; легкость удаления полимера после проведения литографии.

При литографии УФ-лучами используют поливинилцианоматизопрен (полиизопрен с оптически активными группами NH-CN , $-\text{CH}=\text{CH}-$), полиглицидилметакрилат (с оптически активными эпоксидными группами) и другие.

При электронной литографии используют ПММА, хлорсодержащие полиэпоксиды, полисульфоны, полисилоксаны.

При литографии с использованием рентгеновских лучей используют радиационностойкие полимеры — полиэтилентерефталат *Mylar*, поли-*p*-ксилилен *Parylene*, полиимидхинолин (с шестизвенными гетероциклами с группами NH , CO , N), резисторные полиимиды (в виде лаков — растворов полиамидокислот на основе мономеров с резисторными группами, например, метааминоацетофенона, с фоточувствительностью в 20–100 раз более высокой, чем у обычных полиимидов). Полиимиды широко используются в микро-, оптоэлектронике в качестве защитных и изоляционных слоев различной толщины в производстве полупроводников и ИМС, в том числе на гибкой пленочной подложке (при толщине до 0,04 мкм в ЖК-дисплеях, 1–2 мкм — в диэлектриках многоразовных связей в ИМС, 10–20 мкм — в полупроводниках, 35 мкм — в радиационностойких изоляционных покрытиях и пленках).

При изготовлении гибких микросхем (микропроцессоров) на основе полиимидных пластин и пленок толщиной 4–12 мкм используют реактивное ионное травление с помощью магнетрона с расщепленным катодом с последующим химическим никелированием для получения токопроводящих дорожек. В ряде случаев при дублировании полиимидных пленок обеспечивают аутогезию (прилипание, «сухой» адгезив) обработкой пленок воздушной плазмой высокой частоты (13,6 МГц, 220 Вт, давление плазмообразующего газа — 40 Па, в течение 300 с).

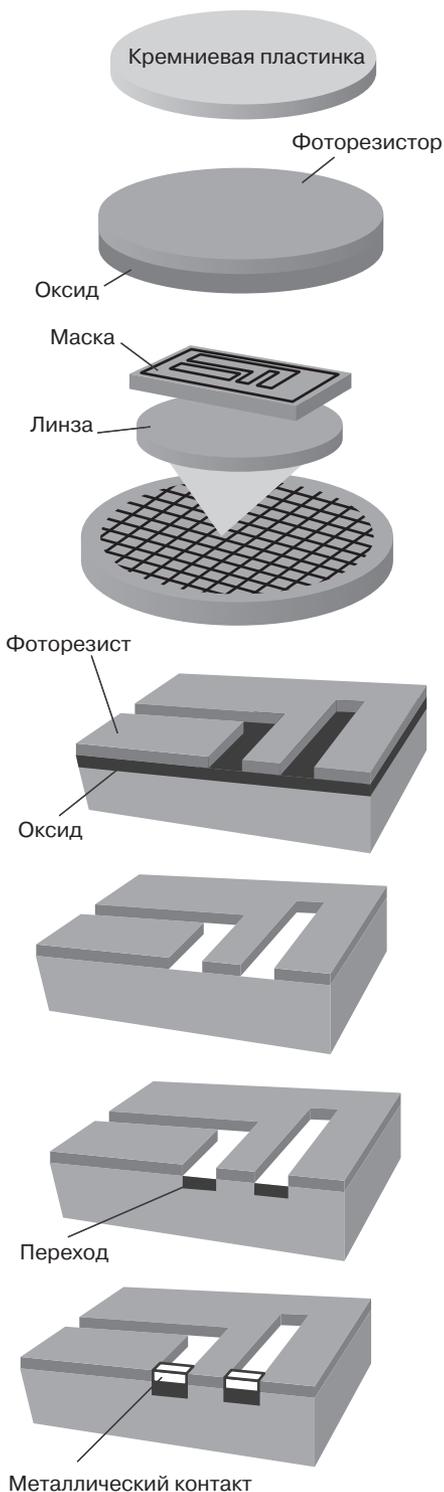
На смену обычной литографии приходит самосборочная литография (см. раздел 1.3).

1.2.4. Материалы и технологии микромеханики

Принципиальное отличие самодиагностирующихся ИМ, в состав которых входят различные микросенсоры и системы передачи и анализа информации (волоконно-оптические, микропроцессорные), от адаптирующихся ИМ (активные конструкции) заключается в том, что адаптирование ИМ осуществляется при помощи конформных исполнительных элементов (актюаторов), использующих для адаптирования конструктивных ИПКМ принципы микромеханики.

Актюаторы — устройства (балочного, биморфная балка, мембранного типа) в микромеханике, преобразующие электрические сигналы в механические перемещения в зависимости от принципа действия подразделяются на тепловые (биластины со слоями материалов с различными КЛТР преобразуют тепловую энергию в механические перемещения, могут работать и в импульсном режиме: переключатели, предохранители, микроконвертеры), электрострикционные (возникновение силы и перемещений под действием приложенного внешнего электрического поля; действие актюаторов мембранного типа основано на изгибе мембраны под действием электрического сигнала, например, мембран из электроактивных полимеров, газовые и жидкостные микроклапаны, микронасосы, микродозаторы), электромагнитные (деформация, изгиб материала актюатора, содержащего магнитные компоненты, полимерные магниты при воздействии электромагнитного поля, наиболее быстродействующие при гигагерцевых частотах).

Термин «актюатор» (*actuator*, англ.; *aktor*, нем.) предложен техническим комитетом *IFTOMM* по стандартизации терминов как синоним часто используемого термина «*end effektor*» (конечное действие). В русской транскрипции эти термины используются в робототехнике, мехатронике наряду со словосочетанием «исполнительный механизм».



1. Поверхность пластины (подложки) окисляют паром

2. На окисленную подложку наносят фоторезист

3. Изображение переносится с маски на подложку литографическим способом

4. Химическая обработка и отжиг (закрепляют неэкспонированный фоторезист). Незакрепленный фоторезист удаляют

5. Незащищенный фоторезистом поверхностный оксидный слой вытравливается химическим способом, затем удаляются остатки фоторезиста

6. Формирование переходов сток–исток внедрением ионов в протравленные участки

7. Литографическое формирование металлических контактов.

Рис. 1.11. Традиционный процесс изготовления микросхем [48]

В конструкционных ИМ в качестве исполнительных механизмов (актюаторов), оптимизирующих конструкционные, демпфирующие свойства изменением собственных колебаний с выведением их на требуемый уровень, используются различные материалы и процессы: металлы с «памятью» формы, полимеры с «памятью» для «залечивания» дефектов, магнитно- и электрореологические жидкости, полиэлектrolитные гели, пьезокерамические материалы, электроактивные полимеры с высокой электромеханической активностью (см. раздел 1.3), термоактивные жидкокристаллические эластомеры.

В ряде узлов и конструкций компонентов ИМ, изделий микромеханики используют различные полимеры (жидкокристаллические, дендримеры и др., см. раздел 1.3).

1.2.4.1. Актюаторы с использованием металлов с «памятью» формы

Каждый металл и сплав имеет свою кристаллическую решетку, архитектура и размеры которой строго заданы. У многих металлов с изменением температуры, давления решетка не остается одной и той же и наступает момент, когда происходит ее перестройка. Такая смена типа кристаллической решетки — полиморфное превращение — может осуществляться двумя способами:

- 1) при высокой температуре за счет диффузии при высокой подвижности атомов;
- 2) при низкой температуре за счет коллективного, согласованного перемещения атомов, что приводит к изменению формы объема сплава (бездиффузионное сдвиговое термоупругое мартенситное превращение с образованием новой кристаллической решетки — мартенсита).

При высокой температуре в аустенитном состоянии сплав имеет кубическую решетку. При охлаждении сплав переходит в мартенситную фазу, в которой ячейки решетки становятся скошенными параллелепипедами. При нагреве аустенитная фаза восстанавливается, и в ней восстанавливается первоначальная форма изделия из сплава с памятью формы.

Мартенситное превращение — один из фундаментальных способов перестройки кристаллической решетки в отсутствие диффузии, характерный для сталей, чистых металлов, цветных сплавов, полупроводников, полимеров.

Эффект памяти — восстановление первоначальной формы и размеров кристаллов после их изменения при деформировании в результате термоупругого мартенситного превращения при термообработке по определенному режиму.

Изменение формы — главная особенность мартенситного превращения, с которой связан эффект памяти сплавов, условие необходимое, но недостаточное для проявления памяти.

Свободная энергия кристаллов мартенсита меньше, чем исходной фазы, что стимулирует развитие мартенситного перехода. Переход тормозится из-за возникновения границы раздела старой и новой фаз и повышения свободной энергии. Растущие кристаллы мартенситной фазы деформируют окружающий объем, который сопротивляется этому. Возникает упругая энергия, препятствующая дальнейшему росту кристаллов. Когда эта энергия превышает предел упругости, происходит интенсивная деформация материала в окрестности границы раздела фаз и рост кристаллов прекращается. В сталях процесс проходит практически мгновенно (отдельные кристаллы мартенсита вырастают до конечных размеров).

Обратный переход мартенсита в аустенит (высокотемпературная фаза, бездиффузионная сдвиговая перестройка решетки затруднена) идет при высоких температурах, когда в мартенсите растут кристаллы аустенита без перехода к исходной форме (атомы не попадают на свои прежние места).

В сплавах с памятью при охлаждении мартенситные кристаллы растут медленно, при нагреве исчезают постепенно, что обеспечивает динамическое равновесие границы раздела между ними и исходной фазы. Граница между фазами ведет себя аналогично, если охлаждение и нагрев заменить соответственно приложением и снятием нагрузки — термоупругое равновесие фаз в твердом теле.

Термоупругое мартенситное превращение сопровождается обратимым изменением формы кристаллов аустенита, что, в основном, обеспечивает память металлов.

Прямым следствием термоупругого мартенситного превращения является обратимое изменение формы твердого тела в результате периодического охлаждения и нагрева (тепловой двигатель). Металлы с памятью (например, нитинол), «вспоминают» свою первоначальную форму при нагреве после предварительного деформирования образца [45, 51].

К концу 1960-х гг. сформировалась область физических исследований и технических применений эффекта памяти формы в сплавах.

Существуют сотни сплавов с мартенситным превращением, но число сплавов, где эффект памяти формы имеет практическое значение, незначительно. Коллективное перемещение атомов в определенном направлении, сопровождающееся самопроизвольной (мартенситной) деформацией материала (перестройка решетки), при которой соседство и межатомные связи атомов не нарушаются (сохраняется возможность вернуться на прежние позиции, к исходной форме), проходит только при определенных условиях. Память отдельного кристалла — это еще не память всего объема сплава, который обычно имеет поликристаллическое строение.

Отдельные кристаллиты (зерна) отличаются ориентацией кристаллических решеток. Сдвиг атомов при мартенситном превращении происходит в решетке по определенным плоскостям и направлениям. Из-за различной ориентации зерен сдвиги в каждом зерне проходят в различных направлениях и, несмотря на значительную деформацию отдельных кристаллов, образец в целом не испытывает заметного изменения формы. Оно происходит в том случае, если кристаллы ориентированы в одном направлении. Управляющей силой, которая при мартенситном превращении организует преимущественную организацию кристаллов, является внешняя нагрузка.

При мартенситном превращении атомы перемещаются в направлении действия внешней нагрузки (образец в целом испытывает деформацию). Процесс развивается до тех пор, пока весь материал не продеформируется в направлении действия силы без разрыва межатомных связей и нарушения соседства атомов. При нагреве они возвращаются на исходные позиции, восстанавливая первоначальную форму всего объема материала.

Эффект памяти основан на термоупругом равновесии фаз и управляющем действии нагрузки. Специальная термомеханическая обработка сплавов создает в материале микронапряжения, действия которых при мартенситных переходах аналогично действию внешней нагрузки. При охлаждении сплав самопроизвольно принимает одну форму, при нагреве — возвращается к исходной (пластина сворачивается в кольцо при охлаждении, при нагреве — разворачивается и наоборот).

Материалы с памятью формы могут проявлять сверхпластичность (значительные деформации, когда мартенситное превращение вызывается приложением внешней нагрузки, а не охлаждением, что используется при создании пружинных амортизаторов, аккумуляторов механической энергии), имеют высокую циклическую прочность (не происходит накопления дефектов структуры) и высокую способность рассеивать механическую энергию (при мартенситных превращениях перестройка кристаллической решетки сопровождается выделением или поглощением тепла, если внешняя нагрузка вызывает мартенситное превращение, то механическая энергия переходит в тепловую; при эффектах памяти наблюдается и процесс превращения тепла в работу).

Изменение формы (при периодическом изменении температуры) металлов с памятью сопровождается проявлением мощных межатомных сил. Давление при расширении материалов такого типа достигает 7 т/см^2 . В зависимости от вида материала изделия различного размера и конфигурации сгибаются, расширяются, извиваются (форму можно программировать).

К металлам с памятью формы относятся сплавы нитинол, нитинол-55 (с железом), никелид титана ВТН-27, сплавы титана ВТ-16, ВТ23 (термообработка по специальному режиму, в 2–3 раза дешевле и в 1,5 раза легче никелида титана), сплав на основе титана с 28–34% марганца и 5–7% кремния, терфенол (магнитострикционный сплав, гасит колебания при низкочастотных вибрациях).

Сплавы на основе марганца имеют температурный интервал максимальной термочувствительности при 20–40 °С и восстанавливают заданную форму в интервале температур от –100 до 180 °С.

Методом порошковой металлургии получены (*Fukuda Metal Co.*) сплавы системы Cu–Zn–Al с эффектом памяти формы спеканием (700 МПа, 900 °С, 0,1 %масс. фторида алюминия) порошков сплавов Cu–Zn (70:30), Cu–Al (50:50) и меди (размер зерен 20–100 мкм). Сплав восстанавливает форму после растяжения на 10%.

При охлаждении сплав переходит в мартенситную фазу, в которой благодаря изменившимся геометрическим параметрам ячеек кристаллической решетки становится пластичным и при механическом воздействии изделие из сплава с «памятью» (нитинола и др.) можно придать практически любую конфигурацию, которая будет сохраняться до тех пор, пока температура не превысит критическую, при которой мартенситная фаза становится энергетически невыгодной, сплав переходит в аустенитную фазу с восстановлением исходной формы изделия. Однако деформации не должны превышать 7–8%, иначе форма полностью не восстановится.

Разработаны нитиноловые сплавы, которые помнят одновременно форму изделий, соответствующих высоким и низким температурам. Эффект памяти в нитиноловых сплавах четко выражен, причем диапазон температур можно точно регулировать в интервале от нескольких градусов до десятков градусов, вводя в сплавы модифицирующие элементы, однако запас цикличности, количество управляемых деформаций (итераций) не превышает 2000, после чего сплавы утрачивают свои свойства.

Токопроводящие волокна, сформированные из филаментов диаметром 50 мкм сплавов с наночастицами титана и никеля, изменяют длину на 12–13% в течение 5 млн итераций и используются в искусственных мышцах. Наномускул (*Nano Muscle Actuator*, фирма *Nano Muscle*, США, *Johnson Electric*, КНР, 2003 г.) развивает мощность в тысячу раз больше, чем человеческие мышцы и в 4000 раз больше, чем электродвигатель, при скорости срабатывания 0,1 с с плавным переходом из одного состояния в другое с заданной скоростью (микропроцессорное управление).

Разработаны материалы с магнитомеханической памятью (магнитоупругий мартенситный переход стимулируется магнитным полем непосредственно или в сочетании с температурой и нагрузкой) и электромеханической памятью (мартенситное превращение сопровождается качественным изменением свойств, переходы проводник–полупроводник, парамагнетик–ферромагнетик), что перспективно для создания актюаторов ИМ радиотехнического назначения для снижения радиолокационной заметности (см. главу 2).

1.2.4.2. Актюаторы на основе пьезокерамики

В случае пьезокерамики при подаче электрического напряжения на пьезокристалл он деформируется, если его деформировать – он электризуется.

Пьезокерамические диски из Zr–Ti–Pb под электрическим напряжением сжимаются или расширяются на доли процента.

Использование в качестве актюаторов в силовых элементах исполнительных механизмов ИМ пьезодвигателей, обеспечивающих микро- и наноперемещения, основано на высокой электромеханической активности пьезокерамики.

Пьезодвигатели работают на основе обратного пьезоэффекта, при котором эффект перемещения достигается за счет деформации пьезоэлемента при приложении внешнего электрического напряжения. Деформация исполнительного пьезоэлемента пьезодвигателя соответствует его напряженному состоянию.

Активным элементом (АЭ) пьезоэлектрических исполнительных устройств являются пьезоэлектрические электромеханические резонансные (частота электрических управляющих сигналов совпадает с частотой собственных механических колебаний пьезоэлектрического активного элемента) и нерезонансные АЭ.

На основе резонансных электромеханических преобразователей разработаны вибродвигатели с упругим элементом, элементами передачи движения (при подключении напряжения в пьезоэлектрическом элементе возбуждаются колебания типа бегущей волны, сообщающие поверхности пьезоэлемента продольно-поперечные деформации, вызывающие радиальные колебания и движения); линейного перемещения; с фазовым управлением (при сдвиге фаз изменяется амплитуда колебаний и скорость вращения); с линейным регулированием скорости вращения (использование сегнетоэлектрических материалов с размытым фазовым переходом).

На основе нерезонансных электромагнитных преобразователей разработаны монолитные устройства микроперемещений (используется поперечный пьезоэлектрический эффект для автоматического микропозиционирования в адаптивной оптике, растровых микроскопах); с крестообразным поперечным сечением (поперечный пьезоэффект приводит к продольной деформации, изгиб обеспечивает перемещение рабочего органа по трем координатам; управление в туннельных атомно-силовых микроскопах); трехкоординатные исполнительные устройства; многослойные двигатели с высокой частотой собственных колебаний.

Пьезопроводы на основе пьезоэлектрических двигателей отличаются высокой точностью, малыми габаритами, простотой конструкции и управления, широким рабочим температурным диапазоном.

Использование пьезопровода нано- и микроперемещений перспективно в точных электромеханических системах оборудования нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектроники, электронной микроскопии, астрономии и адаптивной оптики для позиционирования и совмещения.

Для создания высокоточных приводов малых перемещений, кроме использования электромагнитных, магнитострикционных (изменение длины стержня из пьезомагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля), пьезоэлектрических (использование обратного пьезоэффекта), разрабатываются микроактюаторы на основе лазерных технологий. Лазерный луч из оптоволоконна нагревает исполнительный механизм, который осуществляет силовое воздействие, линейные и угловые перемещения.

При локальном нагревании некоторой области снижается предел текучести (в результате чего пластические деформации возникают при существенно меньших напряжениях). Под действием возникших в результате неравномерного нагрева напряжений сжатия среда деформируется, напряжения частично релаксируют. После окончания импульса, в процессе остывания, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в напряженном состоянии.

Альтернативой актюаторов (микроэлектродвигателей) на основе пьезокерамики являются актюаторы на основе электроактивных полимеров (ЭАП) и материалов (ЭАМ) (см. раздел 1.3.1.2). В качестве актюаторов перспективно использование жидкокристаллических эластомеров на основе кремний-органических каучуков (модифицированных полидиметилсилоксанов, *FULCE, Functional Liquid Crystalline Elastomers*), которые изменяют свои размеры при нагреве благодаря структурным изменениям (переходам из нематического состояния в изотропное) [133] (см. раздел 1.3.1.3).

Термочувствительные ВПКМ (см. раздел 1.2.1) можно использовать не только в качестве датчиков температуры, но и в качестве механических актюаторов, так как состав и структура таких ВПКМ влияют на величину и направленность деформаций.

Оптически активные полимеры изменяют свою форму под воздействием света с определенной длиной волны. Например, при использовании в медицине нитей из полимеров после освещения с использованием оптоволоконного зонда, они преобразуются в спираль, которая препятствует сужению кровеносного сосуда (действия, аналогичные зонду из металла с памятью, *MTI, США, НИЦ GKSS, Германия*).

Фоточувствительные полимеры под воздействием УФ принимают и сохраняют различные формы (пленка, трубка, спираль), при воздействии излучением с другой длиной волны — возвращаются к исходной форме (полимеры с памятью) [129].

Магнитострикционные магнитомягкие материалы изменяют размеры и форму при намагничивании, что используют не только при разработке сенсоров (см. раздел 1.2.1), но и микродвигателей.

1.2.4.3. Технологии изготовления изделий микромеханики

Разработка ИМ предполагает широкое использование компонентов, обеспечивающих диагностирование и адаптацию в микроминиатюрном исполнении. Аналогичные проблемы имеют место и при разработке различных технических устройств, в которых используются микросхемы. При создании микросхем часто ставится задача объединения в них функций высокочувствительных сенсоров, исполнительных механизмов (наиболее сложное звено микросистемной техники), линий связи, микроэлектроники (микропроцессоры, интегральные микроизделия, микроизделия с интегрированными элементами микроэлектроники). Объем продаж микросистемной техники в 2005 г. составил 68 млрд долл (2010 г., прогноз, 200 млрд долл) [115].

Разработка ИМ потребовала миниатюризации элементов, встраиваемых в их структуру (сенсоров, актуаторов, микропроцессоров, микродеталей вспомогательного назначения, конструкций ввода, вывода оптических волокон, токопроводов).

Важнейшую роль в производстве микроизделий играют полимерные материалы, прежде всего, на основе термопластов, а основным технологическим процессом производства элементов микросистем из термопластов является литье под давлением (микролитье), для которого разработано оборудование и требуемая оснастка (литьевые формы). Микролитье обеспечивает экономичность серийного производства микроизделий высокого качества, а автоматизация процесса позволяет изготавливать изделия, размеры которых выходят за пределы восприятия сенсорики человека: макроскопические детали с микроскопической структурой (если размеры изделия по двум направлениям составляют менее 0,1 мкм, его принято называть наноизделием), изделия массой около 1 г, прецизионные участки которых имеют микронные размеры; изделия, масса которых измеряется миллиграммами; изделия, допуски на размеры которых лежат в пределах микрометров.

Микролитьем изготавливают микроизделия из полимерных материалов (на основе биоразлагаемых полимеров для использования в медицине, полиформальдегида, жидкокристаллических термопластов с низкой вязкостью расплавов, термоустойчивого ПЭЭК [138] и других), микролитьем изготавливают микроизделия из керамических и металлических (технология *MIM, Metal Injection Molding*) порошков.

Для производства микроизделий разработаны термопластавтоматы с минимальным объемом впрыска и соответствующие литьевые формы, формообразующие элементы которых могут быть меньше толщины человеческого волоса.

Микроизделия, изготавливаемые микролитьем, используют в медицине (микродатчики, микронасосы, хирургический инструмент, зажимы, перекрывающие сосуды), в оптике (линзы), в средствах связи (штепсельные разъемы, межсоединительные устройства *SIM*-карт, *MID*-штекеров), в механике (детали часовых механизмов, корпуса сенсоров) (рис. 1.12).

Размерная точность литьевого микроизделия из ПМ определяется соответствующей точностью литьевой формы и технологическими процессами ее изготовления (микрофрезерование алмазным и твердосплавным инструментом, микрофрезами диаметром до 0,05 мм, электроэрозионная, лазерная обработка, литография, гальванотехника), обеспечивающими отклонение профиля микрорельефа поверхности 0,04–1,3 мкм с достижимым радиусом скругления 5–100 мкм и отсутствие грата.

Микролитьевые формы снабжены прецизионными направляющими для центрирования, «плавающими» вставками, каналами круглого сечения для вакуумирования оформляющей полости, системой гибкого термостатирования. Термопластавтоматы (электроприводные) для микролитья изделий с минимальной массой и высокой размерной точностью используют комбинации шнекового (диаметр шнека до 12 мм) узла пластикации и плунжерного (диаметр

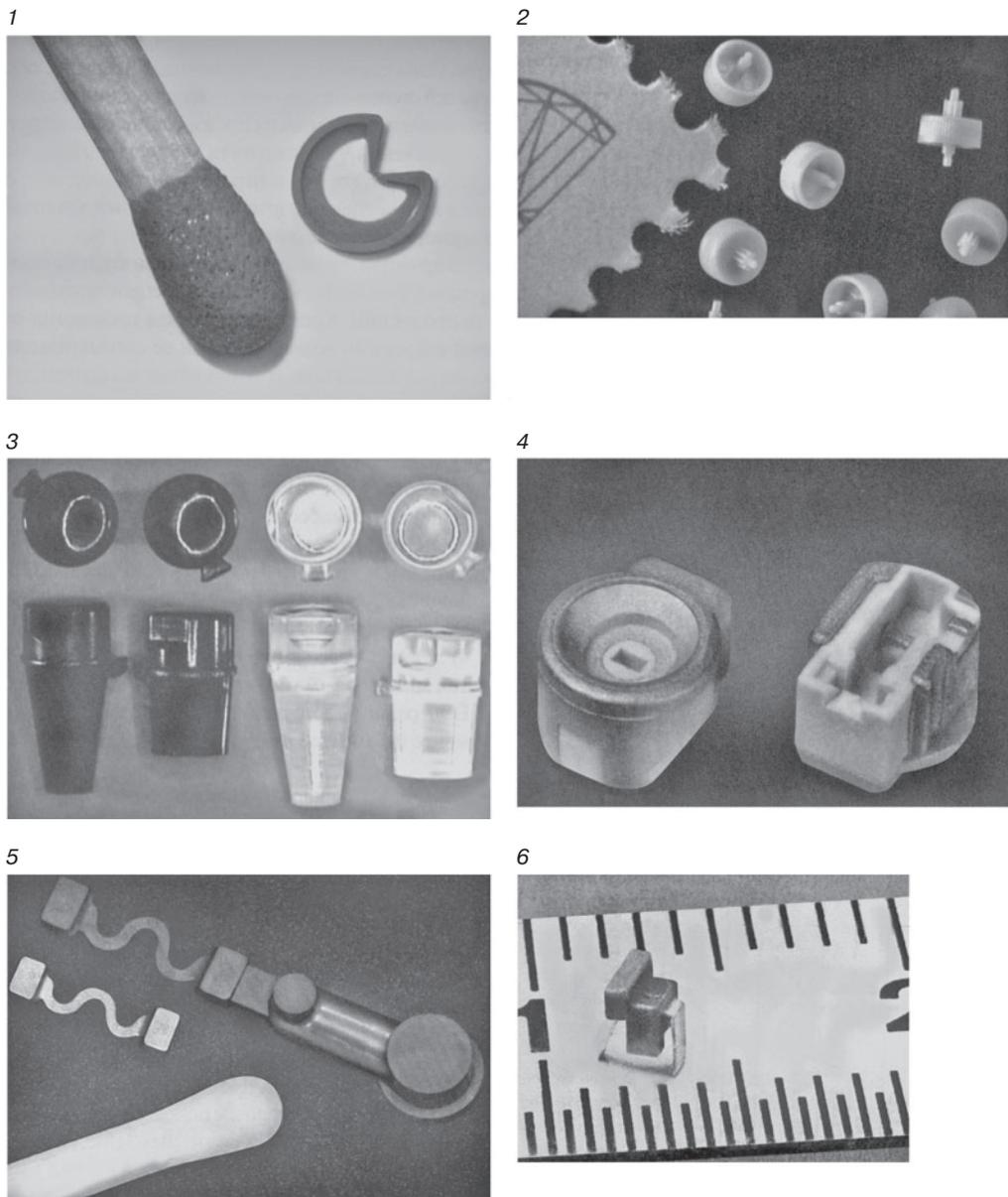


Рис. 1.12. Микроизделия, изготовленные микролитьем [116]:

1 — имплантанный зажим из биоразлагаемого полимера (цикл литья 5 с); 2 — часовые шестеренки из полиформальдегида (объем $0,00042 \text{ см}^3$); 3 — линзы из поликарбоната для мобильных телефонов (объем $0,053\text{--}0,058 \text{ см}^3$); 4 — штепсельные микроразъемы антенны из ЖКП типа *Vectra* (двухкомпонентное микролитье, объем около $0,051 \text{ см}^3$); 5 — заготовка, изготовленная микролитьем (вверху) и металлическая деталь (объем $0,01 \text{ см}^3$) после спекания; 6 — штекер объемом 4 мм^3 из полиэфирэфиркетона *Victrix PEEK 150GL30* [138]

плунжера 5–12 мм) узла впрыска (доза менее 0,2 г) с загрузочными бункерами, обеспечивающими возможность использования гранул ПМ стандартных размеров [116, 117].

Микроизделия многофункционального назначения требуют надежного соединения в одной системе различных микроэлементов — сенсоров, актюаторов, микропроцессоров и др. Традиционные методы сборки — склеивание и пайка достаточно трудоемки и не гарантируют требуемой герметичности. Микрولитье, при котором расплав полимерного материала соединяет микроэлементы интегральных микросистем, наиболее эффективно решает проблемы их сборки и герметизации (рис. 1.13).

Традиционные технологии изготовления микродеталей имеют жесткий предел мелкости, определяемый размером обрабатывающего инструмента.

Основными методами микротехнологии изготовления изделий микромеханики являются фотолитография, лазерная стереолитография (*SL*-технология), масочная стереолитография,

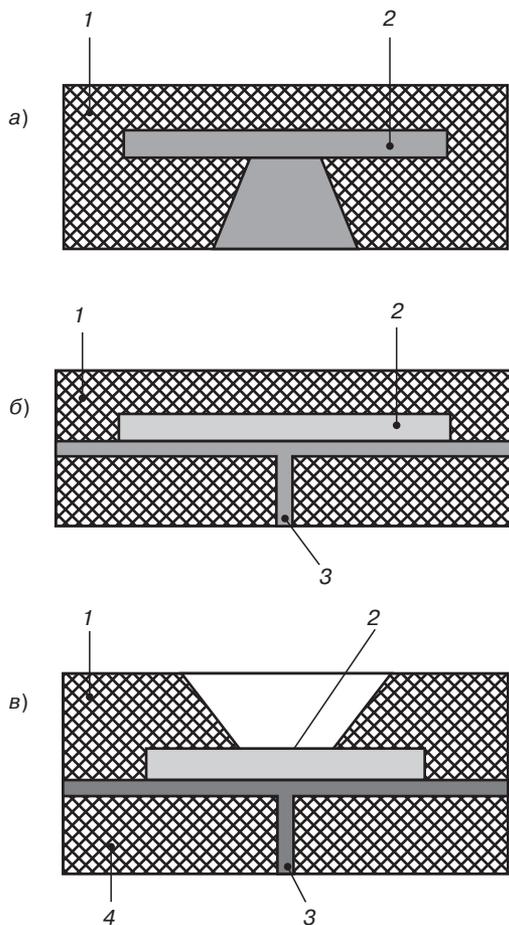


Рис. 1.13. Типы интегральных литевых микроизделий с интегрированными элементами (2) микроэлектроники [117]:

а) на основе однокомпонентных ПМ (1);

б) на основе однокомпонентного ПМ, сенсор 2 контактирует с контролируемой средой 3;

в) на основе двухкомпонентных ПМ (тип 1 и 4), сенсор 2 контактирует с контролируемой средой 3

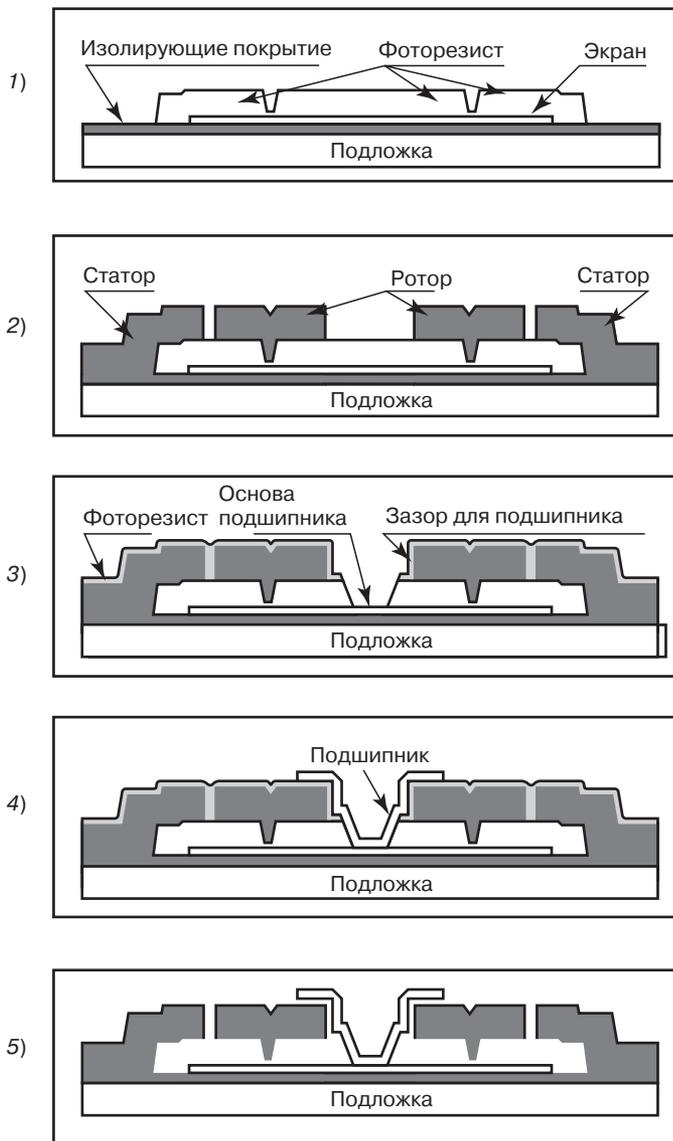


Рис. 1.14. Технологический процесс производства микромотора методом фотолитографии [54]:
 1) формирование основы статора; нанесение на подложку экранирующих, изолирующих и фоторезисторных слоев (фоточувствительный полимер);
 2) формирование статора и ротора;
 3) нанесение фоторезиста, оформление основы подшипника и зазора;
 4) формирование подшипника;
 5) удаление фоторезиста. Готовое изделие в собранном виде с подвижным ротором и подшипником

селективное лазерное спекание порошков, лазерный раскрой пленочных материалов (*LOM*-технология, наложение пленок с обработкой по контуру), послойное экструдирование расплавов.

Фотолитографический процесс изготовления изделия (рис. 1.14) состоит из десятков операций, продолжителен и только благодаря обработке одновременно сотен вейферов (пластины с фоточувствительным покрытием) с тысячами изделий (например, шестеренок) экономически приемлем. Сборка всей механики происходит непосредственно во время процесса изготовления, и так же, как и при изготовлении микропроцессоров (современные микромашины, например моторы диаметром 100 мкм, шестеренки толщиной 1 мкм, изготавливаются на тех же заводах, где делают электронные и оптоэлектронные микросхемы, рис. 1.11) детали микромеханизмов наращивают послойно, скрепляя между собой тонкими перемычками из SiO_2 . После изготовления всех шестеренок, закрепление осей из системы удаляется фоторезист и двигатель готов к работе. Для уменьшения трения проводят ионное легирование поверхностных слоев микродеталей. Микромеханика, используя разработанную для микроэлектроники технологию, поставляет компоненты для микропроцессорных устройств (интегрированные в микрочипы микрофоны, миниатюрные динамики сотовых телефонов).

При изготовлении объемных микроконструкций широко используются фотоотверждаемые полимеры (эпоксидные, уретановые, ненасыщенные олигоэфир). Формирование твердой основы механизма проходит при сканировании объема полимера сфокусированным лазерным лучом (стереолитография). *Лазерная стереолитография (SL-технология, с 1970 г.)* позволяет быстро и точно изготавливать микродетали, объемные микроконструкции любой степени сложности. В России освоение стереолитографии связано с отработкой дизайна новых изделий (создание функциональных прототипов), оперативного изготовления мастер-моделей формообразующих элементов оснастки методом послойного синтеза конструкторских прототипов в автомобильной промышленности (инженерно-технический центр лазерной стереолитографии АО «НИИТАвтопром»), технологическое оборудование фирмы *3D Systems*, США, программное обеспечение *CAD/CAM*-систем). В технологии стереолитографии осуществляют трехмерное компьютерное проектирование с использованием *CAD*-данных любых *CAD/CAM* пакетов. В процессе обработки *CAD*-файла изделие программно представляется в виде набора тонких слоев толщиной 50–150 мкм (точность размеров деталей 0,08–0,1 мм).

Метод лазерной стереолитографии (рис. 1.15) заключается в последовательном отверждении тонких слоев жидких (вязкость при 30 °С 160–2400 сПз) фоточувствительных полимерных

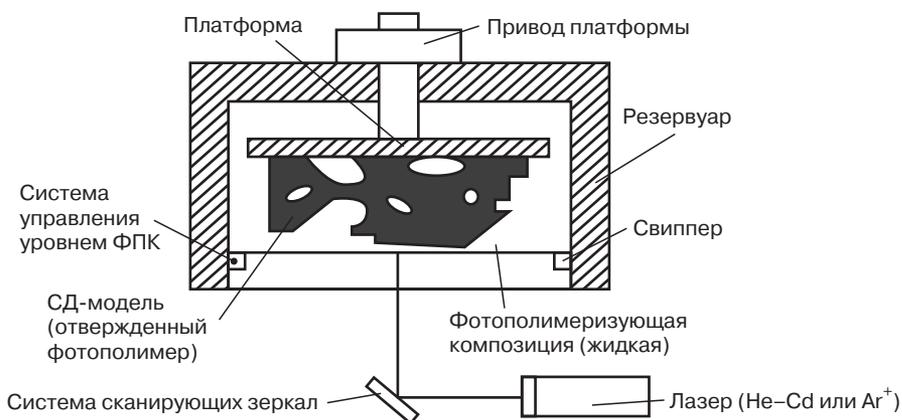


Рис. 1.15. Схема процесса изготовления изделий микромеханики, микроэлектроники, модельных изделий методом лазерной стереолитографии [55]

композиций (ЖФПК на основе уретан-акрилатных, эпоксидных, винилэфирных реактопластов; фирма *Ciba-Geigy Cibatoool SL* использует акрилатные 5081, 5131; уретан-акрилатные 5143, 5149, 5154, 5177, свободно-радикальная фотополимеризация; эпоксидные 5170, 5180, катионно-цепная фотополимеризация; фирма *DuPont SOMOS Photopolymer* акрилатные 2100, 2110, 3100, 3110, свободно-радикальная фотополимеризация; фирма *Allied Signal Exactomer* винилэфирные 2201, 2202SF, катионноцепная фотополимеризация) композиции под воздействием лазерного излучения (УФ-лазеры, гелий-кадмиевый, длина волны 325 нм, аргоновый ионный, длина волны 351 нм) на *SLA*-установках (*SLA*-1902, 250, 400, 500, диаметр пятна лазерного луча D_p 0,120–0,265 мм, энергия излучения E_p 2,5–27 мДж/см²).

Скорость и точность формирования слоев, их толщина определяется составом композиций, техническими возможностями *SLA*-установок.

Формирование изделия осуществляется путем послойной фотополимеризации ЖФПК (σ^+ отвержденных фотополимеров 20–70 МПа, E^+ 840–3900 МПа, ϵ^+ 2,5–46%, a_k 3,3–156 кДж/м², плотность 1,12–1,22 г/см³. Микроизделия из ЭП 5170 и ЭП 5180 имеют высокую точность размеров и оптическую прозрачность). Движение лазерного луча управляется программой компьютера. Двумерная форма каждого слоя соответствует конфигурации поперечного сечения детали, предварительно спроектированной в трехмерной *CAD/CAM*-системе (одна из разновидностей САПР). Производительность процесса возрастает вместе с ростом мощности излучения, увеличением быстродействия системы сканирования лучом, по мере повышения фоточувствительности и светопрозрачности ЖФПК. Достоинством метода является возможность быстрого изготовления деталей практически неограниченной конструктивной сложности. Например, изготовлена микроцепь из 50 звеньев толщиной 50 мкм, гибкое сочленение которой позволяет передавать усилие микродвигателя в требуемое место [54].

Технология допускает полную автоматизацию процесса, однако, в отличие от фотолиграфии, невозможно одновременное изготовление большого числа микромеханизмов. Расширяется круг обрабатываемых материалов и достигается меньший размер (до нанометров) готовых изделий при использовании мощных ионных пучков (например, протонов).

Масочная стереолитография позволяет изготавливать объемные микроизделия при использовании для полимеризации каждого слоя детали индивидуальной маски, через которую ЖФПК освещается некогерентным источником электромагнитного излучения (УФ, ртутная лампа). Каждая маска соответствует определенному поперечному сечению изделия и является для него негативом в УФ-диапазоне. Для изготовления масок-шаблонов используют управляющие компьютерные системы, с помощью которых формируется математическая модель изделия с расчленением на слои. Для каждого слоя имеется управляющая программа его изготовления (метод выжигания) на прозрачной для УФ пленке. Фотошаблоны поочередно вводятся в поток УФ параллельно поверхности ЖФПК и в результате ее послойной фотополимеризации осуществляется формообразование объемного микроизделия.

Метод селективного лазерного спекания порошков используется для изготовления микроизделий из полимерных, металлических, керамических материалов. Объем изделия формируется из тонких слоев порошков (например, полиамида ПА 12, ПЭЭК тип *PEEK PF150* [139]), спекаемых CO_2 -лазером в соответствии с управляющей программой.

Послойная технология получения изделий из тонколистových заготовок, струйный метод последовательного формирования слоев из термопластов (расплавы экструдируются на платформу для получения объемного изделия) обычно используют для быстрого производства конструкторских прототипов и микроизделий.

1.3 Материалы и технологии изготовления компонентов ИПМ молекулярного уровня (нанокомпонентов ИПМ)

Совершенствование компонентов ИПМ достигается использованием нанотехнологий и использованием полимеров, структура которых обеспечивает проявление специфических свойств и нанотехнологий.

1.3.1. Полимеры для производства нанокомпонентов ИПМ

Полимеры находят применение не только в технологических процессах изготовления компонентов ИМ, но и являются материалами компонентов ИМ молекулярного (нано) уровня. Для их создания используют электропроводящие, пьезоэлектрические (электроактивные), жидкокристаллические, дендримерные полимеры.

1.3.1.1. Электропроводящие полимеры с «внутренней» (собственной) электропроводимостью

Электропроводность — способность веществ проводить электрический ток под действием внешнего электрического поля. Количественно электропроводность вещества оценивается его удельной объемной проводимостью γ , являющейся коэффициентом пропорциональности между напряженностью электрического поля E и соответствующей плотностью тока: $j = \gamma \cdot E$. Величина ρ_v , обратная электропроводности, — удельное объемное сопротивление. В системе СИ, измеряя E в В/м, j в А/м², получают единицу удельного сопротивления Ом·м для ρ_v , Ом⁻¹·м⁻¹ для γ .

Электропроводность различных веществ, встречающихся в природе и получаемых искусственно, колеблется весьма значительно. У твердых тел нет ни одной другой физической характеристики, которая бы менялась в столь широких пределах.

Для хорошо проводящих материалов (серебро, медь, алюминий) γ достигает значений порядка 10^8 Ом⁻¹·м⁻¹, для высококачественных изоляционных материалов — γ 10^{-14} – 10^{-16} Ом⁻¹·м⁻¹.

Вещества, электропроводность которых при 20 °С ниже 10^{-6} Ом⁻¹·м⁻¹, обычно относят к электроизолирующим материалам, а с электропроводностью выше 10^5 Ом⁻¹·м⁻¹ к проводящим материалам. Полупроводники с 10^5 Ом⁻¹·м⁻¹ < γ < 10^4 Ом⁻¹·м⁻¹ занимают промежуточное положение.

Электрическая проводимость полимеров — способность полимеров пропускать электрический ток при приложении электрического напряжения. Количественно электропроводность определяется удельной дифференциальной проводимостью $\gamma = dj / dE$, где j — плотность тока, текущего через образец, E — напряженность постоянного электрического поля. Обратная величина $\rho = 1 / \gamma$ называется удельным дифференциальным электрическим сопротивлением. При выполнении закона Ома $\gamma = j / E$.

В диэлектриках после приложения к образцу постоянной разности потенциалов U плотность тока уменьшается со временем τ вследствие установления в образце диэлектрической поляризации, а также приэлектродной поляризации, обусловленной затруднениями при переходе зарядов через поверхность раздела электрод—диэлектрик. В полимерных диэлектриках возникающая при этом обратная разность потенциалов одного порядка с U . Поэтому при расчете γ нужно учитывать, что на носители зарядов действует поле напряженности $E = (U - p) / h$, где h — толщина образца. Это выражение справедливо, если p целиком обусловлена скоплением объемных зарядов в приэлектродных областях; при этом распределение потенциала по толщине нелинейно.

Согласно стандартам, γ определяют по формуле $\gamma = j / E$, то есть без учета p , причем измерение обычно производят через 10^2 – 10 с после приложения к образцу разности потенциалов.

Таблица 1.2. Электрическая проводимость некоторых полимеров [140]

| Полимер | Удельная электрическая проводимость γ | |
|-----------------------|--|--|
| | γ_v объемная (20 °С) (См/м, S/см) | γ_s поверхностная (20 °С, влажность 40–60%) Ом ⁻¹ (См, S) |
| Поливинилиденфторид | $10^{-11}–10^{-13}$ | $10^{-12}–10^{-13}$ |
| Поливинилхлорид | $10^{-12}–10^{-14}$ | $10^{-12}–10^{-13}$ |
| Полиэтилентерефталат | $10^{-13}–10^{-14}$ | $10^{-14}–10^{-15}$ |
| Поликарбонаты | $10^{-13}–10^{-14}$ | $10^{-14}–10^{-16}$ |
| Полиэтилены | $10^{-14}–10^{-15}$ | $10^{-16}–10^{-17}$ |
| Полипропилен | $10^{-14}–10^{-15}$ | $10^{-16}–10^{-17}$ |
| Политрифторхлорэтилен | $10^{-14}–10^{-15}$ | $10^{-16}–10^{-17}$ |
| Полистирол | $10^{-14}–10^{-16}$ | $10^{-16}–10^{-17}$ |
| Политетрафторэтилен | $10^{-15}–10^{-16}$ | $10^{-16}–10^{-17}$ |

В лабораторных исследованиях часто используют остаточную электрическую проводимость ($\gamma_{ост}$), рассчитываемую по стационарному значению j , которое устанавливается спустя $1–10^5$ с после приложения напряжения.

Различают удельную объемную и удельную поверхностную электрическую проводимость. Последняя существенно зависит от состояния поверхности полимера, влажности окружающей атмосферы и других факторов. В анизотропных полимерных материалах (например, ориентированных пленках) электрическая проводимость не одинакова для различных направлений в образце, и γ — тензор второго ранга. В этом случае вектор j может не совпадать по направлению с напряженностью внешнего электрического поля.

В системе единиц СИ удельная объемная электрическая проводимость выражается в S/см, См/м ($1 \text{ См/м} = 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$), удельная поверхностная электрическая проводимость — в См ($1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$). Проводимость полимеров лежит в области между электропроводностью классических электроизоляторов (γ стекла $10^{-12} \text{ S/см} = 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) и проводников (γ меди $10^5 \text{ S/см} = 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). В табл. 1.2 приведены значения объемной и поверхностной электрической проводимости для некоторых полимеров.

Перенос электрических зарядов в полимерах, как и в низкомолекулярных телах, осуществляется ионами, заряженными ассоциатами макромолекул или отдельными макромолекулами в растворе (молионами), а также свободными и слабосвязанными электронами. Суммарная электрическая проводимость определяется концентрацией n_i , зарядом g_i и подвижностью χ_i всех видов носителей:

$$\gamma = \sum_i n_i g_i \chi_i .$$

В соответствии с физической природой носителей зарядов различают ионную, молионную (электрофоретическую) и электронную проводимости. Ионная проводимость и обычных условий характерна для растворов полимерных диэлектриков, полиэлектролитов, а также для стеклообразных полимерных диэлектриков. В ряде случаев такая проводимость наблюдается в полупроводниках полимерных и в электропроводящих полимерных материалах, что обуславливает нежелательное изменение их свойств при длительном прохождении электрического тока. Ионный характер электрической проводимости полимерных диэлектриков, макромолекулы которых не содержат сопряженных связей, подтверждается обнаруженным экспериментально переносом вещества при прохождении электрического тока (в пленках нитроцеллюлозы, пластифицированного поливинилхлорида, полиамидов). Косвенное свидетельство ионного характера электрической проводимости — возможность электроочистки некоторых полимеров, например, политрифторхлорэтилена, от примесных ионов.

Присутствие ионов в полимерах обусловлено электролитической диссоциацией ионогенных участков макромолекул, наличием примесей, а также инъекцией (холодной эмиссией) ионов в полимер из электродов. Многие полимеры характеризуются низкими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon < 10$). В таких системах вследствие электростатического взаимодействия ионы связаны в ионные пары, не имеющие электрического заряда. Поэтому при прочих равных условиях увеличение ϵ (например, при переходе от неполярных полимеров к полярным) приводит к экспоненциальному росту степени диссоциации и ионной проводимости полимера. Значение ϵ , как и время релаксации дипольной поляризации, определяющее $\gamma_{\text{ост}}$, зависит от строения макромолекул и структуры полимера. Все факторы, приводящие к уменьшению подвижности макромолекул (например, отверждение реактопласта) и к падению ϵ , способствуют уменьшению ионной проводимости. Экспоненциальное уменьшение ионной проводимости наблюдается с ростом степени кристалличности полимеров. Электрическая

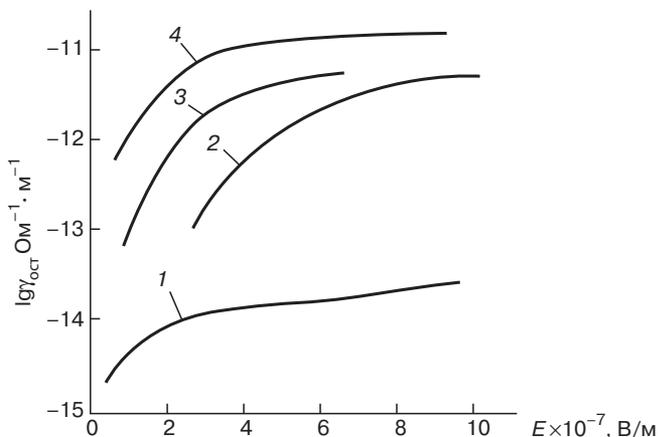


Рис. 1.16. Зависимость электрической проводимости $\gamma_{\text{ост}}$ от напряженности E электрического поля [140, 141]: 1 – полистирол, 353 К; 2 – полипропилен; 348 К; 3 – полиэтилен высокой плотности, 383 К; 4 – политетрафторэтилен, 403 К

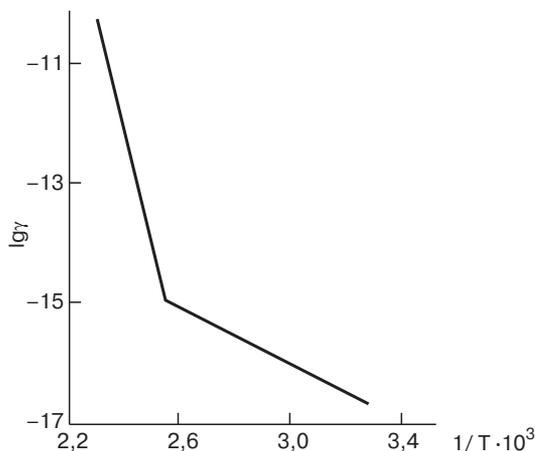


Рис. 1.17. Зависимость электрической проводимости γ от температуры T для сополимера стирола с α -метилстиролом (70:30) [140, 141]

проводимость полимерных диэлектриков существенно зависит от напряженности электрического поля (рис. 1.16). С ростом температуры γ возрастает, причем в области T_c на кривых $\lg \gamma - 1 / T$ обычно наблюдается излом (рис. 1.17). Это объясняется тем, что при $T > T_c$ подвижность носителей заряда возрастает с температурой более резко, чем при $T < T_c$. Значение ионной проводимости полимеров, как и низкомолекулярных тел, существенно уменьшается с ростом внешнего давления.

Молионная проводимость характерна для растворов белков и полиэлектролитов, суспензий, эмульсий; она широко используется для нанесения полимерных покрытий в электрическом поле (метод электрофореза). Этот вид электропроводности можно наблюдать и в пластифицированных полимерных материалах.

Для объяснения электропроводности полимеров привлекают теорию перископов, зонную теорию проводимости, представления о солитонах (зараженные ионные центры с нулевым спином).

Электронная проводимость при сравнительно низких T и E обуславливает перенос зарядов в полимерных полупроводниках, электропроводящих полимерных материалах, а также в полимерных диэлектриках, макромолекулы которых содержат сопряженные двойные связи. Согласно представлениям зонной теории твердых тел, электронная проводимость обусловлена переходом электронов из валентной зоны в зону проводимости. Для такого перехода необходима энергия, определяемая шириной запрещенной зоны. Вакансии в валентной зоне называют дырками и рассматривают как положительные частицы.

Электронная проводимость обнаружена у полимеров с гетероциклами в цепи типа полиимидов, полибензоксазолов, а также у поливинилкарбазола, боковые группы которого образуют цепь сопряженных связей. Для виниловых полимеров связи C—C полностью насыщены, ширина запрещенной зоны велика (например, для политетрафторэтилена 10,07 эВ). Однако и в этом случае под воздействием ионизирующей радиации, тепла, сильного электрического поля может происходить ионизация макромолекул и образование свободных или слабо связанных электронов (полиэтилен, полистирол и др.). Электроны могут быть также инжектированы в полимерные образцы из металлического катода. Эти электроны застревают в дефектах структуры; образующиеся объемные заряды препятствуют дальнейшей инжекции и являются причиной возникновения токов, ограниченных пространственными зарядами (так называемые ТОПЗ).

С ростом температуры электронная электрическая проводимость полимеров возрастает по экспоненциальному закону:

$$\gamma = \gamma_0 e^{(-E_T/2kT)}$$

где γ_0 — предэкспоненциальный множитель; E_T — термическая энергия активации электрической проводимости; k — константа Больцмана.

Значение E_T характеризует ширину запрещенной зоны или глубину залегания дефектов структуры, которые могут быть ловушками для электронов.

В отличие от ионной, электронная проводимость возрастает при кристаллизации полимеров и при повышении внешнего давления. Образование внутри- или межмолекулярных комплексов с переносом заряда также приводит к увеличению электронной проводимости. Подвижность электронов и дырок в полимерах на 2–6 порядков превышает подвижность ионов.

Электронная проводимость полимерных диэлектриков, возникающая под воздействием ионизирующей радиации, возрастает при повышении интенсивности I радиации по формуле,

$$\gamma = I^a,$$

где a — постоянная для данного полимера и вида излучения, принимающая значения от 0,5 до 1,0.

Считается, что такие значения a — следствие экспоненциального распределения по энергиям ловушек электронов относительно нижней границы зоны проводимости [140, 141].

Электропроводностью обладают полимерные композиции с токопроводящими компонентами и электропроводящие полимеры с «внутренней» (собственной) проводимостью, *ICP* (*Intrinsic Conductive Polymers*).

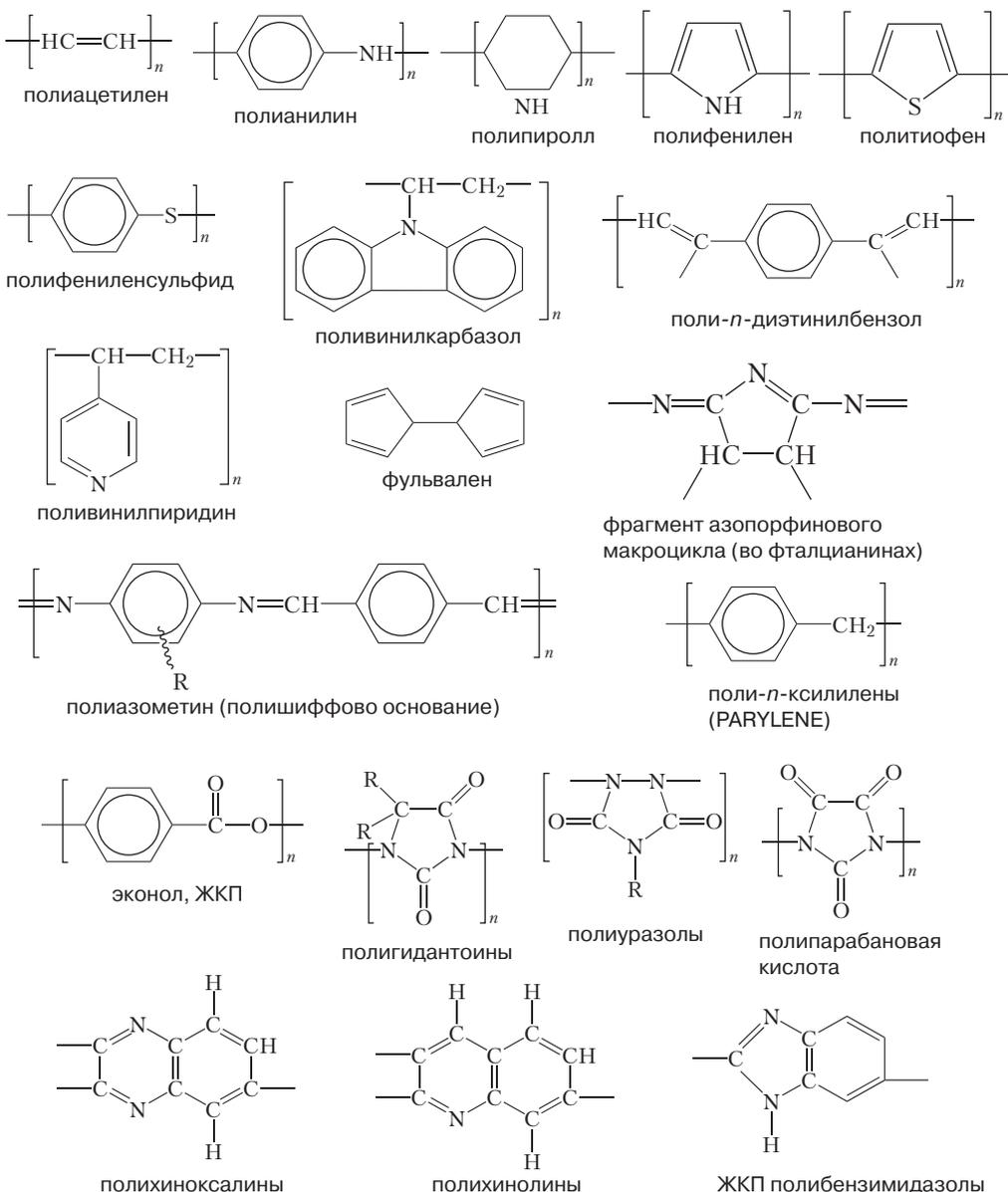


Рис. 1.18. Химическая структура электропроводящих полимеров с «внутренней» (собственной) электропроводимостью [73, 114]

Электропроводящими являются полимеры линейной (полиацетилены) или циклоцепной структуры с сопряженными связями, проявляющие полупроводниковые свойства в результате перекрывания π -орбиталей вдоль ненасыщенной полимерной цепи (рис. 1.18).

Делокализация π -электронов при прохождении электрического тока вдоль цепи определяет полупроводящие свойства (проводимость менее 10^{-5} S/cm).

Электропроводимость полимеров повышается на несколько порядков при их допировании (дотировании) окислительно-восстановительными компонентами (электропроводность допированных полимеров ICP более $10^{-5} S/cm$). Такие полимеры находят применение при изготовлении нанокомпонентов ИПМ молекулярного уровня (молекулярная электроника).

Молекулярная электроника развивается в двух направлениях с получением электроактивных материалов с проводимостью от 10^{-9} до $100 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ [142, 143]:

1) использование электроактивных полимеров («пластические» металлы, синметаллы, синтетические металлы) с сопряженными связями, проявляющих полупроводниковые свойства в результате перекрывания π -орбиталей вдоль ненасыщенной полимерной цепи;

2) молекулярные кристаллы, включающие мономерные соединения и органические комплексы с переносом заряда (КПЗ), в которых катионы (ионы металлов), анионы (например, трийодид-ион, I^{-3}), органические электроно-акцепторы (например, тетрацианхинодиметан, тринитрофлуорен и другие) взаимодействуют с основной цепью полимера через электронное взаимодействие.

Для достижения полупроводниковых свойств проводящие полимеры допируют окислительно-восстановительными агентами: допанаты р-типа (йод, AsF_5), допанаты п-типа (нафталин-натрий). Проводимость в ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) различных полимеров в зависимости от электроактивности и типа допирования составляет:

- 10^{-20} — политетрафторэтилен, алмаз, кварц;
- 10^{-15} — полиимид *Kapton*, полистирол, ПВХ, недопированные полифениленсульфид и поли-*n*-фенилен;
- 10^{-10} — недопированные полипиррол, политиофен, полидиацетилен;
- 10^{-5} — полифталоцианин (недопинированный, в зависимости от типа металла в макроциклах 10^{-12} – 10^{-14});
- 10 — политиофен допированный;
- 10^3 — полипарадиэтинилбензол;
- 10^5 — допированные полиацетилен, поли-*n*-фенилен, полифениленсульфид, полипиррол, графит, пирополимеры (полициклоны *Pluton*, *Fiber HF*).

Полисопряженные полимеры, благодаря своей структуре и ее модификации донорно-акцепторными компонентами (допирование), обеспечивают высокую электропроводность ($10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ и выше) без создания композиций с электропроводящими добавками (сажа, металлические порошки, волокна и др.). Чтобы превратить такие полимеры, как полиацетилен, полипиррол, полифенилацетилен, поли-*n*-фенилен и другие (рис. 1.18) в электропроводящие, их модифицируют — химически или электрохимически допируют. Электрохимическое допирование позволяет достигать более высокой стабильности свойств таких полимеров.

Электропроводящие полимеры с собственной проводимостью (политиофены, полиацетилен, полианилин, полипиррол, полипарафенилен) становятся электропроводящими в результате химического взаимодействия с донорами электронов (различные восстановители, йод) или акцепторами электронов (пентафторид мышьяка AsF_5 , CBF_4 , тетрацианэтилен). Проводимость таких электропроводящих полимеров может достигать проводимости ртути.

Допирование — особый случай модификации полимеров с использованием реакций полимера с донорами или акцепторами электронов. После реакции молекул допантов с несущими неспаренный электрон участками цепи полимера образуются фрагменты, эквивалентные органическим ионам — карбокатионам или карбоанионам. На других участках цепи возможно образование ион-радикалов. После допирования полимер переходит в новое энергетическое состояние с проводимостью, близкой к металлической. Электрохимическое допирование позволяет достигать высокой стабильности свойств. Техника допирования не сложна, но имеет свою специфику, поскольку желательно добиться как можно более равномерного распределения допаната.

Пленки из полиацетилена, состоящего из линейных цепей атомов углерода, имеют высокую электропроводность, близкую к электропроводности металлов.

Тонкие пленки полиацетилена в виде покрытий на носителях (полиэтилен, стекло и др.) получают погружением носителя в раствор катализатора (состав различен, например, $\text{NaBH}_4 + \text{Co}(\text{NO}_3)_2$ при -80 , затем при -30 °С внесением в атмосферу ацетилена (полимеризация заканчивается за несколько секунд). После удаления катализатора пленку обрабатывают допантом (например, парами йода, проводимость более $200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

Пленки, по внешнему виду напоминающие алюминиевую фольгу, а по эластичности — полиэтилен, получают из ацетилена с металлическими катализаторами. Полупроводник р-типа (движение положительных зарядов — «дырок») после введения допирующих добавок (пятифтористый мышьяк, хлор, бром) в триллионы раз увеличивает проводимость р-типа.

Введение калия, натрия, AsF_5 (более 1%) резко меняет проводимость от «дырочной» к металлической, величина ее зависит от количества допантов.

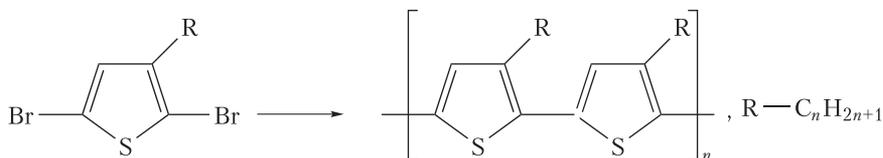
Полимерные листы из допированного полиацетилена способны преобразовать солнечную энергию в электрическую с КПД, близким к кремниевым солнечным батареям (после термокаталитического старения проводимость $10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

В отличие от ацетилена–пиррол (из каменноугольной смолы, $T_{\text{квп}} 130$ °С) полимеризовать значительно дешевле (не требуются сложные каталитические системы, неустойчивые к влаге и кислороду) электрохимическим способом, когда полипиррол образует пленку на одном из электродов ячейки (допирование проводится также электрохимически). Стабилизируют свойства полипиррола, осаждая его на тонкую поливинилхлоридную пористую пленку, которая в растворе практически не препятствует ионам проникать к поверхности пленки-проводника. Количество циклов заряда и разряда для полипиррола практически неограниченно, и электроды из него эффективно работают в солевом электролите (морская вода).

Пластины получают прессованием порошка полипиррола, получаемого полимеризацией в растворе (метанол, окислитель $\text{FeCl}_3 + \text{FeCl}_2$; окислительный потенциал 500 мВ, пиррол/ $\text{FeCl}_3=2,33$; $0-20$ °С, 20 мин, электропроводность $190-220 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

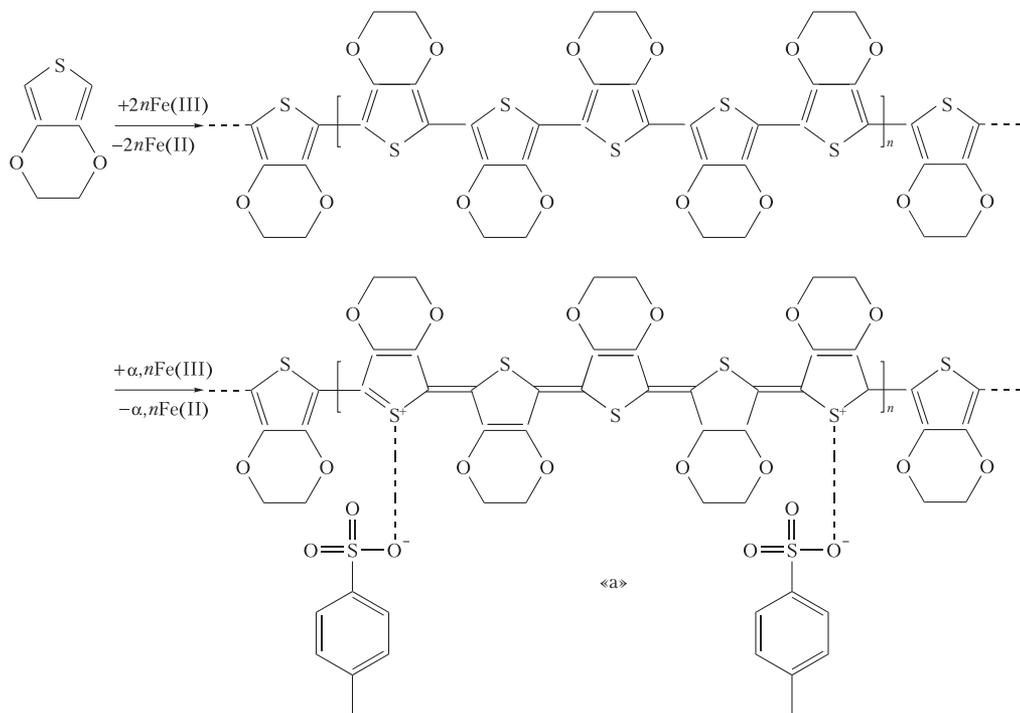
Пленки полипиррола получают осаждением полипиррола (ПП) в водном растворе FeCl_3 на подложки из пленок ПЭТ с покрытием ПММА (такую пленку погружают в жидкий пиррол на 5 с, затем в водный раствор FeCl_3 с контролируемым окислительным потенциалом). ПММА растворяют в ацетоне, пленки ПЭТ и полипиррола разделяются. Полимеризацией пиррола при 0 °С в течение 5 мин (допант-1 м раствор FeCl_3) получают пленки полипиррола с электропроводностью $110 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [143].

Полиалкилтиофены (в частности, растворимый в органических растворителях поли-3-гексилтиофен РНТ с регулярным расположением боковых радикалов R с высокой электропроводностью) получают низкотемпературной полимеризацией 2-бром-3-алкилтиофена или 2,5-дибром-3-алкилтиофена в присутствии металлосодержащих катализаторов типа солей Гриньяра, MgBr_2 (при -60 °С), NiCl_2 (при -5 °С– $+20$ °С), Zn (при -78 °С) в тетрагидрофуране [125].



В электропроводящих полимерах переход в проводящее состояние происходит за счет образования донорно-акцепторных комплексов или комплексов с переносом заряда.

Частичное окисление полимера (на примере полиэтилендиокситиофена) при допировании приводит к образованию положительно заряженных подвижных ионов — носителей заряда с последующей реализацией «дырочной» проводимости за счет сопряженных двойных связей в линейных или циклоцепных полимерах:



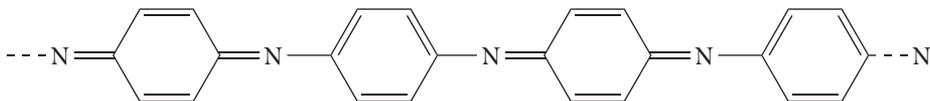
Комплекс *PEDT* и полистиролсульфоновой кислоты *PSS* [119]

Разработаны и полимерные молекулярные электропроводящие системы с *p-n*-переходами. В зависимости от приложенного напряжения происходит запираение электрической цепи или имеет место транзисторный эффект (перенос заряда).

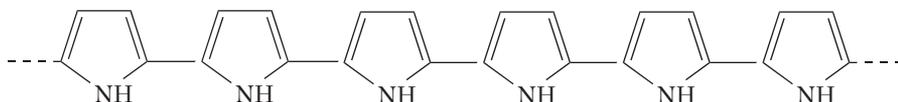
Замена неорганических полупроводников и металлов на органические, полимерные и даже биологические материалы обеспечивает значительное увеличение скоростей действия в электронике и компьютерной технике, создание устройств из сложных молекулярных структур, возможность контроля электрических и оптических устройств за счет создания органических молекул требуемой структуры. Достоинства молекулярной электроники заключаются в минимизации размеров, доступности, разнообразии, простоте изготовления, потенциально низкой стоимости.

Наибольшее применение в технике (антистатические покрытия, изделия электротехники и электроники — полимерные конденсаторы с полимерными проводящими слоями и контроллерами, полимерные дисплеи *PLED* и др.) нашли допированные полимеры со стабильными электропроводящими свойствами: полианилин (система сопряженных связей $-N=C-$), полипиррол (группы NH в 5-звенных циклах), политиофены (атомы серы в 5-звенных циклах), полиалкил-3,4-диокситиофены (в частности, *PEDT*) [119]. Для их получения используют соответствующие мономеры, выпускаемые в промышленном масштабе.

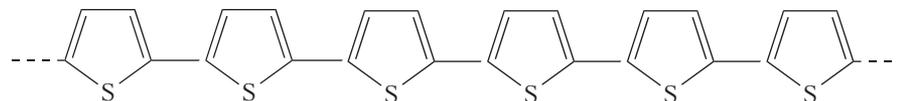
Полианилин



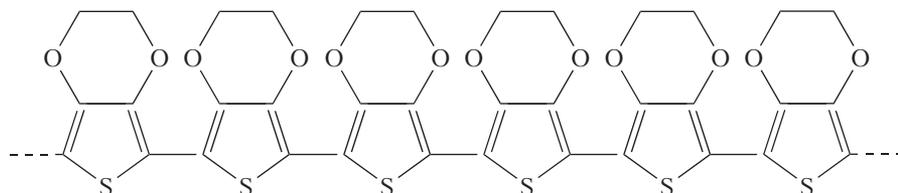
Полипиррол



Политиофен



Поли(3,4-этилендиокситиофен), PEDT



Начальные исследования электропроводности полимеров, в том числе и с использованием дотирования, проводились с полиацетиленом, но из-за плохих технологических свойств и быстрого окисления на воздухе с утратой электропроводности он не нашел практического применения, хотя электропроводность дотированного полиацетилена близка к электропроводности меди. Электропроводящие полимеры *ICP* используются в виде дисперсий в органических растворителях или воде для формирования антистатических и токопроводящих покрытий, для изготовления изделий литьем под давлением или экструзией.

Дисперсии полипиррола (первое использование — пленки, получаемые анодным окислением пиррола) используют полипиррол *Conquest* (фирма *DSM, Heerlen*, Нидерланды) получаемый полимеризацией мономера *Basotronic PYR* (фирма *BASF AG, Ludwigshafen*, Германия),

Допированный полиэтилендиокситиофен (*Baytron P*, комплекс *PEDT* из мономера *Baytron M, EDT* и полистиролсульфоновый кислоты *PSS*, на схеме с. 72 — структура «а», дисперсия в воде) производит и перерабатывает в изделия фирма *H.C. Starck GmbH (Leverkusen, Германия)*, дочернее предприятие фирмы *Bayer Material Science AG* (реализует продукцию с *PEDT* фирма *Agfa-Gevaert N.V., Mortsel, Бельгия*).

В промышленном масштабе допированные окислительными агентами полианилины (свойства существенно зависят от технологии получения и допирования) производит ряд фирм: *Ormecon GmbH, Ammersbek* (Германия), *Panipol, Porvoo* (Финляндия). За разработку и исследование электропроводящих полимеров *ICP* в 2000 г. Алан МакДиармид, Алан Хигер и Хидеки Сиракава получили Нобелевскую премию за работы в области химии [120, 121].

Основные направления использования электропроводящих полимеров, легко поддающихся формованию и обработке — миниатюризация в микронаноэлектронике с использованием в электронных твердотельных схемах компонентов нужной конфигурации с размерами молекулярного уровня. Перспективно использование электропроводящих полимеров (ЭПП) в конденсаторах, полупроводниках, элементах памяти компьютеров, фотопреобразователях, транзисторах с полевым эффектом (рис. 1.24). Некоторые из них при воздействии электрического напряжения или при химических воздействиях изменяют цвет, что используется при создании электронных оптических переключателей и устройств памяти. ЭПП перспективны

для создания межэлементных соединений в микросхемах с размерами молекулярного наноразмера.

Электропроводящие полимеры позволяют изготавливать на их основе широкий ассортимент изделий от полимерных лазеров (органических излучателей — тетрасенов, *tetracene*) до полимерных микропроцессоров с сотнями полимерных транзисторов и других электронных элементов на гибких пленочных полимерных подложках, постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) со сверхплотной записью информации, быстродействующих считывающих устройств без механических узлов (как на приводе *CD-ROM*).

Они используются в качестве проводников (волокна, покрытия) и полупроводников (светоизлучающие диоды *OLED*, *PLED*). Переход электронов на уровни с другой энергией позволяет получить излучение с различной длиной волны.

Перспективы дальнейшего прогресса вычислительной техники связывают с сочетанием электронных и оптических методов обработки информации. Оптоэлектронные компьютеры работают в тысячи раз быстрее с высокой плотностью записи информации.

Электропроводящие полимеры используют в молекулярных электронных и оптических материалах и изделиях.

Молекулярные электронные материалы на основе электропроводящих полимеров используются для изготовления (в скобках — тип полимера):

1. Перезаряжаемых элементов (аккумуляторов) с емкостью до 80 А·ч/кг, энергоемкостью до 340 Вт·ч/кг, облегченной перезаряжаемой системой, постоянством напряжения при разрядке (допированная перхлоратом система полиацетилен+литий; электрохимически допированный поли-*N*-винилкарбазол; допированный йодом поливинилпиридин, полифосфазен).

Снижение массы аккумулятора повышает его удельную энергоемкость. На смену тяжелым свинцовым, кадмий-никелевым, железо-никелевым аккумуляторам (электролит-кислота) пришли литиевые и на основе литиевых сплавов и других металлов.

Использование электропроводящих полимеров для изготовления активных частей источников тока позволяет исключить применение для этих целей цветных металлов, благодаря чему массу аккумулятора можно снизить вдвое. При этом обеспечивается электрохимическая обратимость, большие значения удельной мощности и энергоемкость. Применение ЭПП в аккумуляторах позволяет реализовать безотходную технологию. Некоторые электропроводящие полимеры в комбинации с солями щелочных металлов рассматриваются как перспективные твердые электролиты для батарей с высокой удельной энергией.

Элементы с полимерным электролитом из полифосфазена состоят из литиевого анода, покрытого тонкой пленкой полимера, которая пропускает к отрицательному электроду ионы лития, но тормозит перемещение электронов. Пленка эластична, плотно прилегает к электродам, растягивается или сжимается при заряде или разряде.

2. Микрофонов, пьезоэлектрических преобразователей (поливинилидин).

3. Токопроводов, токопроводящих покрытий в СБИС, проводимость которых от 1 до 2000 Ом⁻¹·см⁻¹ легко регулировать селективным допированием (электрохимически допированный полипиррол, тонкие прозрачные пленки; политиофен; допированные пятифтористым мышьяком, йодом, литием, калием поли-*p*-фенилен и полиацетилен, электропроводность в 2 раза выше, чем у меди; допированный пятифтористым мышьяком поли-*n*-фениленсульфид, тетраметилселенфульвален, поли-*n*-диэтилбензол, электропроводность на порядок выше, чем у графита).

4. диоды, транзисторы, конденсаторы, выпрямители в схемах обработки информации молекулярных размеров (полиацетилен с ионами Na⁺, полипиррол на подложках из кремния).

Микрочип на основе токопроводящего полимера *Redot* (фирма «*Hewlett Packard*», США) может хранить в 1 см³ до 1 Гб информации (1000 высококачественных изображений).

Полупроводниковые транзисторы при размерах порядка 10 000 нм преобладают действовать из-за нехватки электронов (предел миниатюризации схем). В биполярных спиновых переключателях (металлические, трехслойные, из 2-х слоев ферромагнитных сплавов, между которыми

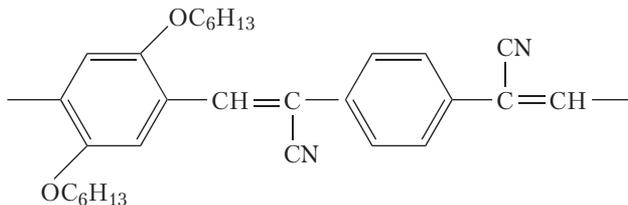
находится слой парамагнитного золота), когда поток электронов от источника тока проходит через первый магнитный слой, все электроны поляризуются в соответствии с направлением его намагниченности (значение его спинов становятся одинаковым). Слой из золота обогащается поляризованными электронами. Пройти через вторую магнитную пластинку электроны смогут только в том случае, если она намагничена так же, как первая (если же ее намагниченность другая, то тока не будет — вентиль закрыт). Направление намагниченности второй пластины изменяют слабым электрическим импульсом. Оно сохранится и после его снятия, поэтому этот переключатель может служить элементом памяти, и способен усиливать сигнал. Разработаны униполярные (полевые) транзисторы с затвором. Электрическим током в них между входом и выходом управляет специальный электрод — затвор. Они позволяют перейти от металлосодержащих транзисторов с золотыми электродами (сложная вакуумная технология для нанесения металлического слоя) к полностью полимерным, с использованием метода трафаретной печати.

На изоляционный слой из полиэтилентерефталата наносят полоску проводящего полимера — она служит затвором и этот бислой закрепляют на гибкой ленте-матрице. Затем сверху изолятора из того же проводящего полимера делают входной и выходной электроды. Между этими электродами напыляют при 350 °С органический полупроводник, дигексилсекситиофен.

Молекулярные оптические материалы на основе электропроводящих полимеров используются для изготовления (в скобках — тип полимера):

1. Оптических дисплейных устройств *OLED*, *PLED* (комплексы политиофена, поли-3-бром-*N*-винилкарбазол, тетрагиофульвален, пиризолин, допированный LiClO_4). Полимеры дают окрашенные изображения с быстрым переключением (быстрые фотохромные изменения) и улучшенной геометрией изображения.

Пленка люминесцирующего полимера (аналог люминесцирующих кристаллов, используемых в светодиодах, боковые группы OC_6H_{13} повышают растворимость, облегчая изготовление

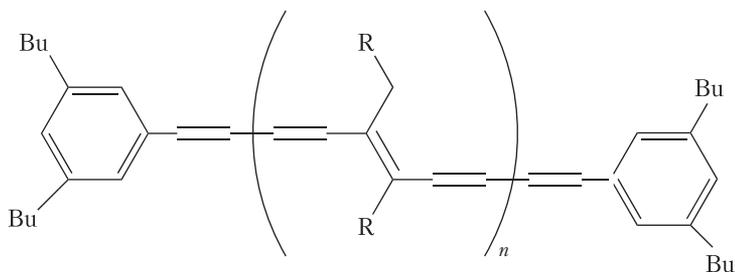


пленок и покрытий, группы CN облегчают движение зарядов), помещенная между электродами, испускает желто-зеленый свет (анод забирает от полимера электроны, катод инжектирует их в образовавшиеся «дырки», электроны и «дырки» идут навстречу друг другу через сопряженные двойные связи, рекомбинируют и излучают фотоны), что используется при изготовлении плоских дисплеев [74].

2. Систем оптической записи и хранения информации в оптоэлектронных компьютерах (полиацетилен, допированный ZnS , поли-*N*-винилкарбазол, электрохимически допированный меропиридиновыми красителями; политриацетилены).

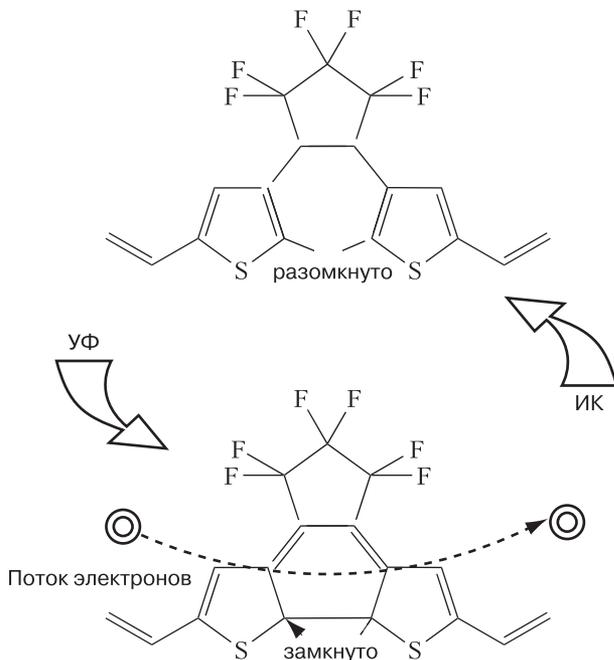
Голографическую внешнюю память, основанную на фоторефрактивном эффекте (изменение физических свойств под действием света), обеспечивает фоторефрактивный поли-*N*-винилкарбазол [75]. Получена трехслойная полимерная пленка, которая удваивает частоту излучения, идущего от полупроводникового лазера, и переводит свет из ближнего ИК-диапазона в видимый (голубой), что позволяет более плотно записывать информацию на компакт-диски [76].

Политриацетилены (легче синтезируются, чем полиацетилен, полидиацетилен, растворимы, устойчивы к окислению) за счет изменения состава боковых групп R могут быть полупроводниками, жидкокристаллическими, фоторефрактивными, излучающими свет под действием напряжения, и используются в качестве фотодиодов [77].



3. Фотонных устройств, твердых оптических переключающих элементов, световых клапанов в оптических логических цепях, оптических волноводах и интегральной оптике (электрохимически допированный политиофен, полиметилнитроанилин, сополимеры (1:1) диацетилена и метакрилатов, ММА, глицидилди-ММА, диметилеилоксана). Оптоэлектронные переключения обеспечиваются процессами допирования (оптически индуцируется) и дедопирования (протекает электрохимически).

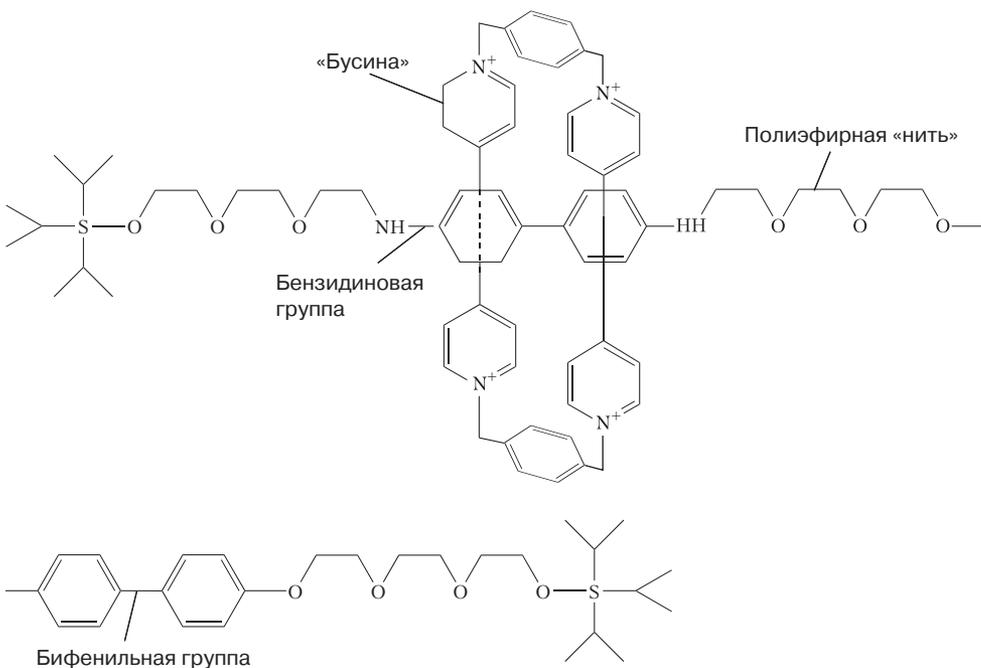
В электронно-оптических компьютерах логические и арифметические операции реализуются на электрических сигналах, а передача информации — на оптических. Это требует стыковки сигналов друг с другом. Звено политиофена (на схеме — индивидуальная молекула) [78], работающее как оптический выключатель тока, содержит два тиофеновых цикла. При



освещении полимера УФ ($\lambda = 400$ нм) между двумя циклами образуется химическая связь (мостик из 6-звенного цикла) и полимер становится электропроводным. После воздействия ИК ($\lambda = 600$ нм) звено полимера возвращается в исходное положение, дополнительный цикл не образуется.

Большая разница в частотах поглощения двух состояний звеньев политиофена объясняется тем, что в первом состоянии электроны локализованы между тиофеновыми циклами,

а во втором — распределены по макромолекуле политиофена, благодаря чему она становится электропроводящей. Мостики из 6-звенных циклов способствуют распределению электронов по макромолекуле и замыкают молекулярную электрическую сеть. Политиофен является эффективным молекулярным оптическим переключателем тока для электронно-оптических компьютеров с обработкой информации на молекулярном уровне. Синтезирована молекулярная конструкция, которая при изменении pH среды может обратимо переходить из одного состояния в другое, то есть служить переключателем. Она состоит из полиэфирной «нити», на которую надета «бусина» из соединенных в кольцо двух положительно заряженных бипиридиновых групп (структура ротаксана) [79].



На концах нити — «узлы» (объемные группы) и бусина не может соскочить с нити. На самой нити два места, где бусина в основном находится (бензидиновая и бифенильная группы). При комнатной температуре бусина движется туда и обратно с большой скоростью, при низкой (229 К) она 84% времени проводит на первой «станции» и 16% — на второй.

При $\text{pH} < 7$ (кислая среда) бензидиновая группа заряжается положительно, и электростатическое отталкивание одноименных зарядов сдвинет бусину вправо — на вторую станцию.

Эластичный полимер способен менять свойства от изолятора до проводника, под давлением или при скручивании он проводит ток силой до 7 А, при снятии нагрузки становится изолятором.

Пока основой электроники являются технологии на основе кремния (кремний — полупроводник; SiO_2 — диэлектрик; Al, Cu — проводник).

Разработка полимерной электроники мотивируется возможностью удешевления электронных устройств и реализацией некоторых применений, которые трудно осуществить при использовании дорогих кремниевых чипов. Существует представление, что полимерная электроника не сможет заменить кремниевую из-за недостаточного быстродействия органических полупроводников, однако уже разработаны органические полупроводники,

в которых подвижность носителей заряда выше, чем в аморфном кремнии. Активные элементы в полимерной электронике будут полностью полимерными: полимерные светодиоды *PLED*, полимеры в фотонике, в интегральных схемах (*Polymer IC*), особенностью которых являются транзисторы, состоящие исключительно из органических материалов (все функциональные части — полупроводник, диэлектрик, проводник). Электропроводящие полимеры могут быть использованы в полевых транзисторах (*OTFT*), исток-стоковых и других типов электродов.

При использовании полимерных материалов в электронике возможен переход к прозрачным интегральным схемам на гибких подложках. Для изготовления полностью полимерных интегральных схем (*Polymer IC*) можно использовать стереорегулярный поли-3-алкилтиофен, в частности, поли-3-гексилтиофен в качестве полупроводника и поливинилфенол в качестве диэлектрика. Электронный чип, в котором допированный политиофен *PEDT/PSS* работает как проводник, разработан фирмой *Infineon*. При разработке чипов с золотыми контактами использован также как проводник полианилин.

Области применения недорогих чипов, позволяющих записывать информацию электрическими сигналами с возможностью ее последующего считывания (*RFID-Tags*), распространяются от устройств с ценовой и защитной информацией до «умных» упаковок парфюмерной продукции [119].

Электропроводящие полимеры позволяют получить прозрачные антистатические проводящие покрытия, характеристики которых позволяют им эффективно конкурировать с наполненными токопроводящими компонентами полимерными композициями, металлическими и металлооксидными покрытиями, например, на основе оксидов индия-цинка (*ITO*).

Например для нанесения токопроводящих покрытий из политиофена *PEDT* используют следующие технологии: 1) в качестве начального продукта используют мономер *EDT Baytron M*, который хорошо пропитывает пористые подложки из алюминия, тантала, ниобия, а затем проводят полимеризацию (формирование покрытия с получением полимера из мономера непосредственно на поверхности, технология *in situ*). Полимеризация *in situ* требует тщательного контроля параметров процесса, удаления примесей катализатора и допанта Fe^{+2} и позволяет получать покрытие с электропроводностью более $500 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$; 2) в качестве начального продукта используется водная дисперсия комплекса *PEDT: PSS*, в которой *PSS* выполняет роль контриона, обеспечивающего допирование и стабильность дисперсии с получением гладких покрытий с электропроводностью менее 500 S/см ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$).

Прозрачные антистатические покрытия используются в антистатических слоях обратной стороны фото- и киноплёнок, лент, пленочной упаковки изделий электроники, кинескопов. Такие покрытия обеспечивают снятие статического электричества с поверхностей с $10^5\text{--}10^9 \text{ Ом/м}^2$ (лучше, чем *ITO*).

Модификации состава пленкообразующих на основе электропроводящих полимеров компонентами, оптимизирующими вязкость, влагоемкость, пленкообразующую способность, адгезию, прочность, твердость позволяет изменять свойства покрытий в широком интервале. Ряд компонентов позволяет оптимизировать морфологическую структуру полимера и пленки. Так, при использовании полярных растворителей (этиленгликоль, N-МП, диметилсульфоксид, сорбит) электропроводность покрытий повышается на 2 порядка [119].

Технология изготовления токопроводящих слоев в электронных платах (процесс *DMS-E*) с использованием мономера *EDT* (этилендиокситиофен, *Bautron M*) разработана фирмой *Blasberg (Solingen, Германия)*, с 2005 г. — *Enthone GmbH (Германия)*. Процесс *DMS-E* имеет определенные технологические и экологические преимущества по сравнению с процессом осаждения меди (процесс «*Electroless Copper*»), состоит из 5-ти стадий и позволяет использовать в качестве токопроводящих слоев из полипиррола и *PEDT* (обеспечивает меньшую энергоемкость и большую надежность), которые являются подложкой для медного слоя, наносимого гальваническим способом (рис. 1.19).

Первая стадия процесса *DMS-E* связана с подготовкой поверхности отверстия под будущий контакт (так называемая *Desmear*-стадия), вторая стадия — обработка поверхности отверстия

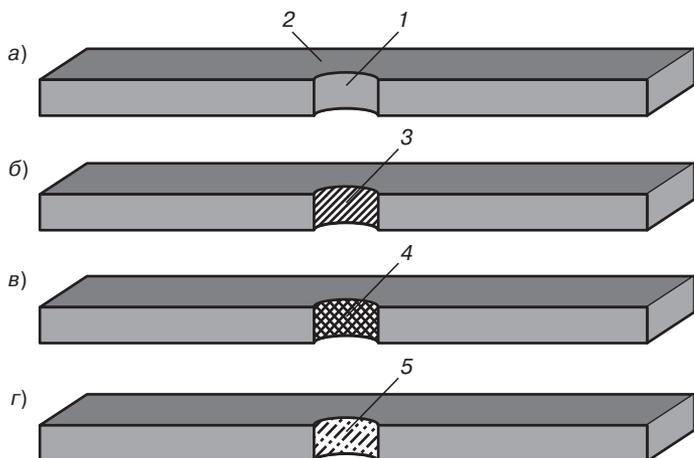


Рис. 1.19. Пяти стадийный процесс *DMS-E* с использованием электропроводного политиофена *PEDT* [119]:

а — исходная электронная плата с медной поверхностью (2) и отверстием (1); *б* — нанесение слоя MnO_2 (3) на поверхность отверстия; *в* — осаждение токопроводящего слоя из допированного комплекса *PEDT/PSS* (4); *г* — осаждение слоя меди (5) на поверхность слоя *PEDT/PSS*

раствором $KMnO_4$ с осаждением слоя MnO_2 (обеспечивает окисление наносимого на 3-й стадии мономера *EDT*); четвертая стадия — нанесение микроэмульсии мономера *EDT*, обработка полистиролсульфоновой кислотой *PSS* (фиксирующая стадия), полимеризация *EDT* до *PEDT*, допированного *PSS*, селективное (на поверхность отверстия) осаждение комплекса *PEDT/PSS*; 5-я стадия — гальваническое осаждение слоя меди на слой электропроводного полимера.

Процесс *DMS-E* имеет очевидные преимущества по сравнению с процессом осаждения меди, платины (*Electroless Plating*), так как исключает в значительной степени использование гальванических растворов и удаление побочных продуктов (формалин, комплексные соединения).

Электропроводящие полимеры нашли применение в качестве контрэлектродов, в частности, в конденсаторах с использованием алюминия и тантала. Такие конденсаторы называются полимерными. Конденсаторы — пассивные электронные элементы, для работы в широком диапазоне частот (Гц–МГц), которые характеризуются показателями мощности, напряжения, эквивалентного сопротивления (серийного сопротивления *ESR*, особенно важного при работе в области высоких частот, при которых мощность конденсатора резко снижается, что связано с ограниченной электропроводностью контрэлектродов), то есть показателями, которые определяются типом используемых материалов.

Имеются несколько типов конденсаторов: пленочные, керамические, электролитические (танталовые, алюминиевые, высокоомощные — состоят из металлического анода с покрытием, металлического оксида и контрэлектрода). В качестве контрэлектродов в электролитических танталовых конденсаторах используется MnO_2 , в алюминиевых — жидкие электролиты. Контрэлектроды MnO_2 и на основе жидких электролитов имеют электропроводность 10^{-3} – 10^{-2} *S/cm*, а электропроводящие полимеры 10^2 *S/cm*.

Технологический процесс изготовления полимерного конденсатора с танталовым анодом и контрэлектродом из электропроводящего политиофена, получаемого полимеризацией смеси мономеров — алкилдиокситиофенов *Bautron M/C*, включает стадии: изготовление анода из тантала (спекание порошка Ta с фракциями, обеспечивающими пористость, высокую площадь поверхности); окисление поверхности анода с образованием Ta_2O_5 толщиной 10–100 нм; изготовление противоконтакта, пропитка $Mn(NO_3)_2$ с последующей термообработкой (термолиз);

полимеризация мономера *Bautron M/C* в присутствии катализатора — соли Fe^{+3} на поверхности диэлектрика Ta_2O_5 ; капсулирование (смешение с порошком графика в растворе серебра).

Полимерные конденсаторы уже занимают прочное место в телекоммуникациях и компьютерах благодаря исключительной надежности при работе при высоких частотах. Катоды из электропроводных полимеров способны «самозалечивать» дефекты, которые могут приводить к воспламенению танталовых конденсаторов (в них металл — восстановитель, углерод — окислитель, разделены тонким слоем диэлектрика). При зарядке конденсатора из-за дефектов возрастает вероятность пробоя этого слоя с повышением температуры. При этом разлагается MnO_2 , а кислород диффундирует к металлу, окисление которого является сильно экзотермической реакцией, что может привести к воспламенению углерода.

В металлополимерных конденсаторах проводимость электропроводящего полимерного слоя с ростом температуры до $250\text{ }^\circ\text{C}$ снижается, что предотвращает дальнейшие нежелательные процессы.

Электропроводящие полимеры применяются и в активных электронных элементах.

Допированный политиофен типа *PEDT*, как и допированные полипирролы, содержит положительные заряды, распределенные по цепи. Это позволяет использовать электропроводящие полимеры (в виде пленок и покрытий) в ряде фотоэлектронных устройств: органические фотонные устройства, полупроводниковые схемы с интегрированными в них органическими структурами, органические фотонные сенсоры, полимерные светоизлучающие диоды (светодиоды, переход электронов на уровни с другой энергией позволяет получать излучение с различными длинами волн). Работа светоизлучающих диодов основана на эффекте электролюминесценции тонкого слоя люминесцирующих органических соединений (в *OLED*, *Organic Light Emitting Diode*) или флуоресцирующих полимеров (в *PLED*, *Polymeric Light Emitting Displays*). В отличие от систем на основе жидких кристаллов (*LCOS*, *Liquid Crystal On Silicon*, *LCD*, *Liquid Crystal Displays*), системы *OLED*, *PLED* не требуют подсветки.

Люминесценция — свечение люминофоров: 1) избыточное при тепловом излучении тела при данной температуре или 2) возбужденное каким-либо источником энергии (светом, излучениями, электрическим полем — электролюминесценция, при химических реакциях — хемилюминесценция, при механических воздействиях). По механизму различают резонансную, спонтанную, вынужденную, рекомбинационную люминесценцию. Люминофор, поглощая некоторое количество энергии, переходит в возбужденное состояние. При возвращении в исходное состояние часть избыточной энергии выделяется в виде излучения с большей длиной волны. Длительность возбужденного состояния отличает люминесценцию (флуоресценцию, фотолюминесценцию — кратковременный процесс, фосфоресценцию — длительный процесс) от рассеяния света, отражения, других видов свечения. Для люминесценции (флуоресценции) органических веществ необходимы молекулы с жесткой структурой, исключающей свободное вращение частей молекулы, снижающих возможность безизлучательных переходов (люминесцирующие комплексы с различными катионами, например, 8-оксихинолин с литией, алюминием, индием, цинком, кадмием и др., 2-оксикарбостирил, флуоресцеин и др.) [13].

В устройствах с использованием полимеров, обладающих способностью к фотолюминесценции, от полимера (помещенного в виде пленки между электродами) под напряжением анод забирает электроны, катод инжектирует их в образовавшиеся «дырки». Электроны и «дырки» идут навстречу друг другу через сопряженные двойные связи, рекомбинируют и излучают фотоны. Так ведут себя фотолюминесцентные полимеры, например, полифениленвинилен (*PPV*), полифлюорен (*PF*).

В составе *PLED* политиофен *Baytron P* выполняет роль поставщика «дырок», из которых электроны «забирает» анод из оксидов индия и цинка, *ITO*. Структура такого *PLED* и его характеристики приведены на рис. 1.20.

Преимущества полимерных светодиодов *PLED*, по сравнению с устройствами на основе жидких кристаллов *LCD*, заключаются в их более высокой контрастности, улучшенной геометрии изображений, быстрым переключением (быстрые фотохромные изменения),

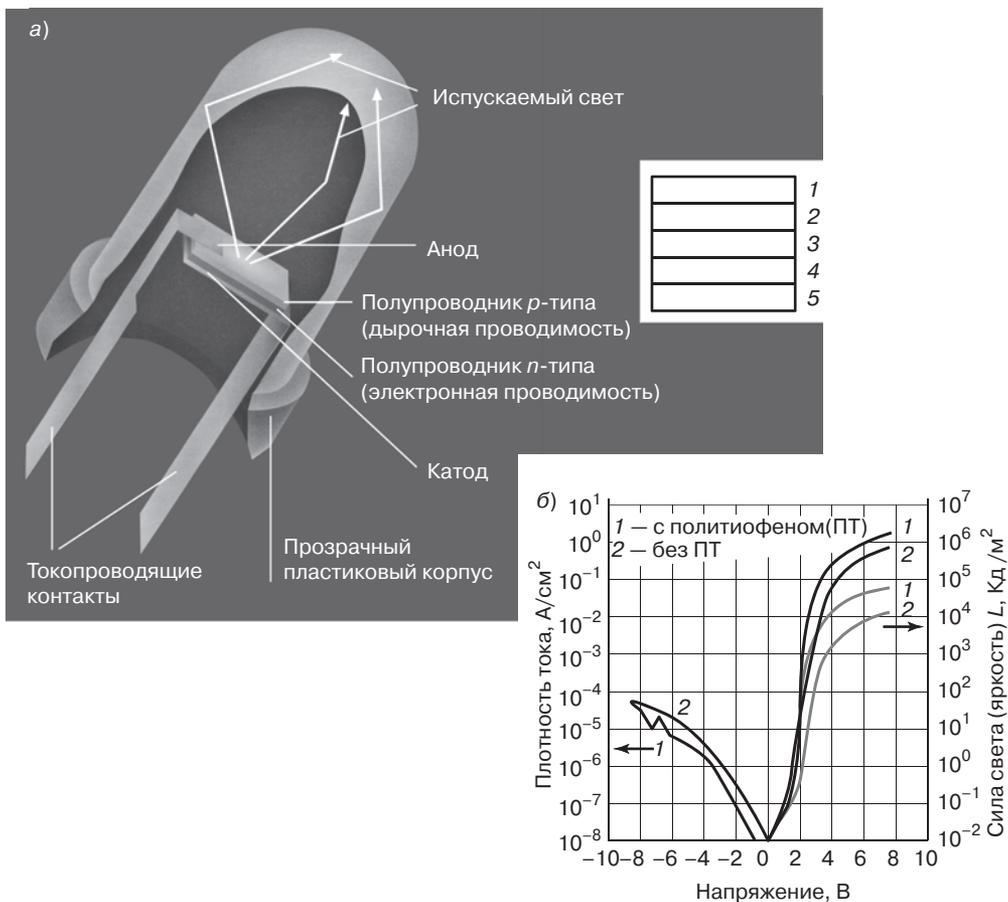
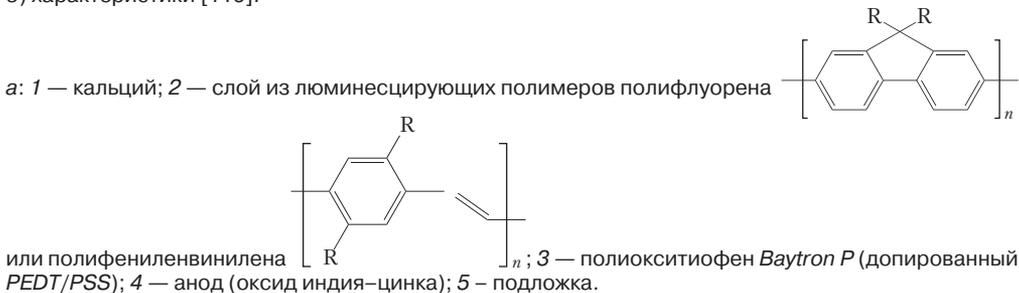


Рис. 1.20. Схема полимерного светоизлучающего диода PLED (а) и его светоизлучающие (LED, б) характеристики [119]:



LED-характеристики (при напряжении 4 В):

(L — сила света, яркость светоизлучения; D — плотность тока)

| | L , кд/м ² | η , кд/А |
|--------------------------------|-------------------------|---------------|
| Со слоем политиофена Baytron P | 10 800 | 5,9 |
| Без политиофена | 1000 | 2,9 |

меньшей энергоёмкости. Разработаны полимерные светодиоды на гибких пленочных подложках [119].

В многослойных конструкциях светоизлучающих диодов (*Organic Licht Emittierende Diode, OLED*) используют проводящие слои из органических соединений — полупроводников с *p*- и *n*-проводимостью, представителями которых являются полициклические соединения с системой сопряженных π -связей (пентацен и другие), металлосодержащие фталоцианины (органические *p*-проводники). Фторсодержащие полициклы (перфторпентацен), фталоцианины (гексадекафтор-металлофталоцианин), перилены, фуллерены — органические полупроводники с *n*-проводимостью (рис. 1.21). Возможность использования подобных соединений, например кристаллов антрацена в качестве светоизлучающих материалов, установлена в 1963 г. В 1987 г. изготовлены образцы функционирующих органических светоизлучающих диодов *OLED*. Двухслойные диоды со слоем органического *p*-проводника и эмиссионного слоя из Alq_3 (8-гидрооксиквинолиналюминия) при напряжении 10 В излучают свет силой более 1000 кд/м² (кд, *cd* — кандела, единица измерения силы света). Сила света современных жидкокристаллических дисплеев, *LCD*, находится в интервале 250–500 кд/м².

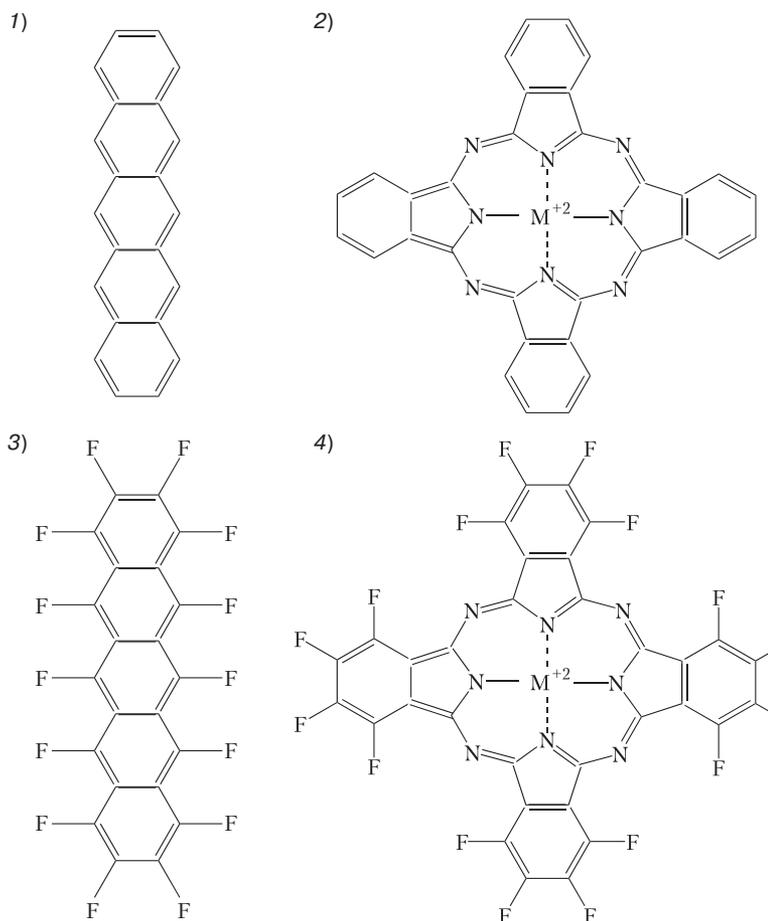


Рис. 1.21. Органические *p*-полупроводники (1 — пентацен, 2 — металл(II)фталоцианин) и *n*-полупроводники (3 — перфторпентацен, 4 — гексадекафтор-металл(II)фталоцианин) [116]

Схема *OLED* с использованием слоев из органических полупроводников, формируемых вакуумной сублимацией, приведена на рис. 1.22.

В *OLED* между анодом и катодом расположены слои из различных органических материалов, состав которых определяет спектр излучения диодов в диапазоне длин волн 400–800 нм, ИК-диапазоне (красный, голубой, зеленый, их комбинация — белый). Принцип действия *OLED* основан на эффекте электролюминесценции тонкого слоя люминесцирующего органического соединения. При этом не требуется подсветка, например, экранов ноутбуков и ЖК-телевизоров, а яркость *OLED* выше яркости *LCD*.

Стабильность свойств и долговечность — критический параметр для практического использования, поэтому актуальна проблема сохранения рабочих характеристик светоизлучающих диодов и органических транзисторов от воздействия окружающей среды.

В случае *OLED* это происходит из-за изменения свойств материала катода, например, кальция. В полимерных чипах полупроводниковые транзисторы защищены внешним слоем изолятора. Такая структура чипа существенно стабильнее микросхем, в которых полупроводник находится непосредственно на поверхности.

Для сохранения излучающей способности *OLED* в 1000 кд/м^2 в течение 10 000 ч необходим тщательный выбор материалов (клеев, капсулирующих составов и др.), обеспечивающих их низкую проницаемость по воде, кислороду, устойчивостью к ударным нагрузкам. Проницаемость материалов *OLED* по воде не должна превышать $10^{-6} \text{ г/м}^2\cdot\text{мм}$ и $0,1 \text{ мл/м}^2\cdot\text{мм}$, по кислороду — $10^{-5} \text{ мл/м}^2\cdot\text{мм}$, тогда как для большинства полимеров эти характеристики составляют соответственно $10^{-1} \text{ г/м}^2\cdot\text{мм}$ и $0,1 \text{ мл/м}^2\cdot\text{мм}$. Этого особенно сложно добиться при разработке гибких *OLED* на пленочных полимерных подложках [123]. Особенно быстро снижается излучательная способность «голубых» *OLED*, что снижает долговечность и «белых» *OLED*.

Технология *OLED* интенсивно развивается. В 2005 г. в мире произведено 61 млн *OLED*-дисплеев (рис. 1.23) на сумму почти 600 млн долл США (рост по сравнению с 2004 г. на 65%), в 2006 г. произведено 100 млн дисплеев на сумму 900 млн долл США.

В Германии исследования в области *OLED* и их применении проводят фирмы *Mühlbauer ASEM Präzisionsautomaten GmbH*, *KSG Leiterplatten GmbH*, *Noyaled AG*, центр *ZmP* (микрородукты *OLED*), *IPMS* (Фраунгоферовский институт фотонных микросистем), *Osram*, *Lumileds*, *Philips* (Европа), *Nichia* (Япония), *Cree* (США), в России — ИФХ и ЭХ, ИПХФ, ИСПМ РАН, в Белоруссии — Институт электроники (светодиодное освещение самолетов ЯК-42). Предполагается, что к 2011 г. стоимость продукции *OLED* превысит 1 млрд евро (стоимость полимерной электроники: 2008 г. — 3 млрд, 2015 г. — 30 млрд, 2025 г. — 300 млрд долл. США). Для решения экономических вопросов необходимо снижение расходов на производство излучателей в 1 люмен до 0,01 евро. Тогда стоимость 1 м^2 *OLED* с силой света 1000 кд/м^2 , что составляет 3000 лм/м^2

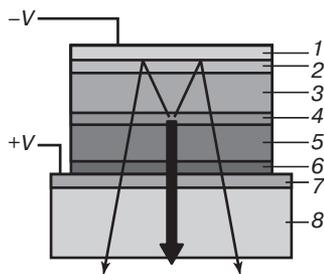


Рис. 1.22. Схема *OLED* ($2 \times 2 \times 0,3 \text{ мм}^3$, толщина элемента $\leq 2 \text{ мм}$) [116, 119]:

1 — катод (магний или иттербий); 2 — инжектор электронов; 3 — электропроводящий слой; 4 — эмиссионный слой; 5 — слой из органического полупроводника с «дырочной» проводимостью; 6 — слой, инжектирующий «дырки»; 7 — анод (проводящий прозрачный индий-цинк-оксид, *ITO*); 8 — подложка (стекло)

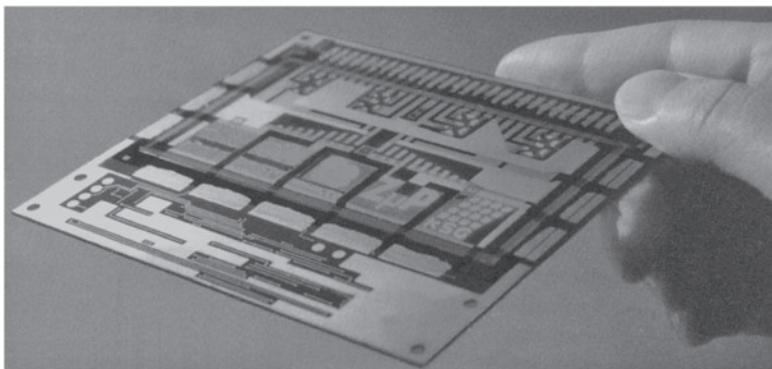
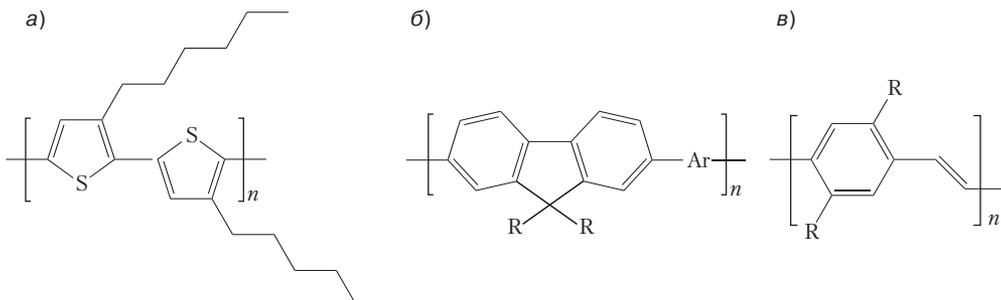


Рис. 1.23. OLED, интегрированные в электронную плату [116]

(лм, люмен, *lumen*, лат. — свет, единица светового потока в системе СИ, 1 лм — световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 стер при силе света 1 кд; стерадиан — телесный угол, вырезающий на сфере, описанной вокруг вершины угла поверхность, площадь которой равна квадрату радиуса сферы), будет меньше 30 долл. США [124].

В органических полевых транзисторах (*OFET*, *Organischen Feld Effekt-Transistoren*), органических резисторных фотоэлементах, органических светоизлучающих диодах (*OLED*, *Organic Light Emitting Diode*) используют полиалкилтиофены (*а*), производные полифлуорена (*б*), производные полифенилвинилена (*в*).



Органические полевые транзисторы *OFET* сохраняют свои характеристики при 85 °С и 85 %-ной влажности без инкапсуляции.

Транзистор с полевым эффектом состоит из 4-х компонентов (рис. 1.24): электрически проводящего, изолирующего, полупроводящего материалов, микросхема из которых сформирована на носителе (основании, подложке).

Транзистор с полевым эффектом в специальной литературе обозначается как «органический» даже тогда, когда органическим является только полупроводящий слой. Все компоненты таких транзисторов могут быть из органических материалов, а сами полимерные транзисторы различаются типом полимерных полупроводников, числом полимерных компонентов (подложка, изолятор, электроды), расположением контактов электродов (*top gate* — наверху, *bottom gate* — внизу).

Наиболее распространенным типом этих устройств является многослойная структура: слой проводящего кремния (подложка с контактами для электродов), слой SiO_2 (изоляция с исток-стоковыми золотыми электродами), полимерный полупроводящий слой (изготавливаются напылением, например, при использовании пентацена, или центробежным методом, при использовании политиофенов).

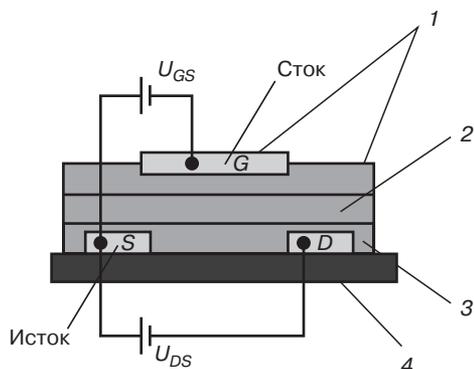


Рис. 1.24. Схема полимерного транзистора с полевым эффектом [125]: 1 — электроды; 2 — изолятор; 3 — полупроводник; 4 — подложка (основание)

Эффективно использование органических проводников с высокой электропроводностью, органических полупроводников с высокой подвижностью носителей заряда, полимеров с хорошими электроизоляционными свойствами.

Используют комбинации материалов и растворителей, которые не растворяют используемые полимеры.

Принцип работы органических транзисторов прост и аналогичен работе тонкопленочных транзисторов (*Thin Film-Transistor, TFT*). Без приложенного напряжения ток не проходит через систему исток-стоковых электродов, так как полупроводящий слой имеет большое омическое сопротивление.

Тем не менее под напряжением образуется очень тонкий проводящий канал « L » в пограничном слое между полупроводником и изолятором из-за накопления носителей заряда, так что ток может течь от исток-электрода к сток-электроду. Сила тока зависит от подведенного напряжения, которое определяет число носителей зарядов, и от подвижности носителей заряда μ (мера скорости носителя заряда).

Число переключений органического транзистора $f = \mu \cdot U_{DS} / L^2$, где U_{DS} — приложенное напряжение; L — длина проводящего канала.

Чем короче L (причем L^2) и выше подвижность μ , тем быстрее переключается транзистор. Длина канала как расстояние между электродами определяется используемой технологией, тогда как подвижность носителя заряда является свойством используемого материала и зависит от степени упорядоченности (структуры) органического полупроводника. Высшая дырочная проводимость свойственна слоям на основе органических веществ с малыми размерами молекул (около $2 \text{ см}^2/U_s$), для полимеров она составляет 10^{-4} – $0,1 \text{ см}^2/U_s$.

Отдельные транзисторы образуют основу, но лишь интегральные полимерные схемы (*IPC, Integrated Plastic Circuits*), полимерные чипы приводят систему многих транзисторов к логическому единству и делают такие интегральные схемы пригодными для практического использования. Не каждый транзистор с идеальной вольт-амперной характеристикой логически пригоден в качестве компонента чипа (микропроцессора). Два транзистора в простейшей интегральной схеме — инвертере (поставщике электронов) будут совместимы, когда высокое напряжение одного (соответствует 1) согласовано с низким (соответствует 0) напряжением другого и наоборот. Важным является тот факт, что инвертер усиливает входящий сигнал. Инвертер работает тогда, когда исходящий сигнал от одного инвертера поступает на вход другого (следующего), что зависит от предельных значений напряжения на транзисторах. Дальнейшие логически работающие схемы в микропроцессорах образуются при дополнительном соединении транзисторов параллельно (*NOR*) или последовательно (*NAND*) входящему транзистору. Все вместе они являются структурными элементами интегральных схем.

При конструировании микропроцессоров, кроме использования логически совместимых транзисторов (для оценки совместимости используется кольцевой осциллограф, который фиксирует колебательный сигнал, подтверждающий работоспособность нечетного количества инверторов, соединенных последовательно), необходимо обеспечить надежный контакт между исток-стоковыми электродами отдельных транзисторов, что требует для интегральных схем со многими сотнями транзисторов использования специальных технологий.

С использованием токопроводящих полимеров уже в 2005 г. разработана (фирма *Poly IC*) быстродействующая интегральная 600 кГц-схема из пяти инвертерных ступеней с 11-ю транзисторами.

Для меггерцевого диапазона эффективность достигнута при напряжении 70 В. Требуется совершенствование литографического процесса для реализации разрешающей способности элементов в 1 мкм, для гигагерцевого диапазона необходима полимерная электроника нового поколения. Электронные печатные схемы (микропроцессоры), базирующиеся на органических проводящих и полупроводящих электрический ток полимерах, существенно расширяет их применение в широком ассортименте изделий за счет замены традиционных электронных изделий, базирующихся на использовании кремниевых полупроводников. При этом стоимость полностью полимерных микропроцессоров может быть существенно снижена. Так, изделие для охранных систем (этикетки *REID-Tags*) с микропроцессором на основе кремния стоит около 1 евро (2005 г.), с полимерным процессором — менее 5 евроцентов, прежде всего, за счет применения растворимых токопроводящих полимеров и технологии непрерывной печати электронных схем на гибких полимерных пленочных подложках (носителях).

Сочетание электропроводящих полимеров с полистиролом, полиэфирэфиркетонем, полиметилметакрилатом, полиэтилентерефталатом, используемыми в качестве электроизоляторов и пленочных подложек, дает возможность изготавливать микропроцессоры без использования металлических и кремниевых компонентов.

Полимерные пленки, используемые в качестве гибких носителей плат печатного монтажа, должны иметь высокую термостойчивость, позволяющую им выдерживать температуры пайки при монтаже элементов, стабильные размеры, высокую изотропию свойств, способность к металлизации, стойкость к тепловому и влажностному старению. Наряду с широко используемыми полиимидными пленками перспективны в качестве гибких подложек микропроцессоров пленки из полиариленов: полифениленсульфида (ПФС), жидкокристаллических полиэфиров (ЖКП), полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) (табл. 1.3).

Температура плавления этих полимеров превышает температуру 250 °С, обычную для процессов пайки, но коэффициенты термического расширения превышают этот показатель для меди ($\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Для формирования токоразводящей электросхемы на плате пленки

Таблица 1.3. Свойства полимеров, определяющих возможность использования их в качестве гибких носителей электронных схем [126]

| Свойства | ПИ | ПФС | ЖКП* | ПЭЭК |
|--|------------------|---------|---------|---------------|
| Ударная вязкость по Изоду, Дж/м ² | 80 | 16 | 530/53 | 83 |
| Относительное удлинение при разрыве, % (при 23 °С, DIN 52455) | 50 | 21 | 2/– | 110 |
| Температура плавления, °С | – | 280 | 280 | 340 |
| Термический коэффициент линейного расширения, 10^{-6} K^{-1} | 25–50 | 55 | 4/38 | 47 |
| Водопоглощение, % (за 24 ч при 23 °С и влажности 50%) | 0,8 | 0,02 | 0,03 | < 0,1 |
| Химическая стойкость | Низкая к щелочам | Высокая | Высокая | Очень высокая |

* Числитель — в направлении литья, знаменатель — поперек.

склеивают с медной фольгой. Прочность при расслаивании клеевого соединения медной фольги с пленкой из ПЭЭК, поверхность которой обработана химическим или плазменным травлением, составляет более 1 Н/мм, что почти в 2 раза превышает требуемый показатель [126].

Разработаны технологии, позволяющие изготавливать интегральные микросхемы на гибких пленочных подложках. Одним из требований к органическим полупроводникам является возможность использования их растворов для формирования слоев, что позволяет изготавливать большой ассортимент интегральных схем методом быстрой печати с использованием системы валиков (*Rolle-zu-Rolle*, технология фирмы *Poly IC*, Германия). Важным шагом в разработке такой технологии является использование литографии, что позволяет изготавливать интегральные схемы в течение 2 ч, а изготовление полностью готового микропроцессора (чипа) менее чем за неделю. По сравнению с кремниевыми чипами производство полимерных чипов дешевле и проще за счет более простого технологического процесса.

На тонкую подложку, например, из ПЭТФ наносится один слой золота (для литографического формирования исток-стоковых электродов транзистора). Полупроводник, например, стереорегулярный поли-3-алкилтиофен наносится из раствора в обычных органических растворителях центробежным способом.

Изоляционный слой центробежным способом наносится из раствора полимера на полупроводящий слой. На последнем этапе напыляют золото для формирования электрода. При такой технологии электроды изготавливают из металла (золота), работа выхода которого совпадает с электропроводностью допированных полианилина или *PEDT/PSS* (допированный полисульфоновой кислотой замещенный полиэтилендиокситиофен). Возможно формирование микросхем с органическими электродами при использовании полимеров с электропроводностью металлов. Ускорение и удешевление производства полимерных чипов достигается использованием непрерывных методов их изготовления, применяемых в технологии печатания. Современные печатные машины могут печатать за несколько минут изделия, площадь которых соответствует годовому производству фабрики по производству кремниевых чипов.

Конечно, этот расчет достаточно условен, но использование непрерывных способов печатания открывает новые возможности для электроники. Способы печатания принципиально возможны применительно к полимерным чипам при использовании растворов соответствующих полимеров (полимерные «электронные чернила»). В этом случае вместо обычных красок для печати используют растворы полимеров, образующих электропроводящие, полупроводящие и изолирующие слои (покрытия). Процесс не так прост, как кажется. Если традиционные способы печатания рассчитаны на восприятие материала человеческим глазом, то при расстоянии между элементами на уровне 10 мкм отдельные печатные фрагменты «сливаются».

Разработана технология печати электронных полимерных чипов на пленочных носителях при низком давлении с использованием специальных приспособлений с допусками около 20 мкм (нанесение линий для проводящих электродов, тонких бездефектных слоев полупроводников и изоляторов, точное оформление схемы и структуры сток-источковых электродов), что определяет специфические требования к печатным машинам, используемым материалам, высокопроизводительным ролик-роликовым установкам (рис. 1.25).

При этом имеются возможности быстрого изменения типов микросхем изменением печатных форм и использования информации о структуре схем в цифровом формате с ее считыванием лазером или световым лучом [126].

Полимерные микропроцессоры используются везде, где они имеют преимущества по сравнению с кремниевыми:

- 1) низкая стоимость как главный критерий конкурентоспособности изделий электроники;
- 2) тонкая, гибкая структура электронных элементов, чипы можно наклеивать как фольгу на полимерные пленки (рис. 1.26) или интегрировать в изделия малых размеров;
- 3) быстрое совершенствование (новые типы электронных изделий разрабатываются так же быстро, как улучшаются такие изделия, как принтеры).



Рис. 1.25. Установка для непрерывной печати изделий полимерной электроники [126]



2)

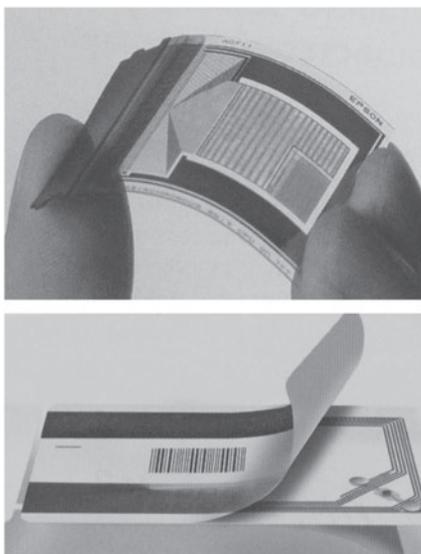


Рис. 1.26. Электронные микросхемы (чипы): 1 — на носителях — гибких полимерных пленках [126] и полимерные *PFID*; 2 — микрочипы радиочастотной идентификации [152]

Полимерную электронику используют в качестве сенсоров, гибких дисплеев, интеллектуальной упаковки, в электронных играх, электронных кодах, радиочастотных метках (содержат индуктивное сопротивление, «откликаются на узкополосный сигнал частотой 125 кГц или 13,56 МГц, передающий определенную информацию, *REID*, *Radio Frequency Identification*, который воспринимает считывающее устройство). *REID*-устройства осуществляют передачу информации без контакта с принимающей электроникой и не требуют источников электропитания. Они могут быть введены в чеки, корпуса изделий, упаковку, одежду, электронные билеты, использоваться при автоматизации технологических процессов, логистике, в качестве компонентов интеллектуальных материалов, в спецификационных документах с указанием производителя, сроков изготовления и хранения, в качестве охранных товарных знаков [126].

Перспективно использование токопроводящих полимеров в радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалах, покрытиях и конструкциях (см. раздел 2.2.2).

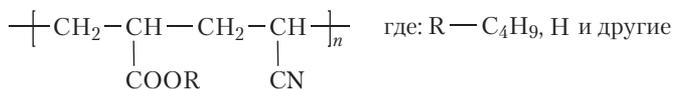
1.3.1.2. Пьезоэлектрические (электроактивные) полимеры

Пьезоэлектрические полимеры и полимерные композиции изменяют свой объем при пропускании электрического тока (электроактивные полимеры, ЭАП; электроактивные материалы, ЭАМ). При изменении линейных размеров на десятки и сотни процентов ЭАП и ЭАМ эффективны в качестве актюаторов ИМ [22, 52].

Известны две группы полимеров, изменяющих форму под действием электрического поля:

1) ионные ЭАП на основе ионных полимерных гелей, иономерных полимерметаллических композиций, электропроводящих полимеров, углеродных нанотрубок (их действие основано на электрохимии — движении или диффузии заряженных ионов в водной среде, необходима эластичная герметичная оболочка, сохраняющая гель; изменяют размеры только при прохождении тока определенного напряжения, иначе проходит электролиз); 2) электронные ЭАП на основе ферроэлектрических полимеров и электрострикционных привитых эластомеров (высокое быстродействие, значительные механические усилия с изменением размеров при воздействии высокого электрического поля, 1–5 кВ напряжения при малой силе тока, почти не нагреваются).

Материалы на основе кремнийорганических каучуков под действием электрического поля сжимаются на 20–30% вдоль силовых линий и расширяются перпендикулярно им (максвелловская деформация). У материалов на основе эластомеров (сополимеры производных акриловой кислоты с различными виниловыми мономерами, при $R-C_4H_9$, $T_c = -35^\circ C$)



с пьезоэлектрической кристаллической фазой удельное смещение под действием электростатического поля достигает 380% (рис. 1.27).

При подаче напряжения положительные и отрицательные заряды (рис. 1.27, б) скапливаются на противоположных пластинах, которые притягиваются друг к другу и расширяются. Тонкая толщиной 30–60 мкм пленка диэлектрического эластомера с обеих сторон лакируется токопроводящей пленкой.

Для ЭАП с большим коэффициентом деформации (разработаны конструкции, изменяющие свою площадь на 50% и сохраняющие эту способность в течение 10 млн рабочих циклов) используют эластичные (растяжимые, рис. 1.27, а) электроды с углеродными наполнителями (сажа, короткие углеродные волокна). Предварительное растяжение полимеров увеличивает коэффициент деформации и электрическую прочность на пробой в 100 раз.

На рис. 1.28 приведены сравнительные данные о коэффициентах деформации (удельное растяжение на единицу длины) в зависимости от силовой характеристики (отношение

достигаемого давления к плотности материала) для различных материалов и устройств, активируемых электрическим током, электростатическим и электромагнитным полями. Наибольшие деформации и усилия свойственны диэлектрическим эластомерам, в частности, акриловым.

В качестве актюаторов могут быть использованы набухающие гели на основе ЭАП.

Полиэлектролиты — полимеры (поликислоты, полиоснования, полиамфолиты), макромолекулы которых содержат ионогенные группы. В растворе полиэлектролиты представляют

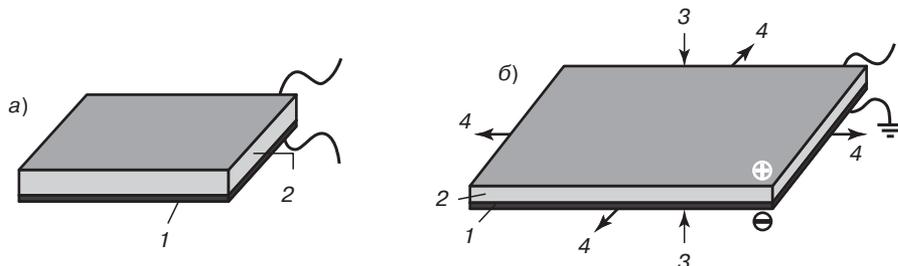


Рис. 1.27. Эффект изменения площади пленочного актюатора на основе ЭАП [52]:

a — напряжение выключено; *б* — напряжение включено; 1 — эластичные электроды; 2 — диэлектрическая эластичная пленка из ЭАП (акрилового эластомера); 3 — сжатие; 4 — увеличение площади

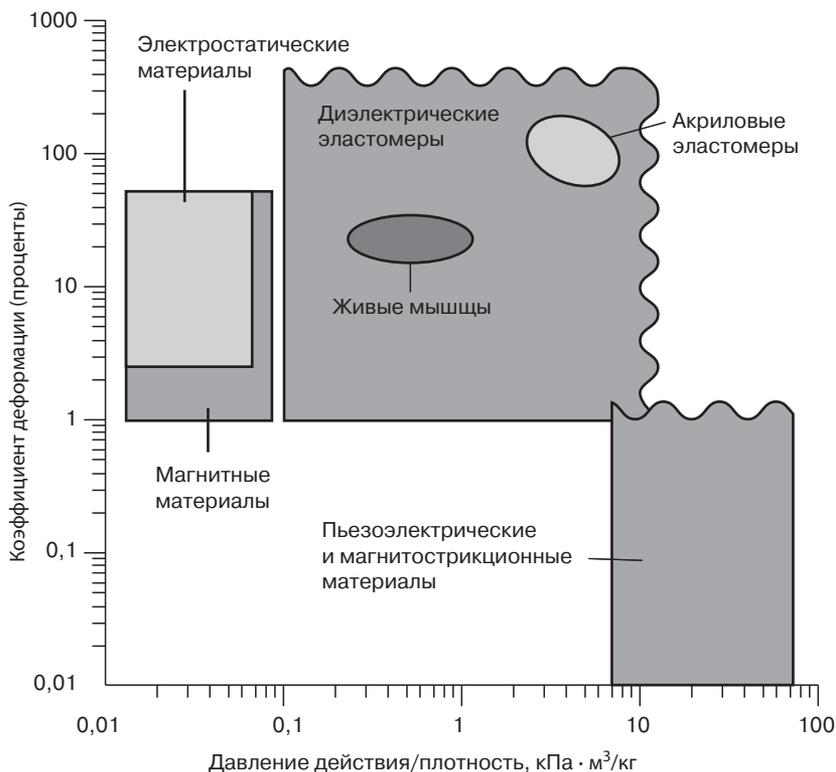


Рис. 1.28. Сравнительные характеристики различных электроактивных материалов [52]

собой полиион, окруженный эквивалентным количеством противоионов (противоположно-заряженных). К типичным полиэлектролитам относятся:

1) полиакриловая, полиметакриловая и другие слабые поликислоты (заряд определяется константами диссоциации ионогенных групп, зависит от pH раствора); полиэтиленсульфокислота, полистиролсульфокислота, полифосфорная кислота с ионогенными группами в основной цепи (сильные поликислоты, в растворе полностью ионизированы независимо от значения pH);

2) поли-4-винилпиридин, поливиниламин и другие (слабые полиоснования, заряд зависит от pH раствора); поли-4-винил-N-этилпиридинийбромид, полимеры с четвертичными $\equiv\text{N}^+$ -атомами азота, фосфора, с третичными $\equiv\text{S}^+$ - атомами серы в цепи (сильные полиоснования);

3) сополимеры неопределенных органических кислот и оснований (метакриловой кислоты и 4-винилпиридина акриловой кислоты и акрилонитрила, биополимеры — белки, нуклеиновые кислоты, полиамфолиты). Суммарный заряд при изменении pH раствора меняет знак, равен нулю в изоэлектрической точке (снижается растворимость и сильно — вязкость растворов).

Для водных растворов полиэлектролитов характерно прогрессирующее возрастание приведенной вязкости при понижении концентрации раствора. Разбавление раствора приводит к увеличению объема, в котором распределяются противоионы. Вследствие этого уменьшается экранирование фиксированных зарядов полииона, возрастает их взаимное отталкивание и полиион набухает («полиэлектролитный эффект»), образуя гель [134–136].

Гелеобразование обусловлено возникновением в объеме жидкой системы пространственной фазовой «сетки», которая лишает систему текучести и придает ей некоторые свойства твердого тела (эластичность, пластичность).

Противоположно заряженные полиэлектролиты образуют полиэлектролитные комплексы (ПЭК), набухающие в водных средах. В воздушно-сухом состоянии ПЭК прозрачны и хрупки, в равновесно-набухшем (в воде) — эластичны.

Полиэлектролитные гели (хемомеханические системы) изменяют свои размеры под действием электрического поля, что связано с электроосмотическими явлениями (осмотическое давление в полиэлектролитной системе определяется противоионами, степенью диссоциации, числом мономерных звеньев в единице объема) в набухающем в растворителе полиэлектролитном геле, что используется при разработке актюаторов, искусственных мускулов (при высокой биологической совместимости гелей с живыми тканями).

Нанокompозитные аэрогели (твердые наночастицы в «жидком» геле, например, аэрогели с наночастицами кварца в полиэтиленгликоле, полиизоцианите) задерживают пенетрацию объектов (осколков, пуль), летящих со скоростью до 600 м/с, благодаря застекловыванию геля при ударном воздействии с последующим самопроизвольным обратимым восстановлением («жидкая» броня).

Гели — дисперсные системы, образующиеся из микрогетерогенных коллоидных растворов (золей) при полной или частичной их коагуляции в результате сцепления частиц дисперсной фазы по отдельным точкам поверхности и удерживания (иммобилизации) жидкой дисперсионной среды (вода, углеводороды) в ячейках возникшей структуры. Контакт между частицами геля осуществляется через тонкую прослойку дисперсионной среды за счет вандер-ваальсовых сил (2–40 кДж/моль). Характерные свойства такой структуры — малая прочность, пластичность, некоторая эластичность, тиксотропия — способность самопроизвольно обратимо восстанавливаться после механического разрушения. Гели из ЭАП (например, из полиакриловой кислоты в слабощелочной водной среде) изменяют свой объем при пропускании электрического тока. На рис. 1.29 приведена схема актюатора из ионного ЭАП на основе геля, обеспечивающего значительное изменение геометрии поверхности. Гель при включении напряжения вытекает из области расширения пленки из ЭАП за счет ее утончения и создает выступы там, где пленка из ЭАП сжимается.

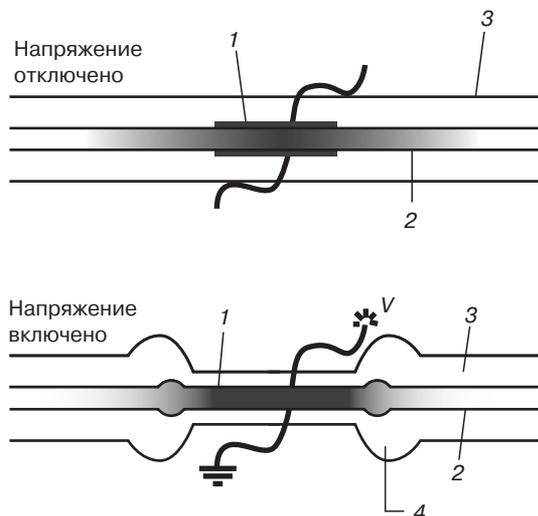


Рис. 1.29. Схема работы актюатора на основе геля ЭАП [52]:

1 — эластичные электроды; 2 — пленка из ЭАПа; 3 — гель из ЭАП; 4 — изменение поверхности при включении напряжения

Полимерные гели фирмы *Fuji Xerox* изменяют свои размеры, объем в зависимости от температуры, света, электрического поля, а гелевые частицы размером 20–200 мкм с пигментами в растворах под действием тех же факторов изменяют свой цвет (аналогично изменению пигментации кальмарами и осьминогами) при изменении объема [127].

Актюаторы из ЭАП в виде диафрагмы (в диафрагменных приводах с изменением объема) при включении напряжения обеспечивают большие смещения, чем при использовании пьезоэлектриков (диафрагма из плоской превращается в полусферическую, рис. 1.30).

Актюаторы на основе ЭАП обеспечивают линейные (рис. 1.31, а) и сложные (рис. 1.31, б) перемещения.

Электроактивные полимеры, в которых реализуются преобразования химических, тепловых, механических изменений в электрические сигналы и наоборот, используются для изготовления изделий микромеханики (актюаторов) и датчиков (сенсоров) и являются конкурентами классических керамических материалов.

Их использование базируется на пьезоэффекте и электрострикции (рис. 1.32).

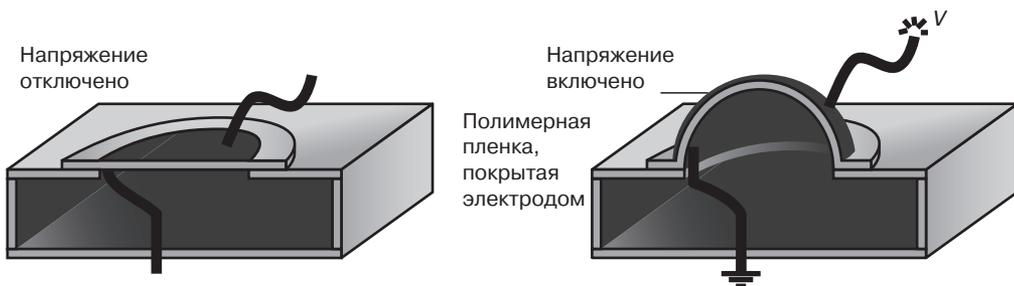


Рис. 1.30. Изменение формы диафрагмы из ЭАП при включении электрического напряжения [52]

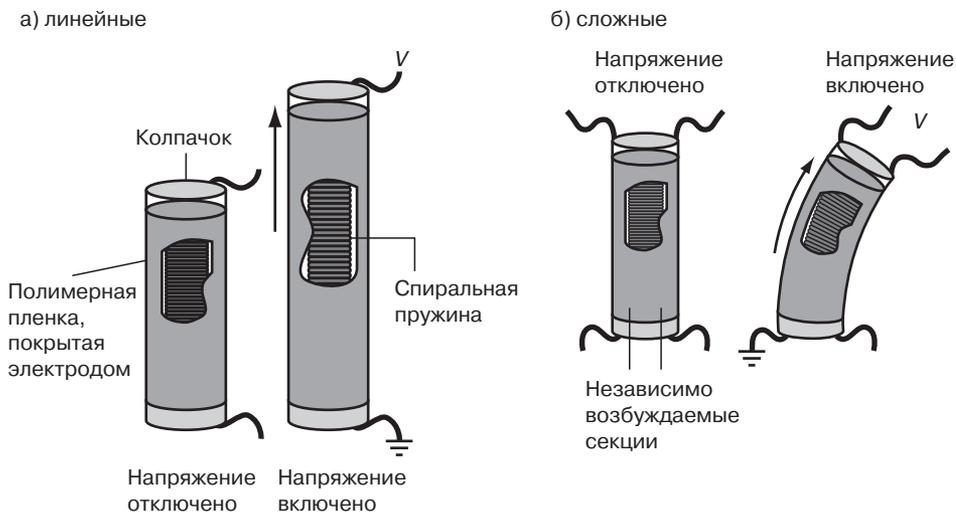


Рис. 1.31. Актуаторы из ЭАП для различных типов перемещений [52]

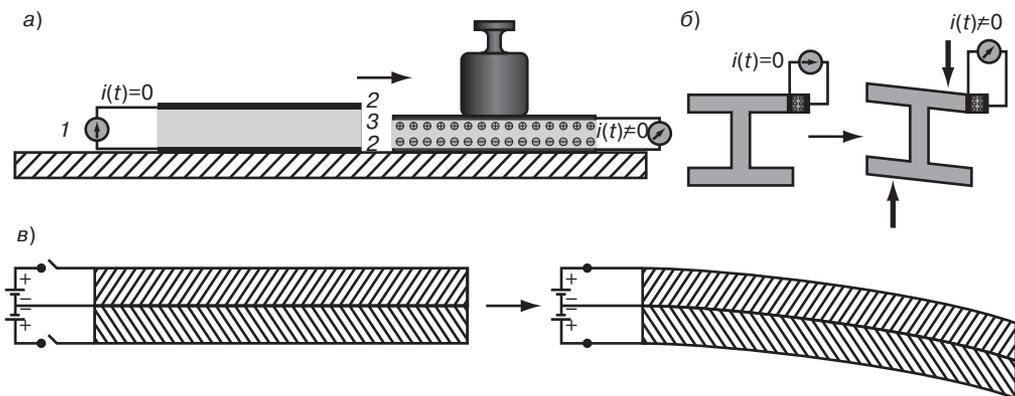


Рис. 1.32. Схемы, иллюстрирующие пьезоэффект и электрострикцию [128]:

а — возникновение электрических зарядов при механическом нагружении (на схеме — сжатие) пьезоэлемента: 1 — измерение количества зарядов (в кулонах, Кл, англ. — с); 2 — токопроводные (металлические) верхний и нижний слои; 3 — пьезоэлектрический материал;

б — сенсорный элемент в виде балки из пьезоэлектрика (фиксируется появление электрических зарядов, электрического тока, например, при сдвиге);

в — деформация биморфной балки, основанная на взаимосвязи пьезоэффекта и электрострикции, возникающая при подаче электрического напряжения

Пьезометр — устройство для измерения линейной деформации твердого тела (пьезоэлектрических материалов, структурные элементы которых не имеют центра симметрии (пьеза — единица давления и механического напряжения, $1 \text{ пз} = 1 \text{ стен/м}^2 = 10^3 \text{ Н/м}$).

В пьезоэлектрических (электроактивных) материалах электрические заряды возникают при деформациях материала (прямой пьезоэффект), а под действием электрического поля происходит деформация материала (обратный пьезоэффект).

Электрострикция — деформация диэлектрика под действием внешнего электрического поля (пропорциональна квадрату напряженности поля и не зависит от изменения его направления на обратное, в отличие от обратного пьезоэффекта).

Измерительное преобразовательное действие пьезоэлектрического датчика (сенсора) основано на пьезоэлектрическом эффекте и служит для преобразования механического усилия в электрический сигнал.

Простейший пьезосенсор — пластина пьезоэлектрика, зажата между двумя металлическими обкладками, к которым прикладывается измеряемое усилие. Возникающая между обкладками ЭДС пропорциональна усилию.

При прямом пьезоэлектрическом эффекте при механической нагрузке на поверхности материала возникают электрические заряды, которые являются источником тока в электрической цепи. Сила тока соответствует уровню механического нагружения, которое в течение времени может изменяться (колебаться). Деформация под действием звукового давления также может вызывать возникновение электрического тока с определенным напряжением. Отношение между величиной нагрузки и специфическим поверхностным зарядом характеризуют пьезокоэффициентом (пьезомодули d_{33} , d_{31} , единицы измерения pC/N^{-1} , то есть пКл/Н, пикокулон/Ньютон, пико — 10^{-12} , используют также для оценки величины деформации в зависимости от напряжения; размерность м/В, например, пьезомодуль керамики ЦТС, цирконат и титанат свинца, $d_{33} = (4-5) \cdot 10^{-10}$ м/В, $d_{31} = (1,5-2,5) \cdot 10^{-10}$ м/В).

Пьезокоэффициент зависит от вида нагружения (растяжение, кручение, сжатие) и структуры (анизотропии) электроактивного материала. Пьезоэффект является сенсорным эффектом. Деформация, зависящая от нагрузки, количественно связана с образующимися электрическими зарядами. Механические напряжения могут воздействовать непосредственно на пьезоэлектрический материал или воздействовать на материал, в котором размещен пьезоэлектрик в качестве сенсора.

При обратном пьезоэффекте воздействие электрического напряжения приводит к деформации материала. Эта деформация также может быть различной (сжатие, растяжение, кручение). И при обратном пьезоэффекте деформация, например, относительное удлинение (сжатие) пропорциональна напряжению, а именно квадрату напряжения электрического поля (линейный эффект, характеризуемый как электрострикция). Оба эффекта практически могут использоваться, (исходя из их физической природы, в одних и тех же или весьма различных устройствах).

Материалы, для которых характерен обратный пьезоэффект, или электрострикционные, являются материалами для исполнительных механизмов (актюаторов), они преобразуют электрический сигнал в деформацию пьезоэлемента или в деформацию материала. При использовании нескольких элементов, стимулирующих деформации различных типов и направлений (анизотропных), возможна реализация различных комплексных типов деформаций и перемещений. Актюаторы на основе электроактивных материалов обеспечивают линейные и сложные перемещения благодаря электромеханической активности. В самоадаптирующихся интеллектуальных материалах ИВПКМ они обеспечивают гашение колебаний, снижают вибрации, регулируют процессы растяжения, сжатия волокон, обеспечивая максимальное противодействие внешним воздействиям, адекватную реакцию материала, приводящую к требуемому изменению его свойств.

Разработка электроактивных полимеров расширила ассортимент пьезоэлектрических и электрострикционных материалов, представленный ранее природными и синтетическими пьезоэлектрическими монокристаллами и пьезокерамикой.

Классическими пьезо- и электрострикционными материалами являются цирконат-титанат-свинцовые керамики, кварц, которые используются в виде пластин с точно установленной механической частотой колебаний, выполняющих при пьезоэлектрическом возбуждении роль датчика тактовых импульсов в часовом механизме.

Пьезоэлектрические и электронные параметры электроактивных полимеров, полимерных и керамических материалов приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Пьезоэлектрические и электрострикционные параметры полимерных и керамических материалов [128]

| Материалы | Пьезокоэффициент (пьезомодуль) d , пКл/Н ¹ | Соотношение механического напряжения и электрического тока при пьезоэффекте $g \frac{mV/m}{H/m^2}$ | Удлинение (деформация, %) при электрострикции при напряжении в мВ/м | Электрически индуцированная специфическая механическая энергия при электрострикции, Вт/м·Дж·м ⁻³ | Коэффициент электромеханической связи при пьезоэффекте (K_p) ² и электрострикции (K_e), % |
|---|---|--|---|---|--|
| ПВДФ | 25 (d_{31}) | 200 | 0,1% при 250 мВ/м | 10^{-3} | 16(K_p), 7(K_e) |
| Сополимер винилиденфторида и трифтор-этилена | 25 | 150 | 4,0% при 150 мВ/м | 0,3 | 20(K_p), 5(K_e) |
| Пористый полипропилен ³ (рис. 1.33, а) | 200(d_{33}) | — | — | 10 | — |
| Многослойный ПТФЭ (рис. 1.33, б) | 600(d_{33}) | — | — | — | — |
| Полисилоксаны | — | — | 32% при 235 мВ/м | — | — |
| Жидкокристаллические эластомеры | — | — | 4% при 1,5 мВ/м | — | — |
| Кварц | 2 | 50 | — | — | 9(K_p) |
| Керамика ВаTiO ₃ ⁴ | 78 | 5 | — | — | 21(K_p) |

¹ В России пьезомодуль d (размерность пКл/Н, пико = 10^{-12} , за рубежом — pCN⁻¹; для пьезомодулей d_{33} , d_{31} используют и показатели с размерностью м/В).

² В России $K_p = K_{33}$.

³ Промышленный тип *EMFi HS01* (Германия).

⁴ Пьезохарактеристики пьезокерамики ЦТС-19 (ВаTiO₃): объемный пьезомодуль $d_{33} = (4-5) \cdot 10^{-10}$ м/В; $d_{31} = (1,5-2,5) \cdot 10^{-10}$ м/В; коэффициент электромеханической связи $K_{33} = 0,6-0,7$; механическая добротность $Q = 70$.

Поливинилиденфторид (ПВДФ) после специальной обработки, приводящей к его поляризации, становится пьезоэлектриком. Пьезоэффект у высокоактивных пьезополимеров обеспечивает образование зарядов до 1 мКл на м^2 поверхности, что при площади сенсора в 10 см^2 в течении 1 мс приводит к току силой до 1 мА. Существенным структурным признаком материала, проявляющего пьезоэлектрические свойства, является его многофазность. Этот физический принцип был использован при разработке пористых полимерных пленок. Поры в пено- и поропластах при наличии переносчиков зарядов (ионов или электронов) к их поверхности образуют специфические диполи (рис. 1.33).

Пористые полимеры (как и ПВДФ) поляризуются. Для сохранения зарядов необходима тщательная электроизоляция. В пористом полипропилене пьезомодуль d_{33} достигает 200 пКл/Н. Такие пьезоактивные пленки производятся промышленностью, но цена их высока (около 300 евро/ м^2 , 2006 г.). В полипропилене оптимальный диаметр пор находится на уровне 5–10 мкм, а поверхность пленки не должна содержать пор. Обычный пенополипропилен не проявляет пьезоактивности, для реализации которой необходима антистатическая обработка.

Пьезоактивность зависит от частоты электрического тока и уровня нагрузки (эластичность пенопластов с увеличением давления сильно снижается). Электрическое напряжение, нагревая материал до 60°C в течение некоторого времени, вызывает деструкцию недостаточно термостойкого полимера, но в ряде случаев такой нагрев не имеет места.

Альтернативой пористым полимерам являются фторированные полимеры с более высокими проводимостью положительных зарядов и пьезомодулями (для сэндвичей из пористого и непористого ПТФЭ пьезомодуль $d_{33} = 600$ пКл/Н).

Особый интерес представляют эти материалы для звуко(шумо) изоляции, например, для шумоизоляции салона автомобиля. Он облицовывается полимерной пленкой, принципы работы которой заключаются в том, что сначала она регистрирует звук (работает как сенсор, микрофон), затем, после электронного анализа, соответствующий электрический сигнал преобразуется

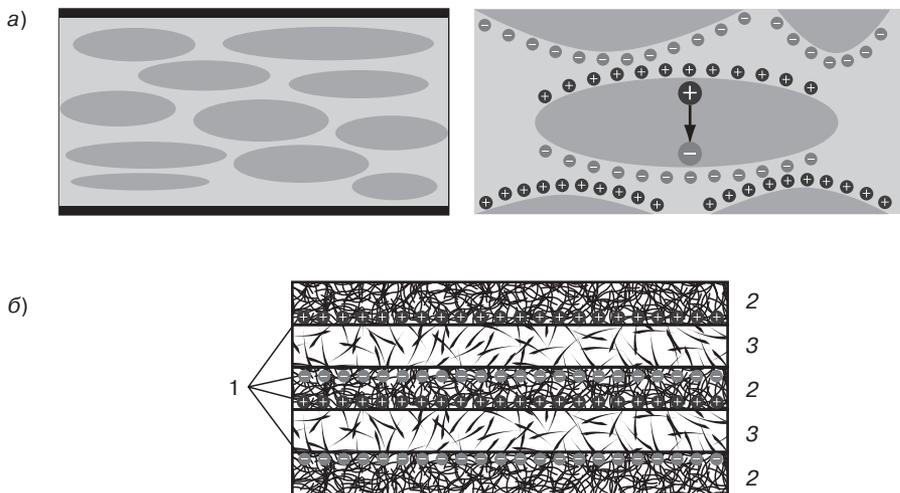


Рис. 1.33. Типы полимерных пьезоэлектриков [128]:

а — Пористый полимерный пьезоэлектрик: на внешней поверхности пор находятся заряды, создающие в порах дипольный момент, при этом материал полностью поляризуется; толщина двойного электрического слоя — до 50 мкм, количество зарядов около 1 мКл/ м^2 ; б — Многослойная (сэндвичевая) система из фторосодержащих полимеров, плотность зарядов достигает 1 мКл/ м^2 ; 1 — положительные и отрицательные заряды на поверхности сплошных слоев; чередование слоев из сплошного (2) и пористого (3) ПТФЭ

в звуковой [128] сигнал, который равен по величине первоначальному звуковому сигналу, но по фазе сдвинут на 180° . Этот сигнал снова проходит через пленку, которая работает уже как актюатор (динамик). При совпадении во времени первоначальных и синтезированных звуковых волн происходит их интерференция, и шум поглощается.

С помощью таких материалов имеются возможности контроля свойств деталей и агрегатов (нахождение дефектов способствует их своевременной замене).

Эластомеры с большой электрострикцией предназначены для использования в искусственных мышцах, для замены мышечной массы. С ними можно изготавливать детали роботов с человеческими контурами и исполнительными навыками.

Электрострикционные полимеры при приложении электрического напряжения изменяют свои размеры на 10–100%. Диэлектрические эластомеры, используемые для изготовления «живых» мышц, имеют коэффициент деформации (удельное растяжение на единицу длины) выше 100% (зависит от силовой характеристики, отношения давления к плотности материала, $\text{кПа}\cdot\text{м}^3/\text{кг}$). Коэффициент деформации акриловых эластомеров достигает 200% при $1,5\text{--}8\text{ кПа}\cdot\text{м}^3/\text{кг}$. Электроактивные полимеры использованы для изготовления искусственных мышц двух типов:

1) ленты из фторсодержащих полимеров (ПВДФ, сополимер винилиденфторида и трифторэтилена, многослойный ПТФЭ, сополимеры с перфторметил (пропил) – виниловыми эфирами) и жидкокристаллических эластомеров); при подаче электрического тока распределение зарядов на поверхности лент изменяется и они сгибаются; разнообразие возможных движений определяется конфигураций лент;

2) пластины из электроактивных полимеров свернутые в трубочки при подаче напряжения сжимаются и сдавливают эластичную сердцевину, заставляя ее вытягиваться.

Искусственные мышцы фирмы *Artificial Muscle* (США) на основе электроактивных полимеров (*EPAM, Electroactive Polymer Artificial Muscle*) выдерживают до 17 000 циклов сжатия-растяжения в секунду, срабатывают миллионы раз при изменении длины более чем на 15% (достигнуто изменение длины в 3,8 раза с резким уменьшением числа итераций) и рассматриваются как перспективные твердотельные приводы (актюаторы), превосходящие электромагнитные, пневматические, гидравлические, пьезоэлектрические приводы по параметрам скорости, удельной мощности, массе, стоимости. Возможные области применения электроактивных полимеров приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Возможности практического использования пьезоэлектрических полимерных материалов* [128]

| Тип изделия | Применение | Преимущества полимерных пьезоэлектрических материалов перед керамическими |
|----------------------------------|--|---|
| Датчики движения (акселерометры) | Биосенсоры, роботы, микромеханика, системы безопасности | Высокая чувствительность, неразрушающие измерения, гибкость, вариабельность форм и размеров |
| Микроизделия | Микроактюаторы (исполнительные механизмы), биосенсоры, роботы, микромеханика, системы контроля | Малая масса, вариабельность форм и размеров |
| Сенсоры давления | Диагностика и биосенсорика | Большой диапазон частот, вариабельность форм и размеров |

* Прежде всего пористые полимерные пьезоэлектрики.

Окончание табл. 1.5

| Тип изделия | Применение | Преимущества полимерных пьезоэлектрических материалов перед керамическими |
|--------------------------------|---|---|
| Медицинские сенсоры | Контроль параметров организма, в том числе детского, системы безопасности (например, для предотвращения внезапной детской смертности) | Большие поверхности, высокая чувствительность |
| Пьезоэлектрические микрофоны | Коммуникационные технологии, активное звукопоглощение | Высокая чувствительность, оптимальные акустические характеристики в воздушной среде |
| Пьезоэлектрические динамики | Плоские динамики, активное звукопоглощение | Оптимальные акустические характеристики в воздушной среде, разнообразие размеров и форм |
| Ультразвуковые детекторы | Медицинская диагностика, коммуникации | Оптимальные акустические характеристики в жидких средах, широкий диапазон частот, вариабельность форм |
| Гидрофоны | Подводные звуковые детекторы | Оптимальные акустические характеристики в жидких средах, широкий диапазон частот, вариабельность форм |
| Детекторы тепла | Излучение малых тепловых потоков | Малая собственная масса, вариабельность форм |
| Мультифункциональные детекторы | — | — |

Энергия движения (давления) преобразуется в электрический ток с большим зарядом и напряжением в 3–5 В в пьезоконвертерах, которые используются в устройствах (электроника без батареек), не требующих источника питания (пульты, калькуляторы, беспроводные выключатели, электротермометры, электронные замки датчики, сигнальные устройства и др.).

Изменяют размеры и формы, то есть могут быть использованы в качестве исполнительных механизмов (актюаторов) в адаптирующихся ИВПКМ, ИМ, полимеры, полимерные материалы различных типов: электроактивные, термоактивные (термочувствительные), фоточувствительные, оптически активные, различающиеся уровнем деформаций и значениями удельной работы на единицу массы (механической активностью, величиной актюаторных напряжений, табл. 1.4, 1.6).

1.3.1.3. Жидкокристаллические полимеры

Жидкокристаллические полимеры (ЖКП) сочетают уникальные свойства жидких кристаллов на основе органических молекул асимметричной вытянутой формы (способность изменять свойства под действием различных внешних факторов — температуры, электрического и магнитного поля и др.) и полимеров, позволяющих изготавливать различные изделия (формованные, пленки, волокна, покрытия, компоненты ИМ), в которых реализуются специфические свойства, присущие жидкокристаллическим системам.

Таблица 1.6. Сравнительные характеристики материалов, определяющие эффективность их использования в качестве актюаторов [108, 109, 133]

| Характеристики | Типы материалов | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------------|---|-----------------------------|------------------------|
| | Термочувствительные ВПКМ | Пьезокерамика | Биморфные материалы | Сплавы с памятью | Термоактивные ЖК-эластомеры | Полиэлектролитные гели |
| Деформация, % | >1 | 0,1–0,3 | ~1,0 | Менее 8 (необратимая), Менее 2 (обратимая) | 400 | >10 |
| Величина актюаторного напряжения | 5–50 МПа | 30–40 МПа | >200 МПа | ~700 МПа | 100 кПа | 10–30 МПа |
| Удельная работа, Дж/кг | 30–40 (40–50 кДж/м ³) | 0,3–6,8 | 20–25 | До 2000 | — | 10–30 |
| Плотность, г/см ³ | 1,4–2,3 | 6–8 | 5–7 | 6–7 | 1,2–1,4 | 1,0–1,2 |

Способность полимеров в жидком состоянии сохранять высокую степень упорядоченности впервые предсказал Флори в 1956 г. На основе изучения термодинамических свойств растворов полимеров он пришел к выводу, что полимеры, которые состоят из звеньев с жесткой молекулярной структурой, должны образовывать анизотропные упорядоченные растворы выше некоторой минимальной концентрации, зависящей от температуры и отношения длины к диаметру стержневидных участков полимерной молекулы. Такое поведение было обнаружено у концентрированных растворов некоторых полипептидов. В растворах этих полимеров образуются стержневидные структуры за счет стабильных геликоидальных конформаций полимерных молекул. Спонтанное упорядочение этих геликов придает их растворам анизотропные ЖК-свойства.

Состояние вещества, структура которого в жидком состоянии (в расплаве или растворе) имеет черты, характерные как для жидкости, так и для твердого тела — мезоморфное (мезос, греч. — промежуточный) состояние характерно для анизотропных жидкостей (низкомолекулярных жидких кристаллов, ЖКП).

Известны три типа ЖК с различным порядком жидкокристаллической организации: нематические, смектические, холестерические (особая форма нематического состояния) ЖК (рис. 1.34).

Нематическое ЖК-состояние представляет собой одно из сравнительно малоупорядоченных состояний, при котором молекулы или повторяющиеся звенья располагаются параллельно при отсутствии порядка в перпендикулярном направлении.

В нематическом мезоморфном состоянии (наиболее характерном для ЖКП, нематика, нема, греч. — нить) длинные оси мезофаз ориентированы параллельно вдоль определенного направления, но жесткие блоки смещены относительно друг друга, не образуют параллельные слои, центры тяжести у них расположены беспорядочно (рис. 1.34, 2).

Термин «нематический» был применен к низкомолекулярным ЖК, которые при наблюдении в поляризованном микроскопе выглядят как нитевидные (качественная идентификация нематической структуры в термотропных ЖКП).

Более упорядоченное (смектическое) состояние похоже на структуру твердого кристалла. При таком состоянии молекулы или повторяющиеся звенья имеют как продольный, так

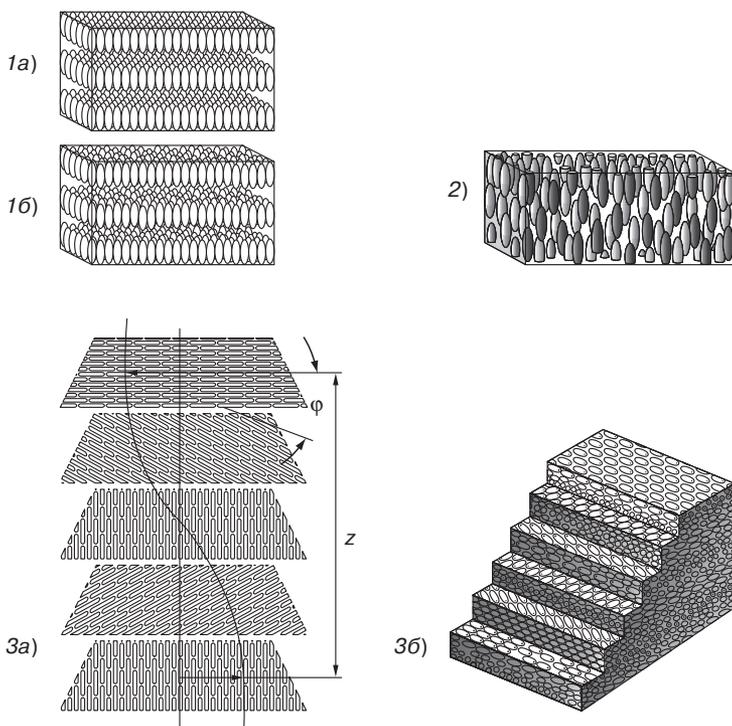


Рис. 1.34. Типы термотропных жидких кристаллов [80]:

1 — смектический с упорядоченным (а) и беспорядочным расположением молекул в слоях (б); 2 — нематический; 3 — холестерический

и поперечный порядок. Смектическая упорядоченность наблюдается у термотропных ЖКП (рис. 1.34, 1а).

В смектическом мезоморфном состоянии стержнеобразные звенья (блоки) расположены параллельно и образуют слои одинаковой толщины, близкой к длине блока мезофазы, которые подвижны и легко перемещаются параллельно друг другу (смектики, смекта, греч. — слой).

В холестерическом мезоморфном состоянии молекулы в ЖК, мезогенные блоки в ЖКП расположены в слоях, как в смектиках, а оси их параллельны плоскости слоев, как в нематиках (рис. 1.34, 3).

Мезогенные блоки холестерических ЖКП собраны в слои, но каждый слой повернут относительно предыдущего на определенный угол ϕ , так что в целом реализуется некоторая винтообразная структура с шагом спирали «z» порядка длины волны видимого света (рис. 1.34, 3а). Группировки жестких блоков у холестериков располагаются на определенном расстоянии друг от друга, подобно ступенькам винтовой лестницы (рис. 1.34, 3б). Шаг спирали чрезвычайно чувствителен к различным внешним воздействиям, в частности к температуре. Лучи разной длины волны отражаются холестерическими ЖКП в зависимости от шага спирали. При повышении температуры шаг спирали укорачивается и отражается коротковолновый диапазон, при снижении температуры шаг спирали удлиняется и отражается длинноволновый диапазон. Свет с длиной волны, отличающейся от шага спирали, поглощается.

Для многих жидкокристаллических полиэфиров характерна оптическая активность, проявляющаяся в переходе при плавлении из смектической в нематическую или холестерическую фазы [88].

Некоторые ЖКП могут находиться поочередно в двух мезоморфных фазах: холестерической и смектической.

Анизотропная (смектическая, по оптическим структурам) фаза присутствует в полимере на основе звеньев из 4,4'-диоксибифенила (30 %мол.) и эфирсульфона (фазовые разделение сегментов, по ДСК — две температуры стеклования) [89].

Полимеры, у которых длина основной цепи значительно превышает длину ответвлений, располагающихся в каждом мономерном звене, называются гребнеобразными (гребневидными).

Полимеры, содержащие жесткие линейные сегменты (которые за их способность образовывать организованные мезофазы называют мезогенными) получают двумя путями: жесткие сегменты помещают непосредственно в основной цепи полимера или прикрепляют к ней как боковые группы [80–82].

Полимеры с жесткими циклическими (мезогенными) звеньями в основной цепи обладают свойствами жидких кристаллов, регулирование мезоморфных переходов которых и свойств достигается комбинацией жестких звеньев с гибкими (спейсерными), длиной и последовательностью мезогенных и гибких сегментов.

Макромолекулы термотропных ЖКП содержат мезогенные (жесткие) и гибкие (спейсерные) блоки и звенья в главных цепях с уменьшенной симметричностью звеньев или мезогенные звенья (блоки) в боковых ответвлениях (гребневидные ЖКП) (рис. 1.35).

Мезофазные (лиотропные смектические) структуры образуют многие биоорганические полимеры (нуклеиновые поликислоты, в частности ДНК — носитель наследственной информации, миозин — сократительный белок мышечной ткани, коллаген — белок соединительной ткани). Мезоморфные свойства полимеров фиксируются различными способами, например, методами ДСК и ДТА. На кривых ДСК при нагревании фиксируются эндотермические пики, соответствующие фазовым переходам твердый кристалл → жидкий кристалл и жидкий кристалл → плавление; при охлаждении — экзотермический пик, соответствующий переходу в ЖК-состояние, с мезофазой, стабильной при 20 °С. Длина спейсерного блока определяет область ЖК-фазовых переходов.

Первыми синтетическими полимерами, обладающими технически полезными ЖК-свойствами явились ароматические полиамиды, которые в определенных растворителях показывают лиотропное поведение.

Ароматические полиамиды, цепи которых построены из фенильных звеньев, соединенных между собой в параположении амидными группами (что обеспечивает сопряженность связей и высокую жесткость цепей), переходят в мезоморфное состояние при значительном разбавлении растворов до концентрации полимера в растворителе 5–10% (лиотропная, лио — греч. — растворяю, ЖК-система). Волокна *Kevlar*, СВМ, Терлон, Русар, полученные из высокоупорядоченных растворов параполиарамидов, имеют σ^+ до 5 ГПа и E^+ до 190 ГПа.

Гибкие спейсерные звенья (блоки), содержащие вторичные аминогруппы, улучшают растворимость полимеров, снижают температурный интервал существования мезоморфного (жидкокристаллического) состояния и температуру плавления [84].

Для проявления мезоморфного ЖК-состояния требуется высокая асимметрия в химическом строении макромолекулы и физическая асимметрия, т. е. вытянутость молекулы в равновесном состоянии. В ЖКП жесткие блоки перемещаются относительно друг друга (например, в процессе литья, получения волокон), но их ориентация сохраняется.

Одним из свойств растворов и расплавов ЖКП является помутнение, окрашивание, опалесценция. Анизотропная фаза ароматических полиамидов радужно окрашена (наблюдения в поляризационном микроскопе), а при достижении определенной концентрации их растворы становятся двулучепреломляющими (изменение цвета ЖК и ЖКП в изделиях квантовой электроники).

В 1973 г. фирмой *Tennessee Eastman Co.* (США) синтезированы ароматические сополиэфиры — термотропные нематики, из которых при литье под давлением получены пластики

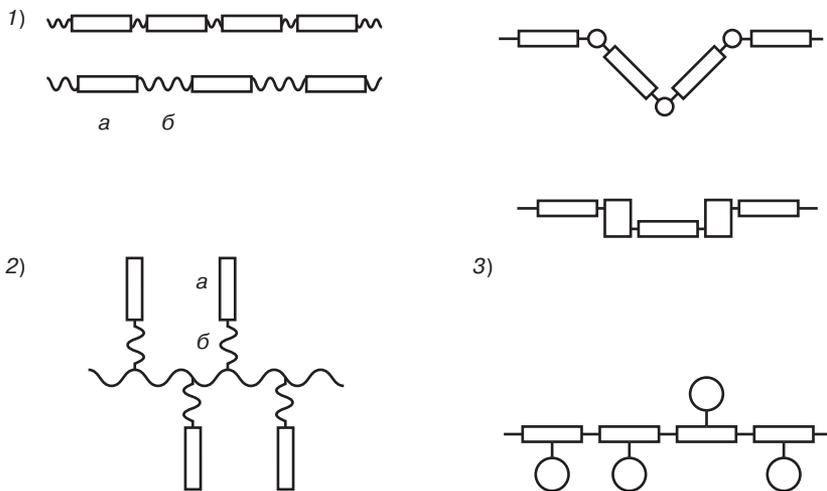


Рис. 1.35. Схемы морфологических структур термотропных жидкокристаллических полимеров [83]:

1 — полимеры с мезогенными (а) и гибкими (спейсерными, б) блоками (звеньями); 2 — разветвленные сополимеры с мезогенными (а) и гибкими (б) боковыми звеньями (гребневидные); 3 — сополимеры с уменьшенной симметричностью звеньев

с высокой прочностью и жесткостью. Их нематические свойства в продольном направлении в десять с лишним раз выше, чем в поперечном благодаря исключительно высокой степени ориентации, достигаемой в ЖК-состоянии, о чем свидетельствует и высокофибриллярная природа поверхностей разрушения таких полимерных материалов.

Для ЖК ароматических полиэфиров характерны и явления самоупрочнения, приводящие к специфическим полимерным материалам, — молекулярным композиционным.

Кроме ароматических полиамидов, полиэфиров, полибензимидазолов, полиимидов и др., в ЖК-состояние способны переходить полимеры с критическим значением фактора гибкости макромолекул $f_c > 0,63$ (фактор гибкости макромолекул по Флори f_c характеризует действительную вытянутость макромолекул, жесткость в равновесном состоянии): полипропилен, политетрафторэтилен, полисилоксаны, полиакрилаты и некоторые другие.

Внешние поля, ориентация, энергические факторы физико-химической природы могут и для гибкоцепных полимеров привести к повышению $f_c > 0,63$, и к реализации ЖК-состояния [80, 81].

Лиотропные жидкокристаллические фазы (мезофазы кубической, гексагональной, ламellarной, нематической структуры) образуют в водных растворах разветвленные полисилоксаны с бифенильными $C_6H_4-C_6H_4$ боковыми группами. Жидкокристаллическая кубическая мезофаза образована из сферических мицелл, расположенных в виде кубической решетки, гексагональная — стержневыми мицеллами, ламellarная — дискообразными мицеллами.

ЖКП с мезогенными и электродонорными группами $-N=N-$, $-CH=CH-$ в боковых звеньях, для которых характерна большая анизотропия диэлектрической проницаемости, перспективны для использования в устройствах нелинейной оптики (генерация 2-й гармоники), для которых используются ЖКП с низким оптическим поглощением и рассеянием, с высокой концентрацией хромофорных групп [85–86].

Жидкокристаллическое состояние наиболее характерно для веществ и полимеров, содержащих бензольные или нафталиновые циклы, соединенные в *n*-положении группами $-COO-$, $-CONH-$, $\equiv C-NH-$, $-CH_2-CH_2-$, $-N=N-$, $-NH-CH_2-$, $-CH=N-NH-$.

Гребневидные высшие полиалкилакрилаты и полиметакрилаты (с длинными алкильными, $n > 10$ или арильными радикалами) кристаллизуются путем упаковки боковых ответвлений (цепей) в гексагональные решетки (кристаллизуются боковыми звеньями, а не основной цепью), при этом увеличивается и жесткость основной цепи из-за взаимодействия в ответвлениях.

Если гребневидный гомополимер содержит в качестве боковых групп радикалы, способные в свободном виде образовывать жидкие кристаллы, то на молекулярном уровне реализуется особый тип вторичной структуры, характеризующейся внутримолекулярным жидкокристаллическим порядком (эффект близок к микроагрегации в привитых сополимерах).

Гребневидные ЖКП с мезогенными группами в боковых звеньях (холестерики, см. рис. 1.35, 2) имеют уникальные свойства. Длинная полимерная цепь тормозит перестройку спиральной структуры, замедляет кристаллизацию мезогенных блоков, но спейсерная «ножка» стимулирует формирование холестерической мезофазы (своеобразная память полимеров), которая определяет физико-механические и оптические свойства.

Анизотропные полимерные структуры образуются в расплавах (термотропные ЖКП) или растворах (лиотропные ЖКП) с последующей фиксацией структуры в твердом агрегатном состоянии в формованных изделиях, пленках, волокнах, покрытиях.

Термотропные ЖКП-системы обладают специфически упорядоченной лабильной структурой, которую можно видоизменять при механических, электрических и магнитных воздействиях для придания требуемых свойств (например, для ориентации компонентов в молекулярных композитах).

В полимерах чаще всего реализуются нематические формы жидкокристаллического фазового состояния, в которых макромолекулы расположены параллельно друг другу и имеется ближний ориентационный порядок.

Нематические домены обладают определенной автономностью. В сильных магнитных полях домены, состоящие из 10^6 – 10^8 диамагнитных жесткоцепных макромолекул, подобно крупным парамагнитным частицам ориентируются в направлении поля. По своим оптическим свойствам такая система ведет себя как нематический монокристалл с большим временем релаксации после удаления из магнитного поля.

Некоторые полимеры (и биополимеры — полипептиды и другие) образуют холестерическую ЖК-структуру (спиральное расположение плоских нематических доменов, характеризующуюся углом ϕ между направлениями ориентаций макромолекул в соседних доменах, шаг спирали) с высокой оптической активностью.

Магнитное поле может вызвать переход холестерической структуры в нематическую.

Спецификой ЖКП является регулируемое изменение их оптических (и в определенной степени диэлектрических и теплофизических) свойств под действием электрического тока (нематика, холестерика), нагрузок (холестерики), в процессе нагревания (смектики, холестерика).

Из ЖКП изготавливают волокна, пленки, покрытия, формованные изделия, композиционные материалы со связующими из ЖКП и их смесей с термо- и реактопластами и изделия из них традиционными способами, в том числе из самоупрочняющихся «молекулярных» композиционных материалов для использования в электротехнике, электронике, волоконной оптике, авто- и аэрокосмической технике.

Переход в нематическую фазу (или истинно кристаллическую) имеет место при механическом растяжении вязкой струи раствора или расплава ЖКП (небольшая фильерная вытяжка для слияния нематических доменов и образования нематического монокристалла) в технологии получения высокомодульных волокон из термотропных ЖК-полимеров (используются расплавы) или лиотропных (*Kevlar*, СВМ) ЖК-полимеров.

Возможно (после удаления растворителя) превращение нематической структуры в кристаллы с вытянутыми цепями КВЦ со 100% проходных цепей (дефекты — «стыки» между отдельными цепями) и получение волокон с $\sigma^+ \geq 5$ –7 ГПа, $E^+ \geq 200$ ГПа.

Термотропные ЖКП имеют низкую вязкость расплавов (возможность изготовления тонкостенных изделий сложных форм), низкий коэффициент термического расширения,

высокую стабильность размеров изделий, высокую огнестойкость по параметрам *FST* (горючесть, дымовыделение, токсичность продуктов горения), высокие упруго-прочностные свойства (по удельным показателям некоторые ЖКП в 15 раз прочнее при растяжении и в 2–5 раз жестче стали) с возможностью их регулирования (самоупрочнение, самоармирование молекулярных композитов), высокую трещиностойкость (ударную вязкость), высокую деформационную устойчивость при нагреве ($HDT/A, T_{18}$), химическую устойчивость к агрессивным средам, растворителям, низкое водопоглощение, высокую устойчивость к УФ и ионизирующим излучениям, высокие и анизотропные оптические и диэлектрические свойства.

Вязкость ЖК-расплавов термотропных ароматических полиэфиров, содержащих мезогенные и немезогенные блоки, с увеличением содержания мезогенных блоков снижается более чем на два десятичных порядка.

В нематическом состоянии аномально низкая вязкость вызвана вторичными и третичными структурами полимеров в ЖК-состоянии. В жесткоцепных полимерах образуются домены в виде скопления полимерных молекул. Внутри каждого домена существует высокая степень упорядоченности, но соседние домены имеют различные направления упорядоченности. При достижении определенной концентрации мезогенных групп вязкость резко снижается, происходит разделение структуры расплава на 2 фазы — изотропную гибкую внешнюю фазу (матричная фаза) и жесткую анизотропную. При росте концентрации мезогенных групп происходит обращение гетерогенной системы, внешней матричной становится жесткая анизотропная фаза, что приводит к резкому возрастанию вязкости системы.

Макромолекулы термотропных жидкокристаллических полимеров (*Liquid Crystal Polymers, LCP*) имеют форму жестких выпрямленных цепей (стержнеобразных палочек) и вследствие такого строения в расплаве обеспечивается ближний порядок благодаря параллельному расположению макромолекул в микроскопически малых объемах. Если подобные жидкокристаллические расплавы подвергнуть течению при сдвиге или растяжении, как это имеет место в процессах переработки термопластов, то макромолекулы упорядочиваются и в макроскопических объемах. Специфическая морфология жидкокристаллических термотропных полимеров фиксируется в твердом состоянии, обеспечивая образование гетерофазной системы (матричной композиции), состоящей из матрицы и протяженных ориентированных макромолекул (волокна) одного химического состава (молекулярные композиты, МК, самоусиливающиеся полимеры, самоармированные полимеры).

Молекулярный композит состоит из жестких стержнеобразных макромолекул, которые в виде волокон диспергированы на молекулярном уровне в полимерной матрице, построенной из статистических клубков. В МК на основе термотропных жидкокристаллических полимеров достигается высокая концентрация молекулярных «волокон» в матрице без нарушения фазовой однородности системы (в отличие от физической смеси двух полимеров).

Разработаны технологические процессы, позволяющие достигать заданную степень ориентации усиливающей (армирующей) компоненты на стадии формирования изделия (например, методом экструзии), процессы изготовления волокон и пленок [90, 91].

ЖКП используют в изделиях оптоэлектроники, дисплейной оптике, в том числе в полимерных светоизлучающих диодах *PLED*, в устройствах хранения и отображения информации, элементах памяти компьютеров, в оптических компьютерах сверхвысокого быстродействия, в качестве компонентов ИМ различного назначения (сенсоры, актуаторы, микропроцессоры, волоконная оптика) и процессах их изготовления [146].

Применение ЖКП в оптоэлектронике связано с изменением их оптических свойств под действием электрического тока (это характерно для нематиков), в процессе нагревания (смектики, холестерики), при нагрузках (холестерики) [144, 145].

Применение нематиков связано с изменением их оптических свойств под действием электрического поля, приводящего к различным физическим эффектам (при напряжении 15–20 В возникновение микроскопических вихрей, «кипение» ЖК, утрата прозрачности; образование вихревых трубок-доменов, ориентационные эффекты). Один и тот же эффект может лежать

в основе различных применений (для решения одной задачи могут использоваться различные физические эффекты). На основе нематиков разработаны запоминающие устройства в оптоэлектронике, устройства для регистрации ИК и СВЧ излучений, дифракционные отклонители лазеров, ослабители, индикаторы, модуляторы, среды для изучения спектров ЯМР.

Композиции на основе ЖКП перспективны в качестве материалов для магнитоэлектрических запоминающих устройств (элементов памяти компьютеров), для создания эффекта поляризационной ориентации, оптической анизотропии, ориентационной избирательности электромагнитного излучения. При помощи дифракционных решеток, работающих как призмы, можно управлять световым потоком (рис. 1.36).

Индикаторы, основанные на ориентационном эффекте и эффекте рассеяния света в нематических ЖК используют поворот мезофазы (ориентационный эффект). Конструкция индикатора включает ЖК-пленку между поляроидными пленками, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярно.

Под действием электрического тока мезофаза нематика поворачивается и поляризует световую волну. В местах перекрытия электродов ЖК просветляется. Нематические индикаторы потребляют не более нескольких микроватт, выдерживают более 10 млн переключателей, эффективны при больших уровнях внешней освещенности (плночные конденсаторы для плоских дисплеев и телевизоров).

Для ориентации мезофазы по всему объему нематика используют небольшое количество ориентантов и предварительное натирание поверхности ЖК-пленок в одном направлении. Для изготовления устройств знаковосинтезирующей электроники и дисплейных ячеек на основе сегнетоэлектрических жидких кристаллов необходимо применение ориентантов наноразмерных толщин. Эту задачу выполняют, в частности, полиимидные слои толщиной 8,5–23,5 нм — анизотропные наноразмерные ориентанты, поверхность которых подвергают натиранию.

Использование смектиков основано на изменении их оптических свойств в процессе нагревания (измерение температуры, регистрация ИК и СВЧ излучений, термооптическая запись информации и регистрация ИК-голлграм).

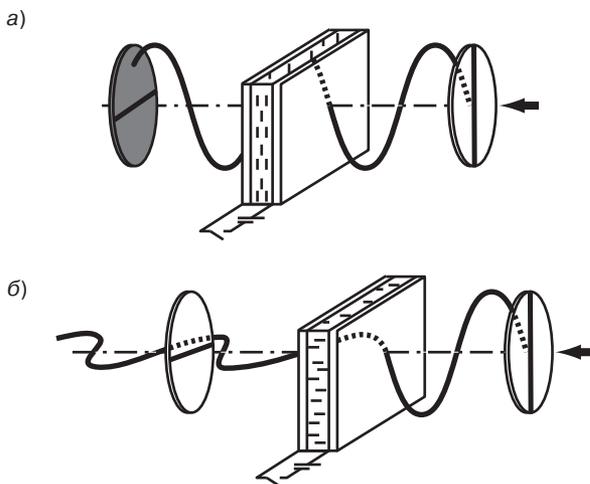


Рис. 1.36. Схема ориентационного электрооптического эффекта, используемого в нематических ЖК индикаторах и модуляторах:

а — в отсутствие напряжения плоскополяризованный свет сохраняет ориентацию после прохождения нематика; б — при напряжении 5–8 В (ориентационный эффект) — 15–20 В (эффект рассеяния) после прохождения нематика с переориентированной мезофазой свет изменяет плоскость поляризации

Аналогичные устройства используют в оптических компьютерах сверхвысокого быстродействия (запись информации электрическими сигналами в двоичном коде на ЖК-пленках, оптическое считывание информации лазером) и оптических затворах (модуляторов), изменяющих интенсивность света с изменением электрического напряжения.

Применение холестериков основано на деформации спирали (см. рис. 1.34), что приводит к изменению их окраски в зависимости от условий, изменяющих исходную структуру холестерика (шаг спирали). Они используются для:

1) измерения температуры, диагностики неразрушающего контроля, регистрации ИК и СВЧ излучений (шаг спирали, ШС, изменяется при изменении температуры);

2) измерения больших давлений до 9000 МПа (ШС изменяется под давлением). С ростом давления пленка начинает рассеивать все более длинноволновые лучи, свет ее меняется с зеленого при нормальном давлении до красного при давлении несколько тысяч атмосфер;

3) измерения сдвиговых напряжений (шаг спирали и свет изменяются при напряжении сдвига, равных нескольким г/см², что используется для анализа напряжений при испытаниях моделей, например, в аэродинамических трубах);

4) получения цветных изображений;

5) регистрации электромагнитных полей (ШС изменяется под действием электрического поля);

6) обнаружения вредных веществ (регистрация вредных веществ и по изменению шага спирали после реакции с парами, изменение цвета при концентрации толуола 0,05 мг/л, бензола — 0,005 мг/л);

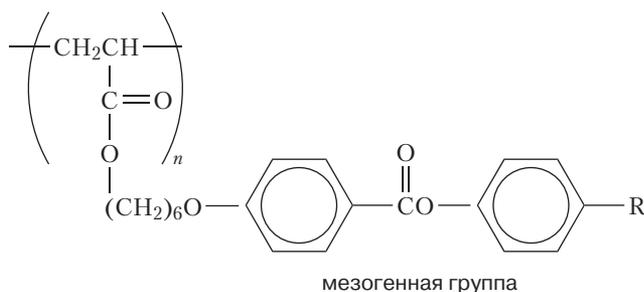
7) регистрации УФ и рентгеновских излучений (регистрация мощности излучения ИК-лазеров и СВЧ-антенн, позволяют получать пространственную картину распределения интенсивности излучаемого потока с чувствительностью до 10⁻⁶ Вт/см²);

8) в селективных фильтрах благодаря поляризационным свойствам (холестерики имеют как правую, так и левую спирали; если знак круговой поляризации белого цвета совпадает со знаком спирали, то слой холестерика пропускает весь спектр, кроме волны селективного отражения, для которой он служит фильтром);

9) в качестве термоиндикаторов.

ЖКП, подобно низкомолекулярным ЖК, могут ориентироваться в электрическом поле. Гребнеобразные ЖКП способны приобретать упорядоченное состояние в сравнительно слабых электрических полях.

Гребнеобразные ЖКП на основе термотропных полиакрилатов образуют нематические структуры, для которых времена релаксации процесса упорядочения в электрических полях составляет около 200 мс.



Такие полимеры находят применение в области хранения информации и в дисплейной оптике. Особый интерес гребнеобразные ЖКП представляют благодаря их способности образовывать холестерическую структуру, которая имеет необычные оптические свойства.

В этой форме нематического состояния полимерные слои, имеющие нематическую структуру, спонтанно создают пачки. Каждый последующий слой имеет свою главную ось, повернутую относительно главной оси предыдущего слоя, так что весь полимер образует упорядоченные геликоидальные серии слоев. Этот тип структуры известен как скрученное нематическое состояние. В гребнеобразных ЖКП такой порядок может возникать из-за наличия асимметричного центра, либо в самих боковых мезогенных группах, либо в оптически активном сомономерном звене. Шаг винтовой линии есть функция молекулярной структуры мезогенного полимера и его физического состояния. Слоевая структура вызывает Брегговское рассеяние падающего света, создавая специфические оттенки в этих материалах, а шаг винтовой линии определяет характер отражения света и светопропускающие свойства.

Если из гребнеобразных ЖК-сополимеров нанести покрытие, варьируя состав в соответствии с количеством присутствующих оптически активных и мезогенных боковых звеньев, то цвет отраженного этими покрытиями света будет изменяться в зависимости от состава предсказуемым образом. Если после нанесения полимерных покрытий заморозить их ЖК-структуру, наблюдаемая окраска будет целиком обусловлена отражением света от полимера в его замороженном ЖК-состоянии, а не присутствием в нем хромофоров или красителей. Уникальные свойства ЖКП можно использовать для создания новых материалов.

Гребнеобразные полимеры с мезогенными группами в боковых звеньях, закрученными в холестерическую спираль, обладают уникальными оптическими свойствами, отражая, в зависимости от температурных условий, не только волны определенной длины видимого спектра, но и волны ИК и УФ-диапазона.

Электрическими полями можно скручивать и раскручивать спирали молекул таких полимеров в мезофазе и после охлаждения они работают в качестве стабильных отражателей и оптических фильтров в требуемом диапазоне длин волн.

Холестерические ЖКП реагируют на изменение температуры изменением своей окраски, что используется в медицине (жидкокристаллическая термография).

Подавая напряжение на токопроводящее покрытие пленки из ЖКП можно управлять ее оптическими свойствами. При напряжении 6–7 В в ЖК возникает электрогидродинамическая неустойчивость, вызывая вихреобразные движения мезофазы. Вихри работают как система цилиндрических линз, образующих дифракционную решетку (форма которой меняется с изменением напряжения и частоты), что позволяет гибко управлять световым потоком. При напряжении 15–20 В пленка из ЖКП становится непрозрачной. В пленке из ЖКП под воздействием различных внешних факторов (механический сдвиг, тепло, излучения, электрическое, магнитное поле) изменяется структура, что приводит к изменениям в отражении света с разной длиной волны, к изменению цвета пленки (контроль распределения температуры поверхности, дефектоскопия, медицинские приборы, контроль качества печатных схем, преобразование ИК-излучения в видимые, цветные ЖК-дисплеи, поляроидные пленки, плоские телевизионные экраны).

Гребнеобразные ЖКП с мезогенными и электронодонорными группами в боковых звеньях (а также полидиметилацетилен, полидиолефины) с большой анизотропией диэлектрической проницаемости, с низким оптическим поглощением и рассеянием, с высокой концентрацией хромофорных групп — органические материалы для нелинейных оптических систем с генерацией 2-й и 3-й оптических гармоник. Жидкокристаллические дисплеи широко применяются в репортажных телевизионных камерах, ЖК-мониторах компьютеров, плоских телевизорах, видеокамерах, цифровых фотокамерах, сотовых телефонах.

В плоских ЖК-дисплеях компьютеров ЖК-материалы (пленки из ЖКП для гибких дисплеев, покрытия) используются в прозрачных тонкопленочных транзисторных ячейках *TFT* (*TFT*-матрица, составная часть твист-ячейки).

В твист-ячейке ориентация мезофазы ЖК, ЖКП на нижней подложке перпендикулярна ориентации на верхней (происходит поворот плоскости поляризации на 90°). Области, где

мезофаза ориентирована планарно (прозрачные) и гомеотропно (мезофаза перпендикулярна поверхности, темные), формируют качественно плоское не мерцающее изображение.

В аналоговом телевидении элементы изображения (пиксели, пиксель, *pixel*, сокр. от англ. *picture's element*, элемент изображения, наименьшая единица двумерного изображения; неделимый объект прямоугольной или квадратной формы, обладающий определенным цветом), из которых состоит красная, зеленая и синяя компоненты — вертикальные прямоугольники, в *HDTV* (телевидение высокой четкости) — в 4 раза меньше и квадратные. В аналоговом *TV* с форматом *NTSC* (США) количество строк (линей пикселей) 720×486 (соответственно линий пикселей по вертикали и строк-колонок пикселей по горизонтали), с форматом *TIFF* 1600×1200 , с форматом *HDTV* 1920×1080 (различные варианты с чередованием строк $1125i$, $1080i$, $1035i$ и с последовательными строками $720p$, $1080p$).

Цифровые фотокамеры оснащены встроенными ПЗС-матрицами (матрица — различное число фотоприемников, соединенных вместе) и цветными ЖК-дисплеями. В конструкциях дисплеев, преобразователей изображения в цифровой формат фоточувствительным элементом является ПЗС-матрица (ПЗС-фотосенсор в технологии ССД, ПЗС — прибор с зарядовой связью, чувствительный элемент). ПЗС-матрица — сенсор, преобразующий изображение в поток электрических импульсов. В ПЗС-матрице происходит накопление заряда. Электронный затвор включает все фотодиоды ($2-7$ млн) матрицы (подсветка ЖК-экрана) и прошедший через них заряд фиксируется кремниевой подложкой. Величина заряда на каждом пикселе пропорциональна освещенности и времени экспозиции. Каждый заряд анализируется цифро-аналоговым преобразователем для получения цифрового значения яркости каждого пикселя. Микропроцессор из совокупности этих чисел формирует файл, который передается в карту памяти камеры или в компьютер через *USB*-порт (англ. *universal serial bus* — универсальная последовательная шина, разъем, с помощью которого передается информация от периферийного устройства к компьютеру и наоборот).

В цифровых фотокамерах достигнута разрешающая способность $2-7$ млн пикселей (в обычных негативах $100-200$ линий на мм), в камере *MVC-CD 1000* (фирма *Sony*, 2000 г., 7-см *LCD*-экран) — 2,1 млн пикселей, в камере *Exilim EX-Z3* (фирма *Casio*) — ПЗС-сенсор с разрешением 3,2 млн пикселей, в профессиональных — не менее 5 млн пикселей.

Большинство разработок фирмы *Sharp* связано с использованием ЖК-дисплеев. Видеискатель в видеокамере *View-Cam* — ЖК-экран, что позволяет ей выполнять функции телевизора, видеомагнитофона, видеопроектора. Ввод информации в электронную записную книжку «*Zaurus*» осуществляется на ЖК-экране специальной «ручкой». Ноутбуки серии *Mebius* имеют 11,3-дюймовый ЖК-экран с высоким качеством изображения. Телевизоры *Gaia* и *Windows* с ЖК-экранами потребляют в 50 раз меньше энергии, чем телевизоры с кинескопом.

Принцип действия ЖК-дисплея основан на эффекте линейной поляризации света. ЖК, ЖКП пропускает лучи света только там, где мезофаза ориентирована планарно, не перпендикулярно поверхности (плоскость колебания вектора напряженности электрического поля совпадает с плоскостью поляризации ЖКП). Используется подпиксельный электрод — проводник, на который подается управляющее напряжение, меняющее ориентацию мезофазы с планарной на гомеотропную (электрод-прозрачная полимерная пленка с нанесенной на внутреннюю поверхность системой электродов с ориентирующим ЖК-покрытием; в цветных дисплеях в каждом пикселе 3 ячейки — синяя, красная, зеленая) (рис. 1.37).

Плоские панели дисплеев (мониторов, телевизоров) приходят на смену аналогичным изделиям с электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ, *CRT*). Прототип плазменной панели разработан в 1964 г. (Иллинойский университет, США), с 1999 г. плазменные панели (60 дюймов, 150 см по диагонали) производила компания *Matsushita* (торговая марка *Panasonic*).

Принцип действия плазменных дисплеев основан на том, что электрический разряд в некоторых газах (неон, ксенон) вызывает УФ-излучения, приводящие к свечению в видимом диапазоне люминофорного покрытия (используются люминисцирующие полимеры и полимерные материалы, наполненные фотолуминофорами на основе оксисульфида иттрия,



Рис. 1.37. Схема жидкокристаллического дисплея LCD (принцип работы см. текст) [92]

активированного европием, комплекса нитрата европия с 1,10-фенантролином и двух неорганических фотолуминофоров, отличающихся размером частиц, спектральным составом и интенсивностью люминесценции). Главное их достоинство — размеры дисплея (до 80 дюймов, 200 см, типичные — 65 дюймов, 160 см по диагонали). По контрастности (200:1) и разрешению (1920×1080 точек) они уступают ЖК-дисплеям (соответственно 500:1 ÷ 800:1 и 3840×2400, что дает разрешение 200 dpi на 22-дюймовом мониторе, рис. 1.38).

Прототип LC-дисплея (LCD, ЖК-дисплей) впервые продемонстрирован в 1971 г. В ЖК-дисплеях под воздействием электрического поля (его напряжения) молекулы ЖКП меняют свою ориентацию (поворачиваются), обеспечивая изменение поляризующих свойств ЖКП. Изменяя поле, можно задавать угол вращения вектора поляризации слоя ЖКП и управлять тем, какое количество света проходит через ЖК-ячейку.

Разработано несколько типов технологий отображения информации:

1. *LCOS (Liquid Crystal On Silicon)* — жидкие кристаллы на кремнии. Отличие от технологии LCD заключается в том, что свет не проходит сквозь слой (пленку) из ЖК, ЖКП, а выборочно отражается при помощи «поляризующих цепочек» (в многослойном дисплее присутствует слой КМОП-комплемментарный металлооксидный полупроводник, логический элемент), что пригодно только для проекторов и проекционных телевизоров.

2. *OLED (Organic Light Emitting Diode)* — органические светоизлучающие диоды. Работа таких устройств основана на эффекте электролюминесценции тонкого слоя люминесцирующих органических соединений, флуоресцирующих полимеров (используются также в качестве сцинтилляторов, люминесцентных солнечных концентраторов, активных сред лазеров [13], что не требует (как в *LCOS, LCD*) подсветки). В полимерных светодиодах *PLED* используют активные слои из полифенилвинилена, политиофенов, расположенные между контактами из прозрачного оксида индия и олова (*ITO*, поставщик «дырок») и кальция (отдает электроны) для обеспечения инжекции и дырок и электронов. *OLED* компактнее, экономичнее и ярче *LCD* (телефоны *Sanyo* (2003 г.), карманные компьютеры *Sony CLIE PEG-VZ90*).

3. *Bistable* с использованием микросфер для черно-белых мобильных устройств (*Philips*) и ЖК (*Nemoptic*, Франция) с ограниченным использованием из-за низкого быстродействия.

4. *SED (Surface-conduction Electron-emitter Display)* — поверхностно-проводящие электронно-излучающие дисплеи (*Canon*). Сохраняют все лучшее, что обеспечивает *LCD*, но лишены их недостатков. Вместо «пушки», стреляющей электронами, используют пластины с нанесенными на их внутреннюю поверхность электродами. На одной из пластин размещен массив электронных излучателей, работающих на основе туннельного эффекта, на второй

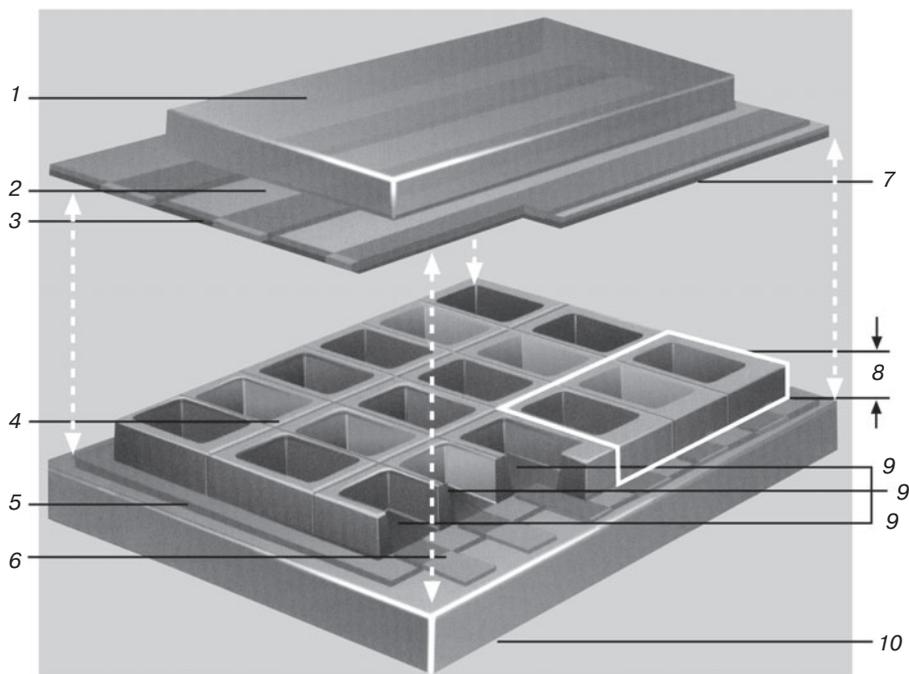


Рис. 1.38. Схема плазменного дисплея PDP [92]:

1 — переднее стекло; 2 — слой диэлектрика; 3 — дисплейный электрод; 4 — ребра жесткости; 5 — защита адресного электрода; 6 — адресный электрод; 7 — слой окиси магния; 8 — пиксель; 9 — фосфор; 10 — заднее стекло.

В слоях 1, 10 могут быть использованы прозрачные полимерные пленки из полиэфирсульфона (типа *Ultradur E*), полициклоолефина *Toray* (фирма *Ticona*)

пластине — слой люминофора. Возникающие за счет туннельного эффекта электроны разгоняются в тонком промежутке между пластинами и попадают на слой люминофора (ЭЛТ, CRT без трубки толщиной в несколько сантиметров) [92].

Прогресс в совершенствовании устройств отображения информации связан как с новыми техническими решениями, так и с новыми материалами.

Технологии совершенствования электронно-лучевых трубок созданием фирмами *LG* и *Samsung* кинескопов с диагональю 31 дюйм, толщиной 35 см, по-видимому, достигли своего предела и к 2005 г. основные разработки направлены как на модернизацию плазменных PDP (используются только в телевизорах) и жидкокристаллических дисплеев, так и на создание новых типов устройств отображения информации: *SED* (*Surface Conduction Electron-Emitter Display*) — поверхностно-проводящие электронноизлучающие дисплеи; *OLED*, *PLED* (*Organic/Polymeric Light Emitting Diode, Displays*) — органические или полимерные светоизлучающие диоды и дисплеи на их основе; *FED* (*Field Emission Display*) — дисплей с диагональю 30 дюймов с использованием в токопроводящих слоях углеродных нанотрубок для экранов больших размеров (перспективнее PDP и SED, фирма *Samsung SDI*, Корея) (рис. 1.39, табл. 1.7).

С использованием светоизлучающих диодов разработаны (*Epson*) образцы компактных (масса 500 г, габариты 13,8×10,3 см) оптических проекторов, продемонстрированных на выставке электроники *IFA 2005* (Берлин), громадные рекламные экраны (фасад 10-этажного дома, Токио).

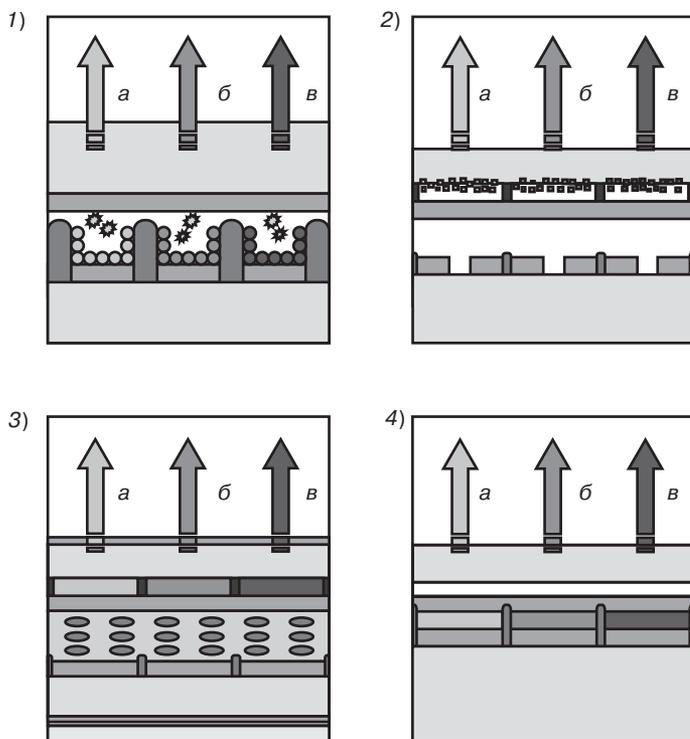


Рис. 1.39. Типы панелей устройств отображения информации и принципы их работы [130]:
 1 — PDP. Каждый пиксель плазменной панели состоит из трех полых ячеек, заполненных сильно разреженным газом. При электрическом разряде газ излучает УФ, вызывающий свечение люминофора. Цвет (а — красный, б — зеленый, в — синий) зависит от величины подаваемого напряжения на определенные участки пикселя;
 2 — LCD. Свет от устройства подсветки, проходя через слой жидкокристаллического материала (меняет свою прозрачность в зависимости от подведенного напряжения), попадает на одну из трех цветных ячеек пикселя с получением требуемого для изображения цвета;
 3 — SED. Как и в электронно-лучевой трубке инжектируемые электроны вызывают свечение люминофора; каждому пикселю соответствуют три источника электронов (пушки) трех основных цветов;
 4 — OLED. При напряжении 5–10 В люминесцирует тонкий слой органического вещества или полимера, входящих в состав светодиодов, испускающих волны различной длины (красный, синий, зеленый)

Дисплеи с объемным изображением *Perspecta Spatial 3D* (разрешение более миллиона вокселей — объемных пикселей) разработаны компанией *Actuality Systems* (США) и используются для особо точной радиолокации, построения 3D-моделей сложных органических соединений.

ЖК-дисплеи с объемным изображением с решетками из большого числа миниатюрных линз создают стереоскопическое изображение глубиной 5,7 м перед экраном, 3,5 м — за экраном и предназначаются для компьютерных мониторов с диагоналями 15,5 и 24 дюйма, обеспечивающих просмотр объемных анимацией с больших расстояний (фирма *Toshiba*, Токийский университет, апрель 2005 г.)

OLED-экраны в клавишах клавиатуры компьютеров — одно из направлений модернизации стандартной клавиатуры «*qwerty*».

В 2006 г. фирмой *Fujitsu* (Япония) разработана технология производства гибких полноцветных дисплеев, «электронной бумаги» для использования в мобильных устройствах, рекламе, полиграфии.

Твердотельные многоцветные полностью неорганические светодиоды используют электролюминесценцию полупроводниковых нанокристаллов (коллоидных квантовых точек), изменение состава и размера которых позволяет широко варьировать спектр излучения и подключение которых к источнику напряжения осуществляется за счет нанослоев нитрида галлия, окружающих нанокристаллы, разработаны в *Los Alamos National Laboratory* [131].

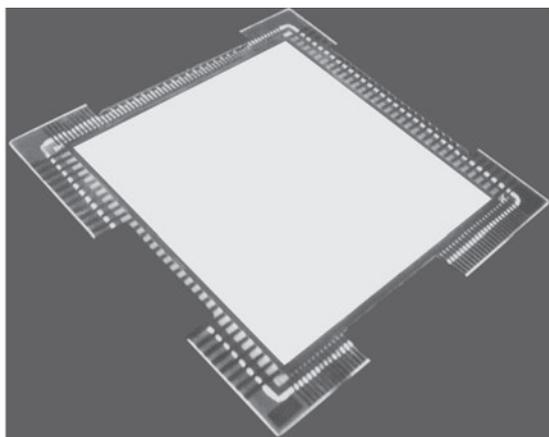
ЖК-дисплеи *NCD*, модифицированные с использованием нанотехнологий, с углом обзора 180° и частотой развертки 60 кадров в секунду без дополнительной подсветки, разрабатываются фирмой *Nano Chromics* (Ирландия) [132].

Таблица 1.7. Сравнительные характеристики различных типов устройств отображения информации [130].

| Тип | Возможные размеры панелей (экранов) | Характеристики устройств | Время выпуска, стоимость в долл США за кв. дюйм |
|-------------|--|---|---|
| <i>PDP</i> | До 80 дюймов при толщине 7,5 см | Очень хороший контраст и яркость, четкая цветопередача. Могут «выгорать» пиксели. Нельзя сделать ячейки с газом, которые формируют пиксель, меньше 20 дюймов. Используются только для телевизоров | С 1998 г.; 80 |
| <i>LSD</i> | До 46 дюймов при толщине 2,5 см | Хороший контраст, средняя яркость, хорошее отображение цветов ¹ . Разрешение на порядок выше, чем у <i>PDP</i> (с 2003 г.). Большое время отклика | Весна 2005 г.; 220 |
| <i>SED</i> | До 55 дюймов при толщине 7,5 см | Отличный контраст, яркость, цветопередача, время отклика. Для телевизоров и мониторов со стандартом повышенной четкости <i>HDTV</i> . Могут выгорать пиксели | Осень 2005 г.; 180 |
| <i>OLED</i> | Диагональ 40 дюймов и более при толщине экрана 2,5 см (толщина панели от 1,4 мм) | Хороший контраст, исключительная яркость, очень четкие цвета, отличное время отклика, низкое потребление энергии. Ресурс синего цвета 10 000 ч (1,5 года) красного и зеленого — 40 000 ч ² | 2007 г. |

¹ Сигналы в формате *HDTV* кодируются из расчета 256 оттенков на каждый цвет, то есть 16 млн оттенков, что является пределом для *LCD* и ограничителем для *PDP*.

² Для профессиональных мониторов, мобильных устройств всех типов. При изготовлении *OLED*-дисплеев (диагональ ≥ 40 дюймов, разрешающая способность более 200 *ppi*) фирма *Epson* (Япония) использует технологию струйной печати с последовательным нанесением на подложку токопроводящих, диэлектрических и органических (полимерных) токопроводящих и люминесцирующих слоев. Качество изображений в несколько раз превосходит типографское. Возможность создания перспективных устройств: отображение панели приборов на стеклах транспортных средств, гибкие экраны, очки-телевизоры.



2



Рис. 1.40. OLED-панель (1) — светильник и OLED-дисплей (2) камеры Hasselblad [130]

Разработка белых OLED-панелей с высокой эффективностью (10 лм/Вт, 1000 кд/м² в течение тысячи часов, консорциум OLLA, Европа, Университет Южной Калифорнии, США, весна 2006 г.) позволяет использовать их не только в дисплеях фотокамер, мобильных телефонов, но и в качестве OLED-светильников (в 3 раза экономичнее других источников искусственного света, рис. 1.40).

В августе 2006 г. компанией *Universal Display* (совместная с университетом штата Аризона *ASU* разработка) продемонстрирован гибкий дисплей на основе OLED. Фирмой *Kicran Timberlake Associates* (Филадельфия, США) разработаны листовые материалы (*Smart Wrap*) с нанесенным на поверхность светодиодным слоем.

Молекулярные оптические материалы на основе молекул ЖК-полимеров с наноразмерами используются для изготовления:

- 1) преобразователей ИК-излучения в видимое;
- 2) поляроидных пленок, дифракционных решеток;
- 3) цветных ЖК-дисплеев, плоских телевизионных экранов, пленочных конденсаторов;
- 4) отражателей и оптических фильтров со стабильными свойствами в требуемом диапазоне волн;
- 5) запоминающих устройств оптических компьютеров (термооптическая запись информации);
- 6) дифракционных отклонителей лазеров;
- 7) ослабителей, индикаторов, модуляторов (систем с управляемым световым потоком);
- 8) устройств для контроля качества печатных схем;
- 9) устройств нелинейной оптики (гребнеобразные ЖКП с высокой концентрацией хромофорных групп с большой анизотропной диэлектрической проницаемостью, с низким оптическим поглощением и рассеянием).

ЖКП эффективны в качестве сенсоров в интеллектуальных материалах (ИМ, регистрация изменения свойств при сдвиговых напряжениях, давлении, изменяющемся тепловом режиме, изменение температуры, концентрации испаряющихся веществ), в том числе специального назначения (радиопоглощающих ИМ, использование анизотропии диэлектрической проницаемости, показателя преломления, изменения радиотехнических характеристик при воздействии электромагнитных полей радиодиапазона).

ЖКП применяются в кабелях, соединительных деталях волоконной оптики. Они отвечают жестким требованиям, предъявляемым к материалам несущих буферных оболочек оптических волокон, так как имеют высокую прочность, водостойкость, низкий КЛТР, стабильные

размеры, гибкость, возможность нанесения оболочек на оптические стеклянные или полимерные волокна высокоскоростной экструзией. Оптические волокна с оболочками из ЖКП имеют меньшие оптические потери при циклическом нагреве и меньшую деформацию по сравнению с оптическими волокнами с оплетками из нитей *Kevlar*.

Жидкокристаллические эластомеры (ЖКЭ) получают как и обычные ЖКП, вводя мезогенные группы или в главные цепи, или в боковые звенья. Особый интерес представляют полисилоксаны с мезогенными группами в боковых звеньях (прививка с использованием платиновых катализаторов), которые имеют $T_c - 10...-24$ °С, $T_{пл}$ нематической фазы 30 ± 120 °С, твердость по Шору, шкала А, $10-80$, $\sigma_{ви}$ $0,2-0,6$ МПа. Они являются высокоанизотропными термоактивными эластомерами с продольными деформациями в $140-160\%$, удельными напряжениями в $20-60$ кПа (40 кПа при 80 °С) при нагреве. Теоретические значения для жидкокристаллического эластомера *FULCE* (*Functional Liquid Crystalline Elastomers*, полидиметилсилоксан с боковыми мезогенными группами) продольных деформаций (удлинение образца при нагреве до 80 °С) — 400% , напряжений, характеризующих механическую активность (актюаторные напряжения) — 100 кПа.

Причиной проявления термоактивности ЖКЭ является переход их структуры при нагреве (тепловая флуктуация) из нематической жидкокристаллической в изотропную (рис. 1.41).

Термоактивность ЖКЭ используется при разработке микроактюаторов (рис. 1.42) и других компонентов микромеханики (насосы, вентили, переключатели).

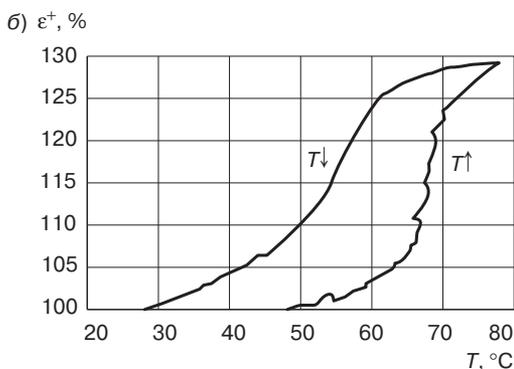
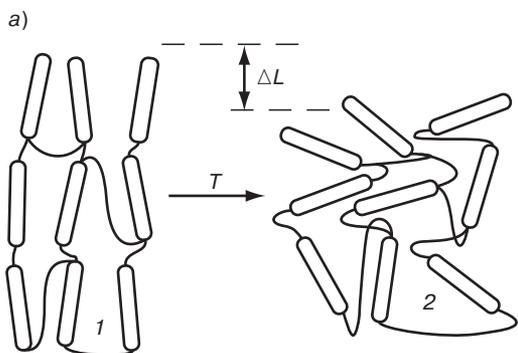


Рис. 1.41. Схема (а) перехода при нагреве эластомера *FULCE* из нематического (1) в изотропное (2) состояние и зависимость (б) возникающей деформации растяжения ϵ^+ (нагрев при напряжении $2,7-3,8$ В) от температуры [133]

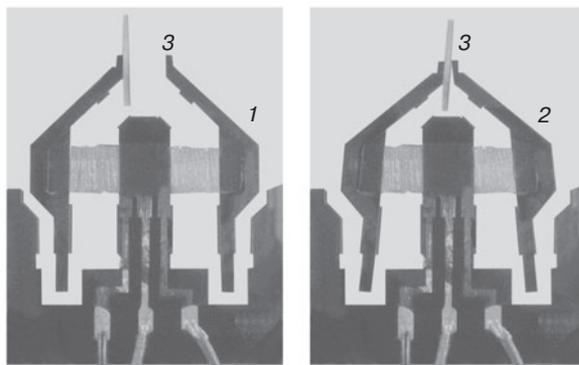


Рис. 1.42. Открытое (1) и закрытое (2) положение микрогрейфера-манипулятора с функцией актюатора с эластичным элементом (3, длина плеча 20 мм, контактирующая площадь 22×25 мм) из ЖКЭ FULCE [133]

1.3.1.4. Дендримеры

Методы синтеза полимеров, основанные на использовании разветвлений, позволяют получать молекулы с контролируемым размером, формой и молекулярной массой — разветвленные звездообразные дендримеры (*dendron*, греч. — дерево), арборолы (*arbor*, лат. — дерево) и гиперразветвленные полимеры [93].

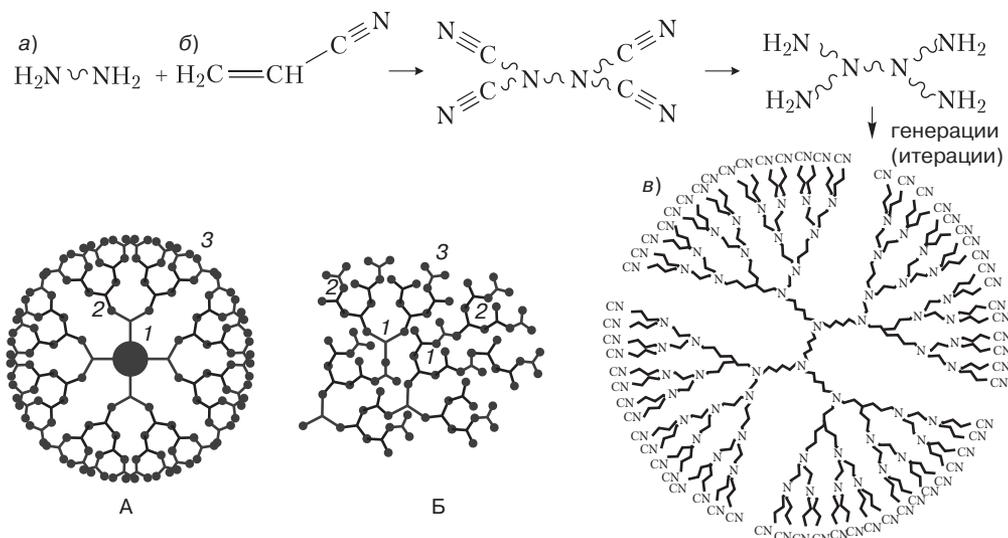
Для получения дендримеров и гиперразветвленных полимеров, в качестве исходных мономеров используют многофункциональные соединения: NH_3 , гидразин $\text{NH}_2\text{—NH}_2$, диамины, глицерин, пентаэритрит, силаны, силоксаны, ди- и триизоцианты. Синтез таких полимеров представляет собой ступенчатый (каскадный дивергентный синтез) процесс пошаговой самосборки посредством чередующихся этапов (генераций, итераций) замены одних активных групп на другие с образованием разветвлений. Процесс ветвления (бифуркации) может быть завершен после нескольких итераций с таким расчетом, чтобы ветвления заканчивались группами требуемого типа (NH_2 -, HO -, F -, HOOC -, эпоксидные, другие) [93–96, 153].

Каскадный процесс получения дендримерного полибутиленмина (θ) из 1,4-диаминобутана (а) и акрилонитрила (б) идет по схеме: $\text{H}_2\text{N—x—NH}_2 + \text{H}_2\text{C=CH—CN} \rightarrow (\text{CN})_2\text{N—x—N}(\text{CN})_2 + \text{NaBH}_4$ (бор-гидрид натрия, катализатор — ионы Co^{+2}) $\rightarrow (\text{H}_2\text{N})_2\text{N—x—N}(\text{NH}_2)_2$, далее с увеличением числа итераций образование дендримеров с различной степенью разветвленности (числом ветвей, клиньев), с концевыми CN - или NH_2 -группами. Последовательно повторяя процесс гидрогенизации по Михаэлю, получают дендримеры с 8, 16, 32, 64 ветвями со свободным объектом между ними [95]. Синтез полиэфирных дендримеров более сложен из-за необходимости временной блокировки OH групп многоатомных спиртов (например, пентаэритрита).

Дендримеры состоят из центрального ядра, выходящих из ядра ветвей (клиньев), каждое из которых заканчивается внешней областью, состоящей из концевых групп. Для гиперразветвленных полимеров наличие центрального ядра не характерно.

Диаметры наномолекул дендримеров и гиперразветвленных полимеров зависят от состава и числа итераций. Так, из исходного мономера диаметром 0,96 нм после 10 итераций образуются полиаминоиминовые дендримеры — наномакромолекулы глобулярной фрактальной структуры 10-го поколения дендритной итерационной последовательности диаметром 13 нм [153].

Дендримеры и гиперразветвленные полимеры являются (в отличие от мицелл) прочными молекулярными наноразмерными ассоциатами, удерживаемыми ковалентными связями. Отдельные дендриты можно связать в более крупные структуры (супрамолекулярные).



Структура наномолекул диаметром 1–50 нм дендримеров (А) и гиперразветвленных полимеров (Б) включает различные звенья и группы [95, 158]:

1 — Si; N–N; M–C₆H₄; 2,6-C₆H₃N; 1,3,5-C₆H₃O₃; C(CH₂)₄;

2 — >N(CH₂)_n>N(CH₂)_n<; CO–NH(CH₂)_n; Si–O–Si; O–CO–NH;

3 — NH₂, OH, COOH, эпоксидные, CN, углеводородные, металлосодержащие, фторсодержащие, других типов группы

Покрывают (толщина 40 нм) с наноконпонентами молекулярного уровня на основе дендримеров и гиперразветвленных наномолекул с единым центром разветвления (аминозамещенные полипропиленимины, дендримеры типа *Astramol*, *Herstel* фирмы *DSM*, ФРГ; гиперразветвленный аминозамещенный полиэтиленимин фирмы *BASF AG*; гиперразветвленные, с замещенными OH, COOH, эпоксидными группами полиэфир типа *Boltorn* фирмы *Perstorp*; гиперразветвленный полиэфирамид *Hubrane* фирмы *DSM*; гиперразветвленный полиглицерин фирм *Solvay*, *Hyperpolymers GmbH*; гиперразветвленный полиуретан фирмы *BASF AG*) обеспечивают гидрофильность (пленка воды смывает грязь с поверхностей, например, оконных стекол) или гидрофобность (самоочищающиеся поверхности с «лотос»-эффектом) поверхностей [94].

Синтезированы разветвленные фторсодержащие полиарилэфир (ATT, Bell Lab. [96]), полиамиды (полимеризацией ε-капролактама под действием трифункционального инициатора) и полиорганосилоксаны [97], дендримеры сферической и стержневидной формы диаметром до 50 нм (*Starburst*, фирма *Dow Chemical*) и азотосодержащие (фирма *S.FI*) [98].

Высокоразветвленные макромолекулы с единым центром разветвления имеют наноразмеры, низкую вязкость расплавов, высокую поверхностную активность, проявляя в зависимости от типа поверхностных атомов и групп гидрофильность или гидрофобность. Дендримеры с внутренней частью из гидрофобных углеводородных цепей с гидрофильными концевыми группами (функциональные группы могут находиться и во внутреннем свободном объеме дендримера) и дендримеры с гидрофобными поверхностями и гидрофильными внутренними частями (обращенные): 1) прочно связывают некоторые растворители, ионизированные молекулы, молекулы красителей, токсичных веществ, что используется в процессах селективного разделения веществ (десорбция, освобождение из свободного объема дендримеров при ступенчатом гидролизе, деструкции внешних и промежуточных слоев дендримеров), очистки сточных вод; 2) позволяют использовать их для поглощения и выделения определенных

низкомолекулярных веществ, контролируемого выделения лекарства, выполнять функции биополимеров, слоев липосом, в качестве адгезивов, адсорбентов; 3) возможность заполнять каждый уровень звеньями определенного состава и строения позволяет «конструировать» особые свойства дендримеров, что перспективно для молекулярной электроники, создание электроизоляционных слоев молекулярного уровня, получения электропроводящих материалов для химических источников тока, электрохромных устройств нелинейной оптики; 4) обеспечивают получение покрытий, поверхность которых модифицирована различными группами различной полярности и химической активности (металлические наноконплексы Co, Ni, Cu, Cd катализируют различные процессы; гидрофильные самоочищающиеся поверхности, гидрофобные поверхности; покрытия с высокими механическими свойствами, устойчивостью к абразивным воздействиям, светостойкие, с пониженной электролизацией, набухаемостью, способностью к смачиванию, склеиванию; покрытия на основе дендримеров с поверхностными группами, выполняющими роль молекулярных переключателей (в молекулярной наноэлектронике), светочувствительных хромофоров (при воздействии видимого света, УФ); 5) внешние поверхности наномолекул легко модифицировать заменой концевых (внешних) групп для использования в качестве адгезивов, адсорбентов, для контролируемого селективного выделения веществ, в качестве носителей катализаторов, желатенизирующих агентов; благодаря постоянству размеров макромолекулы эффективны для получения наномембран (селективным растворением дендримеров из пленок на основе полимеров и дендримеров), в качестве калибровочных для ультрафильтрационных мембран (мембраны с покрытиями на основе ветвей с альдегидными и ацетальными концевыми группами используют в процессах анализа в воде белков, клеток).

Дисплеи с использованием фосфорисцирующих дендримеров отличаются высокими световыми характеристиками [99]. Синтезированы и «плоские» полимеры, формирующиеся при получении в виде мономолекулярных слоев.

Плоские полимеры, строение которых аналогично строению биомембран, получены (использованы представления о двойных слоях молекул, амфифильных по отношению к растворителю) полимеризацией мономеров с активными акрилатными концевыми группами и нитрильными группами, расположенными в центре. Полученная полимерная пленка толщиной 10 нм при 20 °С складывается, образуя прозрачный кристалл, удваивающий частоту лазера (при освещении ИК переизлучают зеленый свет) [100].

1.4. Тенденции развития и совершенствования компонентов ИПМ и технологий их производства

Наряду с широким использованием полимеров в компонентах ИПМ молекулярного уровня и технологиях их изготовления имеет место дальнейшее совершенствование материалов и технологий, обеспечивающих прогресс в разработке 1) компонентов для самодиагностирования и адаптации ИМ к условиям их эксплуатации, 2) систем получения, анализа, отображения, хранения информации, 3) систем вычислительной техники и управления, который реализуется при помощи наукоемких технологий, обеспечивающих наноминиатюризацию, быстрдействие и др.

Предельная миниатюризация компонентов ИМ (сенсоры, процессоры, актюаторы, линии связи и управления), перевод их на нануровень (нано, ит. — карлик, $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, в 1 нм «укладывается» 7 атомов углерода диаметром $0,142 \text{ нм}$, 4 атома кремния диаметром $0,234 \text{ нм}$) достигается при использовании компонентов молекулярного и атомного уровня, что позволяет перейти к изделиям молекулярной и атомной наноэлектроники, наносенсорике, наномеханики.

Интенсивные исследования строения вещества и процессов в нанометровом и наносекундном диапазонах привели к переходу исследований на микроуровне к наноуровню, что открыло новые возможности в области фундаментальных наук и новейших технологий. Возникло множество научных направлений, связанных с изучением наноструктур и нанопроцессов, объединенных термином «нанотехнология».

Нанотехнология — область знания, занимающаяся процессами и явлениями, происходящими в мире, измеряемом нанометрами, совокупность методов и способов, направленных на создание материалов и систем со свойствами, обусловленными проявлениями наномасштабных факторов [5, 10, 11, 56–58, 153].

Нанотехнология определяет прогресс в материаловедении конструкционных и специальных материалов. Она используется для конструирования наноструктур молекулярных электронных и оптических материалов, биоматериалов, различных устройств, прежде всего, в нанoeлектронике, информационных технологиях (наночипы с емкостью памяти в несколько Гб, транзисторы размером в молекулу, устройства получения, обработки, хранения, отображения информации), робототехнике, медицине (моделирование принципов построения живой материи, биокомпьютеры, биороботы), для изготовления нанокомпонентов ИПМ (наноминиатюризация конформных сенсоров, актюаторов, процессоров и их элементов до молекулярного и атомного уровня).

Специализированная информация, относящаяся к проблемам нанотехнологий [10, 11], включает разделы, позволяющие оценить возможности прогресса в различных отраслях науки и техники: наноматериалы и нанотехнологии (физика и процессы нанотехнологии; компоненты нанотехнологии; характеристики наноматериалов — порошки, покрытия, пленки, объемные наноструктурные материалы; сферы использования наноматериалов и нанотехнологий); технология и оборудование для производства наноматериалов (производство порошков, наноструктурных пленок, покрытий, микросхем на основе наноматериалов и нанотехнологий, применение в контрольно-измерительной и испытательной аппаратуре и технике); наноматериалы (полимерные материалы, керамика, наноструктурные пленки); модули и компоненты на основе наноматериалов (микроробототехника, датчики, наномеханика, волоконная и интегральная оптика, лазерная, микроструйная техника, нанопозиционеры и наноманипуляторы), наноструктуры: физика и технология, нанотехнологии и фотонные кристаллы, нанофотоника, микророботы, микромашины и системы, проблемы создания наноматериалов, многофункциональные наноматериалы, химические технологии наноматериалов, нанoeлектроника и твердотельные квантовые компьютеры, наноматериалы для микросистемной техники, объемные наноструктурные материалы, нанoeлектроника, нанофотоника, фотонно-кристаллические структуры, наноматериалы для высокочувствительных хемосенсоров, синтез углеродных нанотрубок и нановолокон, трековые наномембраны, нанокристаллы кремния, нанокристаллические порошки ZrO_2 , гибридные жидкокристаллические и полимерные нанокомпозиты, магнитные наноструктуры, методы нанодиагностики (сканирующая зондовая микроскопия, синхротронное излучение) [11].

Нанотехнологии базируются на понимании того, что частицы размером менее 100 нм придают сделанным из них материалам новые свойства и поведение. Нанообъекты демонстрируют новое физическое и химическое поведение, зависящее от размера частиц (размерные эффекты). Изменяются электронные структуры, проводимость, реакционная способность $T_{пл}$, механические свойства.

Размерные эффекты позволяют конструировать материалы с новыми свойствами (изделия нанoeлектроники, нанооптоэлектроники), использовать наноструктуры в качестве катализаторов.

100-нанометровая граница раздела между микро- и наносистемами достаточно условна, являясь характеристическим размером, отмечающим начало проявления свойств, не присущих системам с микро- и макроразмерами.

Наноструктурированные материалы имеют по сравнению с микроструктурированными новые свойства и необычные характеристики, так как с каждым свойством вещества связана

характеристическая (критическая) длина. Так, электросопротивление вещества возникает в результате рассеяния электронов проводимости на колеблющихся атомах и примесях. Оно характеризуется длиной свободного пробега (средним расстоянием, пролетаемым электроном между двумя отклонениями от прямолинейной траектории). Основные физические и химические свойства меняются, когда размеры твердых тел становятся сравнимыми с характеристическими длинами, большинство из которых лежит в нанометровом диапазоне. Это проявляется в изменении механических, сегнетоэлектрических, ферромагнитных и других свойств. Зависимость электронных свойств от размера приводит к существенным изменениям колебательных характеристик, определяющих оптические свойства.

Свойства наноструктур, наночастиц определяются законами квантовой механики, а не классической ньютоновской физики, свойствами атомов и молекул на поверхности наночастиц с высоким отношением площади поверхности к объему. При размерах наноструктурных единиц меньше длин волн видимого света некоторые материалы становятся прозрачными, диэлектрики — проводниками, резко повышаются упругопрочностные, химические, сорбционные свойства.

В наноразмерных объектах и системах атомы ведут себя иначе, чем в микро- и макрообъектах и системах, а явления и свойства определяются закономерностями квантовой механики, обуславливающих:

- 1) доминирование явлений самоупорядочивания, самоорганизации;
- 2) высокую «полевую» (электрическую, магнитную) активность, каталитическую (химическую) избирательность поверхностей, формирующих специфические границы раздела;
- 3) особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда, концентрационных изменений с низким энергопотреблением и высокой скоростью.

Причинами этого являются изменение отношения вклада в различные процессы поверхности частиц по отношению к их объему, энергетическая, полевая неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц, усиление роли различных видов размерных эффектов.

Индивидуальные наночастицы обычно состоят из не более 10^6 атомов, свойства которых отличаются от таких же атомов, образующих макробъемные вещества.

Наночастицы — образования из связанных атомов или молекул (кластеров) с размерами менее 100 нм. Кластер радиусом 1 нм содержит 10–15 атомов, причем большинство из них находится на поверхности кластера (многие молекулы, особенно молекулы биологического происхождения, состоят из более чем 25 атомов, например, гемм-молекула $\text{FeC}_{34}\text{H}_{32}\text{O}_4\text{N}_4$ — основа гемоглобина, состоит из 75 атомов). Наночастица как часть объемного материала — это кластер с размерами меньше характеристических длин некоторых явлений (для тепловой диффузии — средняя длина свободного пробега — длина рассеяния).

К объектам с наноразмерами обычно относят: наночастицы (1–100 нм); кластеры (1 нм); молекулы (0,5 нм); коллоидные частицы (3–100 нм); вирусы (100 нм); атомы (диаметр атома углерода 0,142 нм, кремния 0,234 нм); элементарная ячейка арсенида галлия — 0,180 нм³ (в нм³ 23 атома Ga и 22 атома As); нанокластеры железа (40 нм, 10^6 – 10^7 атомов, получение из $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в сверхсильных световых полях при воздействии рентгеновских лазерных импульсов); нанослой аморфного углерода (10–30 нм, получают воздействием сверхкоротких лазерных импульсов, используют в нано-, оптоэлектронике, для упрочнения поверхности материалов); для сравнения — человеческий волос 10–15 мкм, клетка крови 5–10 мкм, бактерии 1 мкм, частицы дыма, пигментов 10 нм–1 мкм.

В зависимости от размеров структурных элементов, образующих объемные вещества различной химической природы, различают:

- 1) квантовые ямы — структуры, состоящие из элементов с размерами в одном измерении, лежащими в нанометровом диапазоне, а в двух других они имеют большие размеры;
- 2) квантовые нити, проволоки — структуры с размерами в двух измерениях, лежащими в нанометровом диапазоне, в третьем измерении имеющими большие размеры;

3) квантовые точки (*Q-dot*) – структуры с размерами в трех измерениях, лежащих в нанометровом диапазоне (электронные устройства, способные «захватывать» электроны и удерживать их в объеме радиусом в несколько нанометров). Термин «квантовый» используют для того, чтобы подчеркнуть, что в области нанометровых масштабов имеет место изменение прежде всего электронных свойств квантомеханической природы.

Наночастицы представляют собой разнообразные квантовые наноструктуры: нульмерные (квантовые точки, до 5 нм), одномерные (квантовые нити, нанотрубки), нановолокна, усы, линейные полимеры), двухмерные (квантовые ямы, графен, пленки Ленгмюра–Блуджетта толщиной в один-несколько атомов, адсорбированных на поверхности, сверхрешетки, нанопористые пленки, биомембраны), трехмерные (0D-, 1D-, 2D-, 3D-структуры, фуллерены, фуллероиды, астралены, пластины наноглин, биоорганические полимеры, композиционные наноматериалы), фрактальные («снежинки») и всевозможные их комбинации.

Квантовые наноструктуры формируют с помощью каталитических химических реакций (фуллерены, астралены, нанотрубки, графеновые пленки), самосборки (самопроизвольное образование связей между молекулами и металлической подложкой с образованием упорядоченных структур на ее поверхности – спонтанное агрегирование), литографией (получение электронно-лучевой литографией 10-нанометровых структур) [54, 159]. Уже в 1970-х гг. в компаниях *Bell Laboratories* и *IBM* созданы двумерные квантовые ямы посредством «выращивания» тонких (эпитаксиальных) пленок, позволяющих формировать одноатомные слои полупроводников, затем промышленные методы получения нуль-мерных квантовых точек.

Многообразие наноструктур определяется квантовым характером наносостояния и особыми статистическими законами наномира.

Наносистемы далеки от равновесия из-за наличия развитой поверхности. Положения (и свойства) атомов вблизи поверхности геометрически и физически отличны от положений атомов внутри объема. Глубина изменения структуры может простираться на несколько молекулослоев.

Одним из критериев, отличающих наночастицы, является соотношение количества атомов, находящихся на их поверхности, к общему количеству атомов в частице. В наночастице диаметром 0,7–0,8 нм, содержащей не более 12 атомов, все они находятся на поверхности. Величина поверхности может превышать 600 м²/г, а некомпенсированность валентных возможностей атомов, находящихся на поверхности, приводит к высоким значениям поверхностной энергии [158].

Переход к нанотехнологиям стимулировал совершенствование средств, обеспечивающих исследование и измерение на наномасштабе, переход от использования растровой электронной микроскопии (РЭМ) к зондовой сканирующей и атомно-силовой микроскопии.

Проникновение в наномир стало возможным после создания Г. Рехерером и Дж. Биннитом (*IBM Corp.*) в 1981 г. сканирующего туннельного микроскопа (*STM*, СТМ с его помощью всю имеющуюся на Земле информацию порядка 1 млрд Тб можно размещать в одном грамме вещества), который позволяет наблюдать отдельные атомы на поверхности образца, затем атомно-силового микроскопа (АСМ, АФМ). Зондовые СТМ и АСМ используют для изучения соответственно электропроводящих и электроизоляционных материалов. Наноразмерные элементы фиксируются методами просвечивающей электронной микроскопии (изучением рассеяния на них света), масс-спектрокопией. Наноструктуры, поверхность нанофаз анализируются методами дифракции высокоэнергетических электронов, ионно-полевой микроскопии, сканирующей микроскопии, инфракрасной, романовской, фотоэмиссионной, рентгеновской спектроскопии, магнитного резонанса (исследование микроволновых и радиочастотных переходов), электронного парамагнитного (ЭПР), ядерного магнитного (ЯМР) резонанса.

Нанотехнологии относятся к ключевым направлениям развития науки и техники в XXI веке.

В США в 1999 г. принята федеральная программа «Национальная нанотехнологическая инициатива» (объем финансирования в 2002 г. 600 млн долл.). Разработкой, исследованием

(по 1000 направлений) и применением нанотехнологии и наноматериалов занимаются более 400 исследовательских центров и компаний с объемом финансирования свыше 4,1 млрд долл. (2006 г.), в Европе соответственно 175 и 1,9 млрд долл, в Японии исследования по 300 направлениям проводят около 100 компаний.

Около 30% от мировых инвестиций в нанотехнологию приходятся на США, 20% — на Японию, 15% — на Европу (ЕС).

По анализу, проведенному в США, к 2015 г. потребуется около 2 млн специалистов, профессионально работающих в сфере нанотехнологии (для России 20 000 специалистов).

В 2003 г. рядом научных и производственных фирм образован консорциум «Промышленные нанотехнологии России», в 2004 г. Информационный центр — концерн «Наноиндустрия» на базе института нанотехнологии ИНАТ МФК; в 2008 г. — Государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий «РОСНАНО» с финансированием 130 млрд р. Разработку и исследование полимерных нанокомпозитных материалов различного состава и назначения, различного направления нанотехнологий в России производят ФГУП «ВИАМ», МГУ им. М.В. Ломоносова, МАТИ-МГТУ им. К.Э. Циолковского, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, ИМЕТ РАН, ИНЭОС РАН, Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Институт физики микроструктур РАН, РНЦ «Курчатовский институт», Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, ЗАО «Институт прикладной нанотехнологии» и другие.

3–5 декабря 2008 г. в ЦВК «Экспоцентр» (Москва) прошел первый Международный форум *Rusnanotech-2008* и выставка «Нанотехнологии-2008». К 2015 г. долю продукции предприятий наноиндустрии России на мировом рынке планируется повысить с 0,07 до 3% с объемом продаж до 900 млрд р [165].

Объем использования нанотехнологии в различных областях составляет: 9% — биотехнологии, 15% — устройства хранения данных, 18% — полупроводники, 2% — оптика, 3% — электрохимия, 30% — новые материалы, 8% — наномодифицированные полимеры и полимерные материалы.

Из мирового объема производства наноматериалов и наноустройств в 2005 г. на США приходилось 40–45% рынка, 15–20% на Евросоюз, 25–30% на Японию. Мировой оборот продукции, базирующейся на использовании нанотехнологии, составил в 2005 г. 100 млрд евро, к 2010 г. — до 220 млрд евро, к 2015 — до 1 трлн евро [160].

Перспективными направлениями развития нанотехнологий являются:

1) разработка пленок, покрытий и, прежде всего, нового поколения дисперсно-наполненных наноразмерными наполнителями из веществ различной химической природы композиционных материалов (нанокомпозитов);

2) разработка элементной базы электроники с предельной (наноразмерной, молекулярного и атомного уровня) миниатюризацией (структуры и изделия наноэлектроники, нанооптоэлектрики).

Наноматериалы — вещества и композиции с нанометрическими характеристическими размерами структурных элементов (нанофаз), с особым проявлением взаимодействий между фазами, обеспечивающих возникновение специфических свойств. Скачкообразное изменение свойств материалов с нанофазами размером 0,2–100 нм (не более 300 нм, оптимум при размере нанофазы менее 10 нм) определяется высоким соотношением величины поверхности нанофазы к ее объему.

Применительно к полимерному материаловедению нанотехнология развивается в 2-х основных направлениях.

1. Синтез полимеров с требуемыми свойствами, реализуемыми на молекулярном уровне (макромолекулы имеют наноразмеры), традиционными для химии полимеров способами (получение полимеров с использованием различных химических реакций), различного состава, структуры, морфологии (линейные, разветвленные, гиперразветвленные, сетчатые с различной структурой сеток, с боковыми и концевыми группами различного состава, жидкокристаллические, электроактивные, блок-сополимерные и др.).

С точки зрения химии полимеров, термин «нанотехнология», по словам американского химика, нобелевского лауреата Рояльда Хоффмана — «современное название для того, чем занимается традиционная химия».

2. Получение наполненных композиций, состоящих из двух или более фаз с четкой межфазной границей и со средним размером одной из фаз менее 100 нм — полимерных наноконпозиционных материалов (наноконпозитов).

Квантовые эффекты, изменяющие свойства гетерофазных материалов с наноразмерными компонентами, проявляются в композициях с компонентами различной химической природы неорганическими (металлическими, керамическими), органическими, углеродными.

Наноструктурированные материалы в различных областях нанотехнологии, имеющей междисциплинарную природу (физика, химия, химическая технология, материаловедение, наноэлектроника, нанооптоэлектроника и др.), используют получаемые различными способами нанокластеры: *металлические* (лазерное испарение атомов с конденсацией их в наночастицы при охлаждении, высокочастотный индукционный нагрев, химические методы — синтез металлосо-держающих полимеров, например, ионным обменом с использованием олигометилбензиленов, каталитическое восстановление, разложение металлоорганических соединений, их термолиз, импульсные лазерные методы, нанопорошки, получаемые помолом в наномельницах в жидких средах в присутствии ПАВ, нановолокна, усы); *керамические* (стеклянные наночешуйки, хлопья, пластины нанослоды, наночастицы кремниевой кислоты, оксидов кремния, например, наноаэросил SiO₂ Таркосил-Т-20, алюминия, цинка, индия, карбида вольфрама, органомодифицированные слоистые силикаты, бентониты со структурой монтмориллимита, «наноглины», *Nano-Clay*, нанотрубки галлуазита и других материалов, нанопластины, оптически прозрачные хлопья толщиной менее 5 нм); *полимерные* (элементорганические полимеры с ионно-кластерными, ионно-доменными, размером 1–100 нм нанофазами, образующимися в процессе синтеза; разветвленные звездобразные дендримеры, гиперразветвленные наномолекулы; наномолекулы с внутренней электропроводностью, например, допированный политиофен; нановолокна из лестничного полиэдрального силесквиоксана, повышающие радиационную стойкость наноконпозитов, эффективных для защиты от радиации электронных и оптических устройств (по результатам испытаний на внешней поверхности МКС в течение 14 месяцев); *углеродные* (фуллерены, фуллериты, астралены, однослойные нанотрубки ОНТ (*Single-Wall-Nano-Tubes*, *SWNT*) с различной структурой (кресельной, зигзагообразной, винтовой-хиральной) графеновых стенок из-за их различной ориентации относительно базисных направлений: многослойные нанотрубки МНТ (*Multi-Wall-Nano-Tubes*, *MW-CNT*); углеродные нановолокна НВ (*Carbon-Nanofaser*, *CNF*); наносажи, молекулярные алмазы.

Технология получения наноконпозиционного материала зависит от типа наночастиц, которые вводят в полимер. Специфические свойства наночастиц создают определенные сложности для совмещения их и с полимерами. Высокая поверхностная энергия наночастиц приводит к их агрегированию, слипанию; они химически активны и при взаимодействии с другими веществами утрачивают свои уникальные свойства.

Получить наноконпозиционный полимерный материал традиционными технологиями сложно.

Наноконпозиционные материалы (наноконпозиты) — материалы с непрерывными полимерными, керамическими, металлическими, углеродными матрицами и дискретными (или непрерывными) нанофазами различного состава и структуры: конструкционные, дом высокоэффективной сепарации и избирательного катализа, устойчивые к экстремальным факторам (термоустойчивые, химически и радиационностойкие), интеллектуальные самодиагностирующиеся и адаптирующиеся конструкционные и функциональные, для электронных и фотонных информационных систем, для медицины и биотехнологии, радиопоглощающие, с низкой эффективной отражающей способностью в оптическом диапазоне длин волн, с максимально эффективным энерговыделением (в том числе импульсным), с требуемым уровнем триботехнических свойств [153].

В традиционных ПКМ фаза наполнителя имеет микронные размеры (диаметр минеральных, углеродных волокнистых филаментов 10–15 мкм), в полимерных нанокomпозиционных материалах — менее 100 нм.

При одинаковой объемной доле количество наночастиц в наполненной композиции в 10^9 раз больше, чем микрочастиц, и большая часть непрерывной фазы (связующее, матрица) оказывается в сфере влияния поверхности наноразмерного наполнителя с удельной поверхностью 20–600 м²/г, причем нанофаза композиции может образовать скелетную структуру.

Высокая удельная поверхность (отношение площади поверхности к объему) наночастиц и структур из них (кластеров) приводит к существенному отличию их физических, электронных, механических, оптических свойств от свойств материалов со структурными элементами, имеющими микронные и субмикронные размеры.

Наполнение полимеров наноразмерными наполнителями (даже при их содержании в композиции в количестве 1–5 %об.):

1) повышает упругопрочностные свойства, деформационную теплостойкость, трещиностойкость, стабильность размеров изделий;

2) позволяет создавать материалы с требуемыми электрическими, магнитными, оптическими свойствами для изделий наноэлектроники, нанооптоэлектроники, с регулируемой скоростью диффузии газов и жидкостей;

3) используется при разработке гиксотропных лаков, эмалей, клеев, полимерных пленок и покрытий с высокой твердостью, износостойкостью, токопроводностью, оптической прозрачностью, барьерными свойствами, способностью к самоочищению — наноструктурированные гидрофобные покрытия на основе дендримеров с «лотос»-эффектом; полимерных композиций, мембран из полиэлектролитов с пониженной набухаемостью; наномодифицированных структур гидрофильных и гидрофобных поверхностей, покрытий, в том числе защитных для изделий электроники, сенсорики;

4) используется для наномодифицирования терморезистивных и термопластичных связующих при разработке нового поколения ВПКМ конструкционного и специального назначения.

Объем финансирования работ в области нанополимерных материалов за рубежом в 2006 г. составил 300 млн долл США, в 2009 г. запланировано израсходовать 1,5 млрд долл США.

Объемы применения полимерных нанокomпозитов (автомобилестроение, упаковочные материалы, наноэлектроника) растут от 18 до 25% в год. Достижения нанотехнологий используются при разработке компонентов ИПМ наноразмеров, совершенствовании изделий наноэлектроники, наносенсорики, наномеханики, использовании наноструктур углеродной, полимерной, керамической природы.

Наноэлектроника

Наноэлектроника позволяет достигнуть максимальной миниатюризации электронных устройств (транзисторы, переключатели, элементы памяти и других), в том числе для конформного их размещения в материалах и конструкциях различного назначения.

Направлением развития электроники является использование молекулярных оптических, электрических и магнитных носителей информации. Такими носителями могут быть отдельные органические и неорганические молекулы, органические кристаллы (и полимерные монокристаллы), полимерные монослои, интерполимерные (компленарные, комплементарные, взаимодополнительные, как в ДНК, РНК) комплексы (хранение и передача информации за счет химических реакций). В оптических и магнитных устройствах используют, как правило, полимолекулярные компоненты, в электрических — изолированные молекулы.

В логических элементах могут быть использованы органические молекулы — выпрямители. Многослойная пленка из молекул с тремя группами $-C\equiv N$, заключенная между металлическими электродами, пропускают ток только в одном направлении (молекулярный диод, аналог *p-n*-перехода в полупроводниках).

Перспективным для прогресса вычислительной техники является сочетание электронных и оптических методов обработки информации (повышение скорости и плотности записи информации в тысячах раз).

Извлечение отдельных атомов кремния из подложки, замена их атомами других элементов позволяет изготовить процессоры, запоминаящие устройства предельно малых размеров.

При уменьшении размеров интегральных схем с 1 мкм до 10 нм плотность записи информации (при сохранении других показателей) увеличивается в 10 000 раз, что стимулирует предельную миниатюризацию компонентов интегральных схем, процессоров (транзисторов, конденсаторов, токопроводов и др.).

В конце 2001 г. появился компьютерный чип, созданный по нанотехнологиям (фирма *Intel*, производитель 85% микропроцессоров в мире) с самым быстродействующим транзистором размером 20 нм, что сделало возможным создание к 2007 г. мощных микропроцессоров нового поколения 45 нм, содержащих миллиард транзисторов, работающих на частоте до 20 ГГц при напряжении питания менее 1 В (включение и выключение — более триллиона раз в секунду).

Толщина пленки оксида, используемой для формирования затвора таких транзисторов, составляет три атомных слоя. Они на 30% меньше и на 25% быстрее самых быстродействующих промышленных транзисторов.

В 1998 г. на основе нанотехнологии создан транзистор размером с молекулу. Подобные транзисторы, диоды и другие виды элементной базы используют для создания трехмерных, многослойных схем для микронаноэлектроники, видеодисков *DVD*.

Технологию изготовления транзисторов на единственной молекуле запатентовала в 2002 г. компания *Hewlett-Packard*. Экспериментальные туннельные транзисторы (переключатели из одиночных атомов) на основе кремния производит фирма *Hitachi*.

Освоено несколько технологий получения керамических пленок толщиной 20–30 нм из наноматериалов испарением в газовой фазе (в том числе с использованием лазерного излучения); вакуумным испарением с образованием кластеров и нанокристаллов диаметром 0,5–2 нм; испарением в среде инертного газа; ионно-лучевым напылением. Использование лазерных импульсов большой интенсивности позволяет проводить напыление тонких пленок в воздухе, а не в вакууме.

В нанoeлектронике перспективно использование углеродных наноструктур-фуллеренов, однослойных, многослойных, рулонных нанотрубок, нановолокон [9, 60–68, 154].

Нанослои аморфного углерода толщиной 10–30 нм, образующиеся при воздействии сверхкоротких лазерных импульсов (фемтосекундная лазерная нанотехнология), упрочняют поверхности материалов и благодаря необычным электрическим и оптическим свойствам перспективны для использования в нанoeлектронике, сверхбыстрой оптоэлектронике [11].

Уникальная природа углерод-углеродных связей позволила реализовать полимерные углеродные наноструктуры высшего порядка с переходными формами углерода — фуллерены, фуллериты (фуллерены в кристаллическом состоянии), астралены (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы), одно- и многослойные нанотрубки, нановолокна (рис. 1.43).

В фуллеренах (букиболах) кристаллические турбостратные структуры (ядерная часть пакета — sp^2 -гибридизация) и аморфные фракции углерода (атомы с sp^3 -, sp^2 -, sp -гибридизацией химически связаны между собой и образуют полимерные структуры высшего порядка лентообразной формы) из слоев поликонденсированного ароматического углерода (ядро структуры полимерного скелета) связаны между собой цепочками аморфного углерода (периферия структурных единиц, рис. 1.43; 1–4).

В 1985 г. для получения фуллеренов использован метод (Кротто, Смолли, Керл, Нобелевская премия 1996 г.), основанный на применении высокоэнергетического сфокусированного лазерного луча для создания горячей углеродной плазмы. Фуллерены — семейство шарообразных (сферических усеченных икосаэдров) замкнутых полых (20–26% объема) молекул разных размеров. Их поверхность состоит из соприкасающихся шестиугольников (гексаэдров) и пятиугольников (пентаэдров), в вершинах которых расположены атомы углерода. Фуллере-

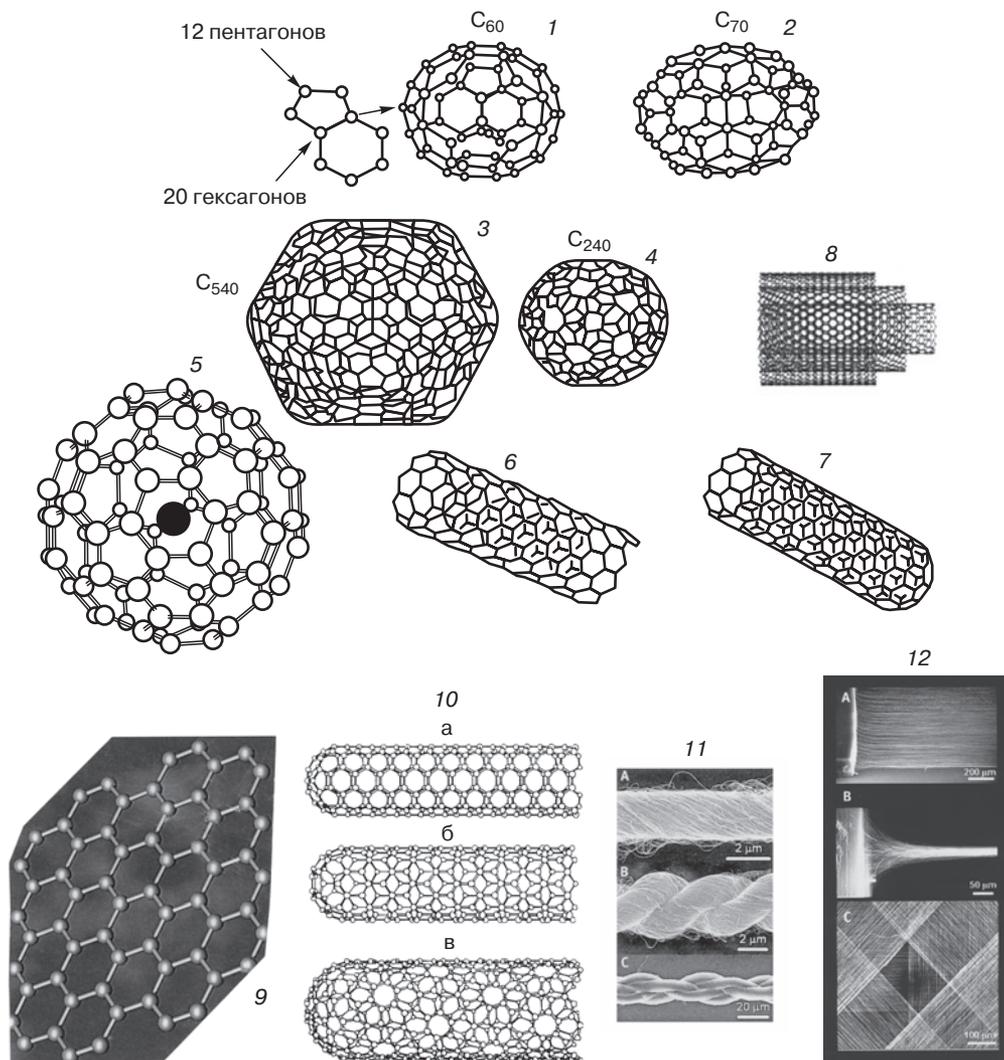


Рис. 1.43. Углеродные наноструктуры [51, 60–66, 153, 154]:

1–4 — фуллерены C_{60} , C_{70} , C_{240} , C_{540} ; 5 — эндометаллфуллерен Me_xC_{82} ; 6, 7 — однослойные нанотрубки (6 — открытая, 7 — закрытая с одной стороны, длина до 1,5 мкм, диаметр 40 нм); 8 — многослойная нанотрубка *Baytubes*; 9 — пленка графена толщиной, равной диаметру атома углерода; 10 — углеродные нанотрубки кресельной (а), зигзагообразной (б), винтовой (в) хиральности; 11 — углеродные нановолокна (А) и нанонити (В, С); 12 — углеродные нановолокна (А), нанонити (В), наноткань (С)

ны — устойчивые многоатомные кластеры углерода с числом атомов от нескольких десятков и выше. Число атомов углерода в таком кластере не произвольно, а подчиняется определенной закономерности. Согласно геометрическому расчету, для построения такого многогранника необходимо, чтобы число пятиугольных граней было равно двенадцати, число же шестиугольных граней может быть произвольным. Такому условию отвечают кластеры с числом атомов $N = 32, 44, 50, 58, 60, 70, 78, 80, 82, 84$ и т. д.

В структуре сажи, полученной лазерным пиролизом бензола, присутствуют сферические и полигональные частицы (астралены), подобные фуллеренам с многослойными стенками (двойная сфера диаметром 1,4 нм, C_{60} внутри C_{240} ; тройная сфера диаметром 2 нм, C_{60} в C_{540}). После прокалки сажи в вакууме при 1600 °С в ней обнаружены фуллерены диаметром 0,81 нм (C_{80}) и 1,19 нм (C_{180}) и сверхфуллерены, подобные присутствующим в карельском минерале шунгите. Фуллеренами называются изолированные молекулы C_n , фуллеритами — фуллерены в твердом состоянии (кристаллические и пленочные материалы на основе фуллеренов), в том числе полимеризованные фуллереновые структуры.

Наиболее изучена структура, свойства и технология получения фуллерена C_{60} (плотность 1,3–1,5 г/см³, $T_{пл} > 360$ °С, растворим в бензоле), который состоит из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников. Атомы углерода в вершинах многоугольников соединены ковалентными sp^2 -гибридными связями. Каждый атом связан в молекуле с тремя соседними атомами одной короткой (0,139 нм) и двумя длинными (0,1493 нм) связями. Фуллерен C_{60} обладает оксаэдрической симметрией. Валентные электроны размещены на поверхности сферы вдоль направления связей. Атомы углерода в молекуле C_{60} расположены в среднем на расстоянии 0,3512 нм от центра усеченного экосаэдра. Длина связи в ребре, соединяющем два пятичленных цикла, 0,1388 нм. Радиус молекулы около 0,07 нм. Фазовый переход у фуллерена наблюдается при 257,1 К. Величина изменения энтальпии фазового перехода $\Delta t_f = 2710 \pm 60$ Дж/моль. Высокотемпературная фаза имеет кубическую пространственную группу (гранцентрированный куб). При температурах ниже 660 К C_{60} образует молекулярные кристаллы.

Кристаллы высокой чистоты (99,98%) и миллиметровых размеров могут быть выращены из газовой фазы.

Фуллериты C_{60} в кристаллическом состоянии при температуре 300 К образуют решетку ГЦК (К 12), в узлах которой размещены молекулы фуллерена, между которыми действуют слабые Ван-дер-Ваальсовы связи. С понижением температуры до 255 К происходит фазовый переход ГЦК решетки в простую кубическую решетку (К6), то есть фуллерит обладает несколькими полиморфными модификациями. По теоретическим расчетам в решетках C_{60} существуют неперекрывающиеся зоны валентных электронов, по-разному занятые электронами. Эти зоны и характер их заполнения электронами определяют электрические и другие свойства фуллеритов.

Фуллерен C_{60} (кластер углерода диаметром 0,14 нм) — гипермолекула с низкой реакционной способностью. Из кластеров C_{60} могут быть построены структуры, представляющие собой поверхностный и объемный кристалл. Это форма существования конденсированного углерода используется для получения новых материалов и химических соединений с уникальными свойствами (твердость, радиационная стойкость и т. д.).

В фуллерите C_{60} , ведущим себя как полупроводник, ширина запрещенной зоны по теоретическим оценкам равна 1,5–1,8 эВ. Примеси (атомы, ионы, молекулы разной природы) могут размещаться в фуллеритах в центре полых фуллеренов, на их поверхности, замещая атомы углерода, то есть образовывать растворы замещения и внедрения и вести себя как доноры и акцепторы. Фуллерен C_{60} имеет электрофизические свойства, близкие к свойствам арсенида галлия.

К многообразным фуллереновым производным относятся также интеркалированные соединения и эндоэральные фуллерены (или эндоэральные комплексы). При интеркаляции, примеси вводятся в пустоты кристаллической решетки фуллерита, а эндоэральные фуллерены образуются при введении атомов различного типа внутрь кластера C_n (см. рис. 1.43, 5).

Центр икосаэдра C_{60} свободен от атомов и представляет собой свободный объем, в котором могут размещаться атомы других элементов. Они играют роль легирующих примесей. В фуллеренах больших размеров в этом объеме могут размещаться даже молекулы, в том числе молекулы других фуллеренов малых размеров. Легируемые металлами фуллерены называют эндометаллофуллеренами.

Одним из методов синтеза эндоэральных фуллеренов является метод, основанный на реакции ядерных превращений. В этом случае валентные электроны металла передаются

фуллереновой оболочке. В результате внутри фуллерена оказывается положительный ион. От валентности внедренного иона зависят электрические свойства и тип магнитных свойств фуллеренов.

Получены десятки разновидностей фуллеренов с интеркалированными соединениями (La@C_{82} , $\text{Sc}_2\text{@C}_{66}$), трехмерные (или кристаллические) решетки из C_{60} с нестандартными механическими и электрическими свойствами. Расширяя решетку монокристаллов C_{60} интеркаляцией молекул CHCl_3 , CHBr_3 получают органические сверхпроводники с приемлемыми для практического использования температурами перехода в сверхпроводящее состояние (кристалл $\text{CHCl}_3/\text{C}_{60}$ с $T_{\text{крит}} = 80$ К, рекорд $T_{\text{крит}}$ сверхпроводящего перехода в фуллеритах; $T_{\text{крит}}$ пленок $\text{TlRb}/\text{C}_{60} - 43$ К, $\text{Cs}_2\text{RbC}_{60} - 33$ К, $T_{\text{крит}} \text{C}_{60} - 18$ К. C_{60} с интеркалированным калием K_3C_{60} — проводник (образуются ионы C_{60}^{-3}).

Из фуллерена C_{60} при 200 атм и 2500 °С получены поликристаллы из алмазных стержней длиной 1 мкм и диаметром в несколько им. Модуль объемного сжатия поликристалла на 11% выше, чем у алмаза. Фуллерены — эффективные катализаторы превращения графита в алмаз и процесса графитизации углеродной матрицы при получении УУКМ.

Углеродные нанотрубки. В углеродных нанотрубках реализована особая форма углерода — нанотрубулярная (см. рис. 1.43).

Углеродные нанотрубки, нанотрубулены диаметром от пяти до нескольких десятков нм состоят из 2–5 коаксиальных графеновых полых цилиндров, стенки которых образованы свернутыми графеновыми слоями. Нанотрубулены — квазиодномерная (1D) форма углерода (нанопроволоки) в ряду форм углерода различной размерности: алмаз (3D), графит (2D), фуллерен (0D). Нанотрубки могут быть однослойными (ОНТ, *Single-Wall-Nano-Tubes, SWNT*) и многослойными (МНТ, *Multi-Wall-Nano-Tubes, MW-CNT*).

Однослойные нанотрубки (ОНТ) и многослойные (МНТ) могут быть как открытыми с концов, так и замкнутыми, когда цилиндры конечной длины содержат на обоих концах «шапки» концевые структуры различной топологии, замыкающие нанотрубку (обычно 0,5 фуллерена).

В простейшем случае трубки можно представить как свернутый в цилиндр лист графита моноатомной толщины, в котором атомы углерода расположены в вершинах шестиугольников. Они различаются по диаметру и размещению шестиугольников по длине нанотрубки. Основным структурным элементом нанотрубок является графеновый слой (см. рис 1.43, 9). Стенки НТ образованы шестиугольными циклами атомов углерода (гексагональными C_6), тип упорядочивания которых совпадает с таковым в графеновой сетке. При этом гексагоны могут образовывать как замкнутые циклы, где связи С–С перпендикулярны оси цилиндра, так и формировать различного рода геликоидальные структуры со спиральным типом атомной геометрии вдоль оси турбуленов (углеродные нанотрубки с кресельной, зигзагообразной, винтовой хиральностью, рис. 1.43, 10).

Простейшая модель МНТ — система коаксиальных ОНТ («русская матрешка»), сохраняющая цилиндрическую форму. ОНТ расположены друг от друга на расстоянии, близком к межслойной дистанции графита (примерно 0,344 нм), что являясь типичным для углеродных материалов с турбоэстранной структурой.

Известны сложные конфигурации МНТ, различающиеся по структурам как поперечного, так и продольного сечений (призматические, свиткообразные МНТ, нановилки).

Нанотрубки получают лазерным испарением графита, дуговым способом, химическим осаждением паров углерода. Нанотрубки диаметром 10–20 нм, длиной 100 нм получают лазерным испарением в аргоне при 1200 °С графитовой мишени, содержащей катализаторы (Co, Ni), зародыши образования нанотрубок при осаждении атомов углерода на охлаждаемую медную подложку.

Нанотрубки диаметром 1–5 нм, длиной 1 мкм получают дуговым способом используя углеродную дугу, образующуюся в потоке гелия при давлении 500 Торр и напряжении 20–25 В при разнесении углеродных электродов диаметром 5–20 мм на расстоянии около 1 мм,

осаждением на отрицательном электроде. Положительный электрод содержит каталитические количества Co, Ni, Fe при получении однослойных нанотрубок (диаметр 1–5 нм, длина 1 мкм). Без использования катализатора получают многослойные нанотрубки.

Непрерывный процесс получения нанотрубок пиролизом при 1100 °С метана (катализатор — железо) наиболее перспективен для промышленной реализации (смесь 2–5 слойных нанотрубок диаметром 3–9 нм, длиной несколько мкм, РХТУ им. Д.И. Менделеева, нанотрубки «Baytubes» фирмы *BMS*, Германия).

Нанотрубки диаметром 16–100 нм получены:

- 1) каталитическим пиролизом бензола (катализатор FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{CO})_5$) при 950 °С в аргоне;
- 2) пиролизом толуола (катализаторы силицилат железа, диэтилдитиокарбонат никеля) при 700 °С;
- 3) пиролизом метана (катализатор Ni + оксиды металлов);
- 4) электрохимическим синтезом (ВГУП НИФИ им. Л.Я. Карпова);
- 5) пиролизом поли-*l*-фениленвиниленов с использованием самосборки (набор, соединение, построение из отдельных атомов и молекул требуемых структур) и селективного взаимодействия с полисопряженными полимерами углеводородов (смеси C_{60} , карбинов, нанотрубки диаметром 0,6–2,2 нм, ИТЭС ОИВТ РАН, Санкт-Петербург) в скрещенных молекулярных пучках.

С 1999 г. фирма *ULVAC* (Япония) серийно производит многослойные (конические, диаметр от нескольких нм до сотен нм) нанотрубки методом плазменного (источник — микроволновый генератор) эпитаксиального (тонкослойного) осаждения углерода из газовой (CH_4 , H_2) фазы (серия *CN-CVD* с использованием стеклянных, диаметром 25,4, 100, 2-мм подложек с напыленным металлическим катализатором: Fe, Co, Ni) и методом непрерывной химической газовой эпитаксии (разложение CH_4 в СВЧ-поле, осаждение на подложки размером 294×210 мм, цилиндрические нанотрубки серии *GN-CVD-300*).

Образующиеся в этих условиях активные радикалы углерода растворяются в металлической подложке и образующиеся нанотрубки прорастают вверх, поднимая частицы металла катализатора [153].

Механизм роста нанотрубок в присутствии металлов, вероятно, заключается в том, что атомы металла-катализатора присоединяются к активным центрам на открытом конце трубки и, обегая ее по краю, способствуют захвату атомов углерода из паровой фазы и встраиванию их в графеновую цилиндрическую или коническую стенку трубки (на концах трубок зафиксированы металлические наночастицы). Механизм формирования нанотрубок, таким образом, не связан со сворачиванием графеновых плоскостей, но тип закрученности (хиральность) полициклов в стенках трубок определяет (наряду с диаметром трубок) их электрофизические свойства. Обычно получают смесь нанотрубок со свойствами полупроводников (2/3 трубок винтообразной и зигзагообразной хиральности) и проводников с металлической проводимостью (1/3 трубок с кресельной структурой стенок). Для их разделения пучки нанотрубок осаждают на кремневую подложку, напыляют металл и при подаче высокого напряжения «металлические» нанотрубки испаряются [153].

Углеродные нанотрубки имеют уникальные упругопрочностные, тепло- и электрофизические свойства:

- E^+ однослойных нанотрубок диаметром 10–20 нм, длиной 100 мкм (получены трубки диаметром 1–150 нм, длиной 1–500 мкм) 1,28–1,8 ТПа (1280–1800 ГПа, ТПа = 10^{12} Па, ГПа = 10^9 , сталь 0,21 ТПа);
- E^+ многослойных трубок диаметром 200 нм — 600 ГПа (E^+ может составлять 500–5000 ГПа [154]);
- σ^+ однослойных нанотрубок — 45 ГПа, многослойных — 7 ГПа (сталь 2,0–2,2 ГПа).

При высокой жесткости углеродные нанотрубки (цилиндры с толщиной стенки около 0,34 нм в однослойных нанотрубках) упруги при изгибе ($\epsilon_{\text{н}} \sim 10\%$) благодаря малой дефектности

полициклической структуры в слоях и деформации 6-звенных циклов (перегибридизация sp^2 C–C связей). Удельная поверхность 500–1500 м²/г, теплопроводность нанотрубок вдоль оси 500–5500 Вт/м·К (в 2 раза выше λ алмаза, кремний – 150, медь – 400 Вт/м·К), удельное сопротивление ρ_v (в зависимости от хиральности) $5 \cdot 10^{-6}$ – 0,8 Ом·см (медь $1,67 \cdot 10^{-6}$ Ом·см). Многостенные трубки CN-CVD позволяют получать плотность тока 100 мкА/см² при напряженности электрического поля в несколько В/мм, нанотрубки кресельной хиральности до 1 млрд А/см² (медь в этих условиях плавится) [153]. Многослойные нанотрубки модифицируют интеркалированием металлов, оксидов, активируют для разделения и получения нанокomпозитов HOOC-, CH₂Cl, CH₂OH-группами.

Углеродные наноструктуры различных типов за рубежом производят фирмы: *Chevron Texaco* (молекулярные алмазы, фуллерен C₆₀, наносажи), *Degussa* (наносажи *Erorax* для наполнения резин, *Printex* с 5 % масс. наночастиц диаметром 20 нм для антистатических и радиоэкранирующих полимерных материалов), *NEC* (нанотрубки, нановолокна с E^+ более 1000 ГПа), *Hyperion Catalytic Inc.* (США), *Nanocyl* (Бельгия), *Nanoleedge* (Франция) – нанотрубки [161]. Промышленное производство нанотрубок (однослойных диаметром 40 нм, многослойных диаметром до 120 нм, стоимость CNT – 1000 евро/кг [161], *Carbon Nanotubes «Baytubes»*) освоено на пилотной установке (30 т/год, строительство в 2007 г. промышленной установки мощностью 3000 т/год) компанией *BMS (Bayer Material Science, Bayer Technology Services, Германия)* [155, 161].

Углеродные нановолокна

Компания *Carbon Nanotechnologies* получает нановолокна пиролизом углеводородного сырья при 1000 °С, используя металлосодержащие катализаторы. Нановолокна, сформированные из нанотрубок диаметром 2–3 нм, компания *IBM* использует в производстве наноскопических электронных цепей транзисторов в качестве межслойных электрических контактов. Фирма *Chemical Vapour Deposition* производит нановолокна (*Carbon-Nano-Faser, CNF*) стоимостью 1000 евро/кг (лабораторные образцы) со снижением стоимости до 250 евро за кг при промышленном производстве [162].

Из углеродных нанотрубок, формирующихся перпендикулярно к кремниевой подложке, вытягивают несколько метров (с площади 1 см²) нановолокон, состоящих из сотен тысяч нанотрубок. Из пучков нановолокон сплетают нити (при диаметре 20 мкм прочность нитей в 5 раз больше прочности нитей *Kevlar* такого же диаметра). Электропроводная прозрачная ткань из углеродных см. анонитий (см. рис 1.43; 12С) изготовлена в 2006 г. в США (Университет штата Техас, Даллас) при толщине 5 мкм имеет массу 1 м², равную 30 мг, и удельную прочность более высокую, чем у стали. Наноткань предназначена для использования в гибких дисплеях (нанотрубки электролюминесцируют) и стеклообогревателях.

В Технологическом институте сверхтвердых и новых углеродных материалов (г. Троицк) синтезированы углерод-азотные нановолокна диаметром 70–120 нм (более эффективны в холодных катодах, чем однослойные углеродные нанотрубки и алмазоподобные пленки, перспективны в качестве светоизлучающих элементов дисплеев). Пиролизом волокон из ПАН, наполненных нанотрубками, получают высокомодульные и высокопрочные углеродные волокна.

Углеродные наноструктуры используют для получения конструкционных, электропроводящих, антистатических, радиоэкранирующих полимерных нанокomпозитов, для модификации традиционных ВПКМ (углепластиков), элементной базы наноэлектроники. Высокая активность поверхности углеродных наночастиц нарушает их нанодисперсность, приводит к образованию ассоциатов (фуллеритов), состоящих из 15–20 структурных единиц диаметром 10–13 нм, что требует их диспергирования (C₆₀ – в растворе бензола, нерастворимых астраленов – в суспензиях при введении поверхностно-активных веществ), в том числе с применением ультразвукового воздействия. E^+ эпоксиidного нанокomпозита с 5 % об. углеродных нанотрубок повышается на 20%, E^- – на 25%, σ^+ полистирола с 1 % об. углеродных нанотрубок повышается на 25% (высокие упругопрочностные свойства нанотрубок существенно повышают прочность

металлов: расчетная σ^+ стали с 30 %об. нанотрубок диаметром 10 нм, длиной 100 мкм повышается в 7 раз, σ^+ алюминия с 10 %об. нанотрубок — в 6 раз; скорость горения ракетного топлива с 60 %об. наночастиц алюминия размером менее 100 нм — 160 мм/с, с 20–40% микрочастиц алюминия — около 10 мм/с). Квантовые эффекты изменяют реологические свойства расплавов наполненных наночастицами термопластов. При введении 1–5 %об. наночастиц размером 50–300 нм в полибутилентерефталат (ПБТ *Ultradur High Speed*) с 30 %об. дискретных стеклянных волокон вязкость композиции при 260 °С снижается на 50% [158].

Наполнение полимеров углеродными наночастицами (наносажи, трубки) резко повышает их электропроводность. Концентрационный порог протекания перколяции (перенос электронов) достигается при введении в полимер около 1 %об. наночастиц. При использовании технического углерода он достигается при степени наполнения в 20 %об. Наносажу *Ecorax* (*Degussa*, Германия) используют для упрочнения резин (5 %масс.), сажу *Printex XE* (5 %масс., наночастиц диаметром 20 нм) — в антистатических и экранирующих ЭМЭ материалов.

Разработано несколько типов электропроводящих полимерных нанокомпозитов с углеродными нанотрубками: *Noryl GTX* (сплав полифениленоксида с полиамидом 6, фирма *GE Plastics*), *Fibril* (связующие ПЭТФ, ПБТФ, полифениленсульфид, ПК, ПП, фторсодержащие эластомеры, фирма *Hyperion Catalysis*), *NTC* (*Nanotube Compounds*, связующие ПА 6, ударопрочный ПС, ПФА, ПБТ, ПФС, ПЭЭК, ПЭИ, сплавы ПК с ударопрочным полистиролом и ПБТ, фирма *PTP Company*), *Aurum CNT GRADE* (термопластичный полиимид, *Mitsui Chemicals Inc.*, Япония; *Hyperion Catalysis Int.*, США), материалы компании *Nanocyl S.A.*, Бельгия (лидер производства и применения нанотрубок). Фуллерены, нанотрубки, нановолокна эффективны в устройствах элементов молекулярной и биоэлектроники, компонентов интеллектуальных материалов предельно малых размеров (наноминиатюризация).

Углеродные нанотрубки используют в производстве плоских дисплеев (фирма *Samsung*, используется полевая эмиссия электронов с концов трубок при приложении небольшого электрического поля; тонкое покрытие из нанотрубок наносится на слой с управляющей электроникой, покрытой пластинкой или пленкой с люминофором), в переключающих компьютерных полевых транзисторах (нанопроволоки, полупроводниковые нанотрубки с низким электросопротивлением и высокой теплопроводностью, позволяют увеличить количество переключателей на чипе и быстродействие), в тонкопленочных конденсаторах интегральных схем, в качестве твердых электролитов гальванических элементов из наполненных нанотрубками полимеров.

Основной целью разработчиков компьютерной техники является увеличение количества переключателей на чипе. Углеродные нанотрубки диаметром 2 нм имеют низкое сопротивление, что позволяет пропускать по ним большие токи без существенного нагрева. Высокая теплопроводность нанотрубок позволяет быстро охлаждать чип. В полевом транзисторе при приложении небольшого напряжения к затвору по нанотрубке между истоком и стоком течет ток. Изменяя напряжение на затворе можно изменить проводимость нанотрубки более чем в 10^6 раз. Время переключения мало, а тактовая частота — терагерцы. Точки пересечения нанотрубок выполняют роль переключателей и на 1 см^2 чипа может быть размещено 10^{12} таких элементов со скоростью переключения в 100 раз более высокой, чем в традиционных чипах.

Углеродные нанотрубки с интеркалированными атомами лития могут быть использованы в конструкциях источников тока (батареек) и топливных водородных элементов, электрохимические ячейки которых используют отрицательные электроды с покрытием из нанотрубок, поглощающих 6,5 %масс. водорода [153].

Полевой транзистор с полупроводниковой нанотрубкой — чувствительный детектор (химический сенсор) различных газов. Многослойные нанотрубки с интеркалированными атомами металлов — эффективные катализаторы некоторых химических реакций. Альтернативой кремнию в наноэлектронике являются графеновые пленки толщиной в один атом (двухмерные кристаллы, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов,

г. Черноголовка). Полупроводящие углеродные нанотрубки с размерами порядка квантовой длины волны электрона или дырки в зоне проводимости используют в конструкциях лазеров на квантовых точках для чтения информации с компакт-дисков. Углеродные нанотрубки перспективны в качестве зондов, в том числе зондов туннельных и атомно-силовых микроскопов; острийных катодов; диодов (рис. 1.44).

Использование фуллеренов и нанотрубок позволяет максимально миниатюзировать изделия молекулярной электроники: микровыпрямители на основе вилкообразных нанотрубок (дефекты в структуре вилки пропускают ток только в одну сторону); электрические цепи для молекулярных компьютеров (из нанотрубок длиной в несколько тысяч нм, формируемых при приложении электрических полей); элементы компьютерной памяти (сети из проводящих полупроводниковых углеродных нанотрубок, в которых каждый узел, сформированный нанопроводами под прямым углом, работает как диод, каждое перекрестие соответствует одному биту информации, включается и выключается без воздействия на остальные, плотность информации в 100 000 раз больше, чем в чипе *Pentium*).

Углеродные нанотрубки с полупроводниковым и металлическим типом проводимости — материалы для интегральных микросхем (углеродных микросхем и токопроводов в кремневых, сопротивление однослойной нанотрубки не зависит от ее длины, что используется для соединения логических элементов микро- и наноэлектронных устройств). Толщина нанопровода из нанотрубок всего около 10 атомов углерода. Допустимая плотность тока в нанотрубках существенно больше, чем в металлических проводах такого же диаметра и в 100 раз превышает лучшие показатели для сверхпроводников.

Фуллерены, нанотрубки, кластеры в виде полых трубок-капилляров, металлокарбогедрены (клеткообразные молекулы, содержащие атомы металлов и углерода, высокие значения электросопротивления и магнитного момента) перспективы для создания микроконденсаторов.

Углеродные структуры, сформированные напылением фуллеренов на поверхность с последующим воздействием на кристаллы фуллеренов (фуллериты) электронным лучом, образуют покрытие с высокой адгезией, что используется в производстве элементов микро- и

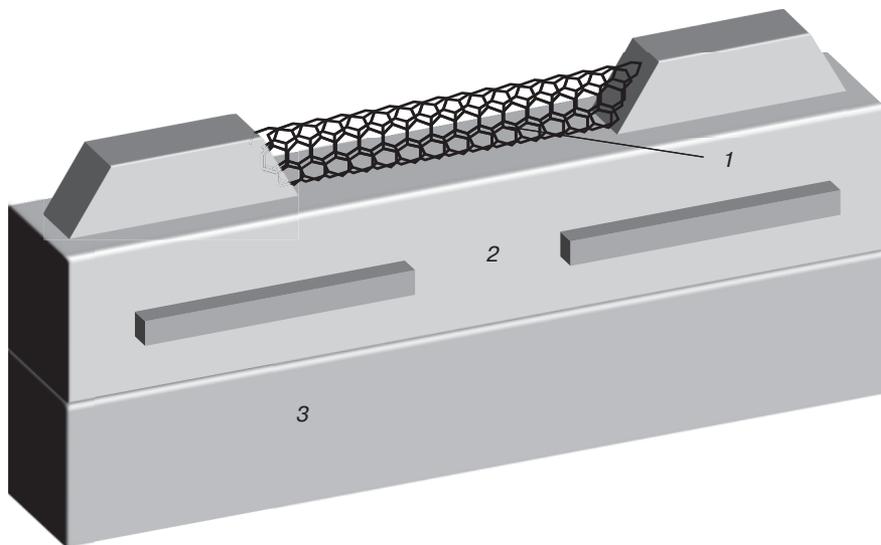


Рис. 1.44. Электронный компонент (диод фирмы *General Electric*) для детектирования и генерирования электромагнитного излучения: 1 — углеродная нанотрубка; 2 — кремниевая основа; 3 — блок управления излучателем, детектором

нанoeлектроники (квантовые проволоки-нанопроводники, затворы полевых транзисторов и другие с шириной элемента в несколько нм). Сухая нанолитография (ФТН РАН им. Иоффе, 2005 г.) в качестве резистора используют аморфный углерод, сформированный из фуллерита, который селективно удаляют с поверхности при определенных параметрах процесса без использования растворителей.

При приложении электрического поля вдоль оси нанотрубки наблюдается интенсивная эмиссия электронов, что используется в панелях плоских дисплеев фирмы *Samsung* для облучения люминесцентного экрана.

Нанотрубки используют в полевых транзисторах, химических сенсорах (частота одной из мод колебаний чувствительна к присутствию посторонних молекул на поверхности), в качестве биморфных пьезокантилеверных актюаторов, молекулярных переключателей.

В лаборатории микроэлектроники фирмы *Motorola* разработаны нанодисплеи с использованием нанотрубок. Нанотрубки выращены (как зубья в расческе) на поверхности стекла при низких температурах каталитической реакцией смеси водорода и метана.

Покрyтия из фуллеренов толщиной в десятки нм служат в качестве токопроводящих слоев в нанoeлектронике [72].

Полимерные пленки с высокими барьерными свойствами (низкие скорости диффузии кислорода и воды) с керамическими наночастицами, вводимыми термовакuumным, ионно-плазменным напылением, электронно-лучевым испарением наносиликатов, используют для упаковки элементов солнечных батарей, изделий электроники, оптоэлектроники.

Наночастицы аморфного оксида кремния позволяют получить покрытие с шероховатостью поверхности менее 1 нм, что используется при наноминиатюризации литографических структур в нанoeлектронике (технология СМР-химико-механическая планирование на атомном уровне подложек, например, ячеек запоминающих устройств). Композиции с наночастицами оксида германия (*Ad Nano Ceria*) используют для формирования диэлектрических слоев в микрочипах [163].

Нанопластинки мусковита (К-слода), флогопита (Mg-слода), Fe-слоды, стеклянные наночешуйки в составе покрытий обеспечивают ряд оптических эффектов: регулируемое отражение в зависимости от освещенности (использование в фотонике, оптоэлектронике, плоских дисплеях), опалесценцию (нанокomпоненты призмной формы, наночастицы слюды с многослойными нанопокрyтиями оксидами железа, титана, кремния) и другие, что используется в интерференционной литографии, в покрытиях со спецэффектами, при разработке фотонных кристаллов [155].

Для использования в электронике и материаловедении перспективны неорганические нанотрубки (более 50 типов, компания *Nano Materials*, Израиль), которые синтезируют из оксидов и галогенидов переходных металлов, кремний-борсодержащих веществ.

Нанотрубки из кремния получают, используя коллоидную суспензию наночастиц кремния в спирте. При воздействии электрического поля наночастицы диаметром 1 нм осаждаются на положительно заряженной поверхности подложки. Нанопленки кремния после испарения спирта сворачиваются, образуя нанотрубки диаметром 2–5 нм, длиной до 100 мкм. Нанотрубки кремния могут служить нанодиодами и твердотельными нанолазерами, управляемыми с помощью электрического поля. Минерал галлуазит имеет трубчатую структуру. Галлуазитные нанотрубки (фирма *Natural Nano*, США, 40 долл за кг) интеркалированные медью, перспективно использовать в качестве нанопополнителей токопроводящих материалов вместо углеродных нанотрубок (250 долл США за г).

Кластеры из металлических и полупроводниковых наночастиц размером 1–10 нм имеют нелинейные оптические свойства, что позволяет создавать на их основе управляемые квантовые светодиоды.

Нанопроводники, разработанные в исследовательском центре компании *Hewlett Packard*, представляют собой полосы редкоземельных металлов (лантаноидов) шириной в десять атомов, напыленных на кремниевую подложку, и предназначены для предельно миниатюрных процессоров.

Дальнейшее уменьшение размеров нанопроводников, дорожек, по которым внутри процессоров распространяется электрический сигнал, невозможно.

Лазеры играют ключевую роль в передаче информации, посылая импульсы света по оптоволокну. Обычные лазеры слишком велики, чтобы встраивать их в микросхему.

Нанопровода из оксида цинка, сульфида кадмия имеют диаметр около 100 нм, что резко снижает размеры лазеров. Наноразмеры имеют нанолазеры на основе нанотрубок.

Методами молекулярной сборки изготавливают полупроводниковые нанолазеры, имеющие вид башен с диаметром основания 0,001 мм (многослойная структура из нескольких десятков плоских чередующихся нанослоев из арсенида алюминия и арсенида галлия).

Разработана технология выращивания кадмий-сульфидных нанопроводников различной длины и толщины, технология изготовления наноскопического цифрового триггера, наноэлектронных транзисторов, нанопроводниковых лазеров, которые могут быть использованы для передачи информации внутри микросхем, для изготовления наноэлектронных чипов [69].

Элементами наноструктур с размерами не более 100 нм являются кластеры, молекулы, атомы, образующие нанокристаллы, квантовые точки, фотонные кристаллы, свойства которых определяются законами квантовой механики (например, полупроводник CdSe с размером частиц менее 60 нм становится проводником).

Фотонные кристаллы (разработаны в 1991 г.) — кристаллические диэлектрики на основе кремния, Al_2O_3 , структуры с периодическим изменением диэлектрической проницаемости с расстояниями между ними порядка 500 нм, сравнимыми с длинами волн видимого света (380–760 нм). Свет отражается от соседних параллельных плоскостей кристаллической решетки (Брэгговское отражение) и при разности хода 2-х волн, равной $0,5\lambda$ в результате интерференции волны гасятся, не могут распространяться в решетке (следствие периодичности решетки и волновой природы электрона). Фотонные кристаллы получают методами электронно-лучевой и рентгеновской литографии. Благодаря способности управлять интенсивностью света, фотонные кристаллы используют в качестве фильтров и устройств в лазерных системах.

Свет в диэлектрической среде движется гораздо быстрее, чем электроны в проводнике, и может передавать больше информации в единицу времени. Полоса пропускания оптических систем (диапазон ТГц) на 3 порядка выше электронных систем (несколько ГГц), что предопределяет эффективность фотоники в развитии наносистемной техники, интегрированных оптических цепей [153, 155].

Альтернативой процессорам и компьютерам на электронной основе является разработка фотонных компьютеров с оптическими аналогами электрических проводников и логических элементов на основе фотонных кристаллов, способных пропускать или задерживать свет с определенной длиной волны. Из фотонных кристаллов можно создавать световоды произвольной формы, модули памяти, логические элементы.

Разработаны различные структуры фотонных кристаллов: одномерные кристаллы (мосты) с резонансными полостями, позволяющими выделить из пучка световых лучей с разными длинами волн какой-либо один; двумерные кристаллы (системы параллельных наностержней), поворачивающие луч света на 90° ; трехмерные кристаллы (блоки из нанополос и наносфер), используемые в логических схемах и ячейках памяти; фотонные кристаллы с дефектами (волновод изгибает световой луч на гораздо более коротком отрезке, чем обычное оптоволокно, уменьшение оптических компонентов, основа миниатюризации оптического компьютера, рис. 1.45).

Один из примеров фотонного кристалла — решетки из кремниевых стержней (при ширине 1,2 мкм задерживает ИК с λ 10 мкм, разработка фирмы *Sandia*), в которых размер стержней и длина поглощаемых волн взаимосвязаны (рис. 1.46).

Фоторефрактивными кристаллическими средами являются полупроводниковые кристаллы $CdF_2:Ga$ и $CdF_2:In$ (фторид кадмия CdF_2 — широкозонный ионный кристалл, полупроводник после легирования и термохимической обработки) с фоточувствительностью 100 мДж/см^2 ,

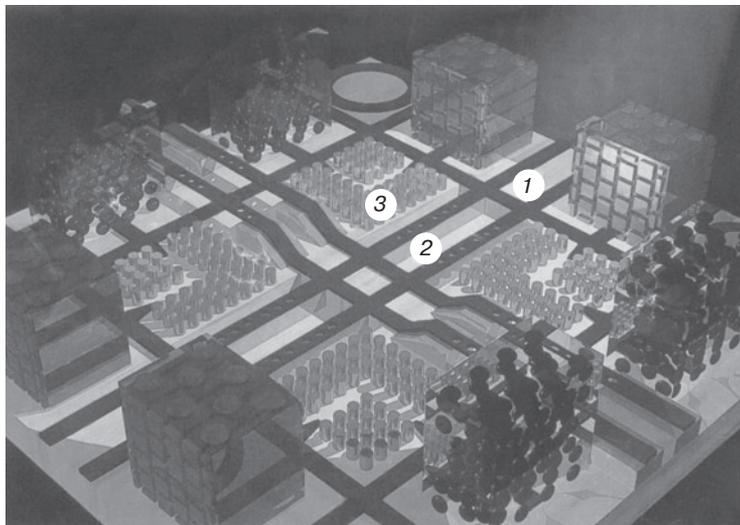


Рис. 1.45. Типы фотонных кристаллов (фото *SPL/EAST News*):

1 — трехмерные фотонные кристаллы для логических схем и ячеек памяти; 2 — одномерные кристаллы (мосты); 3 — двумерные кристаллы, поворачивающие лучи света на 90°

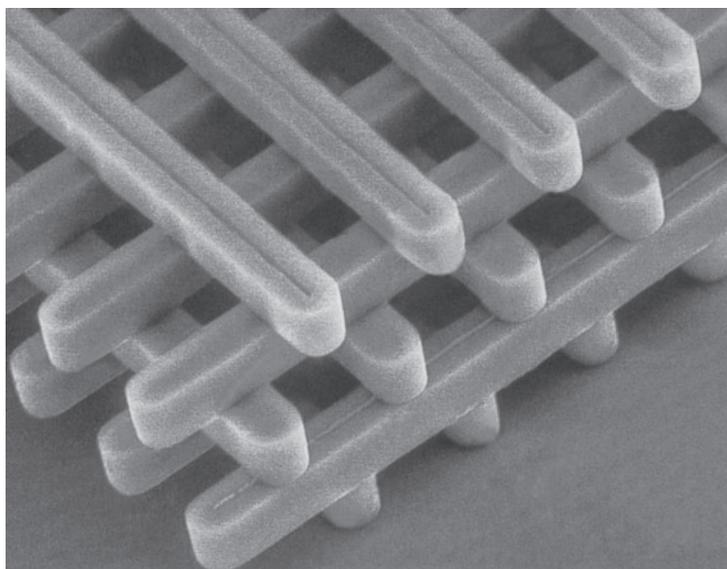


Рис. 1.46. Фотонный кристалл в виде решетки из наностержней (фото *SPL/EAST News*)

пространственным разрешением 10^4 лин/мм (перспективны в качестве голографических сред, устройств с неограниченным числом актов записи — считывания информации) [132].

Разработаны гибридные оптоэлектронные платы, в которых для передачи информации используют оптические волноводы из полимерных полос шириной 0,001 мм (компания *Siemens*, Падерборнский университет, ФРГ), со скоростью передачи информации более высокой, чем по электронным соединениям традиционных микросхем.

Дальнейший прогресс в миниатюризации компьютеров связан с использованием молекулярной электроники, биоэлектроники, квантовой логики. В квантовых компьютерах для хранения информации будут использовать спиновые состояния атомов. Идея квантовых компьютеров (КК) возникла в конце XX века. В 1995 г. Шор (США) создал алгоритм, позволяющий резко увеличить быстродействие компьютера (задачи, которые современный компьютер решает 1000 лет, КК решает за несколько часов). В КК бит информации — «кубит», квантовый бит (использованы представления квантовой физики, химии, логики, рассматривается положение атома одновременно в двух возможных спиновых состояниях). Идея КК реализована при использовании молекулы сложного состава (содержит 5 атомов фтора и 2 атома углерода-13, рис. 1.47), которая использует нужную логическую функцию. В 1998–2002 гг. собраны 2-х,

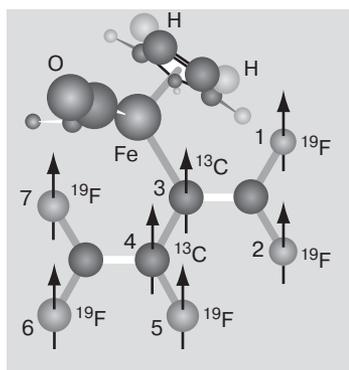


Рис. 1.47. Молекула — 7-кубитный квантовый компьютер, реализующий алгоритм Шора разложения чисел на простые сомножители.

3-х, 7-кубитовые КК (объем молекулы компьютера от нескольких десятков до сотни нм, исследовательский центр *Almaden* компании IBM). Кубитами служат спины атомных ядер фтора и ^{13}C . Расчеты показывают, что 50-кубитный квантовый компьютер разлагает 155-значное число на простые множители, задача важная для криптографии, за доли секунды, несколько обычных компьютеров — за 7 месяцев. Для большинства практических задач необходимы многокубитовые КК, которые будут созданы не ранее 2020 г.

Высокое быстродействие и плотность размещения соединений в наноэлектронных схемах достигается применением в тонкопленочной технологии нанокристаллических соединений (толщина диэлектрических слоев, обусловленная электрическими требованиями, делает необходимым использование процесса заполнения отверстий с прямыми стенками в печатных платах для обеспечения минимального зазора между токопроводящими линиями), увеличением числа линий на один слой (сокращение площади отверстий), устранением ступенчатости покрытий, обеспечением плоскостности.

Активные транзисторные элементы создаются на кремниевой подложке, все соединения формируются над собственно полупроводниковой схемой (около 10 слоев). Внутренняя разводка микрочипа объединяет миллионы транзисторов в единую логическую схему.

Малый размер всех элементов не только уменьшает габариты и энергопотребление микросхем, но и повышает быстродействие электроники. Чем меньше транзисторы и соединяющие

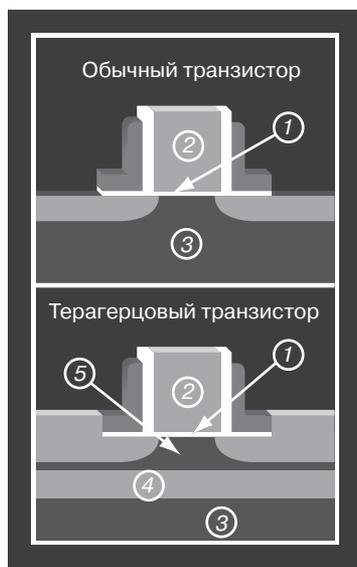


Рис. 1.48. Схемы обычного и терагерцового транзисторов: 1 — слой диэлектрика; 2 — затвор; 3 — кремниевая подложка; 4 — дополнительный слой диэлектрика; 5 — сверхтонкий слой кремния

их токопроводы, тем меньше токи и напряжение, необходимые для передачи информации от одного логического элемента к другому.

Повышение быстродействия процессоров достигнуто (фирма *Intel*, конец 2001 г.) при использовании терагерцовых транзисторов (рис. 1.48) с частотой переключения 1 Терагерц (триллион раз в секунду), в которых в качестве диэлектрика затвора используют диоксид циркония (один молекулярный слой ZrO_2 снижает ток утечки в 10 000 раз, как и три слоя SiO_2). Транзисторы наносят не непосредственно на подложку из кремния, а на дополнительный слой диэлектрика. Сверхтонкий слой кремния прямо под транзистором быстрее создает максимальный ток при переключении транзистора, что позволяет существенно повысить рабочую частоту, понизить рабочее напряжение и теплоотдачу микросхем.

Для решения вопросов миниатюризации и быстродействия элементов вычислительной техники физические проблемы микро- и наноэлектроники исследовались по нескольким направлениям. Физические свойства полупроводниковых систем пониженной размерности (основа субмикроелектроники и наноэлектроники), эффекты размерного квантования в твердотельных образцах малых размеров, квантовый размерный эффект — зависимость свойств от размеров, сопоставимых с длиной волны де Бройля носителей заряда, изменение электронных свойств тела из-за ограничения свободного движения электронов в микро(нано)объеме, ограничивают предельные размеры активных элементов интегральных схем СБИС и межсоединений на уровне 0,01 мкм для литографических линий, меньше 0,1 мкм для биполярных и МДП-транзисторов. Плотность упаковки активных элементов СБИС 10^7 – 10^8 элементов/см², быстродействие 10^{18} – 10^{19} элементов-Гц. В СБИС процессоров *Pentium* фирмы *Intel* технология обеспечивает предельный размер элемента 0,25 мкм. Дальнейший прогресс сверхскоростных СБИС связан с преодолением проблем межсоединений.

На основе электрооптического эффекта в полупроводниковых пленках разработаны принципы оптической памяти и системы оптической обработки информации. На основе структуры пленка — диэлектрик можно создать оптическую память чувствительностью 10^{-7} Дж/см², емкостью 10^7 бит/см² и быстродействием записи 10^{-7} с.

На базе кристаллов необата-бария-стронция и оптической памяти разработаны элементы с перестраиваемым функционированием и перестраиваемыми связями и системы параллельной обработки информации с использованием принципов эволюционного моделирования.

Уникальными свойствами, отсутствующими у массивных материалов, обладают нанокристаллы (размер менее 100 нм) и нанокompозитные слои, содержащие нанокристаллы полупроводников (Si, GaAs и др.) в матрицах прозрачных диэлектриков (SiO_2 , Si_3N_4). Кремниевые источники света (за счет фотолюминесценции) необходимы для организации оптических межсоединений в ультрабольших интегральных схемах (УБИС) и между УБИС, создания матричных дисплеев и других оптоэлектронных систем. Ионно-плазменным и ВЧ-магнетронным осаждением получены люминесцирующие слои $\text{SiO}_x(\text{Si})$ и $\text{SiN}_x(\text{Si})$, содержащие нанокристаллы Si (3–30 нм) в матрицах SiO_x и SiN_x , и кремниевые светодиоиды.

Для оптоэлектроники разработан новый класс материалов — магнитные полупроводники — шпинели ACr_2X_4 (A—Cd, Hg; X—S, Se) с нелинейным эффектом Фарадея, управляемым магнитным полем.

Исследование массопереноса в системах жидкий металл–полупроводник привело к разработке новых запоминающих устройств (ЗУ). В программируемых постоянных ЗУ (ППЗУ, информация сохраняется при отключении питания) запись информации производится электротермическим пробоем тонких металлических или поликремниевых перемычек или закорачиванием *p-n* перехода биполярного транзистора. Информационная емкость ППЗУ (более 1 Мбит на кристалле) повышена за счет записи информации электротермическим массопереносом материала электрода при микропробое тонкого диэлектрического слоя в структуре металл–диэлектрик–полупроводник ($\text{Al-Si}_3\text{N}_4-n\text{-Si}$).

Вакуумная микроэлектроника может быть самой быстродействующей, поскольку предельная скорость электронов в вакууме сравнима со скоростью света $3 \cdot 10^8$ м/с, в то время как предельная скорость носителей заряда в самых быстродействующих полупроводниках составляет $(2-3) \cdot 10^5$ м/с [50].

Перспективный эмиссионный материал вакуумной микроэлектроники — тонкие нанокластерные углеродные пленки на основе нанотрубок, обеспечивающие стабильную автоэлектронную эмиссию в условиях технического вакуума. Полевые эмиттерные решетки на их основе — элементная база для широкоформатных плоских с высоким разрешением полноцветных телевизионных экранов, плоских панельных дисплеев для мониторов компьютеров, миниатюрных электровакуумных СВЧ-приборов для телекоммуникаций, источников электронов для сканирующей туннельной и силовой микроскопии.

Элементная база вычислительной техники, построенная на принципах частотного представления информации, — микроминиатюрные устройства вакуумных интегральных схем (ВИС, обеспечение быстродействия в десятки миллиардов операций в секунду) и углеродные пленки на основе нанотрубок.

Для высокотемпературной (≥ 300 °C) полупроводниковой наноэлектроники перспективны приборы на основных носителях заряда с полевым управлением — полевые и каналные транзисторы.

Искусственные нейронные сети (ИНС) основаны на использовании результатов исследований автоволновых сред и автоволновых процессов (нервные волокна — нейроны, типичные автоволновые среды, открытые нелинейные системы, процессы, в которых реализуются в виде разнообразных нелинейных волн, стационарных и пульсирующих пространственных структур). ИНС лежат в основе разработки ЭВМ с параллельными принципами обработки больших массивов информации, фундаментальное направление на стыке физики, информатики, микро- и наноэлектроники, биологии.

Развитие наноэлектроники позволило перейти к нейросетевой архитектуре (нейроподобные среды и нейронные сети для параллельной обработки информации) сверхвысокопроизводительных ЭВМ — к нейрочипам, нейропластинам (на основе SiGaAs — технологии, оптонаноэлектронная технология для 2D- и 3D-систем), нейрокомпьютерам (переключений

в секунду 10^9 – 10^{12} , до 10^{15} ; связей 10^8 – 10^{10} супер-ЭВМ *Intel*, 1998 г., $1,5 \cdot 10^{12}$ операций в секунду), в дальнейшем к интеллектуализации вычислительных систем (в мозге человека $1,5 \cdot 10^{10}$ клеток, 3–4 миллиарда нейронов) с активизацией работ в сфере биокомпьютеров и бионейрокомпьютеров. Импульсный характер сигналов в ИНС приближает ее к биологическим прототипам.

Микропроцессоры для ИМ содержат внутри полный функциональный комплект, начиная от логического и арифметического процессора со встроенной памятью и заканчивая цифро-аналоговыми преобразователями.

Любая микронаномеханика без встроенных микронаносенсоров может работать только по твердозаданной программе. Поэтому разного рода сенсоры активно интегрируются в состав микронаносхем. Разработаны нанопроцессоры, содержащие до 60 различных датчиков на одном базовом кремниевом кристалле, которые изготавливаются в едином технологическом процессе, объединяющем тысячи резисторов, транзисторов, систему измерителей и исполнителей. Такие системы способны не только «чувствовать», но и перемещать небольшие массы на вполне заметное расстояние.

Современные компьютеры состоят из деталей, содержащих наноскопические элементы. Наночипы выпускаются миллионными партиями. Технология изготовления полупроводниковых приборов является одной из разновидностей нанотехнологий. Она имеет дело с объектами размером менее 100 нм, наночипов с затворами транзисторов шириной 100–50 нм. Миниатюризация позволяет снизить удельную стоимость и повысить быстродействие полупроводниковых приборов, из которых состоят микросхемы. В одном чипе размещают свыше 50 млн транзисторов.

Совершенствование технологии изготовления интегральных схем связано с использованием новых подходов и материалов [48]:

1) нанесение на поверхность кремниевых пластин (дефекты-дислокации в атомной решетке ухудшают проводимость кремния) тонкого слоя бездефектного монокристаллического кремния, подвергая ее воздействию кремнийсодержащего газа (повышение быстродействия транзисторов);

2) использование технологии «кремний на диэлектрике» (КНД), метода *SIMOX* (*separation by implantation of oxygen*, разделение путем внедрения кислорода, фирма *IBM*). Неглубоко под поверхностью пластины формируют слои двуокиси кремния SiO_2 (увеличение скорости переключения электронных вентилях, уменьшение на 30% потребляемой мощности, переход на элементарную базу следующего поколения миниатюризации) бомбардировкой кремния высокоскоростными ионами кислорода с последующей термообработкой для исправления образовавшихся дефектов кристаллической решетки. Внедрение кислорода проходит медленно, что стимулировало разработку ускоренного процесса: деформирование слоя SiO_2 непосредственно на поверхности кремниевой пластины; сборка из 2-х пластин, на пластину с обработанной поверхностью накладывается пластина с необработанной поверхностью; удаление большей части кремния из верхней пластины (рис. 1.49);

3) разработка метода точного формирования слоев (технология *Smart-Cut*, «умная резка», фирма *Soitec*, Франция). Окисленную поверхность бомбардируют ионами водорода для образования хрупкого слоя, который после соединения пластин удаляется, а поверхность полируется;

4) для увеличения подвижности проходящих через кристаллическую решетку кремния электронов (увеличение быстродействия транзисторов) решетку растягивают (на 1% использованием кремний-германиевого сплава, формирующего требуемые напряжения в структуре кремниевой пластины);

5) использование самосборочной (рис. 1.50) литографии и литографии с жестким УФ.

На смену обычной литографии приходит самосборочная литография (разработки фирмы *IBM*), использующая так называемые двублочные полимеры. При нанесении на вращающуюся кремниевую подложку сополимеров полистирола и ПММА происходит специфическая

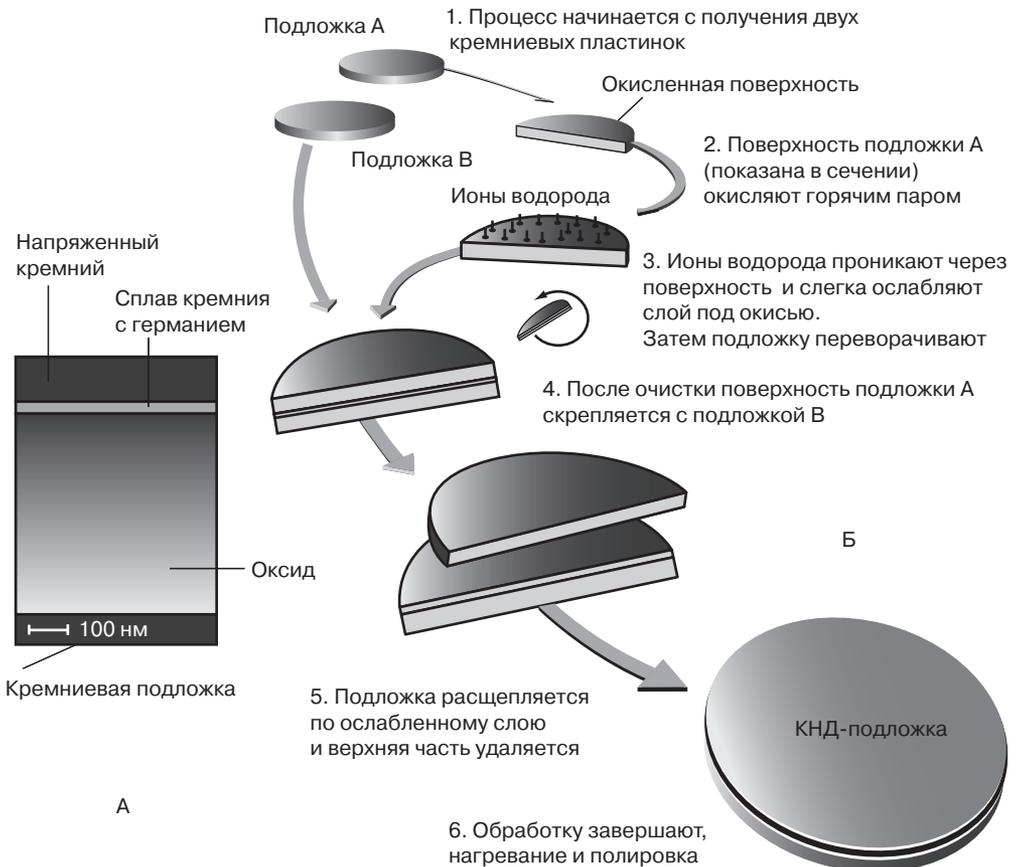


Рис. 1.49. Структура кремниевой подложки, изготовленной по технологии КНД (кремний на диэлектрике) и метода *SIMOX* (А) и технология точного формирования слоев *Smart-Cut* (Б) [48].

сегрегация блоков с сохранением ковалентных связей между блоками. При тепловой обработке ПММА — блоки образуют цилиндры, окруженные стирольными блоками, формируется соотобразный шаблон. После вытравливания ПММА в покрытии образуются поры диаметром 20 нм. Последующее травление переносит сотовый рисунок на подложку из SiO_2 , а на плату наносят слой аморфного кремния. Травящим газом кремний удаляется, оставаясь только в порах (образование нанокристаллических цилиндров, окруженных SiO_2). Поверх структуры наносят изолирующий слой и кремниевый блок, работающий как затвор полевого транзистора. Такая сотовая структура используется для производства флэш-памяти, сохраняющей информацию при отключении питания (информация содержится в конденсаторе, образованном нанокристаллическими цилиндрами, рис. 1.50).

Совершенствование микропроцессоров связано с уменьшением длины затвора, определяющей быстродействие и количество транзисторов в одном кристалле (рис. 1.51).

Возможности освоенной в электронной промышленности литографии позволяют пока изготавливать наночипы с размерами 50 нм.

С усовершенствованием конструкций полупроводниковых приборов, из которых состоят интегральные микросхемы, изменяются технологии их изготовления. Оксидная пленка,

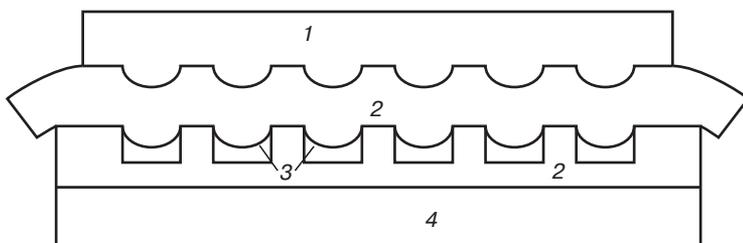


Рис. 1.50. Сотовая структура полевого транзистора с нанокристаллическими цилиндрами для флэш-памяти, сформированная методом самосборочной литографии [49]: 1 — кремниевый затвор; 2 — изолирующий слой из SiO_2 ; 3 — нанокристаллы кремния; 4 — кремниевая подложка

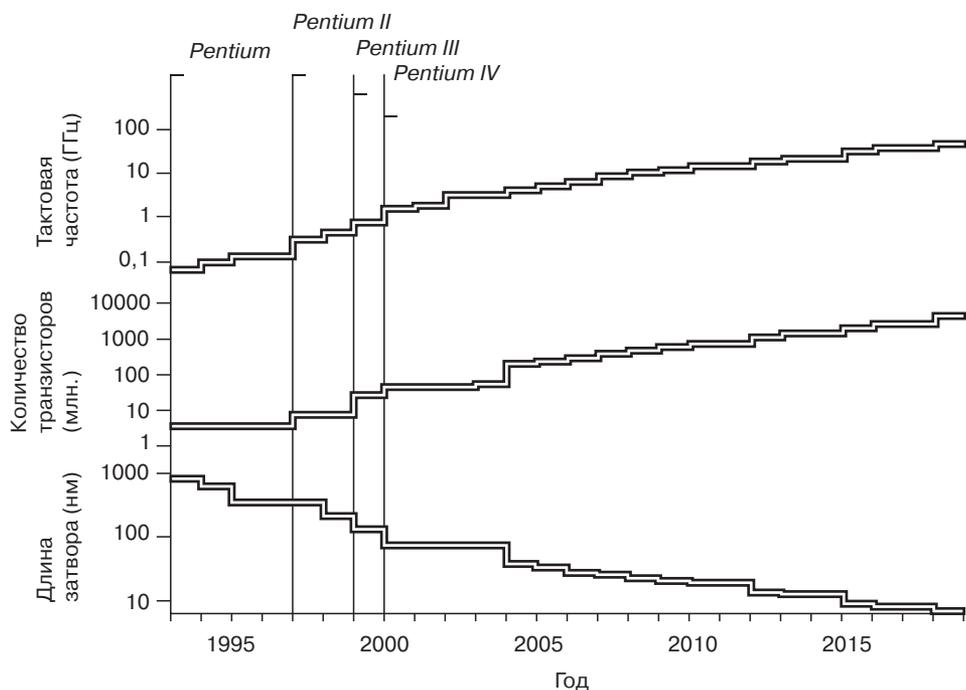


Рис. 1.51. Направления совершенствования микропроцессоров (на примере микропроцессоров Pentium фирмы Intel) [48]

изолирующая затворы транзисторов в чипах, должна быть не толще нескольких атомарных слоев (толщина слоя оксида определяет емкость затвора, с уменьшением которой электрического заряда, инициируемого затвором и находящегося под ним кремния, может быть недостаточно для обеспечения проводимости канала транзистора). Атомарные слои наносят, используя газы, состоящие из небольших молекул, хорошо «прилипающих» к кремнию, но не сцепляющихся друг с другом. Газ другого состава реагирует с первым, формируя слой покрытия толщиной в одну молекулу. Повторные операции формируют диэлектрический слой требуемой толщины (рис. 1.52).

На рис. 1.53 показан базовый элемент микропроцессора — полевой нанотранзистор, действующий как простой выключатель. Приложенное к затвору напряжение индуцирует

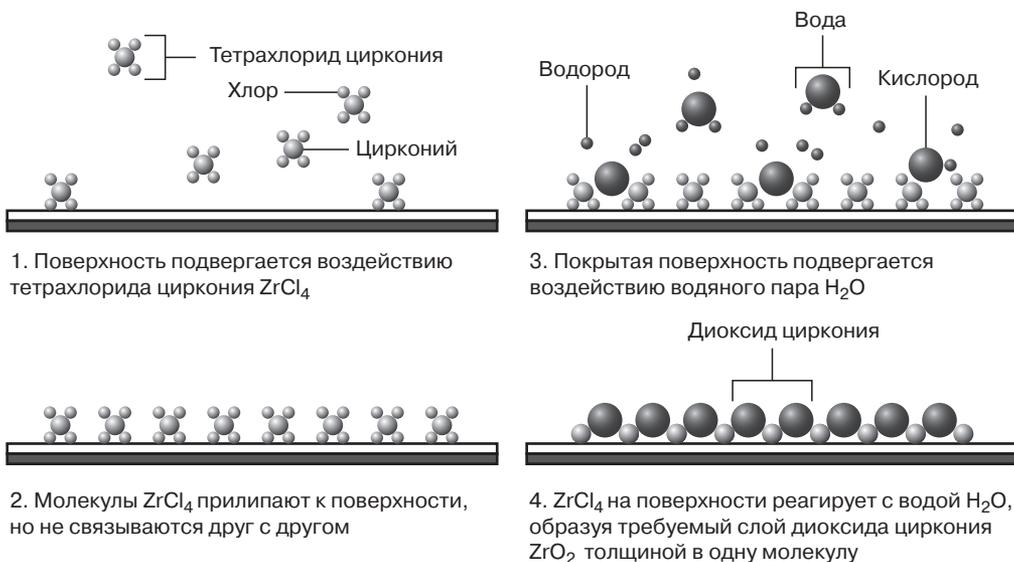


Рис. 1.52. Схема процесса формирования оксидных нанопокровов, изолирующих затворы транзисторов [48]

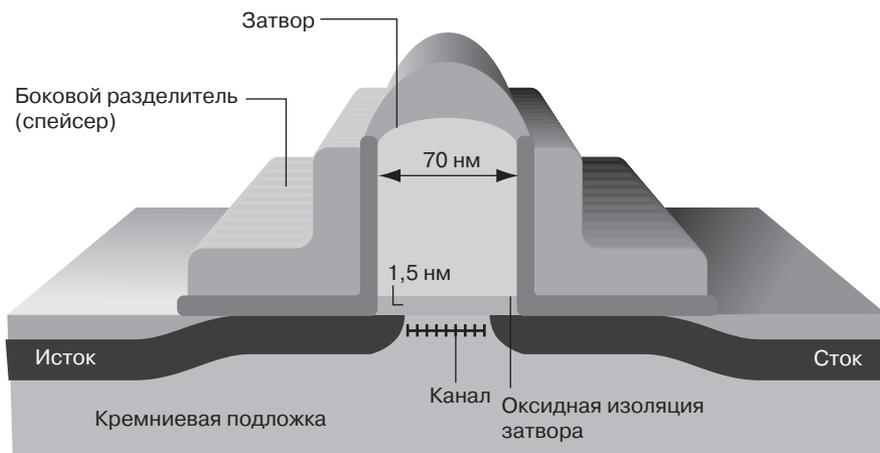


Рис. 1.53. Полевой нанотранзистор, сформированный с использованием нанотехнологий [48, 103]

электрический заряд, благодаря которому канал пропускает ток от истока к стоку. При малых размерах затвора нанотранзистор может включаться и выключаться миллиарды раз в секунду.

Топологию микросхемы формируют, используя фотолитографию, усовершенствованную для получения деталей микросхемы с наноразмерами. Элементы с размерами 70 нм создаются с помощью УФ-излучения с длиной волны 248 нм при использовании таких методов и устройств, как оптическая коррекция нанозорлов, масок с фазовым сдвигом, эксимерных лазеров.

Когда размер элементов структуры меньше длины световой волны, искажения, возникающие вследствие оптической дифракции, заранее рассчитывают, используют маски, которые учитывают дифракционные искажения, и получают транзисторы с элементами 50 нм, используя свет с длиной волны 193 нм.

Использование литографии с жестким УФ (мягкое рентгеновское излучение, длина волны 13 нм) позволяет формировать элементы с размером меньшим на порядок. Переход на литографию с жестким УФ существенно усложняет оборудование и технологию и требует использования зеркал сложной формы вместо линз в проекционных камерах, масок, поглощающих и отражающих жесткий УФ вместо стеклянных фотошаблонов.

На поверхность масок наносят десятки слоев молибдена и кремния толщиной в несколько нм каждый, отражающая поверхность покрывается хромом. Для удаления фоторезиста и остатков продуктов травления предложено (Лаборатория в Лос-Аламос, США) использовать низковязкую сверхкритическую двуокись углерода (когда давление и температура выше критической точки — CO_2 низковязкая жидкость, не разрушающая хрупкую структуру наноскопических деталей наночипов). После промывки при снижении давления до атмосферного CO_2 испаряется. Истоки и стоки формируют в углублениях по обе стороны от затворов транзистора (рис. 1.53) внедрением в кремний примесей (ионы мышьяка, бора), превращающих его в проводник. Активацию ионов для включения их в кристаллическую решетку проводят при нагреве и последующем охлаждении со скоростью тысячи $^\circ\text{C}$ в секунду (лазерная обработка позволяет изменять температуру со скоростью 5 млрд $^\circ\text{C}$ в секунду и предотвращать нежелательную диффузию ионов).

В состав микросхем входят миллионы конденсаторов, образующих динамическую память с произвольным доступом (*DRAM*-чипы), которые формируют нанесением атомарных слоев. Разрабатываются технологии изготовления соединений всех элементов чипа между собой с использованием меди (электролитическое осаждение) вместо алюминия с последующей полировкой кристалла микросхемы.

В системе нанопроводов для передачи информации используются нанопроводники на основе материалов, свойства которых на наномасштабе варьируются в широком интервале при минимальном изменении их составов.

Традиционные подходы к микроархитектуре процессоров (процессор *Prescott*, вариант *Pentium 4*, 125 млн транзисторов, компания *Intel*, май 2004 г.) привели к реализации предельных возможностей микропроцессоров одноядерной архитектуры и стимулировали переход к многоядерной архитектуре (рис. 1.54), интеграции нескольких процессоров в одном многоядерном кристалле (промежуточный этап — размещение нескольких процессоров на одной системной плате, рис. 1.55).

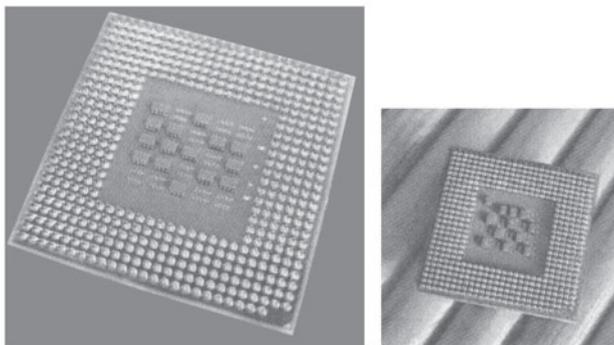


Рис. 1.54. Процессор фирмы *Intel* с двумя ядрами, набором микросхем с пропускной способностью 4-х независимых программ потоков

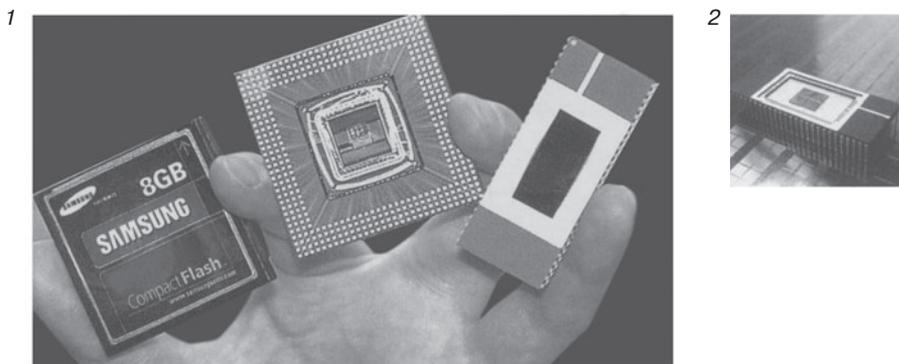


Рис. 1.55. Типы флеш-карт, изготовленных по 10-нанометровой технологии (флеш-память объемом 8 Гб, *Samsung*, (1) и чип флэш-памяти объемом 2 Гб (2).

Суперпроцессор *Cell* (*IBM, Sony, Toshiba*, 2005 г., девятиядерный, каждый модуль выполняет вычисление параллельно с другими, тактовая частота, с ростом которой возрастает число операций в единицу времени, 4–4,6 ГГц) имеет вычислительную мощность 256 Гфлопс (256 млрд операций в секунду).

Размещение нескольких процессоров в одном кристалле позволяет уменьшить время их взаимодействия до долей наносекунды. В 2006 г. уменьшена длина логических вентилях с 50 до 35 нм (к 2010 г. — 18 нм). Потребление мощности (более 110 Вт), выделение тепла и тактовая частота существенно возрастают (рис. 1.51). Тактовая частота определяет скорость работы транзисторов.

Микропроцессор с тактовой частотой 3,6 ГГц может выполнять по несколько операций на каждый такт, то есть каждые 277 триллионных долей секунды, а на получение информации из основной оперативной памяти уходит примерно в 400 раз больше времени. Возможности

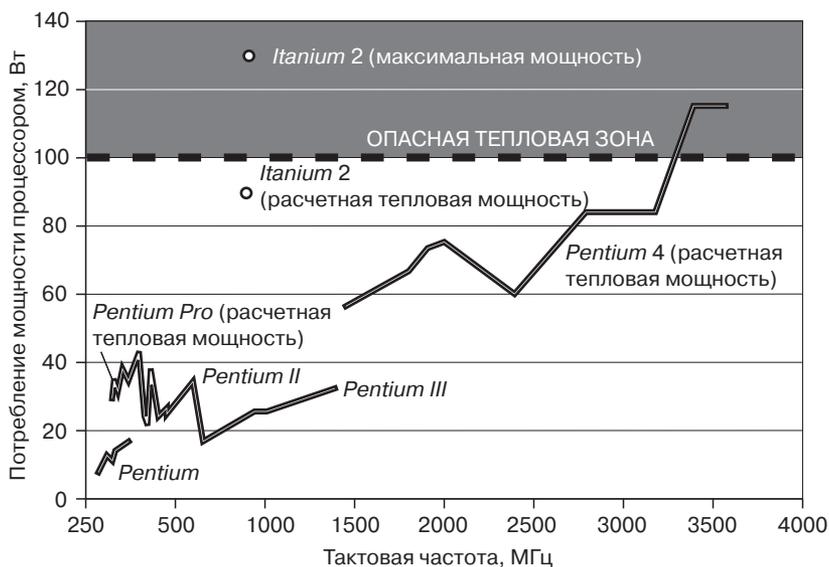


Рис. 1.56. Потребляемая мощность микропроцессоров в зависимости от тактовой частоты [101]

КЭШ-памяти (накристалльная КЭШ-память) и параллелизма на уровне команд в архитектуре современных микропроцессоров практически исчерпаны. Более высокий уровень параллелизма за счет совершенствования архитектуры микросхем достигается размещением в одном кристалле нескольких отдельных ядер (улучшение характеристик процессоров только на 30% зависит от повышения тактовой частоты) (рис. 1.56). Многоядерная архитектура процессоров существенно усложняет их программирование (большинство существующих программ не рассчитаны на многоядерную архитектуру), но интенсивно продвигается (выпуск восьмиядерных процессоров *Niagara*, компания *Sun Microsystems*, 2006 г.) [101]. Объем производства изделий полупроводниковой промышленности составил в 2003 г. около 2 млрд долл. На рис. 1.57 представлены тенденции совершенствования микро(нано)процессоров.

Одним из направлений совершенствования наноэлектронных устройств является использование представлений о магнитосопротивлении, направления в электронике — спинтроники.

В состав современных НЖМД (накопители на жестких магнитных дисках) входят магнитный диск, на котором хранятся данные, записывающая и считывающая головки. На каждом квадратном дюйме диска с плотностью записи 20 Гбит/дюйм² (1 Гбит/дюйм² = 155 Мбит/см²) размещается около 20 млрд битов. Для повышения плотности записи размеры считывающей головки необходимо уменьшать, а ее чувствительность и быстродействие — увеличивать.

Магнитосопротивление (МС) — изменение удельного электрического сопротивления вещества под воздействием магнитного поля. МС металлов пренебрежимо мало (Кельвин, 1857 г.). За последние десятилетия открыто несколько видов МС (МС при 300 К): гигантское (ГМС, 10, 1988 г., ГМС — устройство состоящее из двух слоев ферромагнитных кобальта или железа, разделенных слоем немагнитного металла; используется в считывающих головках НЖМД); туннельное (ТМС, 15, вместо немагнитного металла используется слой диэлектрика,

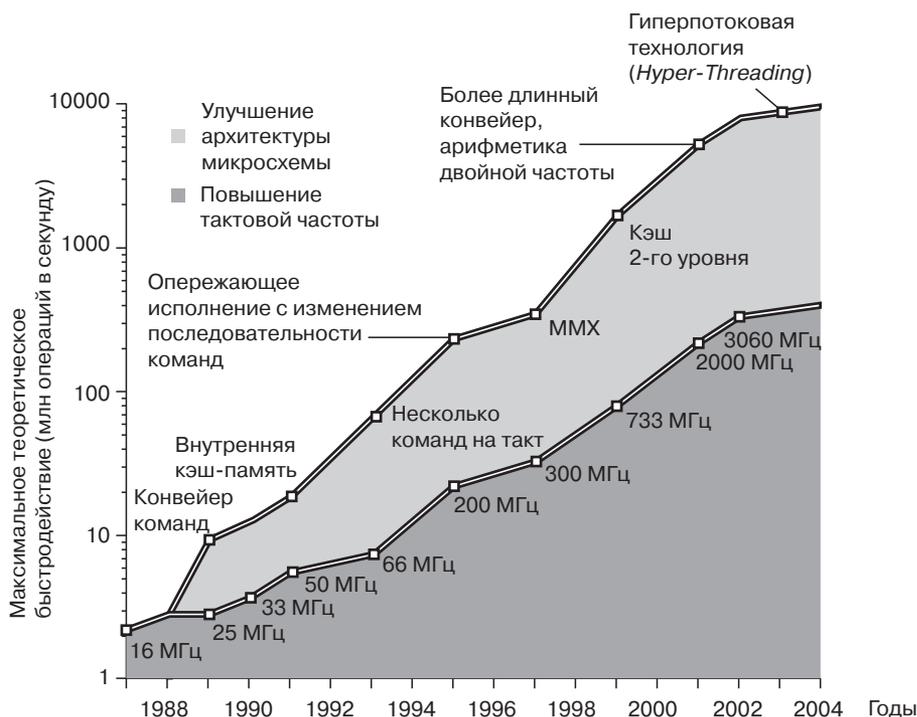


Рис. 1.57. Тенденции совершенствования микропроцессоров [101]

проводимость которого обусловлена квантовым туннельным эффектом, головки НЖМД, регистрация ничтожных изменений внешнего магнитного поля, магнитные сенсоры); колоссальное (КМС; 0,4; 1950–1994, возникает в диэлектрических кристаллах оксида марганца — манганитах, под влиянием магнитного поля переходит из немагнитного и непроводящего состояния в ферромагнитное металлическое); баллистическое (БМС, 3000, 1999, баллистическое прохождении электронов через субмикронные контакты в ферромагнитной металлической системе, состоящей из иглы и проволоки); экстраординарное (ЭМС, более 35% в поле 0,05 Тл, 1988, большое относительное изменение сопротивления, величина которого зависит от геометрии устройства из металла и полупроводника, отсутствие в конструкции магнитных материалов — низкий уровень шума, отношение сигнал/шум = 43 дБ, считывающие магнитные головки с высоким быстродействием менее 0,001 нс и высокой плотностью записи — свыше 300 Тбит/дюйм²).

Резкое увеличение МС (зависящее от толщины слоев) при увеличении магнитного поля зафиксировано для микроэлектронной структуры (полупроводниковой сверхрешетки), состоящей из чередующихся слоев арсенида галлия Ga₂As и арсенида алюминия-галлия AlGa₂As. МС структуры индий-сурьма-золото в магнитном поле 5 Тл при 20 °С достигает 10 000. Большие величины ЭМС обусловлены взаимодействием электронов, движущихся по искривленным траекториям, с субмикронными (порядка сотен нанометров) структурными параметрами ЭМС-устройств (форма, взаимное расположение, электрические свойства материалов элементов, геометрия определяет величину ЭМС) по узким полупроводниковым каналам. При этом сила тока резко уменьшается, а сопротивление устройства возрастает. Главной характеристикой считывающей головки считается не величина МС, а отношение сигнал/шум, которое для ЭМС составляет 43 Дб, что позволяет при использовании ЭМС повысить плотность записи до 1 Тбит/дюйм² (1000 Гбит/ дюйм²) из-за отсутствия магнитных материалов, причем каждому биту соответствует квадрат со стороной 25 нм. В субмикронном масштабе меняется физика проводимости, величина ЭМС уменьшается. Производство наноскопических устройств основано на модифицированной технологии, используемой в производстве микросхем, электронно-лучевой литографии на полупроводниковых подложках из арсенида галлия. Технология позволяет изготавливать ЭМС-устройства в виде линейных структур с внешним шунтом (рис. 1.58): с одной стороны полупроводниковые полоски из антимонида индия, InSb, легированного теллуром, располагается металл (золото), с другой стороны — по два вывода для измерения напряжения и подачи тока. Золотые контакты изолированы от шунта колпачком из нитрида кремния. Наноскопические ЭМС-устройства с МС равным 35% в поле 0,05 Тл обеспечивают плотность записи до 700 Гбит/дюйм². Плотность записи определяется толщиной мезаструк-

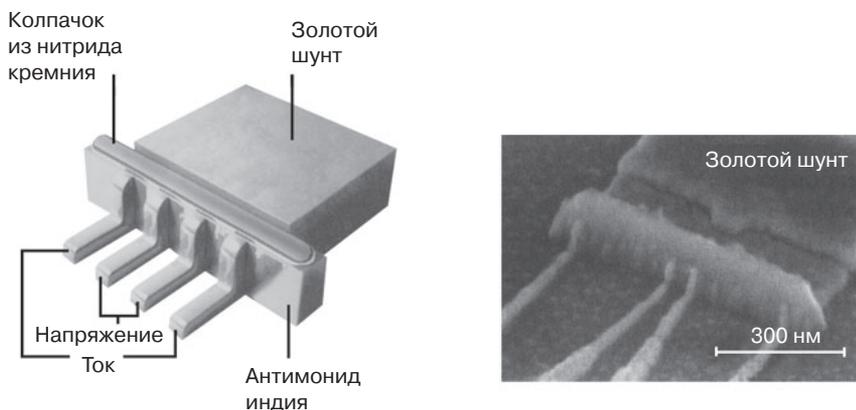


Рис. 1.58. Наноскопическое ЭМС-устройство линейной структуры (прототип считывающей головки для НЖМД) [119]

туры из антимиониды индия и расстоянием между контактами для измерения напряжения. Быстродействие ЭМС-устройств в 100 раз больше, чем у других типов считывающих головок. Границы субмикронных элементов ЭМС-устройств волнисты, носители заряда рассеиваются на них и движутся по диффузионным траекториям, что увеличивает МС. Эффект экстраординарного магнитного сопротивления может быть использован для изготовления субмикронных магнитных сенсоров (измерителей магнитного поля), магнитных накопителей — устройствах сверхплотной записи данных [118].

Наносенсорика

Наносенсоры разработаны на основе полимерных и углеродных наномолекул. Наномембраны с мезопорами диаметром 10–100 нм на основе привитых макромолекул, изменяющих под действием температуры и рН-среды параметры растворимости и имеющие переход «клубок-глобула», определяющий резкое изменение проницаемости и сорбции, являются чувствительными сенсорами для ИМ. Устройство из нанотрубки длиной 10 мкм, диаметром 75 нм (нанотермометр), заполненной жидким галлием может служить сенсором температуры. Поверхности с вертикально ориентированными на них углеродными нанотрубками (диаметр около 10 нм, длина 10–100 мкм) практически полностью поглощают электромагнитные излучения (коэффициент отражения видимого диапазона ЭМИ в интервале 380–760 нм 0,045%), что перспективно для использования в инфракрасных сенсорах, радиопоглощающих покрытиях, в оптических приборах, космических телескопах. Акселерометр, изготовленный методами нанотехнологии, способен измерять ускорение, равное стомиллионной доле силы земного тяготения.

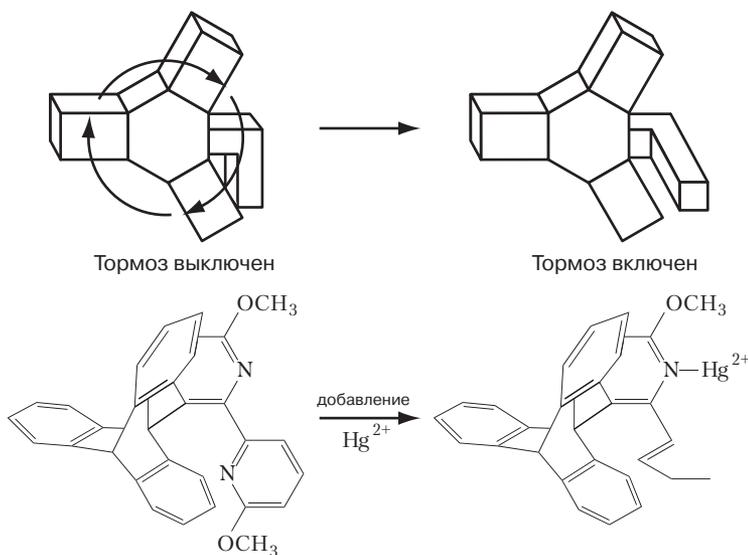
Сенсоры молекулярного уровня на основе ЖКП в интеллектуальных материалах регистрируют изменение свойств при механическом сдвиге, давлении, изменяющемся тепловом режиме, изменении температуры, концентрации испаряющихся веществ, фиксируют сдвиговые напряжения в материалах конструкций, в том числе в радиопоглощающих материалах и конструкциях благодаря анизотропии диэлектрической проницаемости, фиксируют изменение показателей преломления, изменение радиотехнических характеристик при воздействии электромагнитных полей. Металлокоординационные молекулы (фталоцианины) — молекулярные наносенсоры ИМ, фиксирующие изменение свойств, меняя свою структуру с изменением цвета.

Наномеханика

Наномеханика использует специфические свойства полимеров и молекул органических соединений, которые позволяют создать молекулярные актюаторы, молекулярные двигатели. Молекулярные исполнительные механизмы используют особенность некоторых полимеров изменять свой объем при изменении внешних условий. Так, гель на основе полиакриловой кислоты в слабощелочных водных растворах при пропускании электрического тока изменяет свой объем. Синтезированы полимеры, изменяющие свои размеры (изменение свободного объема, надмолекулярных структур) под действием видимого света (в темноте первоначальная форма восстанавливается, своеобразная память полимеров), мгновенно уменьшающие объем при погружении в кипящую воду.

Молекулярные машины используют вращение в световом потоке молекулярных комплексов сложного строения.

Лопастей молекулярного пропеллера (молекула из 5-ти ароматических и гетероциклов, расположенных в разных плоскостях) вращаются при 20 °С, но сильно замедляются, когда в раствор добавляют ионы Hg^{+2} (полная остановка при 243 К). Ионы ртути образуют комплексные соединения с атомами азота бипиридиновой цепи («тормоза»), присоединенной к оси колеса. Конформация этой цепи меняется, становится жесткой и препятствует вращению колеса. Удаление ионов ртути восстанавливает вращение колеса. Структура работает как молекулярный тормоз [104]. В качестве узлов роботов предполагается использовать молекулярные двигатели на основе координационных металлоорганических комплексов (металлофталоцианины,



металлоцены, порфирины с ионами металлов). Ионы металлов в структуре порфиринов притягиваются порфириновыми циклами, которые начинают вращаться в световом потоке, переносящем электромагнитные взаимодействия.

Нанобионика

Нанобионика — биоорганическое материаловедение на основе нанотехнологии подошла к моделированию принципов построения живой материи, которая основана на самоорганизации (создание структур с помощью квантовых точек) и саморегуляции, созданию бионических приборов, клеточных мембран из биоорганики (объединение физики и молекулярной биологии) [50].

Биочипы (Институт молекулярной биологии РАН) используют в диагностике биологических объектов. Биологический чип в виде геля полиакриламида, нанесенного на стеклянную пластину (600–1000 ячеек размером $100 \times 100 \times 20$ мкм), содержит в каждой ячейке молекулы ДНК-сенсоры биологических объектов. Для быстрого (в течение 24 ч) определения наличия возбудителей инфекционных заболеваний в физиологических жидкостях больного в ячейки микрочипа помещают фрагменты молекул ДНК возбудителей различных инфекций.

Для анализа в ячейки вводят диагностируемые препараты, помеченные флуоресцирующими молекулами. При совпадении типов ДНК (фиксируется точное соответствие последовательности 5-ти видов азотистых оснований в двухцепочечных нитях-спиралях ДНК, их комплементарность) в препарате и ячейке флуоресцентный микроскоп в сочетании с лазерным сканером регистрирует сигнал из соответствующей ячейки, который анализируется запрограммированным микропроцессором, что позволяет определить разновидность патогенных бактерий или вирусов (резкое ускорение сложных анализов).

Батарейка из 2-х углеродных филаментов — электродов длиной 2 см и толщиной 7 мкм, в которой один электрод покрыт токопроводящим полимером и ферментом-катализатором (глюкозооксидаза) и отнимает электроны у молекулы глюкозы, а второй покрыт полимером и ферментом и отдает электроны растворенному кислороду при 37°C и pH 7,2, использует преобразование энергии реакции глюкозы с кислородом (протекает в процессе обмена веществ) в электричество. Для питания сенсора, следящего за уровнем глюкозы у больных диабетом (система имплантантов), достаточно 1,9 мВт.

Биобатарея, использующая превращение глюкозы (бактерии морского ила отнимают у молекулы глюкозы электроны и передают их углеродным электродам), вырабатывает электроэнергию с КПД более 80% в течение нескольких дней.

В живых организмах процессами (каждую секунду в головном мозге человека проходит около 100 000 химических реакций) управляют молекулы ДНК, содержащие программу для клеточного ядра с помощью заложенного в них набора генов с определенными алгоритмами. Существует универсальный механизм, отсекающий миллиарды неправильных решений и оставляющий одно правильное. Доказана теоретическая возможность построения ДНК-компьютеров, создан (Институт Вейсмана, Израиль) ДНК-компьютер, способный отвечать на вопрос «да» или «нет» с точностью 99,8%.

В области компьютерных устройств нанотехнология позволяет создать белковые блоки памяти емкостью в триллион байт (молекулярная бионанотехнология, рабочие частоты ТГц, емкость памяти — несколько ГГц).

Биполупроводники на основе грибовых (дрожжевых) культур, которые «защищаясь» от токсичного кадмия, выделяют особую субстанцию, под действием которой из сульфата кадмия образуются частицы сульфида кадмия практически одного размера (диаметр около 1,8 нм) пригодные для применения в оптических интегральных схемах.

Интерполимерные компленарные комплексы (в биохимии компленарность, комплементарность — взаимное соответствие в химическом строении двух макромолекул, обеспечивающее их взаимодействие, например, при образовании спирали ДНК, соединения фермента с субстратом, антигена с антителом, структуры подходят как ключ к замку) позволяют сохранять и передавать информацию за счет химических реакций. Проводятся исследования (Институт Макса Планка, ФРГ) по созданию единой системы из транзисторов и нервных клеток, когда сигнал от одного транзистора к другому передается по нейронной сети. Клетки организма могут быть скомбинированы с компьютерными микросхемами и использоваться в качестве внешних сенсоров (гибридные нейроно-кремниевые цепи, нейрочипы, в которых взаимодействуют нейроны и кремниевые устройства).

Цель биокомпьютерных исследований с использованием вычислительных возможностей живых организмов — создание живого организма (например, искусственной клетки с функцией синтеза белка, Япония, Франция, конец 2003 г.), генетически программируемого для решения научных и прикладных задач (биороботы, искусственный интеллект).

Микро- и нанокомпоненты ИМ находят применение в различных областях техники, прежде всего в конструкциях с прогнозируемым ресурсом работоспособности, производстве специального оборудования, видеотехнике, медицине [9].

1.5. Интеллектуальные полимерные композиционные материалы (ИПКМ)

Одним из важнейших направлений развития полимерного материаловедения является разработка и использование интеллектуальных ВПКМ (ИПКМ).

В конструкционных ИПКМ изменение конструкционных, демпфирующих свойств фиксируют по частотам собственных колебаний структуры ВПКМ. Оптимизация свойств ИПКМ достигается за счет введения в структуру компонентов, реагирующих на изменение собственных колебаний, выводящих их на требуемый уровень, выполняющих функцию исполнительных элементов, актюаторов:

1) введение наряду с армирующими волокнами в структуру ВПКМ до 15 %об. волокон, лент из металлов с памятью формы позволяет обеспечить гашение колебаний при вибрациях и «залечивание» дефектов. Так, введение 15 %об. волокон из сплава нитинола в эпоксидный углепластик увеличивают его собственную частоту колебаний с 21 до 62 Гц (возможность выхода из резонанса);

2. введение полимеров (полимер-полимерная матрица в ИПКМ) с памятью способствует залечиванию дефектов. Под напряжением макромолекулы полиакрилатов и поливиниловых эфиров способны изменять конформацию (переход от ориентированной к клубкообразной конформации, от кристаллов с выпрямленными цепями, КВЦ, к кристаллам складчатой формы, КСЦ, с изменением объема, переходы сопровождаются способностью совершать определенную работу; см. также рис. 1.41);

3. введение в матрицу ИПКМ капсулированных (диаметр капсул около 1 мкм) магнито- и электрореологических жидкостей оптимизирует вибродемпфирующие свойства; эти функции выполняют: а) вязкие магнито-реологические жидкости (коллоидные растворы с ферромагнитными частицами диаметром ≤ 10 нм), б) электрореологические жидкости (коллоидные растворы с сегнетоэлектрическими, пьезоэлектрическими и электретными полимерными диэлектрическими компонентами, поляризованными в сильном электрическом поле за счет ориентации дипольных электрических моментов в кремнийорганических жидкостях), в) композиции с вязкоупругими полимерными связующими.

Ферромагнитные, сегнетоэлектрические, электретные частицы в электромагнитном поле ориентируются в инертной жидкости в капсулах. Магнито- и электрореологические жидкости утрачивают текучесть (замораживание магнитных моментов, магнитное стеклование). Конфигурация частиц приближается к порогу перколяции и возникает жесткая система, вязкость которой резко изменяется (если продолжительность воздействия электрического поля меньше времени релаксации, то система жесткая — вязкость возрастает, а если продолжительность воздействия поля больше времени релаксации, то система вязкая, что позволяет эффективно осуществить вибропоглощение и использовать в качестве датчиков для оценки степени вибрации). На основе резин, полимерных пен, термоэластопластов получают эффективные вибропоглощающие материалы с хорошими демпфирующими свойствами;

4. введение в матрицу ИПКМ пьезоэлектрических волокон регулирует вибрационные процессы. При возникновении деформирующей силы напряжение передается пьезоэлектрическим волокнам, сжимая и растягивая их. Механическая энергия преобразуется в электрическое напряжение, которое принимается встроенным микрочипом, накапливается, обращается и подается на волокна, заставляя их соответственно растягиваться и сжиматься, возникает противодействующий момент, гасящий вибрацию (рис. 1.59).

Из филаментов цирконата-титаната свинца $Pb(Zr, Ti)O_3$ диаметром 105, 250, 800 мкм и длиной 75 и 150 мм получают *PZT*-керамические волокна, используемые в качестве наполнителя пьезокомпозиционных полимерных материалов. Пьезокомпозиционные материалы сочетают пьезоэлектрические свойства керамик, прочность и технологичность полимерных материалов и способны генерировать электрические заряды (напряжение до 1000 В) в ответ на механические воздействия. На основе таких композиций разрабатываются актюаторы интеллектуальных адаптирующихся материалов, которые *NASA* планирует использовать, прежде всего, в аэрокосмических конструкциях.

Инвесторами разработок таких композиций и изделий являются фирмы *Volkswagen AG*, *SWAC automation*, а исследования проводятся фраунгоферовским институтом (*Fraunhofer Institute for Ceramic Technology and Sintered Materials, IKTS*), *NASA Langley Research Centre* и фирмами, занимающимися созданием и производством интеллектуальных (*Smart*) материалов (*Smart Material Corp., Sarasota*, США, с 2000 г.; *Smart Material GmbH*, с июля 2002 г., 100 %-ное финансирование для *Autovision GmbH* фирмой *Volkswagen AG*, производство совместно с *IKTS* в г. Дрездене, Германия).

В качестве актюатора используют пластины толщиной менее 10 мм цилиндрической или прямоугольной формы с пьезоэлектрическим слоем, сформированным из пьезокомпозиционного материала однонаправленной или ортотропной структуры, получаемого пропиткой эпоксидным связующим ленты из пьезоэлектрических *PZT*-волокон (рис. 1.60).

Актюаторы позволяют эффективно управлять уровнем напряжений, возникающих в конструктивных элементах при вибрациях, используя электрическую энергию для приведения

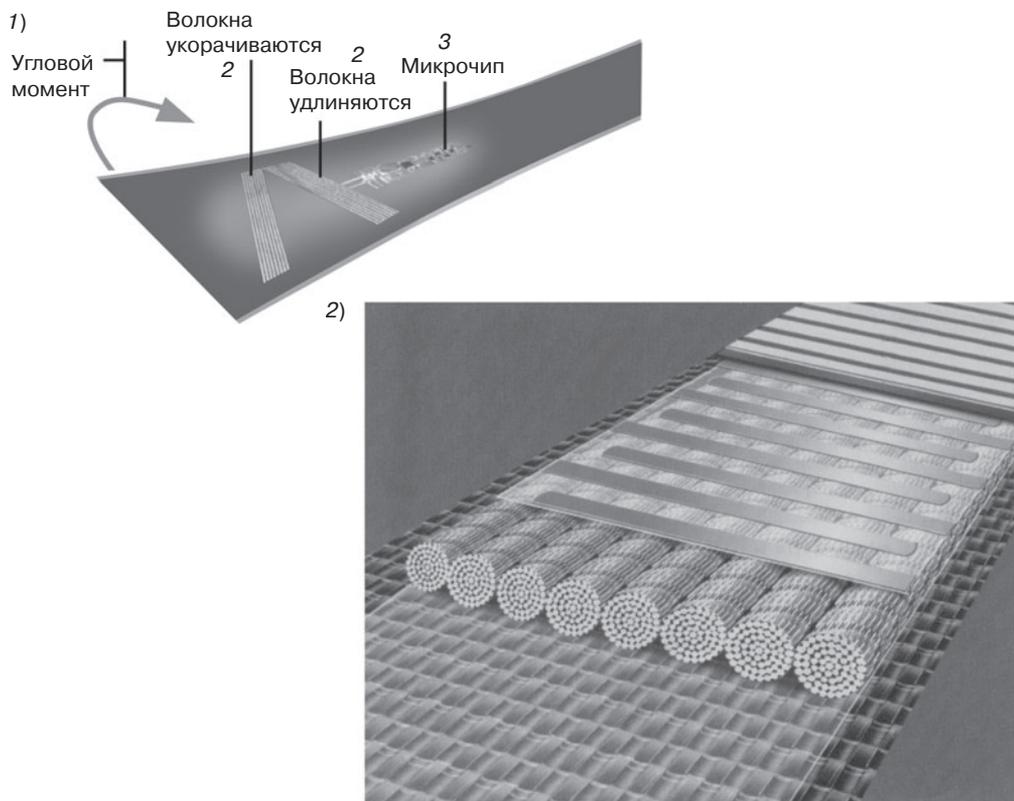


Рис. 1.59. Гашение колебаний и снижение вибраций в конструкциях из ВПКМ (1) с конформными пьезоэлектрическими волокнами (2) за счет преобразования механической энергии в электрическое напряжение и микропроцессорного (3) регулирования процессов растяжения и сжатия электроактивных пьезоволокон

механической работы, и работать в качестве сенсоров, эффективно преобразуя механические напряжения в электрические, фиксируемые и используемые микропроцессорами сигналы;

5. использование пьезокерамики с высокой электромеханической активностью (пьезоактюаторы, пьезодвигатели);

6. использование электроактивных полимеров в силовых элементах исполнительных механизмов, например, в виде гелей, изменяющих свой объем при пропускании электрического тока;

7. использованием магнитоэластичных аморфных материалов с прямым и обратным преобразованием электрической энергии в механическую, в том числе с наполнителями из порошков самарий-кобальтовых сплавов;

8. использование механохимических материалов, обеспечивающих прямое преобразование химической энергии в механическую;

9. использование микроактюаторов на основе лазерных технологий.

В условиях эксплуатации конструкций из ВПКМ повысить надежность и долговечность при изменяющихся условиях внешних воздействий, обеспечить оптимальное противодействие им можно не только оптимальным армированием, планируемой анизотропией свойств, конструированием структуры ВПКМ, но и адекватной реакцией материала, приводящей к требуемому изменению его свойств.

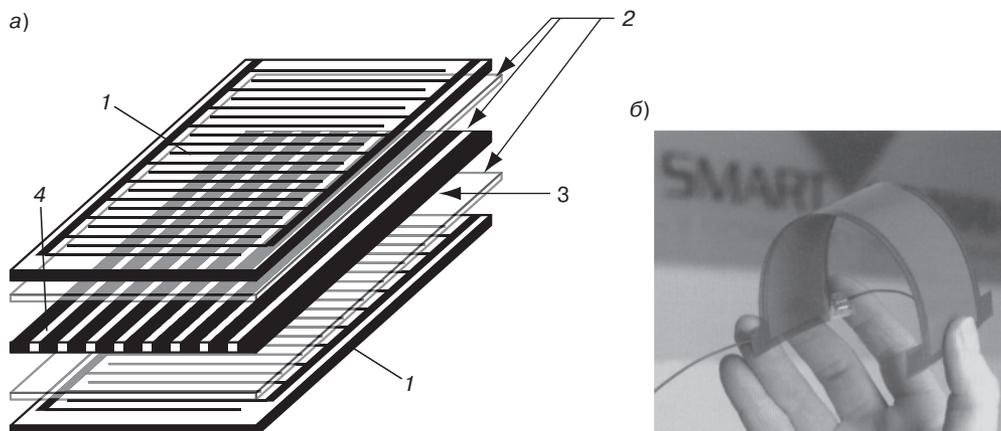


Рис. 1.60. Многослойная конструкция (а) актюатора (б) с пьезоэлектрическим слоем из эпоксидного волокнита с пьезокерамическими волокнами на основе цирконата титаната свинца *PZT* [157]:
 1 — верхний и нижний слои пьезокомпозиции из полиимидной пленки с интегрированными электродами (фиксация уровня возбуждения пьезокерамики под воздействием вибрации по изменению модулей d_{31} и d_{33});
 2 — пленочное эпоксидное связующее— клей (остановка роста трещин в керамических волокнах и композиции, обеспечение монолитности структуры актюатора);
 3 — слой эпоксидного волокнита с однонаправленными пьезокерамическими волокнами (сформированы структуры с прямоугольным сечением 4; повышение эксплуатационных параметров по сравнению с объемной пьезокерамикой)

Конструкции из ВПКМ дают возможность управлять частотными характеристиками путем оптимального армирования, введения слоев с определенными углами ориентации волокон (при оценке поведения при динамических нагрузках в случае металлических конструкций возможно управление первой–четвертой гармониками, в конструкциях из ПКМ — до восьмой и десятой гармоник).

Расширение использования ВПКМ в сильно нагруженных конструкциях привело к необходимости их совершенствования.

Четкая взаимосвязь структуры и свойств ВПКМ, возможность конструировать структуры ВПКМ, обеспечивающей оптимальное реагирование на внешние воздействия, позволяет считать ВПКМ с планируемой анизотропией свойств первым этапом «интеллектуализации» материалов. ИПКМ–ВПКМ, в которых за счет использования конформных компонентов, основанных на достижениях микро- и наносенсорике, механики, процессорной техники, реализуются возможности самодиагностики (самоинформирующиеся, самодиагностирующиеся ИПКМ) и адаптивности к внешним воздействиям (самоадаптирующиеся ИПКМ). Такие материалы приобретают новое качество — адекватность поведения, интеллектуальность. ИПКМ, сохраняя особенности ВПКМ, обладают рядом принципиально новых функций: контроль своего состояния, его анализ, реагирование на внешние воздействия с оптимизацией своих свойств. В ИПКМ компоненты (устройства, узлы конструкции), обеспечивающие контроль, анализ и реагирование на внешние воздействия введены в структуру ВПКМ (конформные компоненты, введение которых в объем металлических и керамических материалов невозможно).

Конформное размещение дополнительных компонентов в гетерофазных ВПКМ, использование достижений микро- и нанотехнологий не создаст непреодолимых затруднений при такой модификации. В ВПКМ сравнительно просто вводить сенсоры, микропроцессоры, полимерные, в том числе из электроактивных полимеров актюаторы, оптические волокна.

Системы самодиагностики, передачи информации, адаптирования с использованием конформных микро(нано)компонентов, волоконно-оптических датчиков и волокон, волокон на основе электроактивных полимеров (пьезоэлектрические волокна), на основе материалов с эффектом памяти формы, исполнительных устройств на основе микро(нано) механики (актюаторов), внедряемых в структуру гетерофазных ВПКМ, хотя и изменяют (контролируемо) в известных пределах свойства ВПКМ, вписываются в традиционную технологию наполнения полимеров, используемых в качестве связующих (матриц) ВПКМ (с определенными ограничениями) при изготовлении ВПКМ и технологию их переработки в изделия (они же позволяют контролировать процессы формирования полуфабрикатов, препрегов и формования изделий из ВПКМ). Конформное размещение в структуре ИПКМ оптических волокон обеспечивает:

1) минимальное изменение структуры ВПКМ с запланированным объемом и распределением армирующих волокон (блок оптических волокон имеет диаметр 100–300 мкм, что аналогично диаметрам армирующих нитей и жгутов из филаментов 7–15 мкм) и конструкционных свойств ВПКМ после встраивания в ИПКМ датчиков и оптоволоконной системы передачи информации (с учетом определенных сложностей при углах армирования 90° в ортотропных структурах);

2) сохранение требуемого коэффициента затухания сигнала в оптических волокнах;

3) прочие и совместимые с ВПКМ соединения для ввода-вывода лазерного излучения (связующее выполняет и роль клея). Встроенные в ИПКМ оптические волокна не создают электрических помех в радиопрозрачных ВПКМ, не требуют электроизоляции, не нагревают конструкцию, точно фиксируют дефекты в объеме ИПКМ, имеют большой радиус измерений.

Волокна и пленки из материалов с «памятью» формы в ИПКМ находят применение в качестве рабочих элементов (актюаторов), различных термочувствительных сигнальных и исполнительных устройств и механизмов, совершают определенную работу при нагреве или охлаждении.

Конструкции из ИПКМ, содержащие встроенные датчики, актюаторы и микропроцессоры, используют для изготовления, функционирования, повышения надежности и долговечности, обслуживания систем различного назначения. Они способны демпфировать колебания, опасные вибрации, обнаруживать нарушение структурной целостности.

ИПКМ могут адекватно реагировать на изменяющиеся внешние воздействия и корректировать свойства до уровня, оптимально соответствующего изменяющимся воздействиям.

Они перспективны во всех областях (судо-, автомобилестроение, строительство), где требуется повышение надежности и прогнозирование работоспособности конструкций.

В Великобритании спроектирована спортивная яхта, в углепластиковую мачту которой введены сенсоры, регистрирующие степень ветровой нагрузки на мачту, и оптоволоконная система, передающая информацию в бортовой компьютер, подающий звуковой сигнал и команду на управление парусами, если сила ветра слишком велика. «Интеллектуальная» система «указывает» когда идти под парусом опасно.

Микро- и наносенсоры, процессоры, актюаторы, разработанные с использованием достигшей микро(нано)сенсорике, механики, процессорной техники, нашли применение в качестве компонентов конструкционных и специальных ВПКМ, прежде всего в авиакосмических конструкциях.

ИПКМ чаще всего используются в качестве оболочек конструкций силового и специального назначения.

ВПКМ с интегрированным электронным оборудованием (конформные датчики, волоконная оптика) — поколение материалов, относящихся к ИПКМ (интеллектуальным), позволяющим создавать принципиально новые конструкции, оболочки (например, *smart skin* — «думающая оболочка»).

«Думающая оболочка» представляет собой совокупность различных электронных устройств и антенн, осуществляющих прием, переработку и передачу информации. Все они

размещены непосредственно в самой обшивке, выполняемой из ВПКМ (играют роль нервных окончаний, имеющих в коже человека, но волоконные «нервы» устойчивее природных к воздействию температур, механических повреждений, электромагнитного и лазерного излучения, поражающих факторов ядерного взрыва).

Обшивка с конформной электроникой обладает исключительно высокой надежностью при использовании термоустойчивых материалов в решении вопросов охлаждения устройств с большим тепловыделением. С начала 1980-х гг. в рамках проекта «Форкаст-1» (США) были рассмотрены сотни перспективных разработок, около 70 которых в 1985 г. отобраны для дальнейшего совершенствования по проекту «Форкаст-2». В лаборатории астронавтики (база ВВС Эдвардс, штат Калифорния) и научно-исследовательском центре имени Лэнгли (NASA) разрабатывают оболочки с конформной электроникой для космических аппаратов пилотируемых летательных аппаратов — в Научно-исследовательском центре имени братьев Райт (база ВВС Райт-Паттерсон, штат Огайо). К работе привлечены фирмы *Hughes Aircraft*, *Rockwell International*, *Westinhaus*, *Lockheed*, *Boeing*, *McDonnell Douglas*.

Разработка самодиагностирующихся и адаптирующихся ИПМ позволила перейти к производству авиатехники 5-го поколения с высоким уровнем эксплуатационных характеристик (маневренность, весовое совершенство, надежность, радиопоглощение, УРЗ): ЛАВИ (фирма IAI, Израиль); Рафаэль (из эпоксидных угле- и кевларопластиков передняя часть фюзеляжа, большая часть конструкции крыльев, панели длиной 30 м, 35 %масс. ВПКМ в конструкции, фирма Дассо–Берге, Франция); JAS-39 (обшивки и сегменты крыльев 2000×700×160 мм с лонжеронами, эпоксидные углепластики структуры [0/90/±45] фирмы *Saad-Scania*, *SAAB*, Швеция), *EAP* (85 %масс. ВПКМ в конструкции, фирма *Bae*, Англия); *EFA* (Англия, ФРГ, Италия, Испания, с 1997 г. — *NEFMA*, ранее *Eurofighter*); *F-35 Joint Strike Fighter* (США); *Lockheed Martin F/A-22 Raptor* (США); проект 1.44 (МИГ, Россия); летающая лаборатория *СУ-47 «Беркут»* (триплан-тандем с крыльями обратной стреловидности, слоистые толстостенные панели крыльев и кили из ВПКМ; двигатели АЛ-31ФН с искривленными каналами воздухозаборников, всеракурсные поворотные сопла, σ_d 0,5–3 м²); переходные к 5-му поколению *СУ-30 МКИ* (аналог *F-18*), *СУ-34*, *СУ-27 СКМ* (лучше *F-16* и *Мираж 2005*), *СУ-30 МК*, *СУ-35* (глубокая модернизация *СУ-27*, *МИГ 29 СМТ*). Эти самолеты приходят на смену истребителям 4-го поколения *F-15*, *F-16* (США), *МИГ-29*, *СУ-27* (Россия).

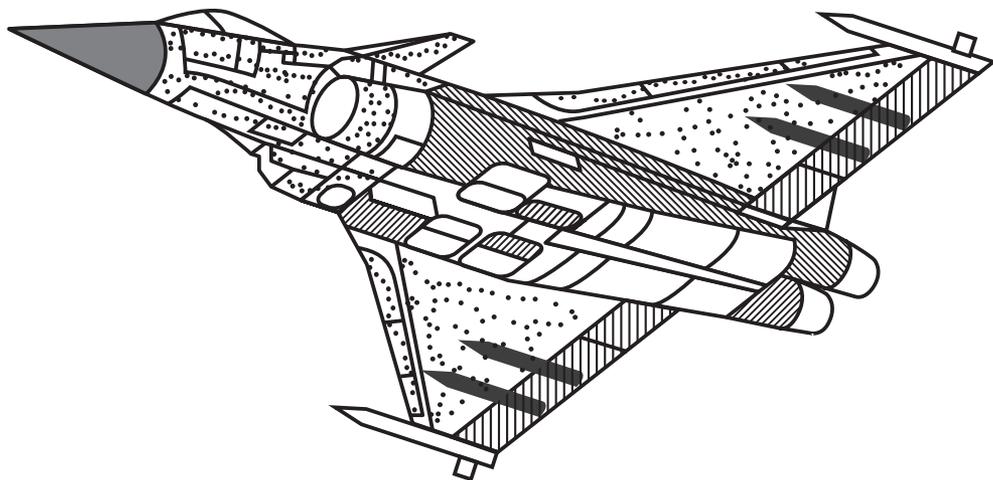


Рис. 1.61. Самолет 5-го поколения «Рафаэль» (отмечены конструкции из ВПКМ и ИПМ)

Самолеты конструируют на дисплеях трехмерных компьютеров с демонстрацией в объемном изображении всех стадий сборки (отказ от полномасштабных моделей), которые воспроизводят до 4 млн возможных ситуаций в электромеханических и электронных системах. В самолетах 5-го поколения с высоким интеллектуальным потенциалом бортовых компьютеров «органов чувств» будет на несколько порядков больше, что обеспечит полное адаптивное к изменяющимся внешним воздействиям. Для них разрабатываются радиоэлектронные системы с цифровыми электродистанционными системами управления, ЭДСУ, с применением микропроцессоров, электромеханических силовых приводов (усовершенствованные системы приводов без гидронасосов и трубопроводов), высоковольтные системы энергоснабжения, электроприводы с использованием самарий — кобальтовых магнитных материалов, лазерные гироскопы, электромеханические приборы со стрелками заменяются на дисплеи.

В СУ-27 СКМ информация об окружающей обстановке поступает от 150 антенн и датчиков, размещенных по всему фюзеляжу (переход к 5-му поколению), используются электронные принципы навигационного и радиолокационного бомбометания с использованием микропроцессоров. РЛС «ведет» воздушные и наземные движущиеся цели. Три жидкокристаллических индикатора (дисплеи) получают всю полетную и боевую информацию (резерв — аналоговые стрелочные приборы). В СУ-35 (наиболее близок к самолетам 5-го поколения) два больших дисплея фиксируют информацию, а самая важная информация передается на лобовое стекло шлема пилота (информация переводится в зрительные образы).

Проводятся работы, направленные на создание конструкций ЛА, оснащенных датчиками, измеряющими давление и нагрузки, анализирующими их и осуществляющие изменение формы оперения; воздухозаборников, сопел двигателей.

ИПКМ используют для дальнейшего совершенствования ЛА. Улучшение аэродинамических характеристик ЛА связывают с использованием (в перспективе к 2030 г.) аэроупругих крыльев (проект ААW, *Active Aeroelastic Wing*, активное аэроупругое назначение): истребителей, бомбардировщиков, пилотируемых и беспилотных. Традиционные элементы управления (закрылки, элероны) являются основными мощными отражателями радиоволн. В момент отклонения разделенных закрылков при управлении полетом В-2 резко возрастает его ЭПР и он становится видимым на экранах РЛС.

Гибкое крыло создает изменение по крену и большую площадь поверхности, отклоняющей воздушные потоки, чем обычные элероны. Крылья ААW имеют меньше подвижных устройств, тоньше и легче обычных, что кроме улучшения аэродинамических характеристик увеличивает дальность полета, полезную нагрузку, уменьшает расход топлива, снижение массы дозвуковых ЛА на 7–10%, сверхзвуковых — на 18%. За счет передачи крылу функций хвостового оперения у самолета уменьшается аэродинамическое сопротивление и отражение радиоволн.

Аэроактивное крыло — конструкция, изменяющая свою форму в зависимости от условий полета, является следующим шагом после реализации идеи трансформируемых крыльев (беспилотный ЛА со складывающимися крыльями фирмы *Lockheed*, крылатая ракета *Tomahawk* с телескопическими крыльями фирмы *Raytheon*, радиоуправляемый ЛА *Firebee* фирмы *NextGen Aeronautic*). Для ААW-крыльев (изменение геометрии крыла, рост отношения квадрата длины крыла к его площади на 200% для регулирования крена и повышения подъемной силы; увеличение поверхности крыла на 50%, стреловидности — на 20%, крутки крыла — на 5%) нужны конструкции, структура которых обеспечит устойчивость к нагрузкам, оболочки, способные изменять свою форму на основе ИПКМ с компонентами, способными под воздействием температуры и(или) электромагнитного поля (кобальто-самариевые полимерные магниты) менять свои свойства, оболочки с пьезоэлектрическими элементами, способные воспринимать нагрузки и адаптироваться к ним.

На схеме (рис. 1.62) показано, каким образом работает крыло с технологиями ААW. Для создания крена на правый борт передний закрылок левого крыла поднимается вверх, крыло «скручивается» и создается дополнительная подъемная сила. С помощью элеронов можно увеличить угол скручивания закрылка. Самолет F/A-18A с активным аэроэластичным крылом впервые поднялся в воздух в ноябре 2002 г.

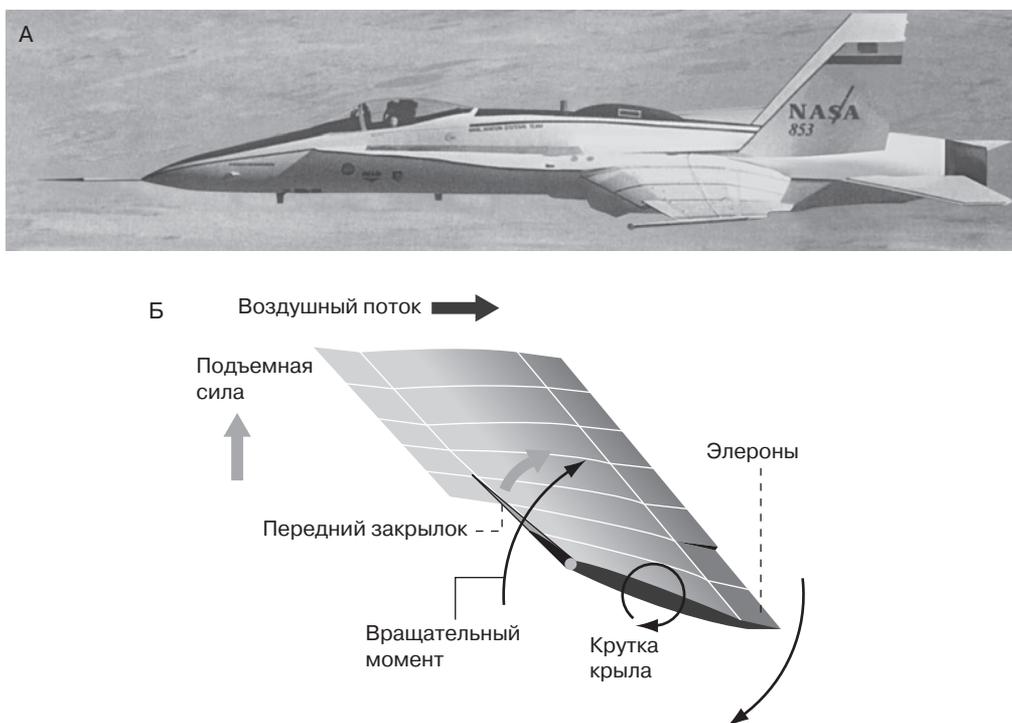


Рис. 1.62. Самолет *F/A-18A* с активным аэродинамическим крылом (А, ноябрь 2002 г., передняя кромка крыла отклонена вниз) и схема (Б) его работы [105]

1.6. Применение компонентов ИМ

Внедрение ИМ связано с ограничениями экономического характера (высокая стоимость наукоемких технологий), хотя в ряде случаев (спортивные изделия, лыжи, ракетки из ВПКМ с пьезоэлектрическими актюаторами, транспортные средства) использование компонентов ИМ и самих ИМ достаточно эффективно.

Элементная база ИМ, разработанная с использованием микро- и нанотехнологий, используется в ряде направлений, позволяет решать в определенной степени экономические проблемы, связанные со значительными затратами на реализацию сложных наукоемких технологий и производство специального оборудования, направлена на повышение качества жизни (видеотехника, медицина).

Сплавы с памятью используются в различных областях техники.

Разработана технология изготовления болтов из никелида титана ВТН-27 (аналог сплава Нитинол-55), при нагреве которых увеличивается их диаметр, в результате чего образуется соединение с натягом.

Более 100 тысяч втулок из нитинола, обеспечивающих соединение и герметизацию различных деталей, установлено на истребителях *F-14* (США). Большой интерес представляют саморазвертывающиеся устройства, например, крупногабаритные каркасы антенн космической связи (рис. 1.63).

Нитиноловые трубочки, введенные в артерии после нагрева до температуры тела, расширяют и укрепляют стенки сосудов (рис 1.64).

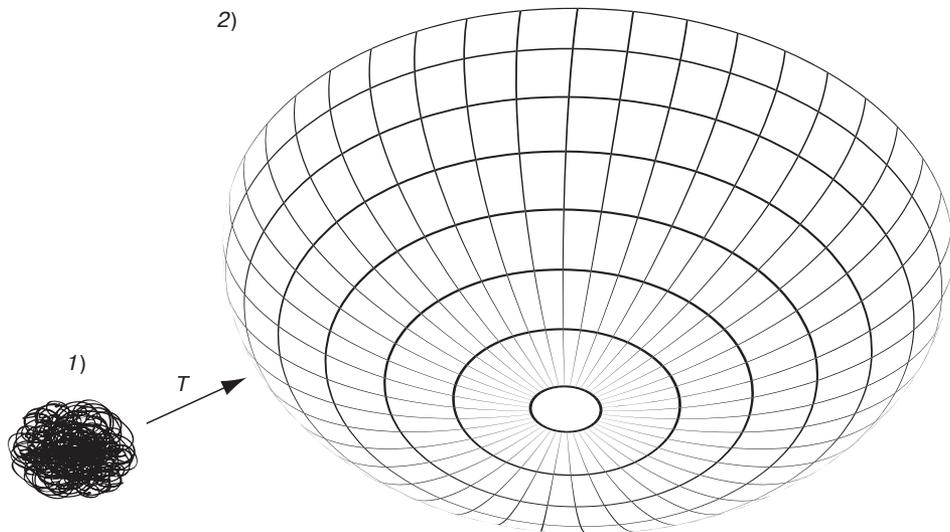


Рис. 1.63. Развертывание каркаса (2) из нитиноловой проволоки в результате мартенситного превращения при нагреве деформированной заготовки (1)

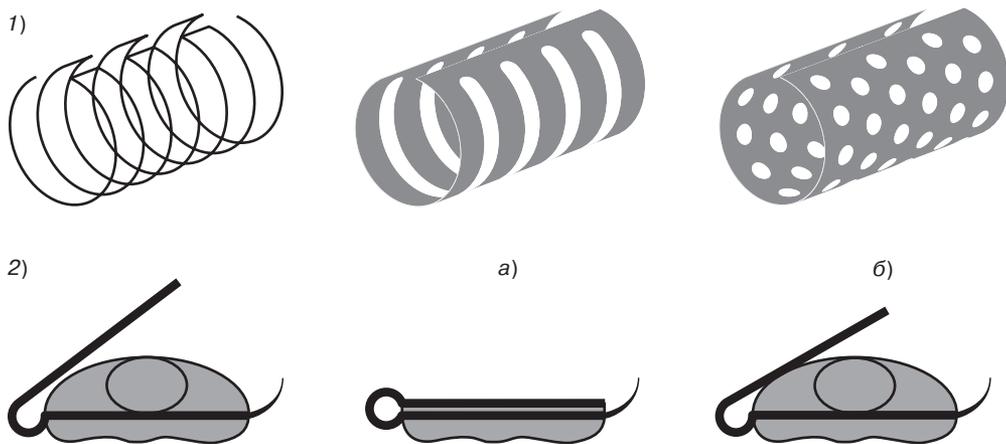


Рис. 1.64. Применение металлов с эффектом памяти формы в медицине [51]:
1 — корректоры функции клапанов вен; 2 — зажимы «Клест» (охват сосуда с прошиванием тканей, а — обжатие сосуда, б — освобождение сосуда)

На выставке *IEC-2003* (Париж) представлены ПКМ с пьезоэлектрическими компонентами, эффективно гасящими вибрации и ПМ с эффектом памяти формы для применения в конструкциях буферов и амортизаторов.

Металлы с памятью могут использоваться в качестве элементов моторов (ротор — однополосный гиперболоид вращения из пучка стержней из сплава Нитинол, при пропускании импульсов тока через ленту из пучка стержней она совершает колебательные движения) и зубчатых передач.

В современном автомобилестроении компьютеризация и применение множества высокотехнологичных устройств (используется более 500 различных датчиков) становится главным направлением: компьютер, корректирующий действия водителя в сложных ситуациях (например, при заносе); датчики дождя, управляющие стеклоочистителями; ультразвуковая система ближней навигации (предупреждение столкновений); 77 ГГц-вые сенсоры автосенсоров, сканирующие пространство на расстоянии до 150 м (22–26 ГГц-вые только на 25 м); проекционные дисплеи на передних стеклах; поворотные фары для лучшего освещения дороги на поворотах (блоки фар поворачиваются электроникой на основе измерения угла поворота), адаптивные стоп-сигналы (изменяют площадь и интенсивность своего свечения в зависимости от нажатия на педаль тормоза); система динамического контроля курсовой устойчивости, управление системами, отвечающими за безопасность движения (*DSC*, меняет угол поворота руля и восстанавливает курс автомобиля); микроэлектронные устройства для открывания дверей и включения зажигания двигателя; электронно-управляемая тормозная система *sensortronic*; сенсорная, встроенная в бампер система, обеспечивающая поднятие капота, защищающего пассажиров от поражения при столкновении; датчики столкновения на основе микропроцессоров со встроенными микросенсорами, инициирующие надувание подушек безопасности (микропроцессор постоянно анализирует сигнал от микроакселератора и если ускорение автомобиля превышает опасные пределы, принимает решение об активации системы безопасности); система *E-merge* (при аварии осуществляет автоматический связь с ближайшим сервисом по спутниковой системе, используя приемник *GPS*), сенсоры (размером с почтовую марку) для отслеживания состояния аккумуляторных батарей, реагирующие на падение напряжения, контролирующие работу генератора.

Доля управляющей электроники в автомобиле к 2010 г. увеличится на 35%. Разрабатываются электронные системы управления, обмена данными от различных сенсоров с интенсивностью до 25 Мб/с, для повышения скорости обработки данных переходит с 4–8-разрядных микропроцессоров на 16–32-битовые устройства.

Из-за необходимости использования для передачи данных волоконно-оптических кабелей и электрооптических конверторов стоимость электрооборудования автомобиля достигает 50% его себестоимости.

Области применения полимерных магнитов [106]: акустические системы, реле и бесконтактные датчики, электромашины, магнитные сепараторы, холодильники; магнитные элементы кодовых замков и охранной сигнализации; тахогенераторы, датчики положения, электроизмерительные приборы; медицина (магнитотерапия, магнитные матрасы); автоматизированное шоссе (в США предусматривается разместить до полутонны ферритовых магнитопластов на одну милю шоссе для автоматического управления движением автомобиля, оснащенного специальным компьютером и системой слежения); магнитное покрытие для полов офисов и промышленных помещений; магнитная компонента для глушителей автомобилей (в Европе на эти цели уходит 23 тыс. т магнитопластов); периферийные устройства компьютеров, мобильные телефоны, фотоаппараты, кинокамеры; магнитные устройства для обработки воды, углеводородного топлива, масел, магнитные фильтры; магниты для учебных заведений (магнитная азбука, символы и знаки на магнитной фиксации, наглядный и демонстрационный материал), магнитные фиксаторы различных типов; магнитные устройства для использования в рекламе, торговле, при оснащении выставок, конференций, спортивных мероприятий и т. д.; магнитная сепарация в гидроприводах термопластавтоматов; магнитная фиксация калибраторов и вспомогательных устройств экструзионных линий, магнитные папки-карманы, магнитные бирки на стеллажах. Магнитомягкие компоненты радиопоглощающих материалов (ферриты, использование в технологии *Stealth*) находят широкое применение в различных электротехнических устройствах (табл. 1.8).

Базовыми для создания различных устройств автономных микроботов являются твердотельные технологии микроэлектроники, технология микроканальных пластин — мультисканальных умножителей электронов (до 70% объема пластины толщиной 400 мкм занято

цилиндрическими каналами диаметром 1–10 мкм, впускные окна в каналах вывода пучка синхротронного излучения). Перспективной является волоконная технология, позволяющая разработать автономные сенсорные микроустройства и сенсорные сети для МЭМС и НЭМС (рис. 1.65).

Таблица 1.8. Использование магнитомягких материалов в технике [31]

| Применение | Эксплуатируемые свойства |
|--|--|
| Силовые трансформаторы Согласующие трансформаторы Широкополосные трансформаторы Трансформаторы питания Электрические машины | Низкие удельные магнитные потери, высокая магнитная индукция Высокая индукция, низкая коэрцитивная сила |
| Электромагнитное реле | Высокая начальная магнитная проницаемость Высокий коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса, низкая динамическая коэрцитивная сила |
| Измерительные трансформаторы тока и напряжения | |
| Насыщающиеся реакторы Задающие трансформаторы Магнитные усилители Магнитные ключи | Низкий коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса, высокая магнитная индукция |
| Импульсные трансформаторы Сигнальные трансформаторы | Высокая запасенная магнитная энергия |
| Накопительные трансформаторы Накопительные реакторы Токоограничивающие реакторы Сглаживающие реакторы Реакторы помехоподавления Магнитомеханические преобразователи (вибраторы) | Высокая магнитострикция, высокий коэффициент магнитомеханической связи Высокая магнитная проницаемость в заданном поле |
| Магнитные экраны | |

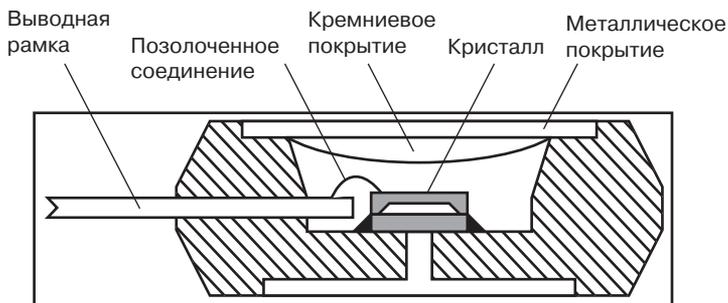
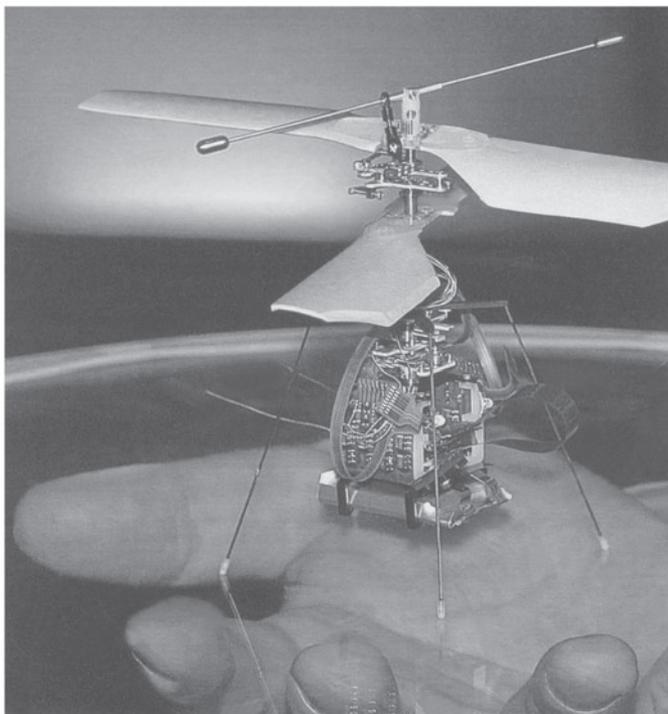


Рис. 1.65. Микродатчики давления, созданные по технологии МЭМС (микроэлектромеханическая система) [106]

Летающий микровертолет (МикроФлаингРобот) имеет высоту 7 см, массу 8,9 г, диаметр лопастей 13 см, 4 микродвигателя (*Seiko Epson*, Япония, 2004 г.). Микровертолет *FR-11* (фирма *Epson*, Япония; диаметр винта 136 мм, масса 12 г) с использованием батарей летает без посадки 3 мин, проводит фотосъемку и передает информацию через систему беспроводной связи *Bluetooth* (рис. 1.66). На выставке в Лос-Анжелосе в конце 1999 г. продемонстрирован самолет величиной с ладонь, способный в течение нескольких часов полета производить съемки на кинокамеру на расстояниях до 12 км (одно из направлений разведывательной техники).

1)



2)

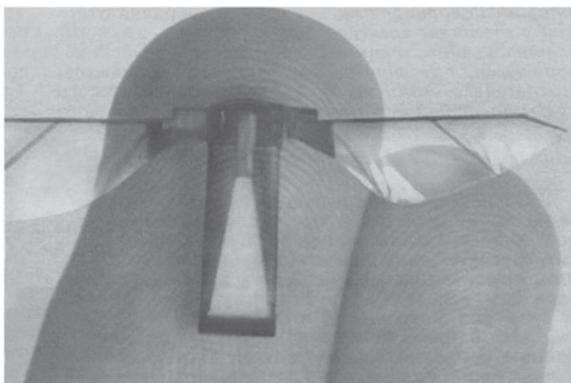


Рис. 1.66. Микровертолет *FR-11* (1) фирмы *Epson* (Япония) и роботонасекомое (2) (Гарвардский университет, США, сентябрь 2007 г.)

Для микроботов ЛА размером 1–2 см разрабатываются 3D-микроэлектромеханические (МЭМС); наноэлектромеханические (НЭМС) и нанооптомеханические (НОМС) системы. В МЭМС используют датчики плоской и объемной структуры, изготавливаемые фотолитографией. Электрический сигнал возникает при смещении измерительных элементов датчика и при резонансных колебаниях, из-за изменения температуры, внешних нагрузок.

Каждый робот состоит из трех модулей (робототехническая триада сенсор–контроллер–актюатор): движения, управления, для восприятия. Для управления используют микроконтроллеры (8-бит и более), для восприятия – акустический радар (сонар), ИК-датчики, видеокамеры, радиомодем (для связи, 4800 бод и более), для движения – микромоторы с элементами питания (например, Ni-металлогидридные аккумуляторы).

Системы с сейсмодатчиками, емкостными, индукционными, СВЧ-, ИК-, ультразвуковыми датчиками используются в охранной сигнализации (индукционные датчики в кабинах-металлоискателях; в радиочастотных метках, откликающихся (размагничивающихся) на узкополосный позывной сигнал охранной системы при выходе с оплаченным товаром, ИК-датчики, инфракрасные светодиоды в стандартных турникетах метро, автоматически открывающихся дверях; комплекс датчиков в оптических и акустических системах теленаблюдения).

Фталоцианины с координационными атомами хрома (желтый и пурпурный цвета в зависимости от структуры металло-координационного соединения), с атомами меди (голубой цвет) используются в качестве проявляющих красителей в пленках «Полароид» (рис. 1.67).

Плотность оптической записи информации на DVD составляет 4,7–17 Гб (гигабайт). Бесконтактное считывание информации с CD и DVD (отличаются размером пит и количеством информационных слоев, изготавливаются сверхточной штамповкой или литьем с последующим напылением золотого, серебряного или алюминиевого зеркального покрытия и защитой слоем оптически прозрачного полиакрилата; питы цифровой информации в виде лунок и бугорков шириной 0,6–0,8 мкм, длиной 0,9–3,3 мкм, глубиной 0,1–0,13 мкм наносятся на спиральную дорожку шириной 0,5 мкм, длиной 7 км действием лазерного излучения, приводящего к изменению структуры легкоплавкого сплава или красителя) производится лазером через слой покрытия из поликарбоната, толщиной около 1 мм. Питы рассеивают падающий на них свет, зеркальные промежутки между питами возвращают свет в фотоприемник и вращающийся диск генерирует последовательность нулей и единиц, составляющих закодированную информацию (рис. 1.5).

Массовое производство CD и DVD проводится с полной автоматизацией многооперационного процесса, начиная с литья под давлением (цикл менее 4 с) тонкостенных дорожек из поликарбоната (в мире в 2006 г. производилось до 120 000 дисков в минуту из поликарбоната Makrolon).

Разработки в направлении модификации поликарбонатов как несущего материала электронных носителей информации с одновременным развитием средств лазерной голографии позволяет прогнозировать резкое увеличение объема записываемой информации и скорости ее записи и считывания до 1,0–1,6 Тб (1 Тб = 10^6 Мб) и 40–120 Мб/с соответственно. Поликарбонаты используются и в качестве диффузной подложки ЖК-дисплеев телевизоров с усиленной яркостью изображения и равномерностью свечения.

Плотность записи информации повышено до 17 Гб при применении лазера с меньшей длиной волны и сильной фокусировкой (уменьшение расстояния между дорожками и длины пит), при изготовлении двусторонних и многослойных DVD, при использовании трехмерной оптической FDM-записи (емкость 1 Тб). В самоуничтожающихся EZZD-дисках поликарбонатный блок-сополимер становится непрозрачным для лазера из-за окисления кислородом воздуха через 48 ч.

В сотовых телефонах со встроенным микропроцессором кодирование и декодирование речи обеспечивает микрокомпьютер. Смартфоны (Sony Ericsson P800, Siemens 5*56) – ручные микрокомпьютеры с достаточно большими сенсорными экранами (ЖК-дисплеями) и большой памятью, в которую можно загружать разнообразные программы.

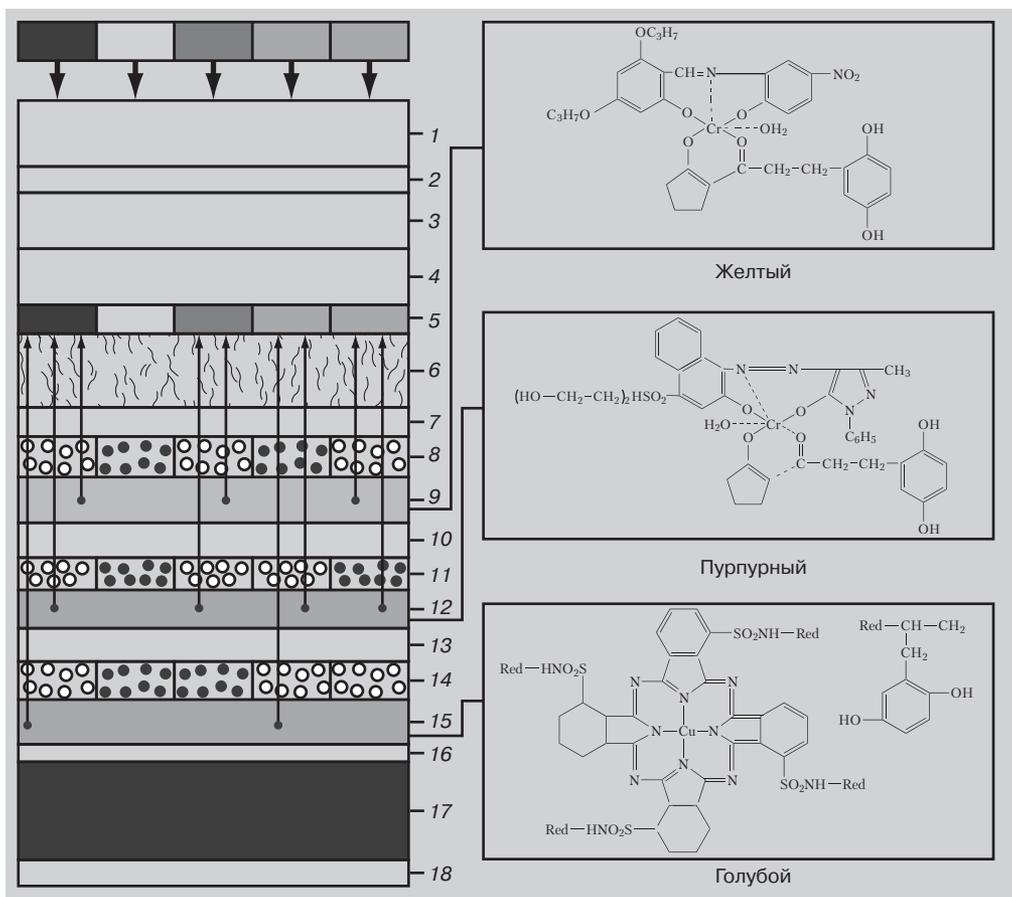


Рис. 1.67. Схема многослойной пленки фирмы Полароид:

1 — прозрачная полиэтилентерефталатная основа; 2, 3 — кислотный подслои; 4 — полимерный промежуточный слой; 5 — приемный слой; 6 — обрабатывающий состав с двуокисью титана; 7 — защитный желатиновый слой; 8 — несенсибилизированный эмульсионный слой; 9 — желтый проявляющий краситель; 10 — полимерный промежуточный слой; 11 — ортохроматический эмульсионный слой; 12 — пурпурный проявляющий краситель; 13 — полимерный промежуточный слой; 14 — изопанхроматический эмульсионный слой; 15 — голубой проявляющий краситель; 16 — подслои; 17 — черная основа; 18 — противоскручивающий слой

Жидкокристаллические полимеры ЖКП широко используются для изготовления деталей микро- и микрооптоэлектроники (элементы для поверхностного монтажа, панели печатных схем вместо эпоксистеклопластиков, штекеры, корпуса светоизлучающих диодов, многоточечные конвекторы, трехразмерные объемные печатные платы). ЖКП типа *Vectra* получают без использования ионных катализаторов, что дает им преимущество, поскольку к материалам, используемым в электронике, предъявляют жесткие требования к содержанию ионов (не более 5 ppm, 5 частей на миллион). Печатные схемы и другие электронные детали из ЖКП отличаются легкостью, простотой сборки, малыми размерами, четкий рельеф участков и элементов, устойчивостью к пайке, возможность металлизации, низкое водопоглощение, низкий КЛТР $15-20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [144, 145].

В оптических компьютерах сверхвысокого быстродействия запись информации производится электрическими сигналами на ЖК-пленках с последующим оптическим считыванием информации лазером.

ЖК-дисплеи применяются в репортажных телевизионных камерах, мониторах компьютеров, плоских телевизорах, видеокамерах, цифровых фотоаппаратах, сотовых телефонах. В плоских ЖК-дисплеях, в том числе гибких, с использованием пленок из ЖКП, оптическими сенсорами, преобразующими изображение в поток электрических импульсов, являются прозрачные тонкопленочные транзисторные *TFT*-ячейки (матрицы в твист-ячейках). В конструкциях дисплеев, преобразователей изображения в цифровой формат, фоточувствительным элементом является ПЗС-матрица (ПЗС-прибор с зарядовой связью, фотосенсор, чувствительный элемент в технологии ССД). Большинство разработок цифровых фотокамер, видеокамер, видеоскаanners используют ЖК-дисплеи.

В «черных ящиках» нового поколения (Дассо Электроник, ОКБ «Авиа автоматика», ОАО «Прибор») используют накопители не на основе ленточных магнитофонов, а на основе твердотельных накопителей, специальных микрочипов (флэш-память), способных воспринимать (объем памяти в 50 раз больше) и надежно хранить информацию. Они выдерживают 3400-кратную перегрузку и температуру до 1100 °С.

Достижения микроэлектроники и микромеханики используют в медицине. Одно из направлений их применения — имплантируемые микрочипы:

- 1) имплантанты — процессоры движения (запрограммированные микрочипы имплантированы в спинной мозг; соединены микротокпроводами с мышцами, заставляя сокращаться их в нужном ритме и последовательности);
- 2) имплантанты — процессоры речи (процессор распознает речь, преобразует ее в электрические импульсы, которые передаются на нервные окончания внутреннего уха);
- 3) имплантанты электронного органа зрения (мини-видеокамера, соединенная микротокпроводами со зрительным нервом; микрочипы, вживляемые в зрительный отдел коры головного мозга);
- 4) микрокардиостимуляторы с миниисточниками электропитания (стабилизация сокращений сердечной мышцы);
- 5) электронная таблетка (выделяет в организм дозы лекарств через определенные промежутки времени);
- 6) имплантируемые, идентифицирующие владельца (идентификация по заранее записанной микрочипы информации, микрочипы *Verichip* компании *Applied Digital Solution*).

Полупроводниковые интегральные датчики давления используют в медицинских тонометрах, датчики силы — при взвешивании на весах.

Использование для изготовления одежды («динамическое» обмундирование) волокон, наполненных магнитными наночастицами, позволяет изменять (путем воздействия электрическим током на волокна) прочность, жесткость, проницаемость волокон и одежды из них.

Японская корпорация *Toshiba* создала электродвигатель диаметром 0,8 мм и весом 4 мг для миниатюрных роботов фирм *Mitsubishi Electric* и *Hitachi*, которые предназначены для диагностики, проведения микроопераций, доставки лекарств (после растворения оболочки капсулы по программе и радиосигналом робот самостоятельно движется по кровеносным сосудам, желудочно-кишечному тракту), для ремонта и смены батарей у искусственных органов.

Для снятия холестериновых бляшек со стенок сосудов предназначен микроробот в виде лодки (фирма *Microtech*, ФРГ, длина 4 мм, диаметр 0,65 мм) с гребным винтом, что станет возможным после разработки микрофрезы и решения проблемы энергоснабжения (микротопливный элемент).

В Калифорнийском университете (Беркли) изготовлен роторный двигатель внутреннего сгорания (диаметр ротора 1 мм, мощность двигателя 26 милливатт).

Блоки и узлы на основе *Cu*-фталоцианина (молекулярная электроника) разрабатываются для биороботов, ремонтирующих источники питания искусственных органов.

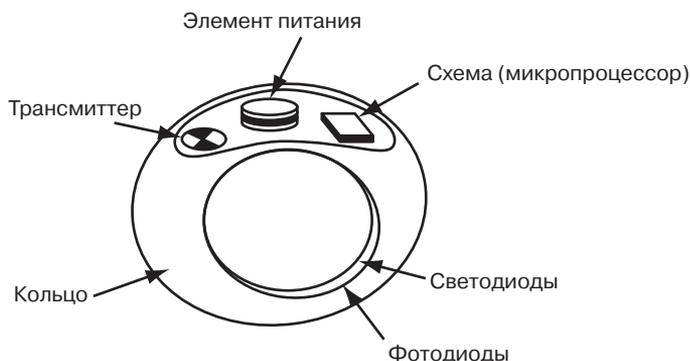


Рис. 1.68. MIT-кольцо для наблюдения за состоянием здоровья [16]

Достижения в области микротехнологий перспективны для наблюдения за состоянием здоровья. Одно из применений — MIT-кольцо (рис. 1.68). Установленный в кольцо светодиод непрерывно излучает свет внутрь пальца наблюдаемого пациента. Оценивая отраженный свет, кольцо может измерять частоту пульса, состояние сердца, кровяное давление. Посредством встроенной антенны сигналы могут передаваться на приемник сигналов [16].

Высокая электромеханическая активность пьезокерамики реализована при разработке пьезодвигателей микро- и наноперемещений.

Силовые пьезодвигатели нано- и микроперемещений имеют диапазон перемещений порядка нескольких десятков микрометров, чувствительность порядка единиц нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н, мощность на выходном валу двигателя порядка 100 Вт и полосу пропускания порядка нескольких десятков герц.

В точных электромеханических системах юстировки формы поверхности главных зеркал больших телескопов и доводочных ступенях совмещения оптикомеханического оборудования нанотехнологии и микроэлектроники, где диапазон линейных перемещений не превышает нескольких десятков микрометров, угловых — нескольких десятков угловых секунд при погрешностях соответственно до десятых и сотых долей нанометра и десятых долей угловой секунды, полосе пропускания порядка нескольких десятков герц и нагрузке, достигающей 1000 Н, наиболее перспективно применение силовых пьезоэлектрических двигателей, так как они полностью отвечают требованиям по диапазону перемещений, точности, быстродействию, нагрузочной способности и конструктивному выполнению.

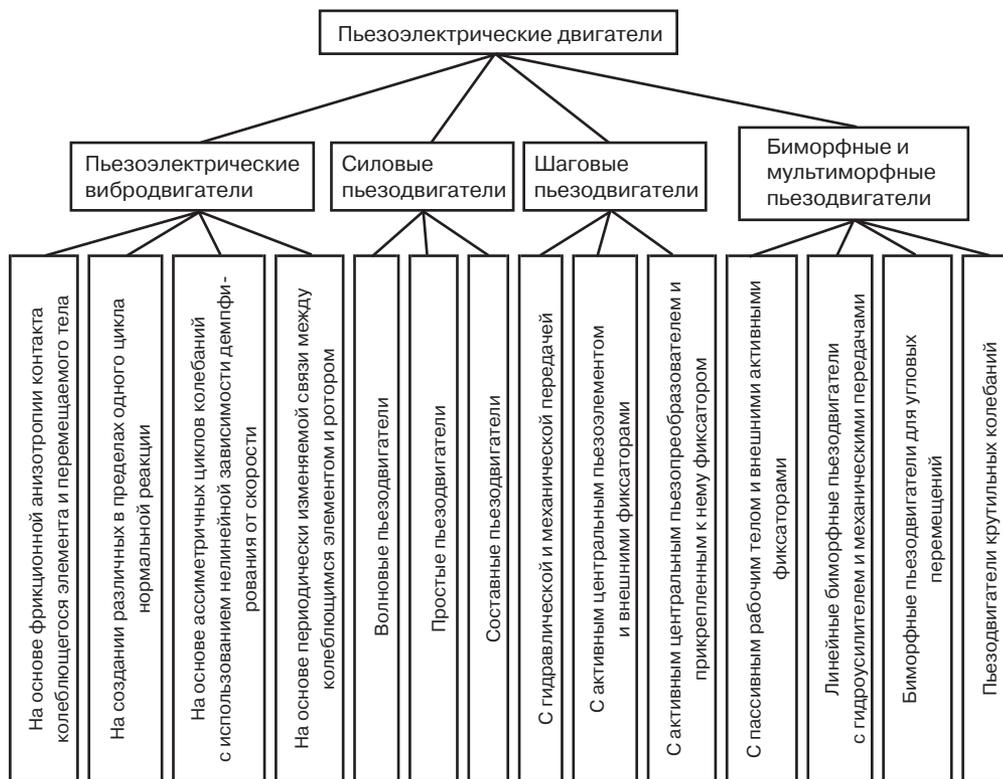
Высокоскоростные высокоточные сегнетоэлектрические движители используются в автомобильной промышленности и системах лазерного наведения.

Высокая электромеханическая активность пьезокерамики реализована при разработке 4-х классов пьезодвигателей (табл. 1.9).

Игольчатая конструкция печатающей головки для принтеров и печатных устройств с пьезоэлектрическим приводом обеспечивает меньшее энергопотребление, быстродействие (периодическое преобразование колебательной энергии возбужденного пьезопривода по частоте его разнеса в энергию вылета иглы), малые габариты.

Пьезокерамические преобразователи широко используются в защитно-звуковых устройствах (акустические излучатели типа «Сирена», искровые разрядники «электрошоки» с использованием пьезокерамических трансформаторов, напряжение разрядки до 60 кВ, разряд длительностью 1 с приводит к нарушению равновесия и контроля над телом), в тактильных индикаторах звука (приемно-преобразующие устройства вибротон с электромагнитным вибратором, пьезоэлектрическим микрофоном для пользователей с потерей слуха). Возможность преобразования пьезоэлектрическими датчиками вибрации в сигнал переменного тока, температуры в сигнал постоянного тока использованы в системе мониторинга для нефтепереработки

Таблица 1.9. Типы пьезодвигателей микро- и наноперемещений [17, 18]



и нефтехимии «Компакс». Датчики на основе пьезопленок используются для измерения быстропеременных и импульсных давлений в трубопроводах. Для лечения заболеваний внутреннего и среднего уха разработан миниатюрный ультразвуковой излучатель с пьезоэлектрическим преобразователем и электродом электрофореза (ускорение транспорта лекарств к патологическому очагу). Ультразвуковой эхотомоскоп осуществляет объемную УЗ-визуализацию изображений анатомических структур. Для деформируемых зеркал адаптивных оптических систем (с повышенной разрешающей способностью систем с уменьшенной апертурой, способностью корректировать оптические характеристики) с управляемой формой поверхности диаметром 150 мм (федеральная космическая программа) в конструкции зеркала используют актюаторы из электрострикционных материалов. Перспективный эмиссионный материал вакуумной микроэлектроники — тонкие нанокластерные углеродные пленки на основе нанотрубок, обеспечивающие стабильную автоэлектронную эмиссию в условиях технического вакуума. Полевые эмиттерные решетки на их основе — элементная база для широкоформатных плоских с высоким разрешением полноцветных телевизионных экранов, плоских панельных дисплеев для мониторов компьютеров, миниатюрных электровакуумных СВЧ-приборов для телекоммуникаций, источников электронов для сканирующей туннельной и силовой микроскопии. Наиболее эффективный способ гашения колебаний, снижения вибрации — использование пьезокерамических материалов. Новое поколение спортивных изделий из ПКМ (лыжи, ракетки из стекло-, органо- и углепластиков) использует конформные пьезоэлементы в виде пьезоэлектрических волокон. Они преобразуют механическую деформацию в электрическое напряжение. Расположенный внутри лыжи микрочип меняет полярность индуцированного напряжения и



Рис. 1.69. Использование пьезоэлектрических материалов для выработки электроэнергии [69]

прикладывает его к волокнам, заставляет их растягиваться или сжиматься, противодействуя угловому моменту и обеспечивая легкость и плавность поворота. За счет углового момента непосредственно перед носком ботинка возникает боковая деформирующая сила. В одной из конструкций компании *Head Sport* напряжение передается пьезоэлектрическими волокнами, сжимая и растягивая их. Механическая энергия преобразуется в электрическое напряжение, которое принимается встроенным в лыжу микрочипом, накапливается, обращается и подается в волокна, заставляя их соответственно растягиваться и сжиматься. Таким образом, каждые 5 с возникает противодействующий момент, удерживающий кант лыжи на снегу и гасящий вибрацию. Профессиональные горнолыжники предпочитают лыжи с пьезоэлементами, поскольку они подходят для разного снега и обеспечивают спокойное скольжение. Пьезоэлектрические волокна, встроенные в рукоятку теннисной ракетки, гасят вибрации, возникающие при ударе по мячу. Компания *Advanced Cerametrics* разрабатывает самоподогревающиеся туристические и лыжные ботинки, источником энергии в которых служат пьезоэлектрические материалы в каблук. Аналогичная конструкция солдатской обуви позволяет бойцам подзаряжать батареи электронных устройств во время ходьбы (рис. 1.69).

Электроактивные полимеры рассматриваются как перспективные материалы для искусственных мышц, мускулов, биороботов [22, 128].

Литература

1. Семенов В.И. Армированные пластики; под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. — М.: МАИ, 1997. — С. 112–124.
2. *International Work Shop on Intelligent Materials, Tsukuba Science City, march 1989.*
3. *Intelligent Materials and Systems, march 1990, Honolulu, Hawaii, USA.*
4. Исии Тосикадзу. *Engineering Materials*, 1991, v. 39, № 6, p. 111–114.
5. *Molecularly Designed Nanostructured Materials*, 1991, v. 39, № 6, p. 111–114.
6. Голубкова Т.А. и др. Технология. Серия «Конструкции из КМ». — М.: ВИМИ, 1995. — С. 3–21.
7. *Chong K.P., Liu S.C., Li J.C., Intelligent structures, Taiwan, National Central University, 1990, p. 16–37.*
8. *Smart materials structures*, 1999, № 6, p. 816–825.
9. Михайлин Ю.А. Интеллектуальные материалы // СИБ «Полимерные материалы». — 2004. — № 8 (63), № 9 (64), № 10 (65), № 12 (67). — 2005, № 1 (68), № 2 (69), № 3 (70).

10. Материалы I Российского научно-технического симпозиума «Интеллектуальные КМ и конструкции в авиакосмической технике» (ИКМК–2004), МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23–25 июня 2004 г.
11. Материалы Международной специализированной выставки микро- и нанотехнологий (MNTEx–2004). – М., 5–7 декабря 2005.
12. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
13. Barashkov N.N., Gundor O.A., *Fluorescent Polymers, England, Ellis Horwood Ltd.*, 1994, 310 p.
14. Михайлин Ю.А. СИБ «Полимерные материалы». – 2001. – № 9 (28). – С. 2–4.
15. Шалобаев Е.В. Сенсорика и 21-й век// Датчики и системы. – 2001. – №1. С. 72–74.
16. Тринклер Х.Р., Каноун О. Современное состояние сенсорной техники.// Датчики и системы. – 2001. – № 11. – С. 53–62.
17. Гориш А.В., Коптев Ю.Н. Проектирование пьезокерамических чувствительных элементов и датчиков. – ОАО «ИПК Машприбор», 1995. – 60 с.
18. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. – М.: Машиностроение, 1979. – 205 с.
19. Коптев Ю.Н. //Успехи современной радиоэлектроники. – 1991. – № 9. – С. 3–96.
20. *Scientific American*, 2004, № 3, с. 28.
21. Суrowяк З. и др. Тонкие сегнетоэлектрические пленки. – Ростов-на-ДонуФ: МП «Книга», 1994. – 210 с.
22. *Electroactive Polymer (EAP)*. Ed. B.Y. Bar-Cohen, SPI Press Monograph, 2001, v. 98, 309 p.
23. *Smart Mater. and Struct.*, 1998, v. 7, № 4, p. 438–445.
24. *Advanside Materials*, 1991, v. 13, № 23, p. 5, 6.
25. Зубцов В.И.// Приборы и системы. – 2005. – № 1. – С. 50.
26. Зубцов В.И.// Приборы и системы. – 2002. – № 1. – С. 37–39; 2002. – № 11. – С. 34–37; 2004. – № 3. – С. 40–42.
27. Шимаковичус Ч.И.// Приборы и системы. – 2004. – № 2. – С. 35.
28. Бернотас К.Э., и др.// Приборы и системы, 1988, № 11, с. 40–42.
29. Пласт. массы. – 2003. – № 10. – С. 46–48.
30. СИБ «Полимерные материалы». – 2004. – №10 (67). – С. 19.
31. Голубков И.А. Полимерные магниты (магнитопласты).// Международные новости мира пластмасс. – 2003. – № 11–12. – С. 31, 32.
32. Коптев Ю.Н., Гориш А.В. Волоконно-оптические датчики.// Радиотехника. – 1995. – № 10. – С. 10–15.
33. Махов А.А., Позняк Т.Г.// Приборы и системы. – 2004. – № 1. – С. 53–57.
34. Мидвинтер Дж.Э., Волоконные световоды для передачи информации. – М.: Радио и связь, 1983. – 211 с.
35. *Kreicher K.R., Modern Plast. Int.*, 1991, v. 21, № 6, p. 54, 55.
36. Баран А.М., Левин В.М. Физики-химические основы синтеза и переработки полимеров. – Горький, 1987. – С. 94–105.
37. *Oh P.S., American Ceramic Society*, 1999, p. 367.
38. Батталов Э.М. и др.// Пласт. массы. – 2005. – № 2. – С. 33–35.
39. Рандошкин В.// Наука и жизнь. – 1991. – № 6. – С. 48–51.
40. Зарубежное военное обозрение. – 1986. – № 1. – С. 54.
41. Финансовые известия. – № 58, 11.08.1998.
42. Проспект фирмы *Ticona* (ФРГ), 2000 г.
43. Электротехническая промышленность, Информэлектро, 1988, вып. 1. – 28 с.
44. *Tagung uber Polymere fur Elektrotechnik/Elektronik (Mikroelektronik)*, Berlin, 1985, 24–26 Sept., 411 s.
45. *Elektronik Design*, 1982, № 9, p. 159–164.

46. *J. Polymer Sci., Polymer Lett.*, 1984, v. 22, № 6, p. 365–370.
47. *Microprocessors and Microsystems*, 1984, v. 8, № 5, p. 249–251.
48. *Dan Hutchess G., Scientific American*, 2004, № 7, p. 46–53.
49. Стикс Г.// В мире науки. 2004, № 6, с. 22, 23.
50. Татаренко Н.И., Петров А.С.// Зарубежная радиоэлектроника, 1998, № 7, с. 10–31.
51. Новые материалы. Под ред. Ю.С. Карабасова. — М.: МИСИС, 2002. — 736 с.
52. Эшли С.// В мире науки. — 2004. — № . — С. 31–37.
53. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С.// Микросистемная техника.— 2004.— № 1.— С. 13–17.
54. *Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Ed. P. Rai, Washington, SPIE Optical Engineering Press*, 1997, 457 p.
55. Скородумов С.В. и др.// СИБ «Полимерные материалы». — 2000.— № 1 (8).— С. 8, 9.
56. Алферов Ж.И. и др. Наноматериалы и нанотехнологии// Микросистемная техника.— 2003.— № 8.— С. 3–13.
57. *Berringer R., Nanocrystalline materials, Mater. Sci. Eng.*, 1989, v. A117, p. 33–43.
58. *Glieter H., Nanostructured Materials*, 1995. v. 6, p. 3–14.
59. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. — М.: Академкнига, 2004. — 300 с.
60. *Dresselhaus M.S., Atakk, physics of carbon nanotubes, Carbon*, 1995, v. 33, № 7, p. 883–891.
61. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок// Успехи химии.— 2001. Т. 70.— С. 934–970.
62. Минаев В.В. и др.// Микросистемная техника.— 2002.— № 1.— С. 41, 42.
63. Принц В.Я. и др. Микросистемная техника.— 2003.— № 3.— С. 29–34.
64. Дьячков П.Н. Углеродные нанотрубки — материалы для компьютеров 21 века// Природа.— 2000.— № 11.— С. 23–30.
65. Макарова Т.Л. и др. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов: Учебное пособие. — СПб.: Наука, 2001. — 70 с.
66. Золотухин И.В. Фуллерит — новая форма углерода. — Воронеж, 1996. — 42 с.
67. Пласт. массы.— 2005.— № 2.— С. 55.
68. Вернер В.Д. и др.// Нано- и микросистемная техника.— 2005.— № 1.— С. 5–9.
69. *Licher C.B.*// В мире науки.— 2004.— № 3.— С. 28.
70. *Dicker W.U. et al., Nature*, 1995, v. 353, № 6341, p. 239.
71. Известия — наука, 8.02.2002, 15.02.2002, 12.07.2002, 30.08.2003.
72. *Tanaka Nobuo, Kagaku Koguo, Chem. Ind.*, 1991, v. 42, №7, p. 64–68.
73. Михайлин Ю.А.// СИБ ПМ.— 2001.— № 9 (28).— С. 2–4.
74. *Friend R. et al., Nature*, 1993, v. 365, p. 628.
75. *Meerholz K. et al., Nature*, 1994, v. 371, p. 475.
76. *Nature*, 1994, v. 367, p. 49.
77. *Diederich F. et al., Chem. Soc. Rev.*, 1994, v. 23, p. 243.
78. *Lehn J.M. et al., Physical Review Letters*, 1993, v. 70, p. 218.
79. *Bissel R.A. et al., Nature*, 1994, v. 369, p. 133.
80. Волохина А.В. и др. Жидкокристаллические полимеры. — М.: Химия, 1988. — 416 с.
81. Гребенкин М.Ф., Иващенко А.В. Жидкокристаллические материалы. — М.: Химия, 1989. — 240 с.
82. *Coller A.A., Mater. Sci and Technology*, 1989, v. 5, № 4, p. 309–322.
83. *Saechting Kunststoff – Taschenbuch, 27 Ausgabe, Munchen-Wien*, 1999, s. 517–520.
84. *Angeloni A.S. et al., Macromolecular Chemie*, 1985, v. 186, № 5, p. 977–997.
85. *Jackson C.L. et al., Int. Materials Reviews*, 1991, v. 36, № 5, p. 165–186.
86. *Le Barny P. et al., Photo-Opt. Instrum Eng.*, 1986, № 682, p. 56–64.
87. *Luhmann V. et al., Makromol. Chem.*, 1985, v. 186, № 5, p. 1059–1073.
88. *Hall H.K. et al., Macromolecules*, 1987, v. 20, № 8, p. 2041–2044.
89. *Shaffer T.D., ACS Polym. Prepr.*, 1985, v. 26, № 2, p. 289, 290.

90. Gordon B. et al., *ACS Polym. Prepr.*, 1986, v. 27, № 1, p. 311, 312.
91. Brown A.S., *Aerospace American*, 1991, v. 29, № 1, p. 28–35.
92. Boropag E., *Popular mechanics*, 2004, № 12, с. 44–50.
93. Worthy W., *Chem. And Eng. News*, 1988, v. 66, № 8, p. 19–21.
94. Вернер В.Д. и др.// Нано- и микросистемная техника.— 2005.— № 1.— С. 5–9.
95. *Nature*, 1994, v. 371, p. 106.
96. Miller A. et al., *J. Amer. Chem. Soc.*, 1993, v. 115, № 1, p. 356.
97. Chang W.L., *J. Polym. Sci.*, 1989, v. 27A, № 11, p. 3639–3649.
98. *Mechanical Engineering*, 1991, v. 113, № 8, p. 60–63.
99. Вебстер Г.// В мире науки, 2004.— № 5.— С. 68–73.
100. Stupp S.I. et al., *Science*, 1993, v. 259, № 5091, p. 59.
101. Gibbs W., *Scientific American*, 2005, № 2, p. 78–81.
102. Новиков В.А. и др. Микросистемная техника.— 2004.— № 1.— С. 35–44.
103. Валиев К.А., Орликовский А.Л.// Электроника.— 2000.— № 3.— С. 43–49.
104. Kelly T.R. et al., *J. Amer. Chem. Soc.*, 1994, v. 116, p. 356.
105. Miller G.D., *American Scientist*, 2004, № 2, p. 60–62.
106. Алехин В.// Зарубежное военное обозрение.— 2004.— № 2.— С. 49–52.
107. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований; под ред. М.К. Роко и др. — М.: Мир. 2004 — С. 202–292.
108. Сафронов А.В., Виноградов В.М.// Приборы.— 2004.— № 3 (45).— С. 30–34.
109. Сафронов Ф.В.: дисс... кандид. техн. наук. Разработка и исследование термочувствительных ВПКМ. — М., МАТИ, 2005. — 188 с.
110. Алферов Ж.И. и др., Конструкции из КМ.— 2004.— вып. 4.— С. 14–18.
111. Клебанова Н.// Что нового в науке.— 2005.— № 5.— С. 44–48.
112. Минкель Дж.// В мире науки.— 2005.— № 3.— С. 10.
113. Мамонтов Д.// Популярная механика.— 2005.— № 6.— С. 42–46.
114. Известия, 23–24.05.2005.
115. Морвитцер Д., Ганц М.// ИБ «Полимерные материалы».— 2006.— № 4.— С. 24–28.
116. *Konzilia G., Kunststoffe*, 2004, v. 94, № 6, s. 27–29.
117. *Ojeda D., Risse A., Kunststoffe*, 2004, v. 95, № 7, s. 24–29.
118. *Solin S.A.*// В мире науки.— 2004.— № 11.— С. 44–51.
119. *Kirchmeyer S., Brassat L., Kunststoffe*, 2005, № 10, s. 202–208.
120. *Shirakawa M., Angewandte Chemie*, 2001, v. 40, № 14, s. 2574–2580.
121. *Heeger A. J., Angewandte Chemie*, 2001, v. 40, № 14, s. 2591–2611.
122. *Mac Diarmid A. G., Angewandte Chemie*, 2001, v. 40, № 14, s. 2581–2590.
123. *Crawford G.P., Flexible Flat Panel Displays, Willy*, 2005, 200 p.
124. *Hild O.R., Kunststoffe*, 2006, № 6, s. 40–43.
125. *Rost H., Kunststoffe*, 2005, № 10, s. 209–214.
126. *Seidel Ch. Kunststoffe*, 2005, № 10, s. 197–201.
127. ИБ «Полимерные материалы».— 2003.— № 103 (46).— С. 22.
128. *Jingnickel B.J., Von Seggern H., Kunststoffe*, 2004, № 11, s. 99–102.
129. ИБ «Полимерные материалы».— 2005.— № 6 (74).— С. 24.
130. Колтовой Ф. // Что нового в науке.— 2005.— № 3.— С. 118–121.
131. Что нового в науке.— 2005.— № 6.— С. 100.
132. Молчанов М.// В мире науки.— 2005.— № 7.— С. 12.
133. *Fischl T. Kunststoffe*.— 2006.— № 10.— С. 30–34.
134. Зезин А.Б. Энциклопедия полимеров. — М.: Сов. Энциклопедия. 1977 — Т. 3. — С. 89–101.
135. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, N.Y.–L. 1969, v.10, p. 765–781.
136. *Polyelectrolytes. Ed. A. Rembaum, Boston*, 1975, v.2. 300 p.
137. Козлов Н.А.// Известия вузов. Электроника — 2003 — № 3 — С. 82–88.

138. *Steffen G., Kunststoffe*, 2006, № 10, s. 24–26.
139. *Rechtenwald T. и др., Kunststoffe*, 2006, № 11, s. 62–68.
140. Энциклопедия полимеров. — М.: Сов. Энциклопедия, 1972. — Т. 1. — С. 740–754.
141. Электрические свойства полимеров; под ред. Б.И. Сажина. — Л.: Химия, 1970, 2-е изд. 1997. — 290 с.
142. Электротехническая промышленность, Информэлектро, 1988, Вып. 1 — С. 28.
143. *J. Appl. Polymer Science*, 1989, v. 38, № 4, p. 1173–1178.
144. Михайлин Ю.А. Жидкокристаллические полимеры, ИБ «Полимерные материалы» — 2006 — № 2 — С. 24–30; № 3 — С. 24–29, № 5 — С. 36–39; № 7 — С. 20–22; № 12. — С. 40–44.
145. Михайлин Ю.А., Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006. — С. 183–239.
146. Михайлин Ю.А.// ИБ «Полимерные материалы». — 2005 — № 3 — С. 24–29.
147. Буряк В.П.// Полимерные материалы — 2007 — № 5 — С. 16–24.
148. Гончаренко В.А.// Полимерные материалы — 2007 — № 3 — С. 27–40.
149. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из КМ / Г.А. Молодцов и др. — Машиностроение, 2000, 352 с.
150. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. — М.: Техносфера, 2006. — 223 с.
151. *Rogalla A. at al., Kunststoffe*, 2007, № 7, S. 72–76.
152. Тим И.// Полимерные материалы — 2008 — № 2 — С. 4–7.
153. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. — М.: Техносфера, 2006. — 336 с.
154. Харрис П. Углеродные нанотрубы и родственные структуры. — М.: Техносфера, 2003. — 336 с.
155. *Muelhaupt R., Kunststoffe*, 2004, № 8, S. 76–88.
156. *Das Bayer-Forschungsmagazin, Ausgabe 18, S. 14–16* («Полимерные материалы» — 2008 — № 6 — С. 16, 18).
157. *JEC Composites Magazine*, 2007, № 36, p. 28.
158. *Brandstetter F., Kunststoffe*, 2006, № 6, S. 32–35.
159. Марголин В.И., Тушин В.А. Основы нанотехнологии, электронная литография и ионная имплантация: учеб. пособие. — СП(б)ГЭТУ, ЛЭТИ, 2000. — С. 56.
160. *Kohlhepp K.G., Kunststoffe*, 2005, № 12, S. 80–82.
161. *Schmid M., Kunststoffe*, 2007, № 8, S. 154–156.
162. *Brandt J. at al., Kunststoffe*, 2004, № 10, S. 292–294.
163. *Kaskel S., Kunststoffe*, 2006, № 6, S. 39–39.
164. *Mater P., Veder K. // Полимерные материалы* — 2008 — № 11.
165. ИБ «Полимерные материалы» — 2008 — № 11.

2. Радиозэкранирующие и радиопоглощающие полимерные материалы

Полимерные материалы, в частности, полимерные композиционные материалы, в том числе ПКМ с непрерывными волокнами, ВПКМ, используют при создании материалов с регулируемыми электрофизическими свойствами, что дает возможность использовать их в качестве полимерных магнитодиэлектрических и электропроводящих материалов в радиозэкранирующих и радиопоглощающих электромагнитную энергию (ЭМЭ) радиодиапазона покрытиях и конструкциях.

Принцип работы экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию материалов заключается в том, что при прохождении этой энергии через материал она преобразуется. При этом имеют место явления отражения, рассеивания, поглощения, интерференции, дифракции электромагнитных волн [1, 2].

При взаимодействии электромагнитного излучения (ЭМИ) с поглощающей и экранирующей ЭМЭ поверхностью оно частично отражается, рассеивается. Для поглощения ЭМЭ используют материалы (полимерные, керамические), покрытия и конструкции с токопроводящими (металлы, углеродные материалы, токопроводящие полимеры) и магнитными (магнитомягкие ферриты, стеклообразные металлы и др.) компонентами.

В таких материалах под действием изменяющегося магнитного поля поглощенная часть ЭМИ приводит к возникновению (в соответствии с природой электромагнитной индукции) вихревого электрического поля, вихревых токов, уменьшающих энергию ЭМИ.

В электропроводящих материалах возникают токи Фуко, которые по закону Джоуля–Ленца нагревают материал. Мощность потерь ЭМИ на вихревые токи сильно (квадратично) зависит от индукции магнитного поля внутри ферромагнитных материалов. Их высокая магнитная проницаемость обуславливает высокое значение магнитной индукции, высокую тепловую мощность, что требует использования в магнитодиэлектриках термоустойчивых диэлектрических компонентов на основе полиариленов (полифениленсульфиды, ПЭЭК, табл. 2.77, 2.78) и керамических материалов. Поглощение ферритами ЭМИ СВЧ-диапазона основано на эффекте Фарадея и ферромагнитного резонанса. Магнитодиэлектрические материалы поглощают ЭМЭ за счет наведения слабых токов, за счет магнитогистерезисных, диэлектрических, определяемых значениями $\operatorname{tg} \delta_e$, и магнитных, определяемых значениями $\operatorname{tg} \delta_m$, потерь. При определенных условиях ЭМЭ поглощается за счет интерференции.

Дифракция волн — отклонение волн, возникающее при их распространении в средах с резкими неоднородностями (например, с препятствиями). Дифракция свойственна всякому волновому движению и имеет место, если размеры неоднородностей порядка длины волны или больше. Дифракция света наблюдается при распространении света вблизи краев непрозрачных тел, сквозь узкие отверстия, щели. Дифракционная картина (чередование максимумов и минимумов) является результатом интерференции (со вторичным излучением).

При разработке поглощающих и экранирующих ЭМИ материалов, покрытий и конструкций используется комплексный подход, обеспечивающий требуемую эксплуатационную эффективность и предполагающий проведение анализа физических явлений в материалах при действии на них электромагнитных полей и установление влияния состава и структуры материалов на показатели их диэлектрических и магнитных свойств. Составы и структура

материалов с регулируемыми диэлектрическими и магнитодиэлектрическими свойствами предназначаются для различных областей техники.

Эффективность экранирования ЭМЭ в волноводах, коаксиальных линиях, безэховых камерах определяется потерями, обусловленными поглощением и отражением ЭМЭ, и характеризуется, прежде всего, коэффициентом отражения R .

Если число электронов, участвующих в движении при взаимодействии электромагнитного поля с материалом, будет настолько велико, что индуцированные при их движении поля по своей интенсивности (напряженности) приблизятся к возбуждающим, то результирующее поле становится равным нулю и ЭМЭ не сможет проникнуть в материал. Это особенно характерно для металлов. Что же касается полимерных материалов, то этот «поверхностный эффект» (отражающая способность) будет зависеть от их электрофизических свойств, температуры, частоты электромагнитной энергии и т. д.

Поглощающий электромагнитную энергию материал будет соответствовать своему назначению только тогда, когда отражение электромагнитных волн будет почти отсутствовать, а падающая энергия поглощаться, трансформируясь в другие виды энергии, чаще всего в тепловую. При разработке поглощающих ЭМЭ материалов используют физические принципы, обеспечивающие максимальное поглощение и минимальное отражение ЭМЭ от защищаемого объекта. Использование поглощающих ЭМЭ материалов, покрытий и конструкций, в том числе, ЭМЭ радиодиапазона высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот, позволяет решить проблему уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ, технология *Stealth*) различных конструкций, прежде всего, летательных аппаратов. В то же время постоянно совершенствуются средства обнаружения (РЛС бистатические, загоризонтные, с фазированными антенными решетками). Проблема УРЗ стимулировала разработку интеллектуальных ВПКМ, обеспечивающих адекватное реагирование не только на изменяющиеся внешние механические воздействия, но и на электромагнитное воздействие радиодиапазона. УРЗ самолетов *СУ-27М*, *СУ-35*, *В-2 Spirit*, *F/A-22 Raptor* достигнуто использованием ИВПКМ с радиопоглощающими конформными компонентами в оболочках плоскостей и фюзеляжа.

2.1. Теоретические представления о принципах создания магнитодиэлектрических и токопроводящих (экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию) полимерных материалов

При разработке различных систем и способов экранирования электромагнитных излучений и уменьшения радиолокационной заметности используются современные теоретические представления о взаимодействии электромагнитных излучений, в том числе, ВЧ и СВЧ частот, с веществом.

2.1.1. Характеристики электромагнитного поля

Электромагнитное поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Характеризуется напряженностями (или индукциями) электрического и магнитного полей.

Колебания электромагнитного поля (электромагнитные волны; табл. 2.1) распространяются в пространстве со скоростью, зависящей от свойств среды; в вакууме скорость распространения электромагнитных волн около 300 000 км/с [1, 3].

В однородных изотропных средах направления напряжения электрического (E) и магнитного (H) полей электромагнитных волн перпендикулярны друг другу и направлению распространения волн, то есть электромагнитная волна является поперечной. В каждой точке

Таблица 2.1. Диапазоны длин волн, частот и энергии электромагнитных излучений (ЭМИ)

| Тип ЭМИ | Длина волны, λ^2 | Частота, f , Гц ² | Энергия, эВ |
|---|--|--|---|
| Низкочастотные излучения | | $10^{-3}(10^{-2})-10^3$ $10^1-10^{4,5}$ — звуковые частоты | |
| Радиоволны ¹ | | 10^3-10^{12} 10^9-10^{10} — микроволновый диапазон $10^{11}-10^{12}$ — терагерцовый диапазон | $250 \cdot 10^{-9}$ (для 1 мм–1 м) |
| Инфракрасный диапазон (ИК) | $5 \cdot 10^{-2}-8 \cdot 10^{-5}$ см | $10^{12}-4 \cdot 10^{14}$ | 0,124 (для 10 мкм) |
| Видимый свет (оптический диапазон) | $8 \cdot 10^{-5}-4 \cdot 10^{-5}$ см 760–400 нм | $(4-7,5) \cdot 10^{14}$ | 2,48 (для 500 нм) |
| Ультрафиолетовый диапазон (УФ) «Ближний» УФ «Дальний» УФ ³ | $4 \cdot 10^{-5}-10^{-7}$ см 400–300 нм 300–185 нм | $8 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{17}$ | 4,96 (для 250 нм) |
| Вакуумный УФ Область Шумана Область Лаймана Область Милликена | 185–120 нм 120–50 нм 50–10 нм | | |
| Рентгеновские ЭМИ | $2 \cdot 10^{-7}-6 \cdot 10^{-10}$ см 10–0,01 нм | $10^{15}-5 \cdot 10^{19}$ | 0,1–300 кэВ |
| Мягкое Классическое Жесткое | | | 0,1–5 кэВ 5–50 кэВ 50–300 кэВ (0,5 нм–2480 эВ) |
| γ -излучение | $2 \cdot 10^{-8}-5 \cdot 10^{-12}$ см Менее 0,01 нм | $3 \cdot 10^{18}-3 \cdot 10^{21}$, до 10^{24} (космические лучи) | 2,5 МэВ (для 0,005 нм) |

¹ Радиоволны — электромагнитные волны с частотой менее 3000 ГГц (с длиной волны λ больше 100 мкм). Радиоволны с различной λ отличаются особенностью при распространении, по методам генерации, усиления и излучения. Их делят на сверхдлинные (10–30 км), длинные (10–1 км), средние (1000–100 м), короткие (100–10 м) и УКВ ($\lambda < 10$ м). Последние подразделяются на метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые и субмиллиметровые волны [4].

² Электромагнитные волны характеризуют частотой колебаний (f — число колебаний в секунду, $f = 1/T$, где T — период колебаний, с; длиной $\lambda = c/f$, где λ — длина волны, м; f — частота, с⁻¹, Гц (Герц — единица частоты в системе единиц СИ и СГС. 1 Гц — частота периодического процесса, при которой за 1 с происходит один цикл процесса); c — скорость распространения волн в среде. Сверхвысокие частоты (СВЧ) — частоты электромагнитных колебаний в диапазоне от $3 \cdot 10^7$ до $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

³ Поглощается кислородом O_2 и озоном O_3 земной атмосферы.

пространства колебания E и H происходят в одной фазе. С увеличением расстояния R от источника E и H убывают как $1/R$. Такое медленное убывание полей позволяет осуществить посредством электромагнитных волн связь на больших расстояниях (радиосвязь).

Все электромагнитные явления можно описать с помощью уравнений Максвелла, которые устанавливают связь величин, характеризующих электрические и магнитные поля, с распределением в пространстве зарядов и токов. Содержание четырех уравнений Максвелла для электромагнитного поля качественно сводится к следующему:

- 1) магнитное поле порождается движущимися зарядами и переменным электрическим полем (током смещения);
- 2) электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое поле) порождается переменным магнитным полем;
- 3) силовые линии магнитного поля всегда замкнуты (это означает, что оно не имеет источников — магнитных зарядов, подобных электрическим);
- 4) электрическое поле с незамкнутыми силовыми линиями (потенциальное поле) порождается электрическими зарядами — источниками этого поля.

Из теории Максвелла вытекает конечность скорости распространения электромагнитного взаимодействия и существование электромагнитных волн [1, 3].

Взаимодействие электромагнитного излучения различных диапазонов длин волн и энергий с материалами имеют свою специфику и учитывается при разработке материалов, экранирующих и поглощающих излучения различных диапазонов (например, радиационно-стойкие и экранирующие материалы при ионизирующем волновом (рентген, γ -излучение) и корпускулярном (нейтроны) воздействии.

Определяющими при разработке систем и способов, обеспечивающих поглощение электромагнитной энергии (ЭМЭ) радиодиапазона (радиопоглощающих диэлектрических и магнетодиэлектрических), являются геометрические, диэлектрические, магнетодиэлектрические, радиотехнические параметры материалов, покрытий и конструкций, обеспечивающих оптимальный уровень отражения и поглощения ЭМЭ радиодиапазона с длиной волн $3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^{-3}$ м, с частотой до 10^{12} Гц (100 ГГц).

В общем случае при прохождении электромагнитных волн через среду возможны процессы отражения, преломления, дифракции и интерференции, дисперсии, поглощения и другие.

Принципы создания экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию материалов (диэлектрических и магнетодиэлектрических) установлены при анализе механизмов взаимодействия материалов с электрической (электрическое поле) и магнитной (магнитное поле) компонентами электромагнитного поля радиодиапазона.

Анализ поведения материалов в электрическом и магнитном полях позволяет определить электрофизические параметры, обеспечивающие для радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалов минимальное отражение и максимальное поглощение электромагнитной энергии радиодиапазона, оптимальное значение коэффициента отражения R для экранирующих ЭМЭ материалов.

2.1.2. Поведение материалов в электрическом поле

Электрическое поле — частная форма электромагнитного поля, создается электрическими зарядами или переменным магнитным полем и характеризуется напряженностью электрического поля [3].

Среди четырех классов материалов (металлы, керамика, углеродные материалы, полимеры) поведение полимеров (диэлектриков) в электрическом поле достаточно специфично.

В диэлектриках процессы смещения электрических зарядов внутри атомов и молекул и потери энергии, связанные с этими процессами, доминируют над процессами проводимости.

В первом приближении можно считать, что в диэлектриках нет свободных зарядов, которые могут быть сдвинуты электрическим полем на большие расстояния. При воздействии электрического поля электрические заряды смещаются в пределах молекулы, атома или элементарной ячейки. В отсутствие электрического поля электрический момент любого объекта, выделенного внутри диэлектрика и достаточно большого по сравнению с размером молекулы или элементарной ячейки, равен нулю. При наличии поля, когда заряды разных знаков смещаются в противоположных направлениях, электрический момент объема отличен от нуля. В этом случае говорят, что диэлектрик поляризован.

Поляризуемость — способность атомов, ионов и молекул в электрическом поле приобретать дипольный момент.

При приложении электрического напряжения к материалу в нем возникает электрический ток. Если напряжение постоянно, сила электрического тока определяется законом Ома:

$$I = E/R,$$

где I — сила тока, А; E — напряжение, В; R — сопротивление, Ом.

Однако в действительности напряжение не бывает абсолютно постоянным; очень часто оно изменяется циклически (переменное напряжение) с частотой от 0,1 до 10^{11} Гц. Сопротивление зависит как от размеров образца, так и от ряда других факторов, например окружающих условий, нагрева за счет электрического тока и характеристик материала.

Материалы классифицируют по величине удельного электрического сопротивления:

| Удельное электрическое сопротивление, ρ_v , Ом·см | Класс |
|--|---------------|
| 0– 10^3 | Проводник |
| 10^3 – 10^8 | Полупроводник |
| 10^8 – 10^{18} и выше | Диэлектрик |

Такая классификация произвольна, и эти классы частично перекрываются. Например, большинство полимеров можно отнести к диэлектрическим материалам, однако в сильно нагретом состоянии или в условиях высокой влажности они могут стать проводниками.

При рассмотрении переменного напряжения вводится понятие о емкостном сопротивлении:

$$C = Q/V,$$

где C — емкостное сопротивление, Ф; Q — величина заряда, К (А·с); V — напряжение, В.

Электрические свойства диэлектриков могут быть охарактеризованы при помощи комбинаций сопротивлений разного вида (рис. 2.1). Наиболее реалистичная, но и наиболее сложная комбинация (рис. 2.1, а) может быть упрощена до эквивалентных схем (рис. 2.1, б и в). При приложении напряжения к последовательно соединенным элементам в цепи возникает электрический ток. Когда заряд и напряжение увеличиваются, электрический ток уменьшается. Диэлектрик тем «лучше», чем меньше величина последовательно соединенного сопротивления. При параллельном соединении, наоборот, чем большее сопротивление присоединено параллельно, тем меньше «ток утечки». Хотя для определения электрических характеристик изолирующих материалов измерения проводят, как правило, при последовательном соединении элементов, для схематического изображения диэлектриков чаще всего применяют цепь с параллельным соединением.

При приложении переменного напряжения к «совершенному» диэлектрику возникает электрический ток, который по фазе отстает от напряжения на 90° . Поскольку обычные изолирующие материалы не являются совершенными диэлектриками, величина этого отставания обычно несколько меньше 90° (рис. 2.2, а).

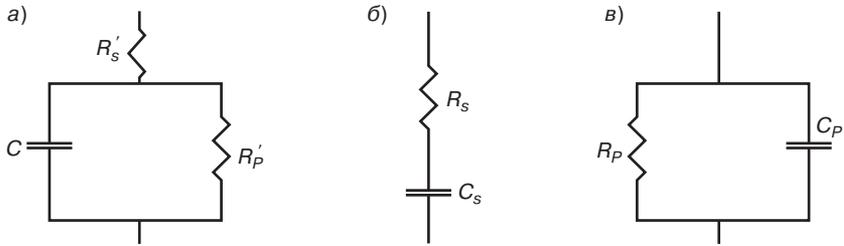


Рис. 2.1. Изображение диэлектриков при помощи комбинаций сопротивлений разного вида [5]: а — изображение диэлектриков; б — эквивалентная последовательная схема; в — эквивалентная параллельная схема; R'_s , R_s — последовательное сопротивление; R'_p , R_p — параллельное сопротивление; C_s — емкостное сопротивление при последовательном соединении; C_p — емкостное сопротивление при параллельном соединении

Как видно из диаграммы, чем меньше угол c_p , тем лучше качество диэлектрика, которое может быть выражено отношением компонент электрического тока, зависящих от сопротивления и от емкости. Эта величина называется тангенсом угла диэлектрических потерь [5]:

$$\operatorname{tg} \delta_\epsilon = I_{R_p} / I_{C_p}$$

Анализ поляризуемости диэлектриков в электрическом поле несколько с других позиций приводит к аналогичным результатам.

Если внести диэлектрик в поле точечного заряда, то поле «сожмется»; напряжение на расстоянии r от точечного заряда в ϵ раз меньше чем в вакууме:

$$F = \frac{q}{\epsilon \cdot r^2},$$

где q — величина заряда; ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Появится угол сдвига фаз δ между током и напряжением, что приводит к активным потерям энергии в диэлектриках. Для реальных диэлектриков потери, выраженные через $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$, связаны с электропроводностью γ :

$$\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \gamma / \omega,$$

где $\omega = 2\pi f$, ω — угловая (круговая) частота, Гц; f — частота электромагнитной энергии, Гц.

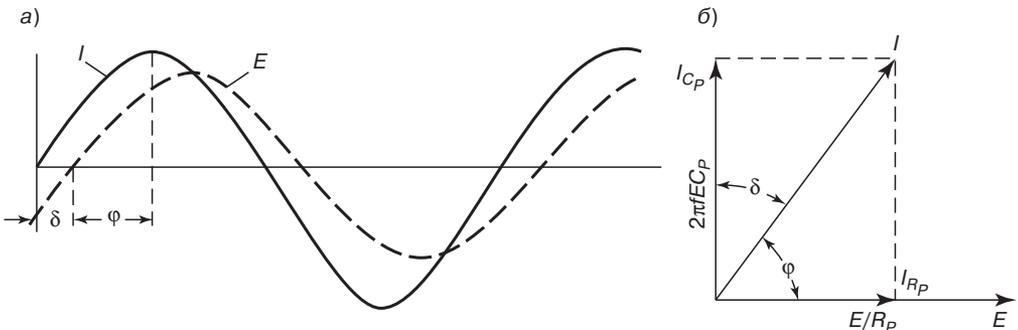


Рис. 2.2. Диаграмма напряжения и тока при переменном напряжении (а); векторная диаграмма параллельной схемы (б) [5]:

I_{C_p} — емкостная компонента электрического тока; I_{R_p} — компонента электрического тока, зависящая от сопротивления

Диэлектрические потери могут быть выражены как потери мощности в Вт (рис. 2.2, б):

$$P = 2\pi f C_p \operatorname{tg} \delta_\epsilon \epsilon E^2,$$

где f — частота; C_p — емкостное сопротивление диэлектрика.

Образцы одинакового размера из различных материалов характеризуются различными емкостными сопротивлениями, что определяет диэлектрическую проницаемость $\epsilon' = C_p / C_v$, где C_v — емкостное сопротивление вакуума.

Чаще всего диэлектрические потери характеризуются значениями $\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \epsilon' / \epsilon''$, где ϵ'' пропорциональна обратной величине сопротивления при параллельном соединении (проводимости γ , см. выше, на переменном токе), которая зависит от размеров диэлектрика.

Обобщенная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ является комплексной величиной, где вещественная часть ϵ' обусловлена деформационной и ориентационной поляризацией, а мнимая ϵ'' характеризует кинетику процесса установления ориентационной дипольной поляризации. С макроскопической точки зрения ϵ'' — мера диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери — часть переменного электрического поля, необратимо преобразующаяся в диэлектрике в тепло.

Для неполярных полимеров ϵ' в основном определяется деформационной электронной поляризацией и ее значение (2,0–2,6) не зависит от частоты в пределах от 0 до 10^{11} Гц, уменьшаясь с повышением температуры. ϵ'' по величине близко к $5 \cdot 10^{-4}$, но в определенном для каждого полимера температурно-частотном диапазоне может проходить через максимум.

ϵ' и ϵ'' полярных полимеров имеют в основном дипольную природу; ϵ' может достигать значения 10 и выше, ϵ'' — превышать 1.

Для всех полимерных диэлектриков температурно-частотные зависимости ϵ' и ϵ'' обусловлены дипольной природой полимера или его примесей и релаксационным характером установления поляризации [2, 5–10].

Диэлектрические свойства полимеров — совокупность параметров, определяющих поведение полимеров в электрическом поле. Такими параметрами являются электрическая прочность, удельное электрическое сопротивление (объемное и поверхностное), диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. Эти величины зависят от температуры, частоты и амплитуды напряженности электрического поля, то есть величин, характеризующих внешнюю среду и условия эксплуатации, а в ряде случаев — от конструкции электродов и геометрических размеров образца. Все это определяет выбор полимера. Поскольку диэлектрические свойства полимеров связаны с их строением, изучение диэлектрических свойств является методом исследования молекулярной структуры и теплового движения в полимерах [5, 6, 10].

Электрическая прочность ($E_{пр}$)

Электрическая прочность — минимальная напряженность внешнего электрического поля ($E_{пр}$), при которой происходит пробой диэлектрика, т. е. диэлектрик разрушается, теряет свои диэлектрические свойства и становится проводником. Различают две основные формы пробоя: тепловую и внутреннюю (внутренний пробой называют также истинным, или электрическим). Тепловой пробой происходит при разогреве полимерного образца проходящим током или из-за диэлектрических потерь, если тепловыделение внутри образца превышает теплоотдачу в окружающую среду. Повышение температуры увеличивает электрическую проводимость и дальнейший разогрев вплоть до разрушения полимера. Значение $E_{пр}$ при тепловой форме пробоя зависит не только от свойств полимера, но и от условий теплообмена между полимерным образцом и окружающей средой, т. е. от разности их температур, теплопроводности и удельной теплоемкости, от размеров и формы образца, от длительности подачи напряжения. Внутренний пробой происходит в результате лавинной ионизации, вызванной электрическим полем внутри диэлектрика, когда по условиям опыта тепловой пробой исключен. Значение $E_{пр}$ при внутреннем пробое связано со строением диэлектрика, слабо зависит от температуры и не зависит от окружающей среды. При внутреннем пробое $E_{пр}$ выше, чем при тепловом.

Удельное объемное электрическое сопротивление (ρ_v)

Удельное объемное электрическое сопротивление — сопротивление между электродами, приложенными к противоположным граням единичного куба данного вещества; выражается в системе СИ в Ом·м (или в кратных и дольных от этой единицы). Значение ρ_v определяется наличием в полимере заряженных частиц и их подвижностью. При внесении полимера в постоянное поле ρ_v увеличивается по времени вследствие поляризационных процессов. После установления стационарной поляризации образец характеризуется остаточным (то есть не зависящим от времени) значением ρ_v , которое определяется количеством свободных заряженных частиц в единице объема, строением полимера и температурой. Грубую оценку остаточного ρ_v часто производят по значению силы тока, измеренной спустя 10 мин после подачи напряжения на образец.

В подавляющем большинстве случаев носителями тока в полимерах являются ионы. Поэтому ρ_v существенно снижается при наличии примесей, особенно полярных (например, воды), и в условиях, облегчающих ионизацию молекул. Значение ρ_v полимеров экспоненциально падает с температурой.

Полимеры, содержащие большое число сопряженных связей, проявляют полупроводниковые свойства и имеют ρ_v $10-10^7$ Ом·м (10^3-10^9 Ом·см); для них характерна электрическая проводимость электронного или дырочного типа (полимеры с собственной, «внутренней» проводимостью *ICP*, см. разделы 1.3.1.1, 1.3.1.3).

Удельное поверхностное электрическое сопротивление (ρ_s)

Удельное поверхностное электрическое сопротивление — сопротивление между противоположными сторонами единичного квадрата на поверхности вещества; выражается в Ом (и в кратных от него единицах); ρ_s определяется наличием носителей тока на поверхности полимера, главным образом адсорбированных проводящих примесей (например, воды).

При повышенных температурах в сухой атмосфере и в отсутствие случайных поверхностных загрязнений поверхностное электрическое сопротивление полимерного образца намного превышает объемное.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ)

Диэлектрическая проницаемость полимеров определяет способность диэлектрика повышать емкость конденсатора, то есть увеличивать заряд на пластинах конденсатора при заданной разности потенциалов. Диэлектрическая проницаемость (ϵ') равна отношению емкости C конденсатора, между пластинами которого помещен диэлектрик, к емкости C_0 того же конденсатора с вакуумированным пространством между пластинами: $\epsilon' = C/C_0$.

Увеличение емкости конденсатора при заполнении его диэлектриком связано с диэлектрической поляризацией, то есть с образованием в единице объема диэлектрика под действием внешнего электрического поля электрического (дипольного) момента, направленного вдоль поля. Электрический момент единицы объема равен геометрической сумме моментов диполей, которые содержатся в этом объеме. Различают деформационную и тепловую поляризации (рис. 2.3).

Деформационная поляризация возникает вследствие квазиупругого смещения под действием электрического поля положительных и отрицательных зарядов атома или молекулы (поляризация электронного или ионного смещения). Деформационная поляризация характерна как для полярных, так и для неполярных диэлектриков, не зависит от интенсивности теплового движения и характеризуется наименьшим временем установления ($10^{-14}-10^{-12}$ с). Это основной вид поляризации в неполярных диэлектриках. Диэлектрическая проницаемость, обусловленная только деформационной поляризацией, должна удовлетворять соотношению Максвелла $\epsilon' = n^2$, где n — показатель преломления в области длинных волн видимого света. Она не зависит от частоты внешнего электрического поля, но несколько меняется с температурой, так как n зависит от плотности вещества.

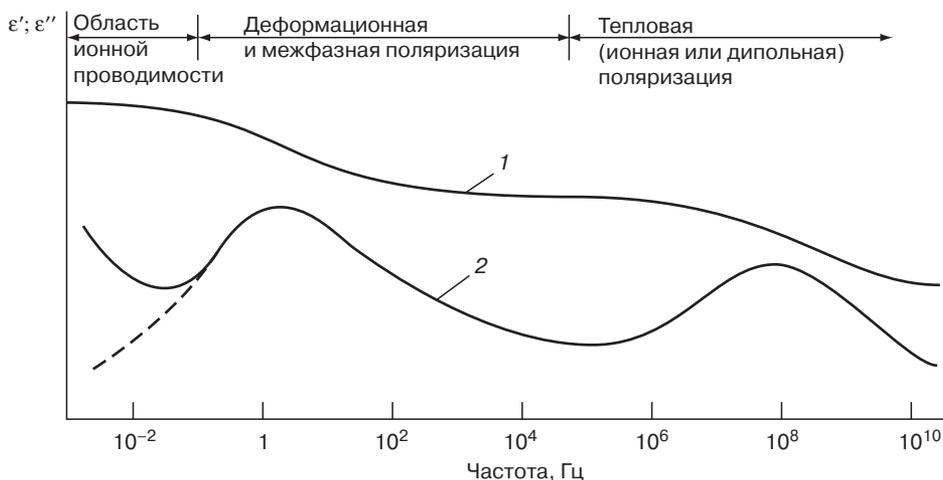


Рис. 2.3. Частотные зависимости диэлектрических свойств типичных полимеров [5, 6, 10]: 1 — диэлектрическая проницаемость ϵ' ; 2 — диэлектрические потери ϵ''

Тепловая поляризация (ионная или дипольная) происходит вследствие движения слабо-связанных ионов внутри диэлектрика в направлении внешнего поля при ориентации постоянных диполей в электрическом поле. Этот вид поляризации имеет релаксационный характер, так как устанавливается в процессе теплового движения частиц диэлектрика за счет энергии теплового движения. Тепловая дипольная поляризация характерна для полярных полимеров, молекулы которых содержат группы атомов с постоянным (перманентным) дипольным моментом. Скорость установления дипольной поляризации в полимерах определяется временем релаксации τ , которое в среднем требуется диполю для поворота под действием внешнего поля. Значение τ зависит от строения полимера и температуры.

Диэлектрическая проницаемость связана с суммой электрических моментов, возникающих в полимере вследствие деформационной и тепловой поляризации. В зависимости от соотношения циклической частоты внешнего поля ω и времени релаксации τ диэлектрическая проницаемость меняется от ϵ (при $\omega\tau \gg 1$) до ϵ_0 (при $\omega\tau \ll 1$). ϵ — диэлектрическая проницаемость в поле предельно высоких радиочастот; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость, характерная для низкочастотных или постоянных полей (так называемая статическая диэлектрическая проницаемость). При $\omega\tau = 1$ диэлектрическая проницаемость заметно зависит от частоты и температуры и наблюдается значительное поглощение энергии поля, превращающейся в тепло. В этом случае для описания дипольной поляризации вводится обобщенная, или комплексная, диэлектрическая проницаемость (ϵ^*):

$$\epsilon^*(\omega, T) = \epsilon'(\omega, T) - i\epsilon''(\omega, T),$$

где T — абсолютная температура; $i = \sqrt{-1}$.

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' соответствует диэлектрической проницаемости диэлектрика, мнимая часть ϵ'' характеризует поглощение электромагнитной энергии, то есть диэлектрические потери.

Соотношение значений вещественной части ϵ' и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости, пропорциональное соотношению тока смещения и проводимости в данной среде, позволяет определить, является ли данная среда проводником, диэлектриком или полупроводником. Если ток смещения $I_{\text{см}} = \epsilon(dE/d\tau)$, (E — напряженность результирующего поля; τ — время) значительно превышает ток проводимости, $I_{\text{пр}} = \sigma E$ током проводимости

можно пренебречь, и такой материал (среду) можно считать диэлектриком. Наоборот, если $I_{\text{пр}} \gg I_{\text{см}}$, то $I_{\text{см}}$ можно пренебречь, а сам материал рассматривать как проводник. В промежуточных случаях, когда $I_{\text{см}}$ и $I_{\text{пр}}$ имеют величину одного порядка, материал можно отнести к полупроводникам.

Межфазная поляризация происходит из-за накопления поверхностных зарядов на границе фаз многофазного диэлектрика. При высоких частотах максимум диэлектрических потерь связан с поляризацией диполей, приводящей к возрастанию потерь на «трение» при смещении молекулярных диполей в переменном электрическом поле. Максимумы диэлектрических потерь наблюдаются при таких значениях частот, при которых происходит наиболее резкое изменение диэлектрической проницаемости.

Тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta_\epsilon$)

Диэлектрические потери — часть энергии внешнего электромагнитного поля, которая необратимо рассеивается в диэлектрике. Если к конденсатору, содержащему диэлектрик, приложить переменное напряжение, то вектор силы тока, возникший в диэлектрике, будет опережать по фазе вектор напряженности приложенного поля на угол δ , равный 90° . Размер этого угла характеризует диэлектрические потери.

Угол диэлектрических потерь δ — мера энергии внешнего переменного электромагнитного поля, превращающейся в полимерном теле в тепло вследствие релаксационных явлений. Угол δ определяется сдвигом фаз между векторами приложенного к диэлектрику электрического поля и поляризации, возникающей под действием этого поля. Тангенс этого угла $\text{tg } \delta_\epsilon$ численно равен отношению активной составляющей I_A тока, проходящего при приложении переменного поля через конденсатор, заполненный данным диэлектриком, к реактивной, или емкостной, составляющей I_C . I_A и I_C можно выразить через диэлектрическую проницаемость ϵ' и коэффициент диэлектрических потерь ϵ'' : $\text{tg } \delta_\epsilon = I_C/I_A = \epsilon''/\epsilon'$. Связь с ϵ' и ϵ'' определяет зависимость $\text{tg } \delta_\epsilon$ от частоты поля и температуры диэлектрика.

В области релаксации дипольной поляризации эта зависимость может быть выведена из формулы Дебая (без учета распределения времен релаксации дипольной поляризации τ):

$$\text{tg } \delta_\epsilon = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)\omega\tau}{\epsilon_0 + \epsilon_\infty\omega^2\tau^2},$$

где ϵ_0 и ϵ_∞ — равновесные значения ϵ' в постоянном поле и поле очень высокой частоты соответственно; ω — круговая частота.

При частоте $\omega_{\text{max}} = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_\infty}}$ или при температуре, при которой время релаксации удовлетворяет условию $\tau = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_\infty}}$, кривая зависимости $\text{tg } \delta_\epsilon$ от частоты (при $T = \text{const}$) или от температуры (при $\omega = \text{const}$) проходит через максимум. В области максимума $\text{tg } \delta_\epsilon$ наблюдается наиболее резкое изменение диэлектрической проницаемости.

Коэффициент потерь ϵ'' выражается через $\text{tg } \delta_\epsilon$ и ϵ' : $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg } \delta_\epsilon$.

Мощность потерь энергии электромагнитного поля в единице объема (1 см^3) диэлектрика в единицу времени (1 с) составляет

$$W = \frac{\omega}{8 \cdot \pi} \epsilon'' E_{\text{max}}^2 = \frac{\omega}{8 \cdot \pi} \epsilon' \cdot \text{tg } \delta_\epsilon \cdot E_{\text{max}}^2.$$

где ω — циклическая частота; E_{max} — амплитуда напряженности приложенного поля.

Диэлектрические потери сопровождают процесс установления дипольной поляризации и поляризации, связанной с накоплением поверхностных зарядов на границе двух фаз

диэлектрика неоднородного строения. Диэлектрические потери появляются также при прохождении через образец остаточного тока.

Величины ϵ' и ϵ'' являются соответственно действительной и мнимой частями обобщенной диэлектрической проницаемости ϵ^* , которая вводится для удобства описания частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''.$$

Если изменение дипольной поляризации во времени соответствует синусоидальному закону, частотные зависимости ϵ' и ϵ'' описываются формулами Дебая:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2};$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)\omega\tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2},$$

где ϵ_0 и ϵ_∞ — значения диэлектрической проницаемости при $\omega = 0$ и $\omega = \infty$; τ — время релаксации дипольной поляризации, характеризующее скорость установления дипольной поляризации при внесении диэлектрика в электрическое поле (или же скорость исчезновения поляризации при дезориентирующем влиянии теплового движения, если поле мгновенно удалено). Зависимость τ от температуры описывается формулой

$$\tau = \tau_0 e^{U/RT},$$

где τ_0 — постоянная; U — энергия активации дипольной поляризации; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Частотные и температурные зависимости обнаруживают при частотах и температурах, для которых выполняется условие $\omega_{\max} \cdot \tau = 1$, максимум для ϵ'' и перегиб для ϵ' (рис. 2.4). При этом измерение частотных зависимостей ϵ' и ϵ'' позволяет оценить время релаксации дипольной поляризации при данной T ($\tau = 1/\omega_{\max}$). Измерения этих зависимостей при разных температурах дают температурную зависимость времени релаксации.

Экспериментальные зависимости ϵ' и ϵ'' от ω при $T = \text{const}$, можно представить, откладывая по оси абсцисс $\epsilon'(\omega)$, а по оси ординат $\epsilon''(\omega)$. Если формулы Дебая справедливы, получают полуокружность с центром на оси $\epsilon'(\omega)$ и точке $(\epsilon_0 + \epsilon_\infty)/2$ и радиусом, который дает значение $\epsilon''_{\max} = (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/2$ (метод круговых диаграмм).

Уравнения Дебая выполняются для полимеров лишь приближенно. Значение ϵ''_{\max} оказывается меньше, чем $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/2$, а область максимума кривой $\epsilon''(\omega)$ и соответствующий ей участок спада зависимости $\epsilon'(\omega)$ охватывают более широкий диапазон частот, чем это предсказывают уравнения. Круговая диаграмма вырождается в дугу меньше полуокружности, центр которой расположен ниже оси $\epsilon'(\omega)$. Отклонение экспериментальных данных от уравнений связывают с тем, что релаксационные свойства полимера характеризуются не одним временем релаксации, а их спектром. Появление набора значений τ обусловлено различием молекулярных взаимодействий в разных точках объема полимера, которое усиливается возможностью внутреннего вращения макромолекул. Наличие спектра значений τ учитывают введением в рассмотрение функций распределения τ относительно наиболее вероятного значения.

В слабых электрических полях, в которых напряженность далека от пробивной, ϵ'' (или $\text{tg } \delta_\epsilon$), ϵ' , а также ρ_v (или γ_v) не зависят от напряженности внешнего поля. Зависимости ϵ' и ϵ'' от ω и T являются основными, определяющими поведение диэлектрика в слабых переменных полях.

Из рассмотрения поведения полимерных диэлектриков в электрическом поле следует, что мерой диэлектрических потерь, обеспечивающих определенный уровень экранирования и поглощения электрической составляющей электромагнитного поля, является ϵ'' (мнимая часть в обобщенной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$) или $\text{tg } \delta_\epsilon$.

ϵ'' и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ определяют часть энергии внешнего электромагнитного поля, которая необратимо рассеивается в диэлектрике, преобразуется в нем в тепло.

2.1.3. Поведение материалов в магнитном поле

Магнитное поле — одна из форм электромагнитного поля. Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и спиновыми магнитными моментами атомных носителей магнетизма (электронов, протонов и др.). Магнетизм — раздел физики, изучающий взаимодействие движущихся электрически заряженных частиц (тел) или частиц (тел) с магнитным моментом, осуществляемое магнитным полем и проявления этого взаимодействия. В магнитных взаимодействиях участвуют элементарные частицы, электрические токи и намагниченные тела, обладающие магнитным моментом. Магнитный момент — величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Магнитный момент тела определяется векторной суммой магнитных моментов частиц, из которых тело состоит. В зависимости от характера взаимодействия частиц-носителей магнитного момента у веществ может наблюдаться ферромагнетизм, ферримагнетизм, антиферромагнетизм, парамагнетизм, диамагнетизм [3, 12, 14, 18, 22].

Все материалы в магнитном поле намагничиваются. Намагничивание связано с наличием у составляющих материал атомов (ионов, молекул) микроскопических магнитных моментов. Магнитный момент — векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Макроскопический магнитный момент создают замкнутые электрические токи и упорядоченные ориентированные магнитные моменты атомных частиц. Магнитный момент атома является суммой векторов орбитальных и собственных (спиновых) моментов электронов. При наложении внешнего магнитного поля векторы ориентируются вдоль поля. Орбитальный момент при этом уменьшается, так как в атоме индуцируется добавочный момент, направленный против поля, — диамагнитный эффект. Наличие некомпенсированных спинов электронов, наоборот, усиливает намагниченность атома — парамагнитный эффект. В твердых телах атомы сближены настолько, что происходит перекрытие энергетических зон электронов; атомы обмениваются электронами и в результате преобладает тот или иной эффект.

Макроскопической характеристикой намагничивания материалов служит величина намагниченности M , равная суммарному магнитному моменту атомов единицы объема.

Установлена связь намагниченности M с напряженностью H внешнего магнитного поля:

$$M = k_m \cdot H,$$

где k_m — безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью материала.

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости все материалы подразделяют на диа-, пара- и ферромагнетики.

Диамагнетики — материалы, которые намагничиваются противоположно приложенному полю и ослабляют его, то есть имеют $k_m < 0$ (от -10^{-4} до -10^{-6}). Атомная магнитная восприимчивость имеет порядок 10^{-6} и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля и температуры. Отрицательная магнитная восприимчивость связана с действием магнитного поля на орбитальный магнитный момент электрона. Согласно правилу Ленца, в атоме возникает добавочный магнитный момент, направленный против поля (диамагнитный эффект).

Диамагнетизм присущ всем веществам, но выражен слабо. Он проявляется только тогда, когда спиновые моменты всех электронов в атоме взаимно скомпенсированы или диамагнитный эффект преобладает над некомпенсированным спиновым моментом.

Вещества с симметричной электронной структурой, не обладающие постоянным магнитным моментом (атомы C, O, N, Bi, Si, Zn, Cu, Pb), диамагнитны. Большинство металлов, ионы которых имеют замкнутую электронную оболочку, диамагнитны ($\mu < 1$).

К диамагнетикам относятся инертные газы, непереходные металлы (Be, Zn, Pb, Cu, Ag и др.), полупроводники (Ge, Si), диэлектрики (полимеры, стекла и др.), сверхпроводники.

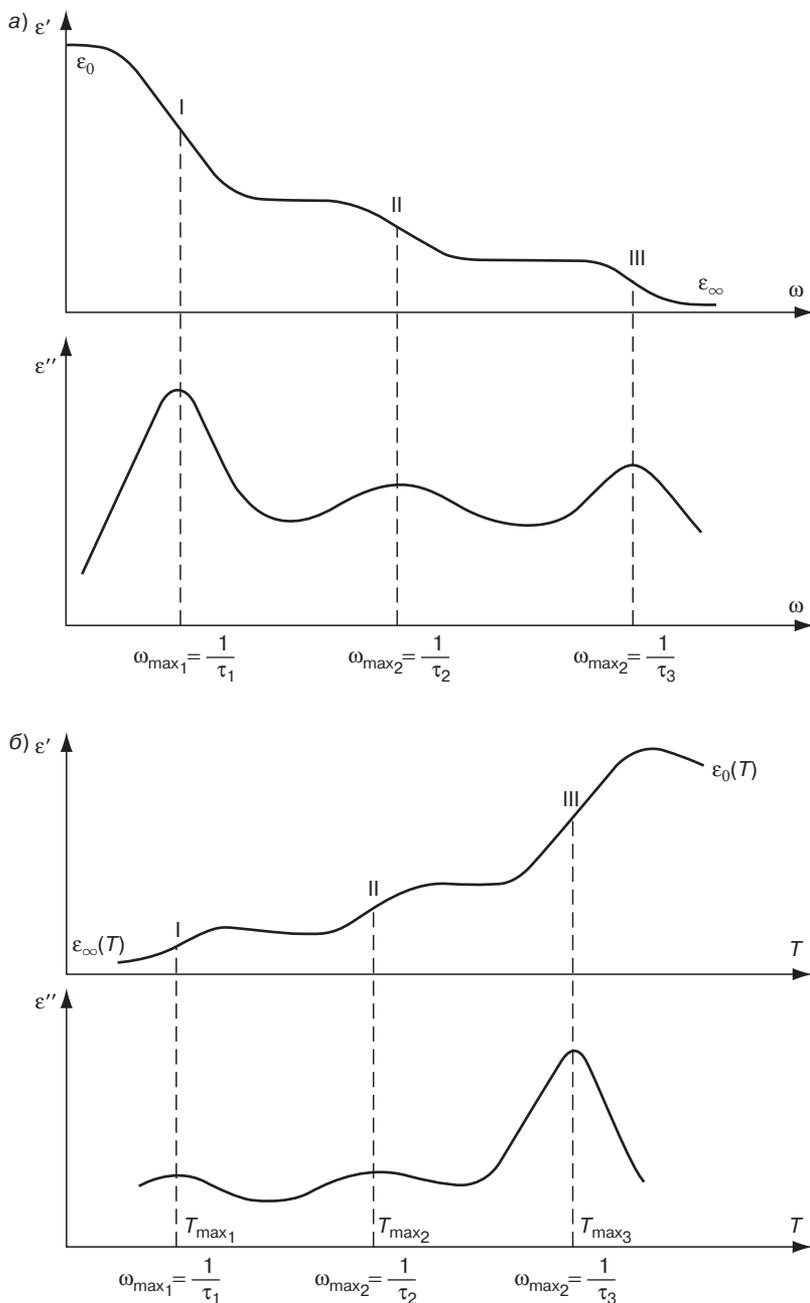


Рис. 2.4. Зависимости (схемы) диэлектрической проницаемости ϵ' и коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' от циклической частоты ω при $T = \text{const}$ (а) и от температуры при $\omega = \text{const}$ (б) для диэлектрика с тремя независимыми областями релаксации поляризации [6, 10]

Парамагнетики — материалы, которые имеют $k_m > 0$ (от 10^{-2} до 10^{-5}) и слабо намагничиваются внешним полем. Намагниченность обусловлена наличием нескомпенсированных спиновых моментов электронов, которые разориентированы в пространстве из-за теплового движения атомов (рис. 2.5). Под воздействием внешнего поля магнитные моменты атома получают преимущественную ориентировку (парамагнитный эффект), и у кристалла появляется некоторая намагниченность. К парамагнетикам относятся металлы, атомы которых имеют нечетное число валентных электронов (K, Na, Al и др., исключение составляют Cu, Ag, Au и Sr, у которых диамагнитный момент заполненных электронных оболочек преобладает над парамагнитным эффектом валентных электронов), переходные металлы (Mo, W, Ti, Pt и др.) с недостроенными электронными оболочками атомов.

Металлы переходных групп (Ti, V, Ni, Nb, Mo, Pd), атомы которых имеют недостаток электронов в d -оболочке и тем самым обладают атомным магнитным моментом, парамагнитны ($\mu > 1$). Парамагнитными свойствами обладают атомы или ионы, имеющие ненулевой результирующий магнитный момент, например, атомы Fe, Ni, Co и редкоземельных элементов. Атомная магнитная восприимчивость парамагнетиков достигает величин порядка $1 \cdot 10^{-1}$. Возникновение ненулевого результирующего магнитного момента является следствием неполного заполнения атомных оболочек электронами (в атомах Fe, Ni, Co — $3d$ -оболочек, а в атомах редкоземельных элементов — $4f$ -оболочек), приводящее к появлению нескомпенсированных электронных спинов. Магнитные моменты нескольких нескомпенсированных спинов складываются, что повышает атомную магнитную восприимчивость. Обменное взаимодействие между атомами с некомпенсированными спинами резко повышает их результирующую магнитную восприимчивость, обуславливая переход вещества в ферромагнитное состояние [11]. Такими свойствами обладают большинство элементов и соединений, индивидуальные атомы или ионы которых обладают парамагнитными свойствами, в том числе Fe и его окислы (γ - Fe_2O_3 и Fe_3O_4), Ni, Co и сплавы на их основе, редкоземельные металлы.

Fe, Co, Ni, Cd обладают значительной способностью концентрировать магнитные силовые линии (высокие значения коэффициента магнитной проницаемости, $\mu \gg 1$), постоянно сохраняют состояние намагниченности — ферромагнитны. Ферромагнетизм связан со спином электронов и в группе железа обусловлен d -электронами.

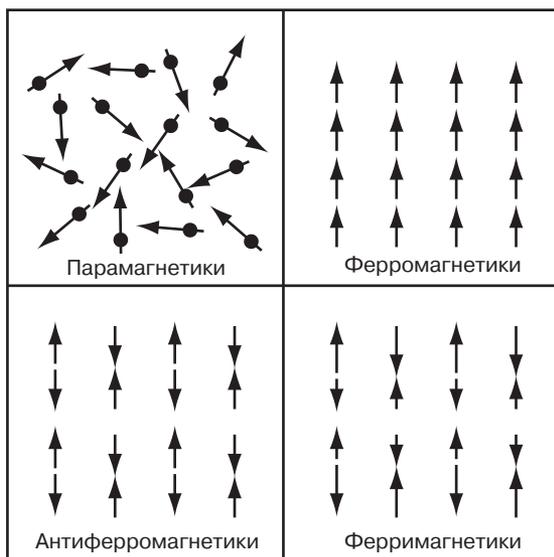


Рис. 2.5. Схема ориентации магнитных моментов атомов различных материалов [18]

Ферромагнетики характеризуются большим значением магнитной восприимчивости ($k_m \gg 1$), а также ее нелинейной зависимостью от напряженности поля H и температуры. Железо, никель, кобальт и редкоземельный металл гадолиний имеют чрезвычайно большое значение $k_m \sim 10^6$. Их способность сильно намагничиваться широко используется в технике.

Ферромагнетизм — результат обменного взаимодействия электронов недостроенных оболочек соседних атомов, перекрывающихся при образовании кристаллов. При этом электрон атома может временно находиться вблизи ядра соседнего атома. Такое взаимодействие приводит к изменению энергетического состояния, и его оценивают обменной энергией. При положительном значении этой энергии более выгодным у атомов кристалла становится параллельная ориентация спиновых магнитных моментов; при отрицательном — антипараллельная (рис. 2.6). Величина и знак обменной энергии зависят от параметра кристаллической решетки (a), отнесенной к диаметру незаполненной электронной подоболочки (d). Согласно квантовой теории все основные свойства ферромагнетиков обусловлены доменной структурой их кристаллов.

Домен — это область кристалла размером 10^{-4} – 10^{-6} м (рис. 2.7), где магнитные моменты атомов ориентированы параллельно определенному кристаллографическому направлению. При отсутствии внешнего магнитного поля каждый домен спонтанно (самопроизвольно) намагничен до насыщения, но магнитные моменты отдельных доменов направлены различно и полный магнитный момент ферромагнетика равен нулю. Между доменами имеются переходные

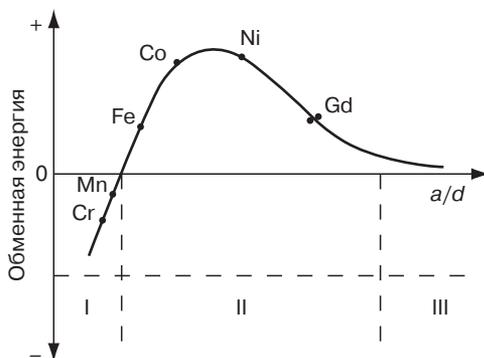


Рис. 2.6. Обменная энергия ферромагнитных металлов [18]:

I — антиферромагнетики; II — ферромагнетики; III — парамагнетики

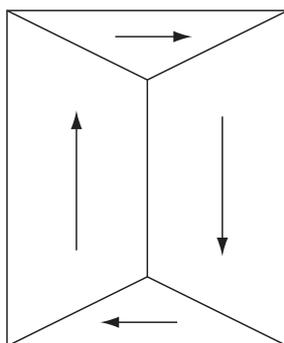


Рис. 2.7. Энергетически выгодная четырехдоменная структура с замкнутым магнитным полем [18]

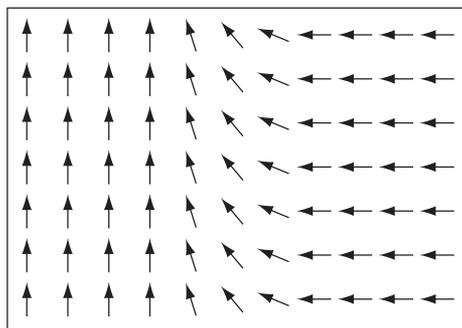


Рис. 2.8. Изменение ориентации магнитных моментов атомов в доменной границе [18]

слои (доменные стенки) шириной 10^{-7} – 10^{-8} м, внутри которых спиновые магнитные моменты постепенно поворачиваются (рис. 2.8).

В **антиферромагнетиках** магнитные моменты атомов ориентируются антипараллельно, и результирующий момент равен нулю (см. рис. 2.5). Если же эти магнитные моменты не скомпенсированы, то возникает результирующий магнитный момент, и такой материал называют **ферримагнетиком**.

Намагниченность монокристалла ферромагнетика анизотропна (рис. 2.9) Кристалл железа в направлении ребра куба $\langle 100 \rangle$ намагничивается до насыщения M_s при значительно меньшей напряженности поля H'_s по сравнению с H''_s при намагничивании в направлении диагонали куба $\langle 111 \rangle$ или в других кристаллографических направлениях. Следовательно, в монокристалле железа имеется шесть направлений легкого намагничивания, развернутые друг относительно друга на 90° или 180° , по которым и ориентируются векторы намагниченности доменов (см. рис. 2.7).

Удельная энергия (Дж/м²), которую необходимо затратить на перемагничивание из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания (заштрихованная зона на рис. 2.9), называется константой кристаллографической магнитной анизотропии — K . Например, для железа при 20°C $K = 4,2 \cdot 10^4$ Дж/м². В поликристаллических материалах эффекты анизотропии усредняются, поэтому магнитная анизотропия не обнаруживается. Однако прокаткой можно создать кристаллографическую анизотропию, которая облегчит намагничивание.

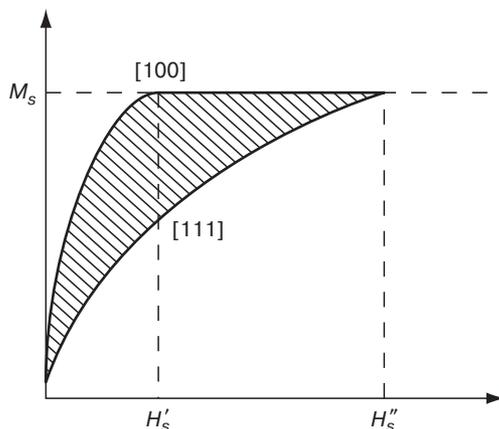


Рис. 2.9. Кривые намагничивания для монокристалла железа [18]

Магнитная индукция — плотность магнитного потока определяется как сумма внешнего H и внутреннего M магнитных полей:

$$B = \mu_0 (H + M),$$

где магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Интенсивность роста индукции при увеличении напряженности намагничивающего поля характеризует магнитная проницаемость μ . Она определяется как тангенс угла наклона к первичной кривой намагничивания $B = f(H)$ (рис. 2.10).

При этом различают начальную магнитную проницаемость $\mu_{пр}$ при $H = 0$ и максимальную μ_{max} .

Кроме абсолютной магнитной проницаемости μ_1 , имеющей размерность Гн/м, используют безразмерную относительную магнитную проницаемость $\mu' = \mu/\mu_0$, которая связана с магнитной восприимчивостью соотношением $\mu' = 1 + k_m$.

Процессы намагничивания полностью необратимы. Если магнитное поле, доведенное до $+H_s$, уменьшать до нуля (рис. 2.10), то индукция сохранит определенное значение B_r , называемое остаточной индукцией. Намагничивание поликристалла полем обратного знака уменьшает индукцию B , и при напряженности поля H_c индукция падает до нуля. Напряженность магнитного поля, равная H_c , называется коэрцитивной силой. При перемагничивании от $+H_s$, до $-H_s$ и обратно кривые не совпадают. Площадь, ограниченная этими кривыми, определяет потери на гистерезис или перемагничивание.

Кривая намагничивания и форма петли гистерезиса — важнейшие характеристики ферромагнетика, так как они определяют основные его константы, а следовательно, и области применения.

При намагничивании изменяется доменная структура поликристалла ферромагнетика (рис. 2.11). При слабых полях наблюдается смещение границ доменов, в результате чего происходит увеличение тех доменов, векторы намагниченности которых составляют с направлением поля H (ось x) меньший угол. Эти домены находятся в энергетически выгодном положении и при увеличении напряженности поля продолжают расти, что сопровождается

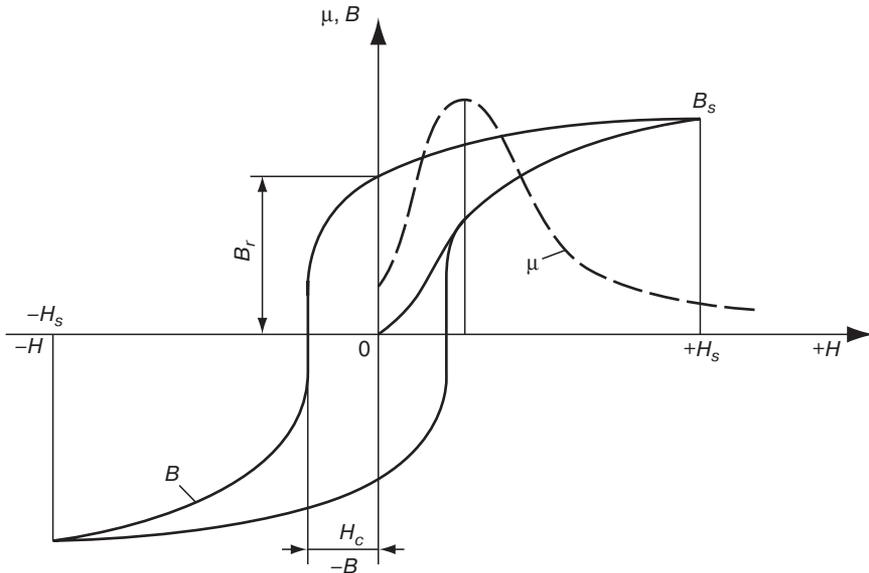


Рис. 2.10. Петля гистерезиса ферромагнетика [18]

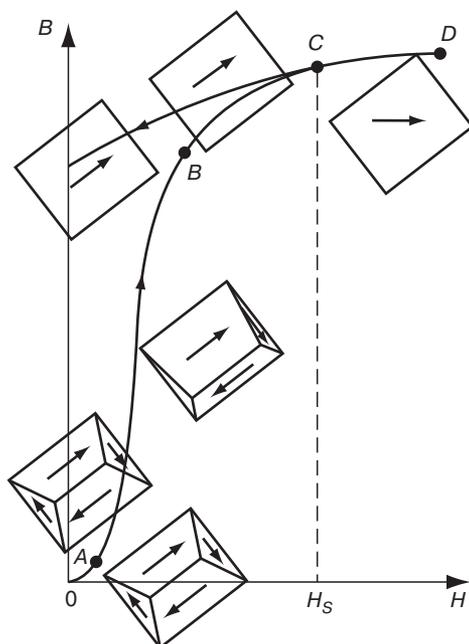


Рис. 2.11. Изменение индукции и доменной структуры при намагничивании ферромагнетика [18]

переориентацией моментов атомов (см. рис. 2.8). На начальном этапе (участок OA) процесс обратим. Затем он приобретает необратимый характер и сопровождается интенсивным ростом индукции (участок AB). Процесс смещения доменных стенок продолжается до тех пор, пока не исчезнут домены, ориентированные невыгодно по отношению к полю. Доменная структура исчезает, каждый кристалл становится однодоменным. Дальнейший процесс намагничивания (участок BC) состоит в том, что векторы намагниченности кристаллов вращаются до полного совпадения с направлением внешнего поля. Полная ориентация векторов намагниченности вдоль поля соответствует индукции насыщения B_s .

В действительности строгую ориентацию моментов атомов можно было бы наблюдать только при абсолютном нуле. При других температурах из-за теплового движения моменты приобретают не строго параллельную ориентацию, что ведет к уменьшению намагниченности и индукции. По мере повышения температуры дезориентация увеличивается, и при температуре точки Кюри θ намагниченность вообще исчезает.

Процесс вращения векторов намагниченности кристаллов полностью обратим. Энергия, затрачиваемая на вращение вектора намагниченности, определяется константой анизотропии K . Процесс намагничивания на этой стадии происходит тем легче, чем меньше константа магнитной анизотропии. Намагничивание в полях напряженностью меньше H_s называют техническим намагничиванием, а в полях с большей напряженностью истинным намагничиванием или парапроцессом. В последнем случае оставшиеся непараллельные магнитные моменты доменов ориентируются параллельно направлению поля.

На процесс намагничивания, кроме магнитной анизотропии, существенно влияют и магнитоstrictionные явления, которые могут как облегчать, так и тормозить намагничивание. При техническом намагничивании размер домена l в направлении магнитного поля изменяется на величину $\lambda = \pm \Delta l / l$, называемую коэффициентом линейной магнитоstriction. Величина

и знак этого коэффициента зависят от природы ферромагнетика, кристаллографического направления и степени намагниченности.

При намагничивании в полях $H > H_s$ увеличивается и объем кристалла. Относительное изменение объема называют коэффициентом объемной магнитострикции парапроцесса λ_s . Он обычно мал, но у некоторых материалов, называемых инварами, достигает значительных величин. Явление магнитострикции используется при конструировании ультразвуковых генераторов волн и других магнитострикционных приборов.

При разработке магнитных материалов с заданными свойствами следует учитывать, что магнитные характеристики M_s , B_s , λ_s , K и θ зависят только от химического состава ферромагнетика, а характеристики μ , H_c , B_c , H_s зависят также и от вида термической обработки, так как являются структурно чувствительными.

Легко намагничиваются (малое значение H_s) химически чистые ферромагнитные металлы и однофазные сплавы на их основе. Количество кристаллических дефектов в них должно быть минимальным, например, границы кристаллов должны иметь минимальную протяженность, что обеспечивается крупнокристаллической структурой.

Если размер кристаллов ферромагнетика приближается к размерам доменов, то при намагничивании и размагничивании возможен только процесс вращения векторов намагничивания, что сопровождается небольшими изменениями намагниченности M и индукции B . Петля гистерезиса принимает прямоугольную форму.

Для намагничивания нежелательны дислокации и остаточные напряжения, для устранения которых в конце технологического процесса применяют термическую обработку — отжиг. Особенно вредны примеси, образующие в кристаллической решетке основного ферромагнетика примесные дефекты или собственные мелкодисперсные фазы. В обоих случаях смещение доменной стенки и вращение векторов намагничивания затрудняются.

Намагничивание ферромагнетика идет тем легче, чем меньше K и λ_s . Уменьшить их влияние можно путем изменения химического состава ферромагнетика. Если изготавливать сплавы из компонентов, образующих твердые растворы, один из которых имеет положительную, а другой отрицательную константу магнитной анизотропии, то для некоторых составов сплавов $K = 0$, например, у сплавов системы Fe–Ni.

Ферромагнетизм — магнитоупорядоченное состояние макроскопических объемов ферромагнетика, в котором магнитные моменты атомов (ионов) параллельны и одинаково ориентированы. Эти объемы — домены — обладают магнитным моментом J_s (суммарный магнитный момент — намагниченность M) даже при отсутствии внешнего намагничивающего поля. Для ферромагнетиков во внешнем магнитном поле характерны нелинейность кривой намагничивания и магнитный гистерезис при перемагничивании (рис. 2.10). Магнитный момент с увеличением температуры уменьшается и обращается в нуль в точке Кюри (переход ферромагнетика в парамагнитное состояние).

Для ферромагнетиков характерен ферромагнитный резонанс — избирательное поглощение энергии электромагнитного поля при частотах радиодиапазона, совпадающих с собственной частотой прецессии Лармора (дополнительное вращение как целого, «прецессия» системы одинаково заряженных частиц, например электронов в атоме, возникающее под действием постоянного и однородного магнитного поля, направление которого и служит осью вращения) магнитного момента ферромагнетика. На основе ферромагнитного резонанса созданы генераторы и усилители СВЧ-диапазона (10^{11} Гц, 1 ТГц = 10^{12} Гц, то есть λ — доли мм), преобразователи частоты, резонансные радиопоглощающие материалы.

В зависимости от условия намагничивания, величины магнитной проницаемости и потерь на перемагничивание (потери на гистерезис) магнитные материалы делятся на магнитомягкие и магнитожесткие.

Определяющими (основными) для характеристики магнитных свойств материалов являются следующие критерии (характеристики) [12, 18–20].

1. Магнитная восприимчивость k_m (или ξ — кси) — магнитная восприимчивость материала устанавливает связь намагниченности M с напряженностью H внешнего магнитного поля; $M = k_m \cdot H$. Знак и величина k_m определяет тип намагничивания (диа-, пара- и ферромагнетизм).

2. Индукция насыщения и коэрцитивная сила.

Магнитное насыщение (индукция M или J) — это достижение максимально возможного для данного вещества значения намагниченности M_∞ (J_∞). В ферромагнетиках магнитное насыщение считается достигнутым, если магнитный момент достигает значения, равного спонтанной намагниченности M_s (J_s) ферромагнитных доменов при данной температуре.

Коэрцитивная сила — значение напряженности магнитного поля H_C , необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества. Различают коэрцитивную силу JH_C когда обращается в нуль намагниченность J (или M) и $B \cdot H_C$ когда магнитная индукция $B = 0$.

3. В переменных полях комплексная магнитная проницаемость $\mu = \mu' + i\mu''$, включает активную μ' и реактивную μ'' составляющие магнитной проницаемости, характеризующие процессы взаимодействия проводника, по которому течет переменный ток при помещении его в магнитное поле.

Магнитная проницаемость характеризует связь между магнитной индукцией B и напряженностью поля H . В системе СГС $\mu = B/H$, в системе СИ $\mu = B/(\mu_0 \cdot H)$, где μ_0 — магнитная проницаемость физического вакуума; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 12,56 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью, $\mu = 1 + 4\pi k_m$ (СГС) = $1 + k_m$ (СИ). Магнитная восприимчивость (k_m , ξ) вещества или среды характеризует связь между магнитным моментом (намагниченностью M или J) вещества и напряженностью магнитного поля H . $k_m = M/H$ (СГС) = $M/(\mu_0 \cdot H)$ (в системе СИ). Магнитный момент — векторная величина, характеризующая вещество, как источник магнитного поля, создает замкнутые электрические токи и упорядоченные магнитные моменты атомных частиц.

Особое значение для техники (в частности, как компоненты магнитодиэлектриков) имеют магнитомягкие ферромагнетики.

Магнитно-мягкие материалы намагничиваются в слабых магнитных полях ($H \leq 5 \cdot 10^4$ А/м) вследствие большой магнитной проницаемости ($\mu_H \leq 88$ мГн/м и $\mu_{\max} \leq 300$ мГн/м) и малых потерь на перемагничивание.

Такие материалы применяют для изготовления сердечников катушек, электромагнитов, трансформаторов, динамо-машин.

При перемагничивании ферромагнетиков в магнитном поле возникает несколько видов энергетических потерь.

1. Потери на гистерезис или перемагничивание для магнитно-мягких материалов невелики.

2. Тепловые удельные потери, связанные с возникновением токов Фуко и определяемых формулой

$$P = \frac{AB_m^2 f^2 d^2}{\rho}$$

При заданной напряженности магнитного поля H тепловые потери растут пропорционально квадратам амплитуды магнитной индукции B_m , частоты магнитного поля f , толщины сердечника d и обратно пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ .

3. В переменных полях появляется еще один вид потерь, как результат сдвига по фазе на угол δ индукции B и напряженности поля H . В таком поле магнитная проницаемость выражается комплексным числом:

$$\mu = \mu' + i\mu''.$$

Потери энергии определяются значениями μ'' и $\text{tg } \delta_\mu = \mu''/\mu'$. С ростом частоты поля μ' снижается интенсивнее, чем растет μ'' (рис. 2.12).

По величине тепловых потерь и $\text{tg } \delta_\mu$ определяют допустимые рабочие частоты, поэтому магнитно-мягкие материалы подразделяются на низко- и высокочастотные.

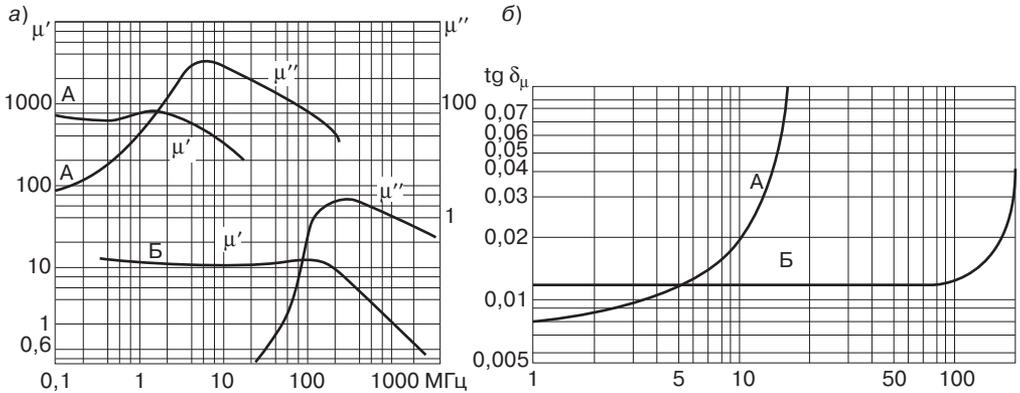


Рис. 2.12. Влияние частоты магнитного поля на μ' и μ'' (а) и $\text{tg } \delta_\mu$ (б) для высокочастотных магнитных материалов двух типов А и Б [18]

Анализ поведения материалов в магнитном поле позволяет выделить магнитомягкие ферромагнетики, которые благодаря высоким значениям магнитной проницаемости μ' и магнитных потерь μ'' , $\text{tg } \delta_\mu$ (особенно в области высоких частот) эффективны в качестве экранирующих и поглощающих.

2.1.4. Электрофизические параметры, обеспечивающие экранирующие и поглощающие свойства материалам, взаимодействующим с электромагнитной энергией радиодиапазона

Анализ поведения материалов в электрическом и магнитном полях и механизмов их взаимодействия позволяет выделить определяющие показатели свойств диэлектрических и магнитоэлектрических материалов (ϵ , $\text{tg } \delta_\epsilon$, μ , $\text{tg } \delta_\mu$ и другие) для решения задач экранирования и поглощения электромагнитной энергии радиодиапазона, в том числе высокочастотного ВЧ и сверхвысокочастотного СВЧ.

В связи с необходимостью защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ) радиодиапазона большого числа конструкций (см. раздел 2.3) проблема экранирования и поглощения ЭМИ предполагает комплексный подход с использованием электрофизических и геометрических параметров материалов, покрытий и конструкций. В полной мере это относится и к проблеме уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ) объектов.

При прохождении ЭМЭ через материалы имеют место явления поглощения, отражения, рассеивания и интерференции электромагнитных волн [1, 2].

Общая эффективность экранирования L , дБ любого замкнутого объема определяется как

$$L = A + R + B,$$

где A — потери, обусловленные поглощением электромагнитной энергии в экранирующих материалах; R — потери, связанные с отражением энергии от обеих поверхностей материалов; B — потери из-за внутренних переотражений в материале; 0,1 Б — децибел, Б, бел — логарифмическая единица отношения двух величин, десятичный логарифм отношения двух одноименных физических величин, в данном случае — характеристика экранирующей способности, отношение ЭМЭ до и за экраном. Если $A > 10$ дБ, что обычно имеет место для электропроводных непористых полимерных материалов и резин, то B можно пренебречь вследствие их

незначительности. Поглощение электромагнитной энергии прямо пропорционально толщине материала b и коэффициенту затухания электромагнитной энергии в этом материале α ;

$$A = b\alpha, \text{ Непер, или } A = 8,686 b\alpha, \text{ дБ.}$$

Для полупроводящих материалов, к которым в отношении проникновения электромагнитной энергии относятся электропроводные материалы, α рассчитывается по следующему уравнению:

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\epsilon' \mu' \left[-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{(\epsilon')^2 4\pi^2 f^2}} \right]}, \text{ Непер/м}$$

где f — частота электромагнитной энергии, Гц; γ — проводимость материала, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; ϵ' — диэлектрическая проницаемость; μ' — магнитная проницаемость.

Для электропроводных и диэлектрических полимерных материалов магнитная поляризация очень мала (за исключением ферромагнетиков), поэтому величины μ^* и μ могут быть заменены магнитной проницаемостью вакуума μ_0 , равной $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Поглощающий материал будет соответствовать своему назначению в том случае, если в нем отсутствует отражение электромагнитной волны от внешней поверхности, а энергия, проникающая внутрь такого материала, полностью в нем поглотится. Выполнение этих условий достигается соответствующим подбором электрических и магнитных свойств материала, в первую очередь комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ и комплексной магнитной проницаемости $\mu = \mu' + i\mu''$ при постепенном переходе от слабопоглощающей среды к сильно поглощающей среде.

Мнимые (реактивные) части проницаемостей обуславливают потери ЭМЭ в материале. Рассмотрим условия отсутствия отражения электромагнитной энергии от поглощающего материала. Пусть этот материал с электрическими параметрами ϵ и μ имеет вид бесконечной плоскости, нормально к которой из внешнего пространства (ϵ_1, μ_1) приходит радиоволна (рис. 2.13).

Поле такой волны на поверхности поглощающего материала и поле внутри материала будут описываться уравнениями Максвелла [27, 28]:

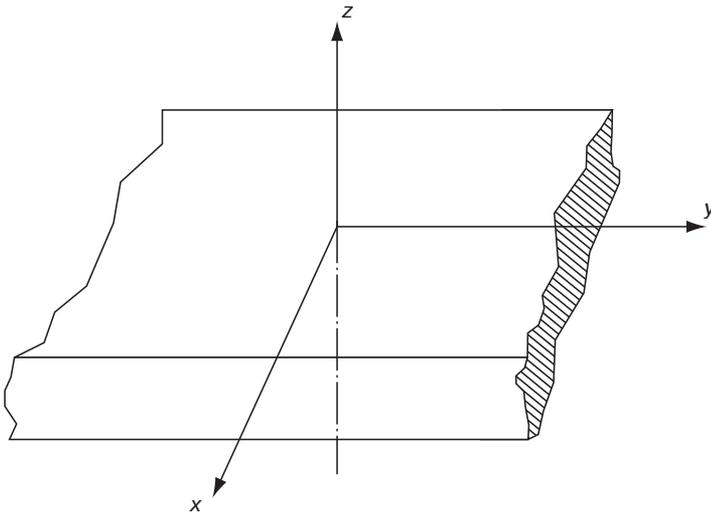


Рис. 2.13. Схема, поясняющая вывод уравнений (1) и(2) [25]

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_m (e^{jkz} + R e^{-jkz}) \\ H_y &= \frac{E_m}{12\pi} (e^{jkz} - R e^{-jkz}) \end{aligned} \right\} z > 0 \quad (1),$$

$$\left. \begin{aligned} E'_y &= E'_m \cdot e^{jk'z} \\ H_y &= E_m \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} e^{jk'z} \end{aligned} \right\} z < 0 \quad (2),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ и $k' = kn$ — волновые множители для внешней среды (воздуха) и поглощающего материала соответственно, $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ — комплексный коэффициент преломления в поглощающей среде; R — коэффициент отражения радиоволн от поверхности покрытия.

Если воспользоваться граничными условиями, которым должно удовлетворять поле на поверхности материала (границе раздела сред), то есть при равенстве тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей, получим следующее выражение для модуля энергетического коэффициента отражения $P_{\text{отр}}$ от границы раздела двух сред:

$$P_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} - 1}{\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} + 1} \quad \text{при } \epsilon = \mu \quad P_{\text{отр}} = 0.$$

$$\text{Если принять } \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} = K, \text{ то } P_{\text{отр}} = \frac{K-1}{K+1} \text{ и при } K = 1 \quad P_{\text{отр}} = 0.$$

При $K = z_2/z_1$, где z_2 — полное волновое сопротивление среды поглощающего материала, z_1 — полное волновое сопротивление среды, в которой находится материал

$$P_{\text{отр}} = \frac{\frac{z_2}{z_1} - 1}{\frac{z_2}{z_1} + 1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad \text{и при } z_2 = z_1 \quad P_{\text{отр}} = 0.$$

Коэффициент отражения R , показывающий, во сколько раз уменьшается за счет отражения мощность проходящего потока электромагнитной энергии, падающей на границу раздела двух сред, определяется по следующему уравнению [1, 2, 24]:

$$R = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{1 - (r_{E_\Sigma})^2} \right],$$

где r_{E_Σ} — модуль амплитудного отражения.

Для нормально падающей электромагнитной волны на среду с потерями модуль амплитудного коэффициента отражения может быть рассчитан по следующему выражению:

$$r_{E_\Sigma} = \sqrt{\frac{e^{2ab} + e^{-2ab} - 2 \cos 2\beta b}{\frac{1}{P_{\text{отр}}} e^{2ab} + P_{\text{отр}} e^{-2ab} - 2 \cos 2\beta b}}$$

где β — фазовый множитель, радиан/м, характеризующий движение электромагнитной волны в материале и определяющий собой фазовую скорость $V_\Phi = \omega \cdot \beta^{-1}$; $P_{\text{отр}}$ — модуль энергетического коэффициента отражения от границы раздела двух сред, равный $\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}$, где z_1 и z_2 — полные

волновые сопротивления среды, в которой находится материал, и самого поглощающего материала.

Полное волновое сопротивление воздуха, в котором обычно находится материал $z_1 = 377$ Ом. Когда второй средой является поглощающий материал, для отсутствия отражения нужно, чтобы выполнялось равенство $z_1 \approx z_2$.

Волновое сопротивление различных материалов определяется по следующим формулам [1, 2, 24]:

$$\text{для проводника:} \quad z = \sqrt{\frac{2\pi f \mu'}{\gamma}}; \quad (3)$$

$$\text{для полупроводника:} \quad z_2 = \sqrt{\frac{(\mu')^2}{(\epsilon)^2 + \frac{\gamma}{4\pi^2 f^2}}}; \quad (4)$$

$$\text{для диэлектрика:} \quad z_2 = \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}}, \quad (5)$$

где $\gamma = \epsilon'' \cdot \omega$ — проводимость материала, Ом⁻¹·м⁻¹; f — частота ЭМИ, Гц; ω — угловая частота, Гц

Так как для воздуха $z_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1} = 377$, то $P_{\text{отр}} = \frac{z_2 - 377}{z_1 + 377}$.

Модуль электрического коэффициента отражения $P_{\text{отр}}$ определяет значения коэффициента R , но реализация условий, при которых $z_2 = 377$ Ом или $z_{2, \text{отн}} = \sqrt{\mu_{2, \text{отн}}/\epsilon_{2, \text{отн}}} = 1$, требует использования не только предельно насыщенных сухим воздухом поглощающих материалов в виде пенопластов, пенорезин, сотовых, порошковых, гранулированных материалов, сферопластов, сколько обеспечения условий, при которых $\epsilon = \mu$, $z_1 = z_2$, то есть путем соответствующего подбора комплексной ϵ и μ проницаемостей поглощающих материалов при постепенном переходе от слабопоглощающей среды к сильно поглощающей.

Дополнительным средством, повышающим поглощающую способность и уменьшающим отражение ЭМЭ, является оптимизация формы («архитектуры») поверхности. Для уменьшения отражения наружную поверхность делают не гладкой, а рельефной, располагая по всей поверхности пирамидальные выступы (шипы). Чтобы увеличить число отражений (при каждом контакте имеет место и поглощение энергии) между шипами (и снизить отражение от поверхности поглощающего покрытия), угол при вершине шипа выгодно делать небольшим, чтобы избежать возврата энергии после двух отражений (90°), трех отражений (60°), четырех отражений (45°) и т. д. (рис. 2.14).

Так обеспечивается согласование волновых сопротивлений (импедансов) z_1 и z_2 . В идеале импеданс материала на поверхности z_2 равен импедансу свободного пространства z_1 и постепенно возрастает с увеличением толщины материала. «Согласованный» вход ЭМИ реализуется не только за счет ϵ и μ , но и за счет шиповидной наружной поверхности поглощающего материала. Например, для безэховых камер выпускаются отдельные пирамиды из поглощающего пенопласта или пенорезины высотой до 2 м (для метрового диапазона волн). Отражение от их поверхности мало зависит от углов падения.

Современные теоретические разработки [29], направленные на решение проблем, прежде всего, уменьшения радиолокационной заметности с позиций «архитектуры» поверхности, широко используются в поглощающих материалах, покрытиях и конструкциях (см. раздел 2.3), в том числе в технологии *Stealth*.

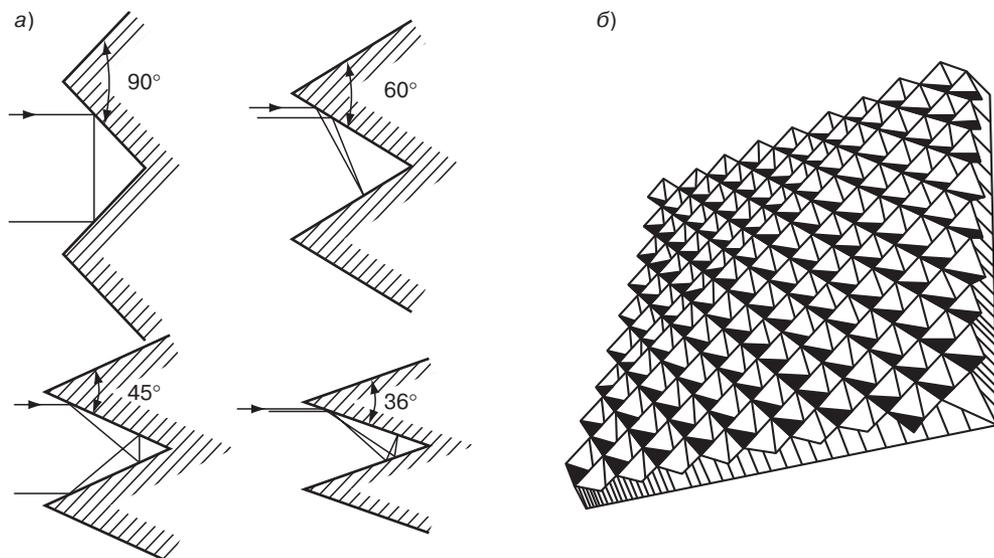


Рис. 2.14. Влияние геометрии поверхности поглощающего материала на число отражений и поглощений (а) и «архитектура» (б) поглощающего ЭМЭ материала [25, 26]

2.1.4.1. Магнитодиэлектрики

Магнитодиэлектриком (МДЭ) называют композиционный магнитный материал, в котором связующим является диэлектрик, а наполнителем — магнитомягкие металлические или ферритовые компоненты. В качестве металлического наполнителя применяют карбонильное железо, размольтые сплавы альсифер и пермаллой. Электроизоляционная пленка, создаваемая специальной технологией нанесения на ферромагнитные частицы органического или неорганического материала снижает потери на вихревые токи магнитоэлектрических композиционных материалов, тем самым обеспечивая возможность их использования для деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц при высокой стабильности магнитных свойств).

Для полимерных диэлектриков ϵ' и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ варьируются в широких пределах. Магнитная проницаемость обычных органических полимеров практически равна 1,0 (магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$) [17]. Относительная магнитная проницаемость отвержденного резольного фенопласта ЛБС — 15,4; железа — 200 [11].

Полимеры, содержащие радикалы и металлокомплексные, имеют слишком слабые магнитные свойства. Наполнение полимеров дисперсными частицами и другими формами магнитных материалов, пропитка ими пористых структур позволяет создавать магнитодиэлектрические наполненные полимерные материалы на основе практически любых полимеров. В качестве наполнителей используют ферриты (магнитные компоненты), углеродные материалы (токопроводящие порошки, сажи, волокна, в том числе наноразмерные, наносажи, нанотрубки, нановолокна, см. 1.4, 2.3.3), металлические магнитные порошки и волокна. Токопроводящие магнитодиэлектрические композиции широко используются не только для поглощения и экранирования ЭМЭ, но и в других областях современной техники.

В токопроводящих полимерных композициях $\epsilon'' = \gamma/\omega$, где γ — электропроводность, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, ω — угловая частота, Гц, $\omega = 2\pi f$ (круговая частота); f — частота электромагнитной энергии, Гц. Реализация условий $\sqrt{\epsilon/\mu} = 1$, $\epsilon = \mu$, $z_1 = z_2$, обеспечивающих минимальный

коэффициент отражения R , в магнитодиэлектриках достигается сочетанием полимеров (связующее), обеспечивающих требуемый уровень диэлектрических свойств, и магнитных, в том числе токопроводящих, компонентов (наполнителей).

Чаще всего при изготовлении магнитодиэлектриков (ферропласты и ферроэласты) используют ферромагнитные порошки и диэлектрические полимеры. Основные параметры магнитомягких ферритов (μ_H — начальная магнитная проницаемость, $\text{tg } \delta_{\mu} \cdot f_{\text{крит}}, B_{\mu_H}$ — температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости, H_c — коэрцитивная сила, B_r — остаточная индукция, B_m — индукция при заданной напряженности магнитного поля, ϵ, ρ_{ν}) сильно изменяются при переходе от монолитного состояния к дисперсному [11, 12, 14, 15, 17, 20, 21, 24, 100]. В дисперсных ферритовых частицах поверхностный слой обладает большими значениями H_c и меньшими значениями μ_H . Для повышения μ_H нужны многодоменные частицы. В полимерных магнитодиэлектриках с увеличением объема ферромагнитных частиц μ_p, B_m, B_r возрастают вследствие уменьшения полей размагничивания b_0 (у полимерных магнитодиэлектриков значения μ_H и $\mu_{\text{эфф}}$ имеют более низкие показатели по сравнению с феррошпинелями).

При образовании электрического контакта между магнитными частицами возникают вихревые токи Фуко, противодействующие намагничиванию (проникновению поля внутрь материала) и поглощению ЭМЭ; общие потери энергии магнитного поля в МДЭ представляют собой сумму потерь на вихревые токи, гистерезис и дополнительные потери [12]. Дополнительные потери связывают с магнитным последствием («магнитной вязкостью») [11]. Такие потери в ферритах в слабых полях весьма малы из-за их невысокой магнитной и электрической проводимости, в МДЭ они определяются процессами в частицах карбонильного железа.

При получении МДЭ высокие магнитные характеристики материалов достигаются только при предельно высоком содержании магнитного наполнителя, что приводит к неравномерному распределению его частиц в объеме материала, ухудшает стабильность и технологичность МДЭ при формовании изделий и снижает их прочность и электроизоляционные свойства. Высокое содержание дисперсного магнитного наполнителя в связующем затрудняет получение МДЭ на основе стеклянных, углеродных, органических и других волокон, широко используемых в производстве крупногабаритных несущих конструкций летательных аппаратов и другой техники.

Необходимость предельного наполнения МДЭ обусловлена сильным размагничивающим действием немагнитных полимерных прослоек между магнитными частицами [17]. Снижение содержания магнитного наполнителя достигается только путем повышения магнитопроводности полимерной фазы, использованием наноразмерных магнитных частиц.

Наличие немагнитных полимерных прослоек с высоким магнитным сопротивлением между частицами магнитного наполнителя (размер магнитных частиц влияет на их магнитную проницаемость) приводят к большому внутреннему размагничиванию в дисперснонаполненных магнитодиэлектриках.

Для снижения коэффициента внутреннего размагничивания $N_{\text{вн}}$

$$N_{\text{вн}} = \frac{P(\mu_H - 1) - (\mu_p - 1)}{(\mu_H - 1)(\mu_p - 1)},$$

где p — коэффициент объемного ферромагнитного наполнения (степень наполнения, объемная доля наполнителя); μ_H — начальная магнитная проницаемость ферромагнитного наполнителя; μ_p — эффективная магнитная проницаемость полимерного магнитодиэлектрика; необходимо увеличение μ_p за счет увеличения объема дисперсного ферромагнитного наполнителя, равномерности его распределения в диэлектрической матрице с малыми значениями ϵ и $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ [15], использования наноразмерных частиц.

При уменьшении магнитного сопротивления полимерного связующего магнитная проводимость и магнитная проницаемость МДЭ повышается [11].

Повышение магнитопроводности достигается использованием допированных электропроводящих полимеров (политиофен, полипиролл) и металллодержащих полимеров ионно-кластерной и ионно-доменной структуры. Величины ϵ' и $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ определяются электропроводностью композиций. Они могут быть существенно повышены в композициях с карбонильным железом (образование «бесконечных» проводящих кластеров [13], см. раздел 2.2.4).

Для расчетов магнитной проницаемости μ_p наполненных магнитодиэлектриков, значения которой используются для оптимизации свойств и прогнозирования эффективности магнитодиэлектриков, используют эмпирические зависимости [15, 16].

Для МДЭ с магнитными частицами сферической формы

$$\mu_p = [v \cdot (\lg \mu_H - \alpha) \cdot (\lg \alpha + 1)]^p,$$

где $\alpha = 0,9$; $v = 11,3$

$$\mu_p = \frac{3 + (\mu_H - 1)(1 + 2p)}{3 + (\mu_H - 1)(1 - p)} \quad (\text{формула Олендорфа})$$

$$\mu_p = \frac{1}{\mu_H^{-1} + (1 - p) / 3}$$

Для МДЭ с магнитными частицами произвольной формы

$$\mu_p = (b \cdot \mu_H)^p;$$

$$\mu_p = [v \cdot (\lg \mu_H - \alpha)(\lg \alpha + 1)]^p,$$

где μ_H — магнитная проницаемость частиц наполнителя; v и α — константы, зависящие от формы частиц; p — объемная доля наполнителя; b — коэффициент формы и размера частиц.

Эмпирические зависимости обеспечивают приемлемое совпадение расчетных и экспериментальных значений μ_p , хотя сложно учитывать целый ряд особенностей, например агрегирование порошков в результате магнитостатического взаимодействия.

Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа, пермаллоя, прессованного порошка альсифера используют для изготовления кольцевых сердечников, используемых в катушках индуктивности, трансформаторах для аппаратуры проводной связи, радиосвязи. Сердечники можно эксплуатировать в условиях воздействия на них вибрационных нагрузок с диапазоном частот 1–500 Гц и максимальными ускорениями до 392 м/с^2 . Начальная магнитная проницаемость сердечника от воздействия механических нагрузок практически не зависит. Временная нестабильность магнитной проницаемости сердечников при эксплуатации за 50 000 ч находится в пределах $\pm 5\%$.

Магнитодиэлектрики на основе ферритов широко используются в покрытиях и конструкциях, обеспечивающих экранирование и поглощение ЭМИ радиодиапазона.

2.1.4.2. Типы экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию материалов. Узкодиапазонные и широкодиапазонные магнитодиэлектрики

В экранирующих и поглощающих материалах поглощаемая энергия преобразуется в тепло, в другие виды энергии в самом материале за счет поглощения, рассеивания и интерференции электромагнитных волн. При поглощении электромагнитной энергии происходит ослабление поля падающей волны, обусловленное переходом энергии поля в тепло за счет диэлектрических и магнитных потерь.

В зависимости от электрических и магнитных свойств материалы делятся на диэлектрические и магнитодиэлектрические. В зависимости от механизма взаимодействия материалов с ЭМЭ они делятся на интерференционные и материалы, поглощающие ЭМЭ за счет магнитодиэлектрических потерь энергии. По принципу работы экранирующие и поглощающие материалы делятся на узко- и широкодиапазонные [26, 30].

По конструктивному выполнению и назначению такие материалы можно разделить на два основных типа:

- 1) экранирующие и поглощающие ЭМЭ покрытия, которые наносятся на защищаемую поверхность (монофункциональные, но с определенным уровнем конструктивных свойств);
- 2) экранирующие и поглощающие многофункциональные материалы: конструкционные ПКМ (стекло-, угле-, органопластики), сочетающие требуемый уровень конструктивных, диэлектрических и магнитных свойств, позволяющие обеспечить высокое весовое совершенство объекта, его экранирование и сложность обнаружения (поглощающие в радиодиапазоне материалы позволяют «имитировать свободное пространство»); теплозащитные (абляционные) материалы, которые могут быть одновременно конструктивными, радиопоглощающими.

Узкодиапазонные интерференционные материалы

К этой группе относятся материалы интерференционного типа, вызывающие гашение электромагнитных волн за счет их интерференции.

Простейший узкодиапазонный материал представляет собой резонансный поглотитель, состоящий из гомогенного слоя диэлектрика, наложенного на защищаемый металл. Поглощение ЭМЭ происходит в результате наложения несовпадающих по фазе колебаний и гашение в результате резонанса при интерференции (рис. 2.15), то есть узкодиапазонные интерференционные поглощающие материалы являются резонансными. Резонанс достигается благодаря интерференции волн, отразившихся от внешней поверхности и поверхности, на которую нанесено покрытие. При этом расстояние между отражающими поверхностями (толщина покрытия) должно быть таким, чтобы обеспечивалось сложение отраженных волн в противофазе.

Отсутствие отражения от такого материала объясняется гашением при интерференции электромагнитных волн, отраженных от поверхности диэлектрик–металл, и от слоя воздух–диэлектрик. При этом волны смещены по фазе относительно друг друга на полволны и имеют равные амплитуды. Такой материал будет работать эффективно только с электромагнитным излучением определенной длины волны.

Гашение падающей волны при интерференции происходит при сдвиге ее фазы в слое $\varphi = (2b - 1)\pi$, где $b = 0, 1, 2, \dots$ при толщине слоя диэлектрика h , равном нечетному числу четвертей длины волны.

Толщина h слоя материала, обеспечивающего интерференцию волны с длиной λ , будет определяться сдвигом фазы на четверть $(2b - 1)(\lambda/4)$ и коэффициентом преломления среды « n »:

$$h = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{2b - 1}{n}$$

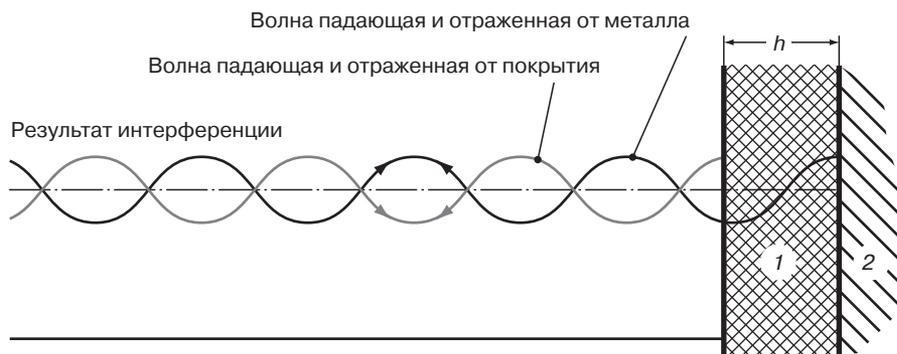


Рис. 2.15. Принцип работы интерференционных узкодиапазонных материалов [26, 30]: 1 — покрытие; 2 — металл

С учетом затухания электромагнитной волны (ξ – коэффициент затухания) в материале [25, 32]

$$\frac{2b-1}{n} = \frac{1}{n+i\xi}, \text{ а } n+i\xi = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}.$$

Выбор толщины такого материала определяется длиной волны и величинами диэлектрической и магнитной проницаемостей материала: $h = \lambda / (4\sqrt{\epsilon\mu})$, где h – толщина материала, λ – длина волны, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости. Материалы этого типа, предназначенные для поглощения коротких волн, могут быть достаточно тонкими.

Толщина h слоя диэлектрика, его ϵ и μ проницаемость выбраны такими, чтобы R падающих электромагнитных волн был равен нулю. Максимальное отклонение резонансной частоты поглощаемого излучения не должно превышать (без значительного понижения эффективности поглощения энергии) $\pm 5\%$.

Для определенной длины волны величина толщины таких материалов, а также величины ϵ и μ должны иметь весьма малые отклонения от заданных. Такие материалы хорошо работают лишь при нормальном падении волн. При других углах падения R материалов резко возрастает, так как он связан с углом падения волны формулой $R = (1 - \cos \theta) / (1 + \cos \theta)$, где R – коэффициент отражения, θ – угол падения волны, отсчитываемый от нормали к поверхности отражения [26, 31].

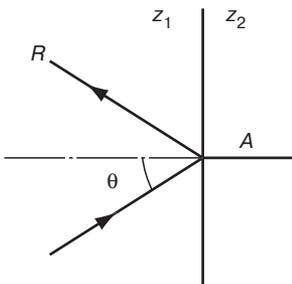
Для оптимизации показателей при расчетах поглощения A и отражения R из уравнений Максвелла корректируют значение входных сопротивлений сред z (импедансов – отношений тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей) с учетом углов падения волны [32].

Когда вектор напряженности электрического поля \vec{E} параллелен границе раздела среды, импеданс $z_i = \frac{1}{\cos \theta_i} \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$.

Когда вектор напряженности магнитного поля \vec{H} перпендикулярен границе раздела среды, импеданс $z_i = \cos \theta_i \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$.

Материал начинает плохо поглощать падающее излучение при углах его падения 70–80°; в этом случае от материала отражается 2–3% энергии [33].

С учетом ϵ и μ [24, 26, 32] сред 1 и 2 (материал)



$$R = \frac{1-K}{1+K}, \quad K = \frac{z_2}{z_1},$$

где z_2 – функция ϵ_2, μ_2 поглощающего материала, γ, f ; z_1 – полное волновое сопротивление среды, в которой находится материал.

Значения z_2 для проводников, полупроводников, диэлектриков приведены ранее, формулы (3), (4), (5).

С учетом коэффициента преломления среды « n » и коэффициента затухания электромагнитной волны ξ в материале [32]:

$$R = \frac{\mu - n - i\xi}{\mu + n + i\xi} \text{ и } R=0 \text{ при } \mu = n + i\xi.$$

Так как $\mu = \mu' + i\mu''$ для полного поглощения необходимо, чтобы $\mu' = n, \mu'' = \xi$, но для этого в поглощающем покрытии должны быть компоненты с большими магнитными потерями.

Входные сопротивления диэлектриков определяются значениями ϵ и μ , $z_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}$. При $\mu = 1$ (для большинства диэлектриков) согласовать z_1 и z_2 сложно даже для электромагнитных волн с определенной длиной волны λ .

Широкие возможности регулирования показателя $\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ возникают при использовании для резонансного поглощения электромагнитной энергии композиций из диэлектрических и магнитных токопроводящих компонентов (магнитодиэлектриков). Для этого используют пенореакто- и термопласты, пенорезины, наполненные порошковыми и волокнистыми углеродными материалами, карбонильным железом и т. д. Полоса поглощающих частот, благодаря большому содержанию магнитного компонента, расширяется. Коэффициент отражения R гофрированных (рельефных) поверхностей мало зависит от угла падения (рис. 2.16, 2.17). Тильная сторона таких материалов может иметь отражающее покрытие (медная фольга, латунная сетка), способствующее отводу тепла. Они могут поглощать и рассеивать мощность до 1 Вт/см^2 (при облучении мощностью до 200 кВт).

Широкодиапазонные экранирующие и поглощающие материалы

В реальных условиях требуется обеспечить минимальное отражение R и максимальное поглощение A ЭМЭ, имеющую различные длины волн, когда узкодиапазонные интерференционные

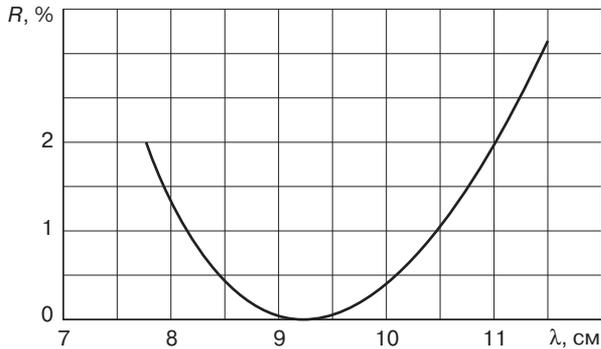


Рис. 2.16. Мощность отраженной электромагнитной энергии от покрытия MSI в зависимости от длины волны при нормальном падении [25]

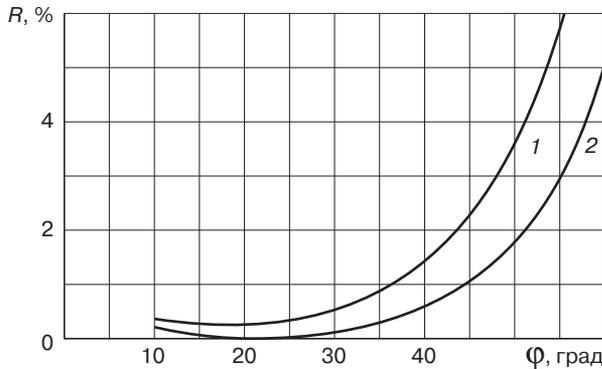


Рис. 2.17. Мощность отраженной электромагнитной энергии от покрытия MSI в зависимости от угла падения ϕ при длине волны $3,2$ см [25]: 1 — горизонтальная поляризация; 2 — вертикальная поляризация. Состав покрытия MSI -пенорезина + $\text{Fe}(\text{CO})_5$

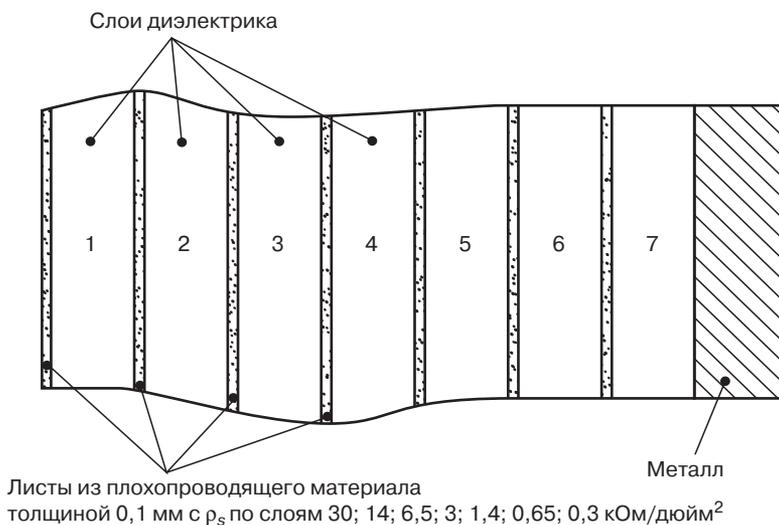


Рис. 2.18. Структура поглощающего материала по принципу «электрического болота» ($\text{tg } \delta_{e1} < \text{tg } \delta_{e7}; \rho_{s1} > \rho_{s7}$) [26]

материалы и покрытия, даже при определенной оптимизации ϵ и μ , будут малоэффективны. Разработаны широкодиапазонные поглощающие ЭМЭ материалы двух различных типов:

1. Многослойные материалы, представляющие собой систему из ориентированных в диэлектрике диполей, расположенных на расстоянии от защищаемой поверхности, равной четверти длины волн, энергию которых необходимо поглотить (широкий диапазон, расширение полосы поглощаемых частот). Материалы поглощают большую часть энергии прежде чем излучение достигнет отражающей поверхности (принцип «электрического болота», рис. 2.18).

2. Материалы, в которых энергия электромагнитных волн превращается в тепловую за счет наведения рассеянных слабых токов, магнитно-гистерезисных или высокочастотных диэлектрических потерь (магнитодиэлектрики).

Поглощающие ЭМЭ материалы, использующие принцип «электрического болота» (*electric swamp*) [26]

Материалы состоят из чередующихся слоев (толщина значительно больше, чем у узкодиапазонных) диэлектрика с малыми потерями и тонких листов плохо проводящего материала, поверхностное сопротивление которого уменьшается на постоянную величину по мере приближения листов к защищаемому металлу.

Характеристики таких материалов могут быть подсчитаны согласно теории передающих линий. Рассчитанная таким способом зависимость коэффициента отражения от длины волны поглощаемого излучения для семислойного материала показана на рис. 2.19.

Типичная зависимость величины мощности излучения, отраженной широкодиапазонным материалом, от угла падения излучения, показана на рис. 2.20. Обычно радиопоглощающие материалы отражают 1% электромагнитной энергии, в некоторых материалах эта величина может быть снижена до 0,01% (с применением оптимального рельефа).

Для таких материалов существует зависимость диапазона излучения и толщины материала: $h = 0,1 \lambda$.

Так, при длине волн 1 м (0,3 ГГц) толщина материала h будет составлять 10 см. Материалы применяются для радиолокационной защиты наземных объектов, оборудования безэховых камер и радиозащиты зданий.

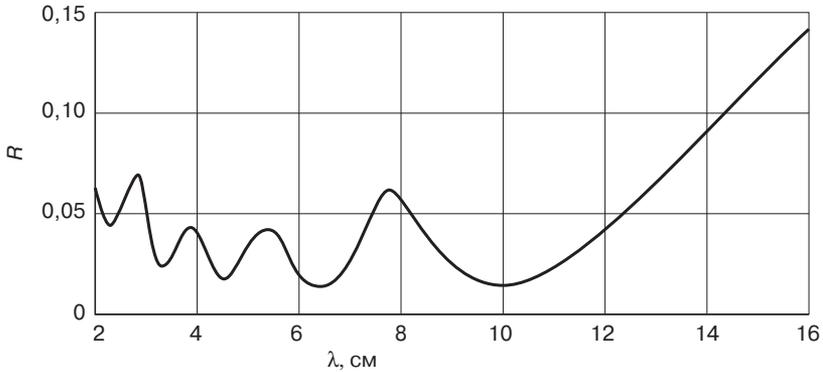


Рис. 2.19. Расчетная зависимость коэффициента отражения семислойного радиопоглощающего материала (см. рис. 2.18) от длины волны поглощаемого излучения [26]

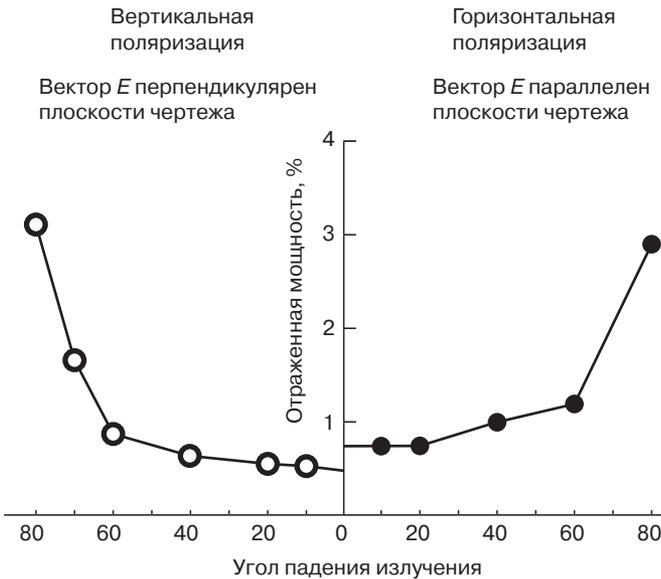


Рис. 2.20. Типичная зависимость величины мощности, отраженной широкодиапазонным радиопоглощающим материалом, от угла падения излучения [26]

Широкодиапазонные магнитоэлектрические материалы

Материалы представляют собой наполненные композиции на основе диэлектрических связующих (полимеры, керамика) и магнитных компонентов (наполнители) различной природы (токопроводящие материалы в виде порошков, волокон, тканей — углеродные, металлические, полимерные и углеродные металлизированные, а также магнитоэлектрики — ферриты, аморфные металлы). Энергию электромагнитных волн такие материалы превращают в тепловую за счет наведения рассеянных слабых токов, диэлектрических ($\text{tg } \delta_\epsilon$) и магнитных ($\text{tg } \delta_\mu$) потерь. Механизмы поглощения энергии рассмотрены в разделе 2.14. Материалы должны иметь высокие значения $\text{tg } \delta_\epsilon$ и $\text{tg } \delta_\mu$. Для увеличения $\text{tg } \delta_\epsilon$ в диэлектрики вводят углеродные компоненты (сажа ацетиленовая) и вспенивают их в 100–200 раз. Для увеличения $\text{tg } \delta_\mu$ материалы

используют в измельченном виде (порошки, гранулы), в качестве наполнителя используют карбонильное железо $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Концентрацию наполнителей увеличивают постепенно по мере приближения к защищаемой поверхности. Так, в многослойных материалах, использующих принцип «электрического болота», концентрация сажи в слоях 1–6 (см. рис. 2.18) составляет 5, 10, 15, 20 %об. В качестве полимерной компоненты используются пенопласты и пенорезины на основе полимеров с высокими диэлектрическими свойствами (полистирол, полиэтилены, фторопласты, кремнийорганические резины, полиуретаны эластичные и жесткие). Обеспечивается и согласование входных сопротивлений (импедансов z_1 и z_2) за счет оптимального рельефа поверхности (перфорация, шипы, коэффициент отражения мало зависит от угла падения, увеличение рассеяние ЭМЭ за счет дифракции волн). Дифракция волн — отклонение волн, возникающее при их распространении в средах с резкими неоднородностями, с препятствиями, что свойственно всякому волновому движению. Дифракция имеет место, когда размеры неоднородностей имеют порядок длины волны λ . Наблюдается при распространении волн вблизи краев шипов, сквозь узкие отверстия и щели.

Подобные материалы и по принципу действия, и по внешнему виду (за счет наполнителей — различные зелено-коричневые цвета, шипы, «кочки») ассоциируются с поверхностью болота.

Существенно расширяется диапазон поглощаемых волн при использовании ферритов (см. раздел 2.2.4), магнитных материалов с большими магнитными потерями $\text{tg } \delta_\mu$ и большой магнитной проницаемостью μ (несколько сотен). В этом качестве перспективны и магнитомягкие аморфные металлические сплавы. Для наиболее эффективного поглощения ферриты располагают непосредственно на отражающей поверхности или на ее имитации (латунные сетки в структуре материала). Ферриты (оксиферы) — комплексные металлические окислы $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, ферромагнитные полупроводники. Их магнитные свойства улучшаются при смещении ферромагнитных и неферромагнитных ферритов, например $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, при снижении ρ_v , которые в 10^4 – 10^{12} раз больше, чем у металлов, что приводит к весьма малым потерям на вихревые токи, которые способствуют повышению температуры до температуры Кюри, при которой тепловое движение разрушает самопроизвольную ориентацию магнитных моментов [34].

Ферриты вводят в покрытия, используют сетки, ткани, пленки с нанесенными на их поверхность различными технологическими приемами (напыление, приклеивание) слою ферритов различной геометрической формы (например, кресты). Форма, толщина и размеры определяются законами теоретической и опытом прикладной радиофизики.

Ферритовый $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ слой толщиной 0,08 мм из частиц размером 74 мкм (размол и циклический нагрев до полного устранения остаточного магнетизма) поглощает 70% энергии излучения при 10 ГГц. Наиболее эффективны композиции (краски), которые можно наносить распылением (пневматизацией). Однако чаще всего используются гибкие ленты, легко принимающие форму экранируемого объекта, которые приклеиваются к металлическим или полимерным силовым конструкциям.

При использовании плиток из ферритов ряд проблем (хрупкость, различие в КЛТР феррита и подложки, влияние термоциклов) решается применением модульных покрытий (рис. 2.21, 2.22).

На рис. 2.22 показана конструкция одного модуля поглощающего покрытия. Для возможности формоизменения в качестве проводящей подложки используется фольга из меди, алюминия или серебра. Ферритовые плитки прикрепляются клеем, чувствительным к давлению, или эпоксидным.

Вес 1 м² материала на основе пенополисилоксановой резины, содержащего ферриты, при толщине 9,5 мм составляет 2,98 кг ($T_{\text{раб}}$ до 260 °С, R в диапазоне волн от 4 см и короче не более 2%), материала на $\lambda = 8$ см и короче при толщине 28,6 мм — 6,85 кг, ферритового материала (R 1% в диапазоне частот 40–3000 МГц) толщиной 5 мм — 4,9 кг [25]. Вес 1 м² феррита около 13 кг (стандартная толщина плитки, в зависимости от состава). В то же время вес 1 м²

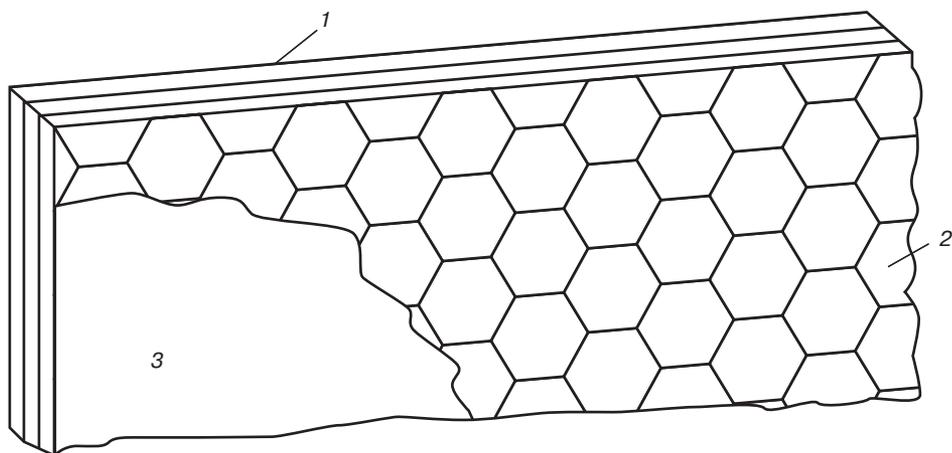


Рис. 2.21. Модульная конструкция керамического ферритового радиопоглощающего материала [35]: 1 — стеклоткань; 2 — керамические ферритовые гексагональные плитки; 3 — металлическая фольга

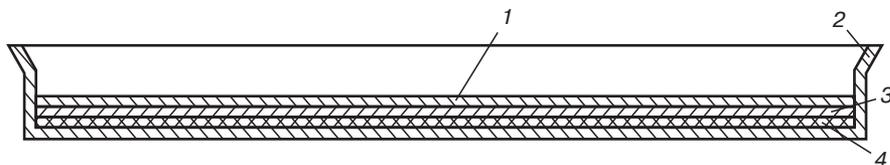


Рис. 2.22. Модуль керамического ферритового радиопоглощающего материала [35]: 1 — стеклоткань; 2 — полая прямоугольная коробка; 3 — керамические ферритовые гексагональные плитки; 4 — металлический медный, серебряный или алюминиевый экран или сетка

углеродной ленты КЛШ-11-300ПУ всего 300–400 г, и для некоторых условий эксплуатации широкодиапазонных поглощающих материалов они более перспективны.

Разработаны широкодиапазонные поглощающие магнетодиэлектрические материалы, которые при толщине 1–3 мм эффективно поглощают ($R < 1\%$) сантиметровый и метровый диапазон ЭМЭ. Электрические и магнитные свойства компонентов экранирующих и поглощающих ЭМЭ материалов приведены в разделе 2.2.

Величина поглощаемой энергии зависит от максимально допустимой рабочей температуры материала. Для полимерных материалов максимальная плотность поглощаемой энергии (без воздушного охлаждения) составляет [33] 0,155–0,465 Вт/см². В случае специальных поглощающих материалов эта величина может быть доведена до 1,55 Вт/см², а для особо теплоустойчивых поглощающих материалов на основе пенокерамики — до 7,55 Вт/см². Величина поглощаемой энергии зависит от теплопередачи материала и может быть увеличена при обеспечении циркуляции воздуха на обратной стороне материала. Поглощающий материал, с обратной стороны которого обеспечена циркуляция воздуха, может работать в интервале температур от –60 до +650 °С при обеспечении его огнестойкости. Поглощающие материалы могут поставляться в виде эластичных и жестких пеноматериалов, тонких листов, рыхлой сыпучей массы и заливочных компаундов. Материалы могут устанавливаться на месте применения с помощью клея либо с помощью крепежных устройств. Устойчивость к воздействию атмосферных условий, топлив и других факторов достигается путем применения защитных материалов соответствующих типов.

2.2. Компоненты и составы материалов, экранирующих и поглощающих электромагнитную энергию

Традиционными способами получения радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалов на основе полимеров являются:

1) наполнение полимеров дисперсными частицами и другими формами магнитных материалов, пропитка ими пористых структур, что позволяет получить большой ассортимент магнитодиэлектрических материалов. Основными магнитными компонентами в магнитодиэлектриках являются магнитомягкие низкочастотные и высокочастотные ферриты и аморфные металлы;

2) наполнение полимеров токопроводящими компонентами — углеродными материалами (порошки, сажи, волокна, фуллерены).

В ряде случаев эффективно использование для радиопоглощения полимерных (и керамических) композиций на основе металлокомплексных и токопроводящих полимеров, металлизированных волокон и текстильных форм из них (ткани, ленты, сетки).

Магнитодиэлектрические и токопроводящие полимерные композиции широко используются не только для поглощения и экранирования ЭМЭ, но и в других областях современной техники (например, токопроводящие клеи в электронике).

В данном разделе полимеры (ПМ, ПКМ) рассматриваются, в основном, с позиций оценки их диэлектрических свойств, другие компоненты магнитодиэлектриков — с позиции оценки их магнитных свойств. Токопроводящие полимеры интересны своими магнитодиэлектрическими свойствами.

Если в отдельных звеньях макромолекул содержатся полярные группы различного вида, способные ориентироваться в электрическом поле независимо одна от другой, и времена релаксации поляризации этих групп различны, то наблюдаются два (или более) максимума ϵ'' для ДГ-потерь. Это установлено для поли- β -хлорэтилметакрилата, смешанных эфиров цианэтилцеллюлозы, смешанных полиэфиров дифенилолметана и двух кислот — терефталевой и себадиновой, сополимеров статистического строения, содержащих полярные сомомеры двух видов.

Магнитными свойствами обладает так называемая триада железо-кобальт-никель, некоторые металлы и сплавы.

Обнаружены (2003 г.) необычные свойства у кобальта. Энергия его магнитной анизотропии больше, чем у любого другого элемента — 9,3 мЭВ на атом. Этот показатель характеризует степень устойчивости магнитных свойств (у материалов, используемых в постоянных магнитах, он не превышает 2 мЭВ на атом).

Ферромагнетизм органических веществ проявляется слабо в области криогенных температур. Создать сильный магнит только из органического материала, в состав которого входят только легкие элементы углерод, водород, азот, кислород, без включения металлов, весьма сложно.

С 1986 г. проводятся работы по синтезу ферромагнитных органических соединений, молекулярных кристаллов-ферромагнетиков (в том числе оптически прозрачных в точке Кюри под действием приложенных электромагнитных полей для применения в оптоэлектронике). Молекулярный кристалл марганец-медь органического соединения имеет точку Кюри 22,5 К и состоит из двух пачек плоских слоев, ориентированных перпендикулярно друг другу (шестиленные циклы сцеплены). Носителями электронов, спины которых участвуют в появлении намагниченности, служат ионы Mn^{+2} и Cu^{+2} (в каждом цикле по 6 ионов). Слабые магнитные свойства полностью органического кристалла из молекул, содержащих две иминоксильные группы $>N^+-O^-$, проявляются при точке Кюри 1,5 К. Благодаря обменно-взаимодействию между электронами нитроксидов возникает параллельная ориентация их спинов (молекулы ведут себя аналогично ионам металлов) — эффект ферромагнетизма.

2.2.1. Полимеры и полимерные материалы

2.2.1.1. Физическое состояние и диэлектрические свойства полимеров

Диэлектрические свойства полимеров связаны с особенностями их строения: наличием длинных цепных молекул и возможностью внутреннего вращения атомов в главной и боковой цепях. Тепловое движение макромолекул определяет подвижность свободных ионов и дипольную поляризацию полимеров.

При температурах ниже температуры стеклования (T_g), когда конформация главной цепи в целом заморожена, сохраняется движение кинетических единиц, локализованных в небольших объемах (короткий участок или одно звено главной цепи, боковой заместитель или его часть). При $T > T_g$ существует также вторая форма движения макромолекулы — сегментальная. Она связана с кооперативным смещением кинетических сегментов главной цепи.

Переход из стеклообразного состояния в высокоэластическое сопровождается изменением наклона графика зависимости $\lg \rho_v$ от обратного значения T . Если кинетическая единица обладает отличным от нуля дипольным моментом, каждой форме теплового движения соответствует свой процесс дипольной поляризации, т. е. отдельный максимум ϵ'' и перегиб ϵ' . В соответствии с характером теплового движения макромолекул различают дипольно-групповые (ДГ) и дипольно-сегментальные (ДС) поляризацию и потери. Эта терминология, как более конкретная, принята взамен старой — дипольно-радикальные и дипольно-эластичные потери и поляризация. В литературе встречаются обозначения указанных процессов как побочного (*Nebenmaxima*) и главного (*Hauptmaxima*) или же с помощью буквенных символов: α — для ДС-процессов, β , γ , δ — для ДГ-процессов.

ДГ-процессы поляризации наблюдаются в условиях, когда основная цепь молекулы неподвижна в течение времени наблюдения, определяемого периодом приложенного поля. Это возможно при любых температурах. Энергия активации U ДГ-поляризации не превышает 20–60 кДж/моль (5–15 ккал/моль). ДС-поляризация и потери могут быть обнаружены только при $T > T_g$. Для ДС-поляризации формально рассчитанные значения U равны 130–590 кДж/моль (30–140 ккал/моль). Столь высокие значения U не имеют непосредственного смысла энергии активации, и в этом случае U следует рассматривать только как температурный коэффициент наиболее вероятного времени релаксации.

Полярные группы могут входить в главную цепь (например, в полиоксиэтилене или в поливинилхлориде), непосредственно примыкать к ней (группы COO в полиметилакрилатах) или замыкать более или менее длинную боковую цепь. В связи с этим ДГ-явления могут иметь некоторое сходство с ДС-процессом или проявлять полную независимость от кинетических свойств основной цепи.

Если в отдельных звеньях макромолекул содержатся полярные группы различного вида, способные ориентироваться в электрическом поле независимо одна от другой, и времена релаксации поляризации этих групп различны, то наблюдаются два (или более) максимума ϵ'' для ДГ-потерь. Это установлено для поли- β -хлорэтилметакрилата, смешанных эфиров цианэтилцеллюлозы, смешанных полиэфиров дифенилолметана и двух кислот — терефталевой и себадиновой, сополимеров статистического строения, содержащих полярные сомомеры двух видов.

Для статистических сополимеров и гомополимеров различного строения, в том числе и содержащих полярные группы двух и более видов, всегда наблюдается только одна область ДС-потерь.

С ростом температуры максимумы частотной зависимости ϵ'' для ДГ- и ДС-потерь сближаются и далее сливаются в один (рис. 2.23). При температуре на 50–100 °С выше температуры стеклования наблюдается единый процесс релаксации поляризации, то есть одна область максимума ϵ'' и перегиба ϵ' .

Исследования диэлектрических потерь и проницаемости полимеров в широком интервале T и ω — один из наиболее удобных и чувствительных методов изучения молекулярного и

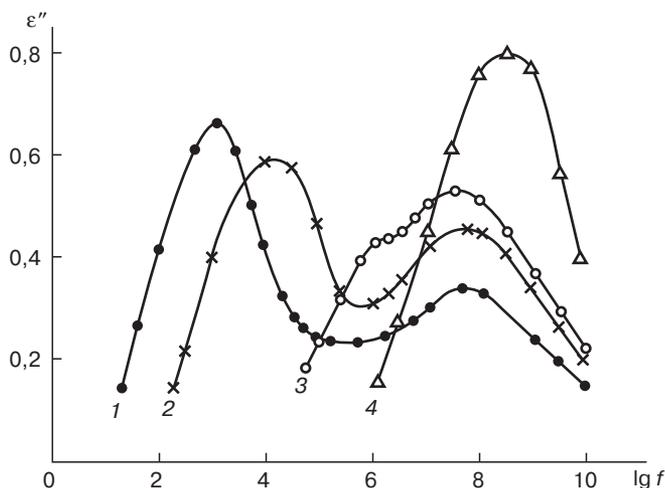


Рис. 2.23. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь ε'' от логарифма частоты $\lg f$ для полиметилметакрилата при различных температурах [10]: 1 — 37 °C; 2 — 50 °C; 3 — 70 °C; 4 — 90 °C

надмолекулярного строения полимеров, молекулярных взаимодействий и релаксационных явлений. Диэлектрический метод пригоден для исследования как полярных, так и неполярных полимеров. Практически не существует полимеров, абсолютно лишенных полярных групп. При синтезе неполярного полимера могут происходить замещения или присоединения (например, при окислении полиэтилена), приводящие к появлению полярных связей. Кроме того, практически всегда существует некоторая асимметрия распределения положительно и отрицательно заряженных частиц, что приводит к появлению отличных от нуля дипольных моментов (например, дипольный момент мономерного звена полистирола равен $0,34D$, $1,140 \cdot 10^{-30}$ К·м).

При изучении строения и теплового движения макромолекул диэлектрический метод дополняет другие методы: механический, динамический, dilatометрический, ядерного магнитного резонанса и др. [5, 6, 8, 10].

2.2.1.2. Зависимость диэлектрических свойств от строения полимеров

Электрическая проводимость, диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость (в меньшей степени — электрическая прочность) полимеров зависят от химического состава и структуры мономерного звена, строения макроцепей, способа их укладки. От молекулярного взаимодействия в полимерах зависят подвижность свободных ионов, времена релаксации и их температурные зависимости, эффективные дипольные моменты мономерного звена.

Диэлектрические потери в неполярных полимерах вне области максимума $\text{tg } \delta_\epsilon$ характеризуются значениями $\text{tg } \delta_\epsilon (1-3) \cdot 10^{-4}$. В максимуме значение $\text{tg } \delta_\epsilon$ может быть примерно на десятичный порядок выше. Удельное объемное электрическое сопротивление неполярных полимеров составляет $1000-10\,000$ ГОм·м ($10^{17}-10^{18}$ Ом·см). Диэлектрическая проницаемость (при $T < T_c$) обычно лежит в пределах 2–2,5.

Для неполярных полимеров возможны одна, две или более областей, в которых $\text{tg } \delta_\epsilon$ проходит через максимум. Для полиизобутилена наблюдается один максимум $\text{tg } \delta_\epsilon$ (ДС-потери). Для полиэтилена возможны две (полиэтилен высокой плотности) или три области, в которых $\text{tg } \delta_\epsilon$ проходит через максимум. Высокочастотная область дипольных потерь приписывается поляризации случайных полярных групп, преимущественно карбонильных, соединенных с основной цепью и дефектных кристаллических или аморфных местах. Область низкочастотных потерь связывается с присутствием кристаллических областей и их плавлением. В полиэтилене низкой плотности обнаруживается третий (среднечастотный) максимум $\text{tg } \delta_\epsilon$. Его

относят к движению сегментов в местах дефектов кристаллической структуры, обусловленных разветвлениями основной цепи. Значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ в полиэтилене пропорциональны количеству карбонильных групп в единице объема. С наличием карбонильных групп связаны дипольные потери и в полипропилене, преимущество которого как диэлектрика — повышенная теплоустойчивость (изотактический полипропилен размягчается вблизи 150 °С).

В технике в качестве неполярных диэлектриков, кроме упомянутых выше полимеров, применяют политетрафторэтилен, поли- β -винилнафталин, поли- α -метилстирол. Из теплостойких полимеров следует назвать полифениленоксид, полисульфоны, полифениленсульфиды, ПЭЭК, полиимиды, полиэфиримиды, которые сохраняют диэлектрические свойства до 180–300 °С. Ценным сочетанием высоких механических и диэлектрических свойств в интервале температур от –200 до +350 °С отличаются неполярные диэлектрики на основе полиимидов. Может быть использован поливинилтриметилсилан ($\operatorname{tg} \delta_{\epsilon} = (1-2) \cdot 10^{-4}$ и $\epsilon' = 2,3$ при температурах от –100 до +220 °С).

Полярные полимеры имеют удельное объемное электрическое сопротивление несколько ниже, чем неполярные (0,01–100 ГОм·м, или 10^{12} – 10^{10} Ом·см, в стеклообразном состоянии). Значение ϵ' меняется от 2,5–3,0 при $T < T_c$ до 4,0–12,0 для полимеров в высокоэластичном состоянии. Полимеры, содержащие сильно полярные группы на концах достаточно длинных линейных боковых цепей, например, триациантилцеллюлоза, могут иметь в стеклообразном состоянии $\epsilon' = 15$ –20. В полимерах с повышенным значением ϵ' облегчена ионизация групп макромолекулы и случайных примесей, поэтому ρ_v таких полимеров в стеклообразном состоянии может быть понижено до 0,01–1 ГОм·м (10^9 – 10^{11} Ом·см). Значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ вдали от области максимума составляют 10^{-3} – 10^{-2} , а в максимуме ДС-потерь возрастают до 10^{-2} –1,0; значение $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ ДГ-потерь, как правило, ниже, чем для ДС-потерь.

Введение полярных заместителей существенно изменяет диэлектрические свойства полимера. При этом важна не только полярность (то есть дипольный момент) вводимой группы, но и способ вхождения заместителя в мономерное звено. На рис. 2.24 приведены температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ и ϵ' полипропилметакрилата и его хлорпроизводных. Замещение $X=Cl$ приводит к образованию диполя, встроенного одним концом в основную цепь. Замещение $R=Cl$ создает полярную группу CCl на конце боковой цепочки. В полипропилметакрилате ($X=R=CH_3$) при 50–100 °С наблюдаются частично совмещенные по температуре ДГ- и ДС-потери, связанные с дипольной поляризацией групп COO боковых цепей. В полимерах с $X=Cl$ область максимума $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ ДС-потерь сдвинута к более высоким температурам и имеет повышенные значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$. В полимерах с $R=Cl$ область ДС-потерь тоже сдвинута к высоким T , но, кроме того, здесь появляется область максимума $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ для ДГ-потерь (и соответствующий ей перегиб ϵ') при температурах от –120 до –90 °С. Последняя обусловлена движением конечных участков боковых цепей, несущих диполь CCl . Полярные группы могут входить непосредственно в главную цепь полимера, как, например, в полиформальдегиде и его гомологах. Так же как и полиэтилен, эти полимеры кристаллически, и в них наблюдаются области дипольных потерь, связанные с плавлением кристаллических образований, движением сегментов цепи и коротких ее участков (3–4 связи) в аморфных местах объема. Но эти полимеры имеют более высокие, чем у полиэтилена, значения ϵ' (2,6–4,0 при 10^2 – 10^7 Гц и температурах от –100 до +20 °С) и $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ (0,1–0,2).

На значение и характер температурно-частотных зависимостей $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ большое влияние оказывает введение в моновзвено заместителей большого объема, которые усиливают стерическое торможение полярных групп. Например, замещение атома водорода на группу CH_3 при переходе от полиметилакрилата к полиметилметакрилату перераспределяет значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ ДГ- и ДС-потерь (рис. 2.25), сдвигает области максимума $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ к высоким T , то есть увеличивает время релаксации ДГ- и ДС-поляризации, повышает энергию активации. Торможение со стороны групп CH_3 также доказывается зависимостью значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ ДС-потерь от содержания полярного компонента в сополимерах метилметакрилат–стирол. Сополимеризация метилметакрилата с небольшим количеством стирола (молярная концентрация до 40%) уменьшает число полярных групп в единице объема, но тем не менее вызывает повышение $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ ДС-потерь (рис. 2.26). Это

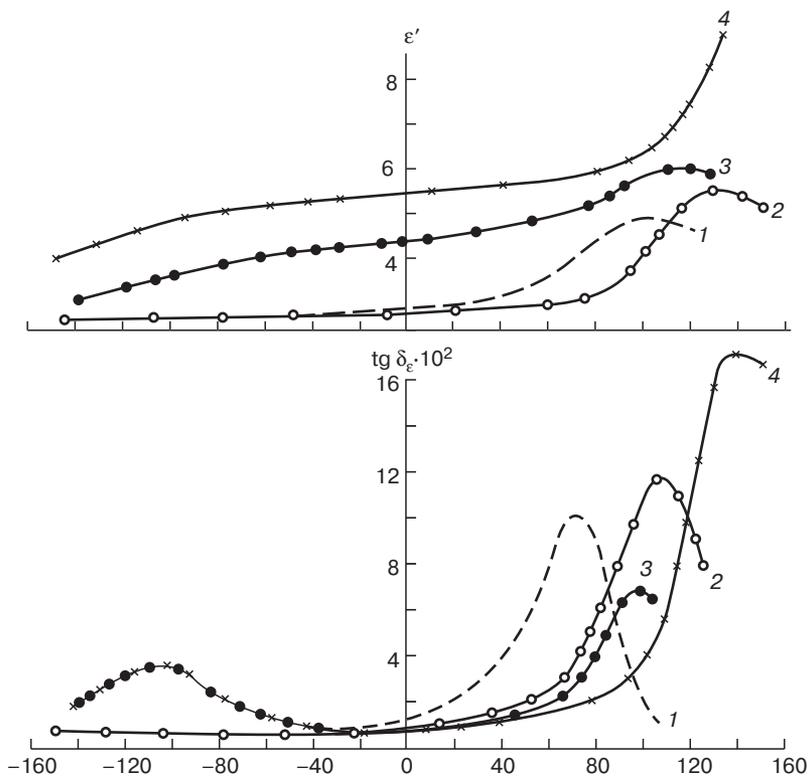
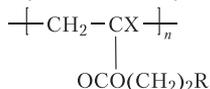


Рис. 2.24. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_\epsilon$ диэлектрической проницаемости ϵ' для полипропилметакрилата и его производных общей формулы



при $f = 400$ Гц [10]. 1. $X = R = \text{CH}_3$; 2. $X = \text{Cl}$, $R = \text{CH}_3$; 3. $X = \text{CH}_3$, $R = \text{Cl}$; 4. $X = R = \text{Cl}$

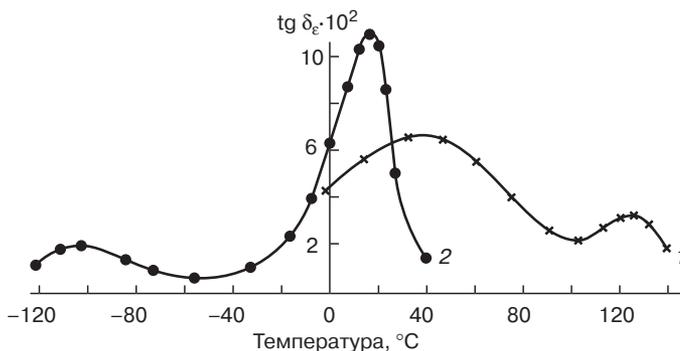


Рис. 2.25. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для полиметилметакрилата (1) и полиметилакрилата (2), $f = 20$ Гц [10]



Рис. 2.26. Зависимость $\text{tg } \delta_{\epsilon, \text{max}}$ дипольно-сегментальных потерь для сополимеров метилметакрилата и стирола от содержания метилметакрилата; $f = 20$ Гц [10].

происходит в результате преобладающего влияния растормаживания полярных групп, смежных со звеньями стирола, так как последний не содержит групп CH_3 . Влияние на диэлектрические свойства, связанное с внутренним торможением, оказывают ароматические кольца, в особенности если они входят непосредственно в главную цепь.

Для стереорегулярных полимеров с синдиотактической конфигурацией цепи (полиметилметакрилат, полибутилметакрилат) существенных отличий в значениях ρ , τ , U , $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, ϵ' по сравнению с теми же величинами для атактических полимеров обнаружено не было. Изотактическое строение цепи влияет на значения $\text{tg } \delta_{\epsilon, \text{max}}$ ДГ- и ДС-потерь. На рис. 2.27 приведены зависимости $\text{tg } \delta_{\epsilon}(T)$ для атактического и изотактического поли-трет-бутилметакрилата, у которых наблюдаются различия в

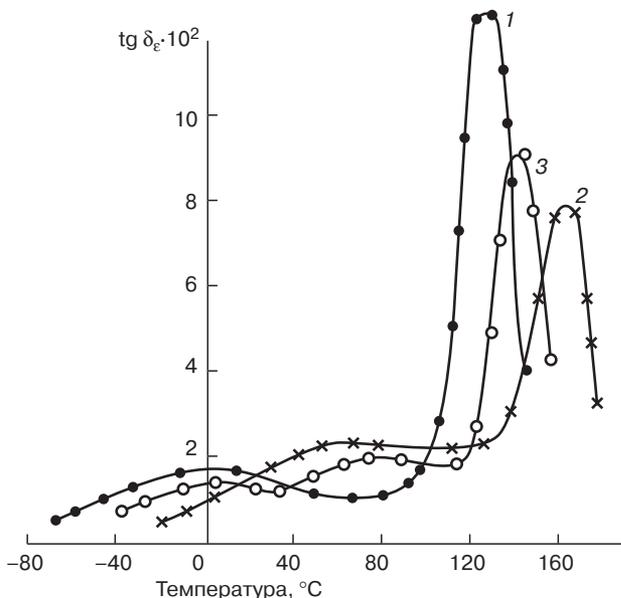


Рис. 2.27. Температурные зависимости $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ ($f = 200$ Гц) для поли-трет-бутилметакрилата различного строения [10]: 1 — изотактический; 2 — атактический; 3 — содержащий в цепи блоки изотактического и атактического строения

величине $\text{tg } \delta_{\epsilon, \text{max}}$ ДС-потерь, а также сдвиг по температуре положения максимума $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ для потерь обоих типов.

В случае несовмещающейся смеси двух (или более) полимеров каждый из компонентов смеси проявляет свои индивидуальные свойства. Значения τ и U ДС- и ДГ-потерь практически не зависят от присутствия другого полимера, а соответствующие им значения $\text{tg } \delta_{\epsilon, \text{max}}$ определяются объемным содержанием данного компонента. Диэлектрическая проницаемость ϵ' мелкодисперсных смесей при однородном распределении компонентов по объему может быть оценена по формуле $\ln \epsilon' = x \ln \epsilon'_1 + (1-x) \ln \epsilon'_2$, где ϵ'_1 и ϵ'_2 — диэлектрические проницаемости компонентов; x — объемная концентрация первого компонента.

Влияние сополимеризации двух мономеров на диэлектрические свойства зависит от характера чередования сомономерных звеньев в макромолекуле (статистическое распределение, блок- или привитые сополимеры). Диэлектрические свойства статистических сополимеров полярного и неполярного мономеров определяются соотношением количеств сомономерных звеньев в цепи и изменением внутри- и межмолекулярных взаимодействий. Диэлектрические свойства блок-сополимеров аналогичны свойствам механической смеси двух полимеров, если длины блоков достаточно велики (превышают длину кинетического сегмента). Значения ϵ' и ϵ'' привитых сополимеров определяются концентрацией компонентов, причем для каждого из компонентов сохраняются неизменными значения τ и U для ДГ- и ДС-процессов.

Образование трехмерных структур в результате поперечной «сшивки» макроцепей ограничивает подвижность полярных групп. С увеличением густоты сетки понижаются значения ϵ''_{max} , возрастают U и τ (то есть повышается температура, соответствующая ϵ''_{max}) для ДС-потерь. Влияние поперечных химических связей макромолекул на ДГ-процессы слабее, чем на ДС-процессы.

По изменению диэлектрических потерь в результате образования трехмерных структур в некоторых случаях можно контролировать отверждение эпоксидных соединений и других реактопластов.

Влияние надмолекулярной организации на диэлектрические свойства наиболее четко проявляется при изучении кристаллизующихся полимеров. Кристаллизация полимеров повышает ρ_v , влияет на значения ϵ' , U , на температурно-частотные зависимости и значения ϵ''_{max} . В кристаллических полимерах принципиально возможно наблюдение областей дипольных потерь, связанных с дипольной поляризацией в аморфных и кристаллических областях, в местах дефектной кристаллической структуры (например, вблизи границы кристаллического образования). Возможна дипольная поляризация при фазовом переходе 1-го рода, при превращении одной кристаллической модификации в другую (например, в политетрафторэтилене при комнатной температуре) или при плавлении.

На рис. 2.28 представлена температурная зависимость $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ для двух образцов полиэтилена низкой плотности (подвергнутого закалке и полученного медленным охлаждением расплава).

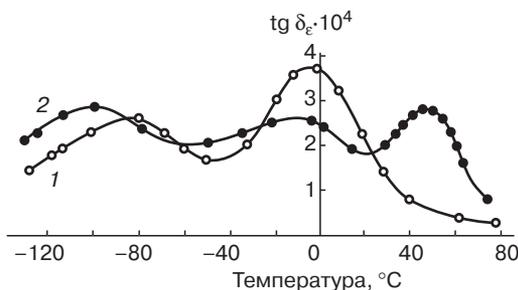


Рис. 2.28. Температурные зависимости $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ ($f = 1$ кГц) для полиэтилена низкой плотности [10]: 1 — закаленный образец; 2 — образец, полученный медленным охлаждением расплава

Закалка полиэтилена уменьшает степень кристалличности образца на 10–15%. Уменьшение кристалличности образца подавляет область низкочастотной релаксации и увеличивает значение $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ среднечастотной области, приписываемой движению цепей в дефектных областях. При этом положение максимума $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ на температурной шкале сдвигается к низким температурам. Влияние кристаллизации полярного полимера на его диэлектрические свойства обнаруживается при изучении диэлектрических потерь и проницаемости полиэтилентерефталата. Полностью аморфный и закристаллизованный образцы полимера дают качественно различные температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$. Значения $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon, \max}$ аморфного образца выше, а τ и U ниже, чем у кристаллического образца.

2.2.1.3. Зависимость диэлектрических свойств от внешних факторов

Ориентационная вытяжка и связанное с ней упорядочение укладки макромолекул приводят к появлению анизотропии ϵ' и ϵ'' и изменению τ для ДС-потерь. На потери ДГ-типа ориентационная вытяжка влияет сравнительно слабо.

Гидростатическое давление существенно повышает τ и U ДС-потерь, слабо влияя на процессы, связанные с движением боковых полярных цепочек в стеклообразном состоянии.

Пластификация снижает температуру, при которой ДГ- и ДС-потери проходят через максимум (то есть понижает τ). Действие пластификатора эффективнее в случае ДС-процесса. В зависимости от совместимости пластификатора и полимера различают межпачечную и внутripачечную пластификацию, причем их воздействие на ДС-потери (на τ ДС-процесса) сохраняет специфику, обнаруженную при изучении влияния природы пластификации на термомеханические свойства и стеклование пластифицированных полимеров. Введение неполярного пластификатора понижает значения ϵ''_{\max} для ДГ- и ДС-потерь и ϵ' вследствие уменьшения объемного содержания полярных групп. Наличие полярных пластифицирующих примесей повышает ϵ'' как в области максимальных значений, так и вне их. При высоком содержании полярного пластификатора возможно появление области максимума ϵ'' и перегиба для ϵ' при повышении температуры, связанных с релаксацией дипольной поляризации самого пластификатора.

Тщательная очистка полимера от низкомолекулярных примесей, играющих роль пластификатора (остатков растворителя, мономера, полярных спутников химических реакции), повышает удельное электрическое сопротивление и электрическую прочность и понижает диэлектрические потери.

В разбавленных и умеренно концентрированных растворах полимеров обнаружены дипольные релаксационные явления, связь которых со структурными особенностями полимера и природой растворителя выяснена еще недостаточно.

Присутствие влаги в зависимости от ее количества и характера распределения в объеме полимера вызывает резкое изменение диэлектрических свойств: понижаются E_{np} и ρ_v , возрастают диэлектрические потери, меняются температурно-частотные зависимости ϵ' и ϵ'' , наблюдается сдвиг максимумов ϵ'' для ДС- и ДГ-потерь в сторону низких температур (пластифицирующее действие воды), возможно появление дополнительных областей релаксации дипольной поляризации.

Диэлектрические свойства наиболее гидрофобных полимеров (политетрафторэтилен, в меньшей степени — полиэтилен, полистирол) при испытании в условиях повышенной влажности меняются незначительно, главным образом вследствие поверхностной конденсации воды. Гидрофильные материалы, особенно те, получение которых сопровождается образованием воды, нуждаются в тщательной сушке и герметизации в изделии, так как их диэлектрические свойства могут зависеть от влажности среды. Удаление влаги может быть затруднено образованием прочных связей воды с макромолекулой (например, водородных связей). Диэлектрические характеристики ρ_v , $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$, электрическая емкость конденсатора с данным полимером в качестве диэлектрика могут служить критерием качества сушки полимера.

Совместное действие повышенных температур и электрического поля вызывает электрическое старение полимера, которое выражается в понижении E_{np} и ρ_v и увеличении

диэлектрических потерь со временем. Причиной электрического старения является деструкция полимера, вызванная или ускоренная электрическим полем (окисление, химические превращения вследствие взаимодействия полимера с продуктами электрического разряда или под действием повышенных температур и т. д.). Старение протекает более интенсивно в образцах, имеющих посторонние включения (наполнители, воздушные пузырьки и т. п.).

Изменение диэлектрических свойств полимеров под действием радиации связано с нарушениями структуры — образованием поперечных связей, деструкцией молекул, в результате которых появляются свободные ионы и радикалы. При этом возрастают электрическая проводимость и диэлектрические потери и уменьшается E_{np} . Ионизирующее облучение ускоряет электрическое старение полимеров [5, 6, 8, 10].

2.2.1.4. Диэлектрические свойства полимерных связующих и пластиков, используемых в качестве компонентов магнитоэлектриков

Параметрами, определяющими эффективность полимеров в экранирующих и поглощающих ЭМЭ материалов, являются $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$, ϵ и электрическая прочность (возможность пробоя после поглощения высокоэнергетического ЭМИ).

Диэлектрические потери — тангенс угла — часть энергии внешнего электрического поля, которая необратимо рассеивается в диэлектрике:

$$\epsilon'' = \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta_\epsilon;$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''.$$

В зависимости от соотношения циклической частоты внешнего поля (ω) и времени релаксации (τ) ϵ^* меняется от ϵ_1 (при $\omega\tau \gg 1$) до ϵ_0 (при $\omega\tau \ll 1$), $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon$, в поле предельно высоких радиочастот, $\epsilon_0 \rightarrow \epsilon$, в низкочастотных и постоянных полях.

При $\omega\tau = 1$ ϵ заметно зависит от частоты и температуры и наблюдается значительное поглощение энергии поля, превращающейся в тепло. В этом случае

$$\epsilon^*(\omega, \tau) = \epsilon'(\omega, \tau) - i\epsilon''(\omega, \tau).$$

Значения ϵ' слабополярных и неполярных полимеров близки к n^2 — квадрату преломления световых волн (табл. 2.2).

Статическая диэлектрическая проницаемость полимеров обычно составляет 2,8–4,0; для полярных она меняется в широких пределах (от 4,0 до 80) в зависимости от строения полимера; ϵ'' уменьшается с температурой.

Диэлектрическая проницаемость пластиков и эластомеров при комнатной температуре обычно не превышает 4–7, достигая 15–20 лишь для полимеров, содержащих большое количество сильнополярных групп в боковых цепях,

Влияние строения полимера на диэлектрическую проницаемость в основном определяется значением дипольного момента отдельного звена макромолекулы и числом полярных групп в единице объема. Изменения диэлектрической проницаемости, происходящие вследствие процессов старения и окисления полимеров при действии ионизирующих облучений, обусловлены влиянием этих факторов на указанные величины.

Таблица 2.2. Диэлектрическая проницаемость ϵ' полимеров при 20 °С [10]

| Полимер | ϵ' | n^2 |
|---|-------------|-------|
| Политетрафторэтилен | 2,009 | 1,996 |
| Натуральный каучук | 2,36 | 2,27 |
| Гуттаперча | 2,400 | 2,383 |
| Полиэтилен (плотность), г/см ³ : | | |
| 0,9183 | 2,273 | 2,278 |
| 0,9200 | 2,276 | 2,282 |
| 0,9593 | 2,357 | 2,361 |

Диэлектрическая проницаемость зависит от присутствия в полимере воды. При 20 °С и частоте 1 кГц ϵ' хлопковой целлюлозы (линтер) составляет 3,2; 7,1 и 18 при относительной влажности 0, 45 и 65% соответственно. Диэлектрическая проницаемость зависит от степени кристалличности и характера надмолекулярных образований; например, ϵ' аморфного полистирола составляет 2,49–2,55, кристаллического — 2,61 (1 кГц, 20 °С). Для полиэтилена установлена эмпирическая связь диэлектрической проницаемости с плотностью полимера ρ : $\epsilon' = 2,276 + 2,01 (\rho - 0,9200)$.

Знание диэлектрической проницаемости имеет важное значение при подборе материалов в кабельной технике и конденсаторостроении. В первом случае предпочтительны материалы с малой ϵ' (слабополярные полимеры), во втором — с повышенными значениями ϵ' . При высоких частотах используются такие слабополярные диэлектрики, как полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен, полипропилен, у которых малы диэлектрические потери. Перспективно применение полимеров повышенной теплостойкости типа полиимидов (до 300–400 °С). В конденсаторах, предназначенных для использования при низких частотах или при постоянном токе, можно применять полярные полимеры с повышенными значениями ϵ' в стеклообразном состоянии.

Измерения диэлектрической проницаемости основаны на сравнении электрической емкости воздушного конденсатора и конденсатора, заполненного испытуемым диэлектриком, в электрическом поле данной частоты. Применяют двух- и трехэлектродные ячейки. Предварительно эти ячейки должны быть отградуированы по стандартному веществу с известной диэлектрической проницаемостью для определения C_0 . При испытании твердых диэлектриков C_0 может быть рассчитана по геометрическим размерам конденсатора с испытуемым диэлектриком. Так, C_0 (в пикофарадах) для плоского конденсатора равно $C_0 = 0,08854 S/h$ (где S — площадь электродов; h — расстояние между ними); для коаксиального конденсатора $C_0 = 0,2416l / (\lg r_1/r_2)$ (где l — высота цилиндрических электродов; r_1 — внутренний радиус внешнего электрода; r_2 — внешний радиус внутреннего электрода); все линейные размеры — в см.

Для измерения электрической емкости ячеек в диапазоне частот 0,01–10⁷ Гц применяют мостовые измерительные схемы и резонансные методы. При сверхвысоких частотах используют схемы с распределенными параметрами — коаксиальные линии, коаксиальные резонаторы и др.

Значения $\text{tg } \delta_\epsilon$ в области релаксации дипольной поляризации зависят от химического строения, молекулярной и надмолекулярной структуры полимера, а также от ряда внешних факторов — гидростатического давления, степени ориентационной вытяжки (ведущей к анизотропии значения $\text{tg } \delta_\epsilon$), присутствия низкомолекулярных примесей, в частности влаги. Низкомолекулярные примеси и гетерогенные включения в полимерном образце (пузыри воздуха, пыль, достаточно большие частицы низко- и высокомолекулярных веществ) могут привести к появлению дополнительных максимумов $\text{tg } \delta_\epsilon$ и дисперсии диэлектрической проницаемости, связанных с дипольной поляризацией примесных молекул или межфазной поляризацией. Вне максимумов $\text{tg } \delta_\epsilon$ уровень диэлектрических потерь не зависит или зависит слабо от ω и T и повышается при наличии в полимере полярных примесей и влаги.

Значения $\text{tg } \delta_\epsilon$ неполярных полимеров лежат в пределах от 5·10⁻⁵ до 10⁻³ (табл. 2.3) и слабо зависят от ω и T .

Вблизи и выше температуры стеклования возможен рост $\text{tg } \delta_\epsilon$ при повышении температуры, что связано с увеличением ионной проводимости полимера; в этом случае $\text{tg } \delta_\epsilon = \gamma / \omega \epsilon'$, где γ — удельная объемная электрическая проводимость полимера, экспоненциально растущая при повышении T . Значения $\text{tg } \delta_\epsilon$ полярных полимеров определяются их строением и подвижностью макромолекул и в сильной степени зависят от ω и T (табл. 2.4).

Повышенные значения $\text{tg } \delta_\epsilon$ полярных полимеров ограничивают их применение при высоких частотах поля.

$\text{tg } \delta_\epsilon$ — макроскопическая характеристика диэлектрика, получаемая путем непосредственных измерений. При частотах 10⁻²–10⁷ Гц для измерений $\text{tg } \delta_\epsilon$ используют мостовые и

Таблица 2.3. Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ некоторых неполярных полимеров при 20 °С [10]

| Полимер | Частота, Гц | $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon} \cdot 10^{-4}$ |
|----------------------------------|---------------|---|
| Полиэтилен | $10^2 - 10^8$ | 2 |
| Полистирол | $10^2 - 10^6$ | 1–4 (25 °С) |
| Политетрафторэтилен | $10^2 - 10^8$ | Менее 2 |
| Полиизопрен (натуральный каучук) | 10^3 | 10–30 |
| Полибутадиен | 10^3 | 9 |
| Полипропилен | $10^2 - 10^9$ | 1–2 |

Таблица 2.4. Значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ некоторых полярных полимеров при 20 °С [10]

| Полимер | Частота, Гц | $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ |
|-------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| Целлюлоза* | 10^3 | 0,02 |
| | 10^6 | 0,065 |
| Триацетат целлюлозы | 10^3 | 0,03 |
| Триэтилцеллюлоза | 10^3 | 0,08 |
| Полиакрилонитрил | 10^3 | 0,08 |
| | 10^6 | 0,03 |
| Полиэтилентерефталат | 10^3 | 0,005 |
| Эпоксидные смолы отвержденные | $10^3 - 10^5$ | 0,02–0,2 |
| Поликарбонаты | 10^2 | 0,001 |
| | 10^6 | 0,01 |
| Полипиромеллитимид | $10^2 - 10^6$ | 0,003 |
| Полиуретаны | 10^3 | 0,001 |
| Полivinилхлорид | 10^2 | 0,02 |

* Измерения при относительной влажности воздуха 65%.

резонансные схемы, при более высоких частотах — схемы с распределенными параметрами (измерительные линии, резонаторы).

Электрическая прочность — минимальная напряженность внешнего электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика, то есть диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства и в нем образуется проводящий канал. В однородном электрическом поле электрическая прочность $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/h$, где $U_{\text{пр}}$ — электрическое напряжение пробоя (пробивное напряжение), h — толщина образца.

Исследование на пробой можно проводить в постоянном поле, переменном поле при плавном повышении напряжения, а также при импульсных испытаниях (табл. 2.5). Для изучения электрического старения и надежности электрической изоляции диэлектрик выдерживают под напряжением длительное время (сотни и тысячи часов).

Физическую природу пробоя изучают в условиях исключения разрядов у краев электродов, а также частичных разрядом в газовых прослойках между электродами и образцом. Для этого используют плоские образцы со сферической выемкой либо пленки, помещаемые между сферическими электродами, с заполнением всех зазоров эпоксипластом. В таких условиях $E_{\text{пр}}$ практически не зависит от толщины образца.

С повышением температуры T величина $E_{\text{пр}}$ большинства полимеров обычно снижается, особенно резко в области температуры стеклования для аморфных полимеров и температуры плавления для кристаллических (рис. 2.29). При комнатной и более низких температурах

Таблица 2.5. Электрическая прочность некоторых полимеров (технические испытания в переменном поле частотой 50 Гц при непрерывном повышении напряжения; температура 25 °С) [10]

| Полимер | Толщина образца, мм | Электрическая прочность, кВ/мм |
|---|---------------------|--------------------------------|
| Полиэтилен | 2 | 28–36 |
| Полипропилен | 1 | 28–40 |
| Полистирол | 2 | 20–25 |
| Политетрафторэтилен | 0,02 | 150–180 |
| | 4 | 25–47 |
| | 0,1–0,3 | 40–80 |
| Поликарбонат | 2 | 21–23 |
| Полиформальдегид | 2 | 27–31 |
| Поливинилхлорид | 2 | 35–45 |
| Феноло-формальдегидная смола отвержденная | 4 | 15–18 |
| Поли-ε-капроамид | 2 | 22 |
| Полиэтилентерефталат | 0,02 | 350–450 |
| Полипиромеллитимид | 0,04 | 100–275 |

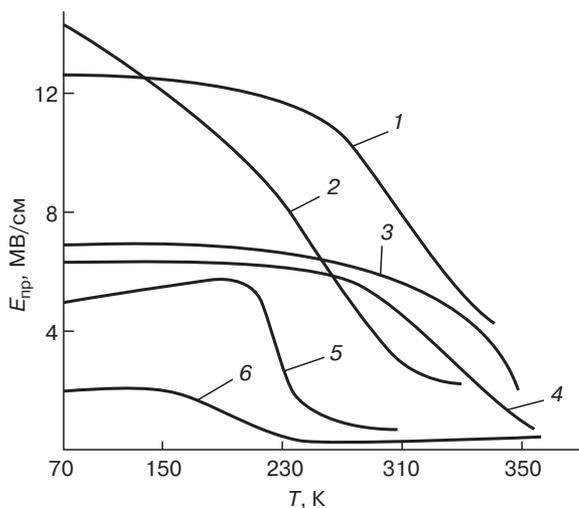


Рис. 2.29. Зависимость электрической прочности $E_{нр}$ от температуры T для полиметилметакрилата (1), поливинилового спирта (2), полистирола (3), полиэтилена (4), полиизобутилена (5) и кремний-органического каучука (6) [10]

полярные полимеры имеют более высокую электрическую прочность (10–15 МВ/см), чем неполярные (5–7 МВ/см). С повышением жесткости полимера (например, в результате радиационного «сшивания» полиэтилена) зависимость $E_{нр} = f(T)$ становится менее резкой. При импульсных испытаниях эта зависимость также слабо выражена. При комнатной температуре в области малых длительностей τ воздействия импульсов ($5 \cdot 10^{-9}$ с) для образцов малой толщины ($h < 50$ мкм) $E_{нр}$ возрастает с уменьшением τ и h .

Резкое снижение $E_{пр}$ с температурой и зависимость $E_{пр} = f(\tau)$ может свидетельствовать о тепловой форме пробоя. Это подтверждается и расчетами, в которых учитывается зависимость удельной электрической проводимости от напряженности электрического поля. Другая возможная причина температурной зависимости $E_{пр}$ — электромеханическое сжатие полимеров в области высокоэластического состояния.

При технических испытаниях обычно применяют такие электродные устройства, которые не устраняют краевых и частичных разрядов. Это приводит к резкому искажению поля и снижению $U_{пр}$, вызывает рост древовидных каналов неполного пробоя (дендритов) и разрушение (эрозию) полимерных пленок. Под действием разрядов происходит электрическое старение полимерной изоляции, завершающееся пробоем к моменту $\tau_{ж}$ (время жизни), $\tau_{ж} = B_p E^{-m_i}$, где B_p , m_i — характеристики полимера, принимающие различные значения для двух интервалов напряженности поля — $E < E^*$ ($i = 1$) и $E > E^*$ ($i = 2$).

В переменном поле при $E < E^*$ время жизни $\tau_{ж}$ обратно пропорционально частоте, а в постоянном поле зависит от температуры по формуле $\tau_M = \tau_0 e^{\Delta W/kT}$, где τ_0 — предэкспоненциальный множитель; ΔW — коэффициент, значение которого для разных полимеров находится в пределах 0,5–2,0 эВ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Соотношения для $\tau_{ж}$ могут применяться для прогнозирования надежности электрической изоляции.

Для полимеров в стеклообразном состоянии внутренний пробой может наблюдаться при низких температурах при постоянном напряжении, действующем короткое время. Ниже приведены значения $E_{пр}$ (МВ/м или кВ/мм) при внутреннем пробое некоторых полимеров, используемых в качестве электроизолирующих материалов: полиэтилен — 650, полистирол — 600, полиизобутадиеп — 100, поливиниловый спирт — 300, поливинилхлорид пластифицированный — 650, полиметилметакрилат — 1000, целлюлоза — до 320.

Значения $E_{пр}$ снижаются, если в полимере имеются трещины или он содержит влагу, воздух, химические примеси, вызывающие перераспределение напряженности поля внутри диэлектрика. Наиболее частая причина пробоя полимерных диэлектриков — нагрев в местах неоднородностей или ионизация воздушных включений. Возможны также нарушения электрической прочности поверхности полимера под действием поверхностных электрических разрядов, особенно при наличии поверхностных загрязнений и влаги.

Для исследования пробоя полимеров в неоднородных полях применяют электроды с малым радиусом кривизны — игольчатые или сферические. В этом случае $U_{пр}$ нелинейно возрастает с увеличением расстояния между электродами и ростом радиуса кривизны электрода, а также зависит от полярности электродов ($U_{пр}$ при отрицательной полярности иглы выше, чем при положительной, как и для неполимерных диэлектриков). Рассчитанное по формулам электростатики значение E_{max} у поверхности острия выше $E_{пр}$, определенной в однородном поле. Это объясняется ослаблением напряженности поля у острия вследствие инжекции носителей зарядов из электрода или возрастанием электрической проводимости полимера в сильных электрических полях. Зависимость $U_{пр}$ от полярности электродов может быть обусловлена в основном ударной ионизацией электронами.

В качестве диэлектрических компонентов в магнитоэлектриках используют полимерные связующие на основе термо- и реактопластов, пенопласты и пенорезины, сферопласты (синтактные пены с наполнителями в виде полых микросфер из диэлектриков — стеклянные, кварцевые, корундовые Al_2O_3 , фенольные и др.). Их диэлектрические свойства приведены в таблицах 2.6–2.17 и на рис. 2.30–2.36.

В целом ряде многофункциональных конструкций находят применение стекло- и органо(кевларо)пластики, выполняющие в магнитоэлектрических материалах функцию диэлектрической компоненты (наряду с конструкционными, теплозащитными и другими свойствами), табл. 2.18–2.23; рис. 2.37, 2.38.

Большой интерес для магнитоэлектриков, работающих под воздействием высокоэнергетических потоков ЭМЭ и связанном с этим значительным тепловыделением, имеют материалы

Таблица 2.6. Электрические свойства полимеров при частоте 10^6 Гц [6, 10 74, 75, 154]

| Типы полимеров | Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·см | Диэлектрическая проницаемость ϵ | Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_\epsilon$ | Электрическая прочность, кВ/мм |
|-------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| Аполярные термопласты: | | | | |
| Полиэтилен | $10^{15}-10^{17}$ | 2,3 | 0,0002 | 18–20 |
| Фторопласт-4 | $10^{15}-10^{16}$ | 2 | 0,0002 | 20–30 |
| Полистирол | $10^{17}-10^{18}$ | 2,45–2,65 | 0,0001–0,0003 | 20–35 |
| Полярные термопласты: | | | | |
| Фторопласт-3 | 10^{15} | 2,5 | 0,015–0,01 | 20–25 |
| Поливинилхлорид | $10^{14}-10^{16}$ | 3–5 | 0,05–0,08 | 14–20 |
| ПММА | $10^{17}-10^{18}$ | 5,5–4,5 | 0,04–0,06 | 18–35 |
| Полиамиды | 10^{13} | 4,1 | 0,014–0,04 | 15 |
| Реактопласты: | | | | |
| Полиэфирсы | $10^{13}-10^{14}$ | 3–4 | 0,003–0,03 | 15–18 |
| Эпоксидные | $10^{13}-10^{14}$ | 3,7–3,9 | 0,001–0,02 | 16 |
| Кремнийорганические | $10^{14}-10^{16}$ | 3–5 | 0,001–0,05 | 18 |
| Фенолоформальдегидные | $10^{11}-10^{12}$ | 4,5–6,5 | 0,03–0,1 | 12–16 |
| Меламиноформальдегидные | $10^{12}-10^{13}$ | 3,5–9,5 | 0,05 | 12–16 |

Таблица 2.7. Электрические свойства волокон (вдоль оси) [74]

| Волокна | ρ_v , Ом·м, | $\text{tg } \delta_\epsilon$, при 10 Гц |
|----------------------------|------------------|--|
| Стекланные | 10^9-10^{12} | 0,001–0,02 |
| Оксидные (β -рутил) | 10^9-10^{11} | 0,015–0,03 |
| Органические (арамидные) | 10^9-10^{12} | 0,01–0,02 |
| Борные | 10^8-10^{10} | 0,02–0,03 |
| Углеродные: | | |
| Карбонизованные | 10^2-10^5 | 0,2–0,4 |
| Графитированные | 1–10 | 0,2–0,45 |

Таблица 2.8. Зависимость ϵ' некоторых полимеров от частоты [10]

| Тип полимера | Частота, Гц ¹ | | |
|------------------------------------|--------------------------|--------|----------------|
| | 10^3 | 10^6 | $3 \cdot 10^9$ |
| Полистирол атактический | 2,56 | 2,56 | 2,55 |
| Полиизобутадиен | 2,23 | 2,23 | 2,23 |
| Полипропилен | 2,26 | 2,26 | 2,25 |
| ПТФЭ | 2,1 | 2,1 | 2,1 |
| ПММА | 2,84 | 2,63 | 2,58 |
| ПЭТФ | 3,12 | 2,98 | – |
| Эпоксидные (холодного отверждения) | 4,4–4,8 | – | – |
| Полиуретаны | 6,7–7,5 | – | – |
| Полиэтилены, плотность: | | – | – |
| 0,9183 г/см ³ | 2,273 | – | – |

Окончание табл. 2.8

| Тип полимера | Частота, Гц ¹ | | |
|--------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|
| | 10 ³ | 10 ⁶ | 3·10 ⁹ |
| 0,9200 г/см ³ | 2,276 | — | — |
| 0,9593 г/см ³ | 2,375 | — | — |

¹ В качестве высокочастотных диэлектриков используются слабополярные полимеры: ПС, ПЭ, ПТФЭ, ПЭ, полифениленоксиды (до 10¹¹ Гц) [62, 63].

Таблица 2.9. Электрические свойства термопластичных полимеров при 20°С [75]

| Полимеры | ρ_v , Ом·см | Электрическая прочность, кВ/мм | ϵ при 50 Гц | $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 50 Гц |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------|--|
| Неполярные: | | | | |
| Полиэтилен | 10 ¹⁷ –10 ¹⁹ | 28–36 | 2,1–2,4 | 2·10 ⁻⁴ –5·10 ⁻⁴ |
| Полипропилен | 10 ¹⁶ –10 ¹⁷ | 28–40 | 2,0–2,2 | 2·10 ⁻⁴ –5·10 ⁻⁴ |
| Полибутен-1 | 10 ¹⁷ | 25–34 | 2,20 | 3·10 ⁻⁴ |
| Полиметилпентен | 10 ¹⁶ | 26–38 | 2,12 | 2·10 ⁻⁴ |
| Политетрафторэтилен | 10 ¹⁷ –10 ²⁰ | 25–27 | 2,0 | 2·10 ⁻⁴ |
| Полистирол | 10 ¹⁷ | 20–25 | 2,5–2,7 | 2·10 ⁻⁴ –4·10 ⁻⁴ |
| Слабополярные: | | | | |
| Полифениленоксид | 10 ¹⁷ | 17–18 | 2,5–2,6 | 3·10 ⁻⁴ –9·10 ⁻⁴ |
| Полисульфон | 10 ¹⁶ | 19 | 3,14 | 5·10 ⁻⁴ |
| Поликарбонат | 10 ¹⁶ | 16–35 | 3,17 | 3·10 ⁻⁴ –9·10 ⁻⁴ |
| Полиарилат | 10 ¹⁵ –10 ¹⁶ | — | 3,17 | 1,8·10 ⁻² |
| Политрифторхлорэтилен | 10 ¹⁸ | 13–15 | 2,6–3,0 | 2·10 ⁻³ |
| Пентапласт | 10 ¹⁸ | 13–15 | 2,6–3,0 | 2·10 ⁻³ |
| Сильнополярные: | | | | |
| Поливинилхлорид | 10 ¹⁵ –10 ¹⁷ | 45 | 3,24 | 2·10 ⁻² –6·10 ⁻² |
| Полиметилметакрилат | 10 ¹⁴ –10 ¹⁵ | 16–20 | 3,5–4,5 | 5·10 ⁻² –6·10 ⁻² |
| Полиамид 6 | 10 ¹³ –10 ¹⁵ | 16–19 | 4,5–11,5 | 3·10 ⁻² –7·10 ⁻² |
| Полиамид 6,6 | 10 ¹³ | 15–16 | 4,1–7,6 | 3·10 ⁻² –7·10 ⁻² |
| Полиформальдегид | 10 ¹³ –10 ¹⁴ | 3,3–3,7 | 3,3–3,7 | 1·10 ⁻² –4,5·10 ⁻³ |

Таблица 2.10. Диэлектрические свойства полиэтиленов [10]

| Свойства | ПЭВД | ПЭНД | ПЭСД |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| ϵ , 1 МГц | 2,2–2,3 | 2,2–2,4 | 2,3–2,4 |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$, 1 кГц–1 МГц | (2–3)·10 ⁻⁴ | (2–4)·10 ⁻⁴ | (2–4)·10 ⁻⁴ |
| ρ_v , Ом·м | 10 ¹⁷ –10 ¹⁸ | 10 ¹⁷ –10 ¹⁸ | 10 ¹⁷ –10 ¹⁸ |
| ρ_s , Ом | 10 ¹⁵ | 10 ¹⁵ | 10 ¹⁵ |

Таблица 2.11. Диэлектрические свойства материалов на основе полиэтилена и поливинилхлорида [79]

| Полимер | Плотность, г/см ³ | ϵ , 10 ⁶ Гц | $\text{tg } \delta_\epsilon$, 10 ⁶ Гц | Электрическая прочность, кВ/мм | ρ_v , Ом·см |
|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|--------------------------------|---------------------|
| Низковспененный полиэтилен | 0,45–0,47 | 1,48–1,50 | 0,0008 | 9,0–9,5 | $4,5 \cdot 10^{16}$ |
| Монолитный полиэтилен | 0,92 | 2,2–2,3 | 0,0004 | 20–30 | $5,1 \cdot 10^{16}$ |
| ПХВ-1 | 0,07–0,13 | 1,6 | 0,015 | 3,9 | — |
| ПХВ-2 | 0,13–0,22 | 1,8 | 0,16 | 4,1 | — |
| ПВ-1 | 0,5–0,11 | — | — | — | — |
| Винипор (эластичный) | 0,10–0,12 | 1,0–1,2 | 0,0088 | — | — |

Таблица 2.12. Свойства линейных полимеров в составе термопластов [75]

| № | Наименование полимера, обозначение | Характерное звено | Степень кристалличности, % | Температура плавления, °С | Температура стеклования, °С | Плотность ρ , г/см ³ | КЛТР α , 10 ⁻⁶ °С ⁻¹ | Диэлектрическая проницаемость ϵ | Влагопоглощение, %масс. |
|-----------------------------|------------------------------------|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|--|-------------------------|
| <i>Полимеры 1-ой группы</i> | | | | | | | | | |
| 1 | Полистирол, ПС | $\begin{array}{c} \text{---CH}_2\text{---CH---} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$ | 0 | — | 90–110 | 1,05 | 60 | 2,5 | 0,0 |
| 2 | Полиметилметакрилат, ПММА | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{---CH}_2\text{---CH---} \\ \\ \text{O=C---OC} \end{array}$ | 0 | — | 100–115 | 1,18 | 80 | 4,0 | 0,2 |
| 3 | Поливинилхлорид, ПВХ | $\begin{array}{c} \text{---CH}_2\text{---CH---} \\ \\ \text{Cl} \end{array}$ | 10–15 | 175–310 | 70–90 | 1,35 | 70 | 3,2 | 0,03 |

| | | | | | | | | | |
|----|--------------------------------------|--|-------|-----|---------|------|-------|------|------|
| 4 | Полифениленоксид, ПФО | | 15–20 | 267 | 200–210 | 1,06 | 30 | 2,5 | 0,18 |
| 5 | Полисульфон, ПСН, <i>Udel</i> | | 0–10 | – | 180–190 | 1,2 | 65 | 3,2 | 0,4 |
| 6 | Поликарбонат, ПК | | 0–20 | 275 | 140–150 | 1,2 | 65 | 3,2 | 0,4 |
| 7 | Полифениленамид, фенилон | | 0–10 | 310 | 275 | 1,33 | 35 | 9,5 | 2,7 |
| 8 | Поли- <i>p</i> -бензоат, аропласт | | 10–20 | 421 | 340 | 1,44 | – | 3,82 | 0,2 |
| 9 | Полиэфируретан, ПУ-1 | | 15–20 | 285 | 140 | 1,20 | 130 | 4,5 | 2,0 |
| 10 | Полиэфирсульфон, ПЭС | | 0 | – | 230 | 1,37 | 45–60 | 3,1 | 0,5 |

Полимеры 2-ой группы

| | | | | | | | | | |
|----|-----------------------------------|--|-------|-----|----|---------------|----|-----|-----|
| 11 | Поликапроамид, ПА-6 | | 40–60 | 225 | 70 | 1,13– 1,14 | 90 | 7,9 | 6,5 |
| 12 | Политрифторхлорэтил- лен, ПТФХ | | 30–40 | 210 | 60 | 2,09– 2,16 | 70 | 2,6 | 0 |

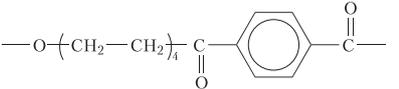
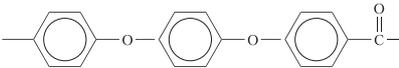
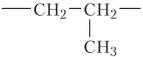
| № | Наименование полимера, обозначение | Характерное звено | Степень кристалличности, % | Температура плавления, °С | Температура стеклования, °С | Плотность ρ , г/см ³ | КЛТР α , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | Диэлектрическая проницаемость ϵ | Влагопоглощение, %масс |
|----|------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|--|------------------------|
| 13 | Полибутилентерефталат, ПБТФ |  | 40–50 | 207 | 43 | 1,27 | – | 2,6 | 0,3 |
| 14 | Полиэфирэфиркетон, ПЭЭК |  | 25–40 | 380 | 145 | 1,32 | – | 4,0 | 0,22 |
| 15 | Полиэтилен, ПЭ | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ | 60–85 | 120–145 | 60–85 | 0,918–0,955 | 140–210 | 2,1–2,3 | 0,0 |
| 16 | Полипропилен, ПП |  | 40–70 | 165–170 | –10 | 0,9–0,91 | 110–140 | 2,4 | 0,03 |
| 17 | Политетрафторэтилен, ПТФЭ | $-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$ | 70–95 | 327 | –120 | 2,14–2,2 | 250 | 1,9–2,0 | 0,0 |
| 18 | Полиоксиметилен, ПОМ | $-\text{O}-\text{CH}_2-$ | 60–80 | 175 | 83 | 1,42 | 130 | 3,5 | 0,8 |

Таблица 2.13. Диэлектрические свойства резин [10]

| Свойства | Тип (I или II) каучука в резине | | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| | натуральный НК | | СКС-30 | | бутилкаучук | | СКН-26 |
| | I | II | I | II | I | II | I |
| ρ , г/см ³ | 0,92–1,0 | 1,12 | 0,93 | 1,14 | 0,93–0,97 | 1,16 | 0,962 |
| ϵ при 10^3 Гц | 2,45–2,68 | 15–20 | 2,9 | – | 2,2–2,4 | – | 10,2 |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 10^3 Гц | $1,8 \cdot 10^{-3}$ | 0,1 | $0,9 \cdot 10^{-3}$ | – | $(0,4–0,9) \cdot 10^{-3}$ | – | 0,31 |
| Проводимость, γ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ | $(2–100) \cdot 10^{-17}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$ | – | $9 \cdot 10^{-7}$ | $4,8 \cdot 10^{-16}$ | $5,3 \cdot 10^{-4}$ | $3,3 \cdot 10^{-10}$ |

Таблица 2.14. Значения ρ_V [ТОМ·м (Ом·см)] полимеров при 200 °С [10]

| | |
|--------------------------------|--|
| Полиизопрен | 300 (3·10 ¹⁶) |
| Эпоксидные смолы, отвержденные | 100 (3·10 ¹⁶) |
| Политетрафторэтилен | 1000 (10 ¹⁷) |
| Полиамиды | 0,001–10 (10 ¹¹ –10 ¹⁵) |
| Поликарбонаты | 10–100 (10 ¹⁵) |
| Полиимиды | 10–100 (10 ¹⁵ –10 ¹⁶) |
| Полифениленоксид | 1000 (10 ¹⁷) |
| Поливинилхлорид | 0,001–100 (10 ¹¹ –10 ¹⁶) |
| Полиэтилен | 1000–10000 (10 ¹⁷ –10 ¹⁸) |

Таблица 2.15. Диэлектрические свойства некоторых полимерных материалов [10]

| | |
|---|---|
| ПЭТФ пленки: | |
| $\epsilon / \text{tg } \delta_\epsilon, 50 \text{ Гц}$ | 3,0–3,2 / 3,5·10 ⁻³ |
| $\epsilon / \text{tg } \delta_\epsilon, 10^3 \text{ Гц}$ | 2,9–3,1 / 5,5·10 ⁻³ |
| $\epsilon / \text{tg } \delta_\epsilon, 10^6 \text{ Гц}$ | 2,8–2,9 / 18,0·10 ⁻³ |
| $\rho_S, \text{ Ом}$ | 10 ¹⁴ |
| $\rho_V, \text{ Ом·см}$ | 10 ¹⁶ –10 ¹⁷ |
| Фенилон: | |
| $\rho_V, 20 \text{ °С}$ | 1,3·10 ¹⁴ |
| $\rho_V, 20 \text{ °С (после 1000 ч при 200 °С)}$ | 1,3·10 ¹⁴ |
| $\rho_V, 220 \text{ °С}$ | 5,5·10 ¹³ |
| $\rho_V, 200 \text{ °С 1000 ч}$ | 3,5·10 ¹³ |
| $\rho_S, 20 \text{ °С} / 220 \text{ °С}$ | 1,2·10 ¹⁴ / 4·10 ¹³ |
| $\text{tg } \delta_\epsilon, 10^3 \text{ Гц}$ | 0,015 |
| $\epsilon, 10^3 \text{ Гц}$ | 5,5 |
| Полипропилен: | |
| $\epsilon, 10^6 \text{ Гц}$ | 2 |
| $\rho_V, \text{ Ом·см}$ | 10 ¹⁴ |
| $\text{tg } \delta_\epsilon, 10^6 \text{ Гц}$ | (3–5)·10 ⁻⁴ |
| ПТФЭ ($\eta 10^{11}$ пз при 380 °С): | |
| $\rho_V, \text{ Ом·см}$ | 10 ¹⁷ –10 ²⁰ |
| $\rho_S, \text{ Ом}$ | 10 ¹⁷ |
| $\epsilon / \text{tg } \delta_\epsilon, 60 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ | 1,9–2,2 / 0,0002–0,00025 |
| $\epsilon / \text{tg } \delta_\epsilon, 10^8 \text{–} 10^{10} \text{ Гц}$ | 2,0 / 0,0002 |

Окончание табл. 2.15

| | |
|-----------------------------------|--|
| Полиимид типа СП-1: | |
| ρ_v , 20 °С, Ом·см | $10^{16}-10^{17}$ |
| ρ_v , 200 °С, Ом·см | $10^{13}-10^{14}$ |
| $\text{tg } \delta_e$, при 50 Гц | 0,0025 |
| ПЭЭК [72]: | |
| ϵ , 1 кГц | 3,3 |
| $\text{tg } \delta_e$, 1 кГц | 0,003 |
| ρ_v , Ом·см | $4,9 \cdot 10^{16}$ $1,4 \cdot 10^5$ (с 30% углеродных волокон) |

Таблица 2.16. Диэлектрические свойства пенополистиролов и полипеноуретанов [10]

| Свойства | Пенополистиролы | | | Пенополиуретаны* | |
|--|-----------------|---------------|---------------|------------------|---------------|
| | ПС-1 | ПС-4 | ПСБ-6 | ПУ-101 | ПУ-100Т |
| ρ , кг/м ³ | 10–200 | 40–65 | 15–50 | 100–200 | 150–250 |
| ϵ при 10^{10} Гц | 1,1–1,28 | 1,08–1,15 | 1,06–1,12 | 1,1–1,2 | 1,1–1,3 |
| $\text{tg } \delta_e$ при 10^{10} Гц | 0,0012–0,0024 | 0,0015–0,0020 | 0,0012–0,0020 | 0,0015 | 0,0016–0,0020 |

* Диэлектрические свойства полиуретановых эластомеров (литьевые и ТЭП) [10]:

 ρ_v , Ом·см $2 \cdot 10^9-4 \cdot 10^{12}$; $\text{tg } \delta_e$, 50 Гц 0,027–0,031;

1 МГц 0,032–0,059.

Таблица 2.17. Свойства пенопластов на основе диановых эпоксидных отвержденных смол (порофоры – фреоны) [10]

| Свойства | Тип отвердителя | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Алифатический полиамин | Ароматический полиамин | $\text{BF}_3 \cdot \text{NR}_3$ | $\text{BF}_3 \cdot \text{HOR}$ |
| ρ , кг/м ³ | 60–200 | 80–300 | 30–300 | 20–50 |
| Электрическая прочность, кВ/мм | 3,0–3,5 | 3,0–5,0 | 3,0–5,0 | – |
| ϵ при 10^6 Гц | 1,07–1,35 | 1,10–1,50 | – | 1,05–1,10 |
| $\text{tg } \delta_e$ при 10^6 Гц | 0,002–0,006 | 0,002–0,007 | – | 0,001–0,002 |

Диэлектрические свойства отвержденных эпоксидных диановых реактопластов:

 ϵ , 1 МГц, 3,5–5; ρ_v $10^{14}-10^{16}$ Ом·см; ρ_s $10^{12}-10^{14}$ Ом; $\text{tg } \delta_e$ (1 МГц) 0,01–0,03.

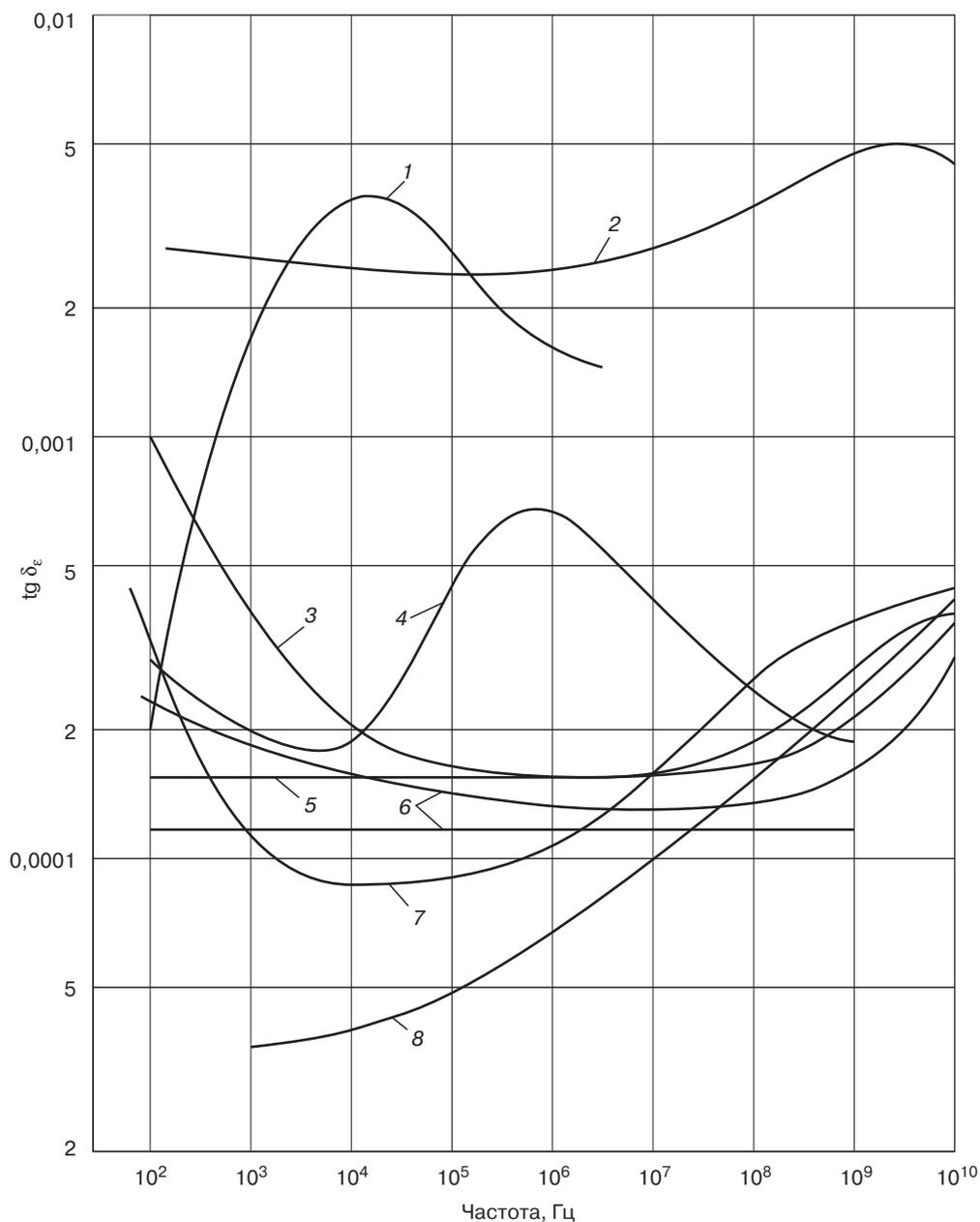


Рис. 2.30. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь некоторых неполярных полимеров от частоты [5]:

1 — полистирол при 25 °С; 2 — полиэтилен при 25 °С; 3 — политетрафторэтилен при 100 °С; 4 — сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена (*PEP* фирмы *DuPont*); 5 — полиэтилен при 25 °С; 6 — политетрафторэтилен при 23 °С; 7 — полиизобутилен при 25 °С; 8 — полистирол при 25 °С

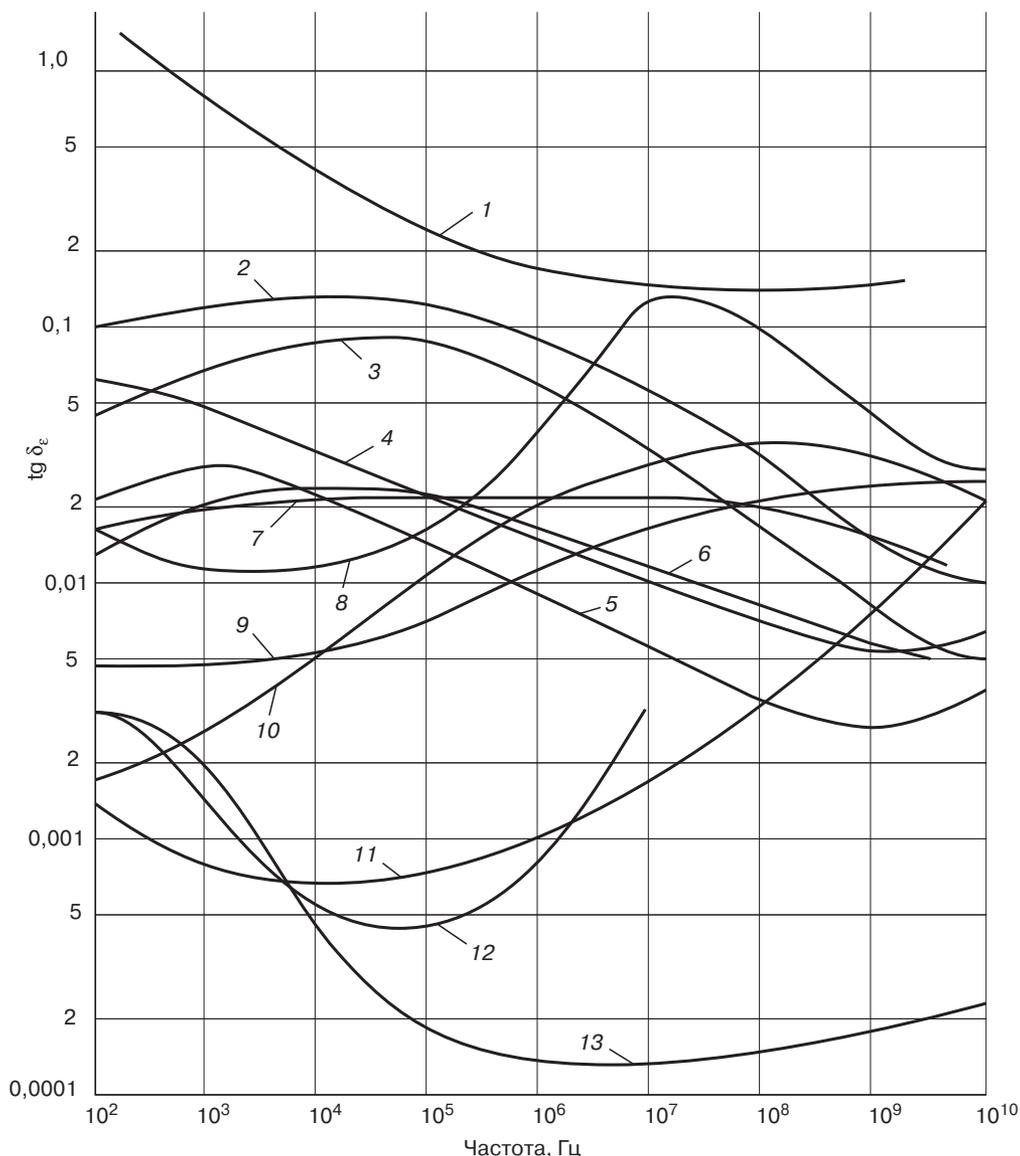


Рис. 2.31. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для полярных полимеров при 25 °С от частоты [5]:

1 — фенольный отвержденный реактопласт; 2 — пластифицированный поливинилхлорид; 3 — сополимер винилхлорида с винилиденхлоридом; 4 — полиметилметакрилат; 5 — политрифторхлорэтилен; 6 — непластифицированный поливинилхлорид; 7 — гексаметиленадипамид (*Naylon*, ПА-6); 8 — композиция на основе полимера 2-хлорбутадиена (неопрен); 9 — пластифицированная этилцеллюлоза; 10 — литевая композиция на основе эпоксидного связующего; 11 — силиконовый каучук SE-500; 12 — пенополиуретан с плотностью 0,033 г/см³; 13 — сополимер стирола (50%) и хлорированного дифенила (50%)

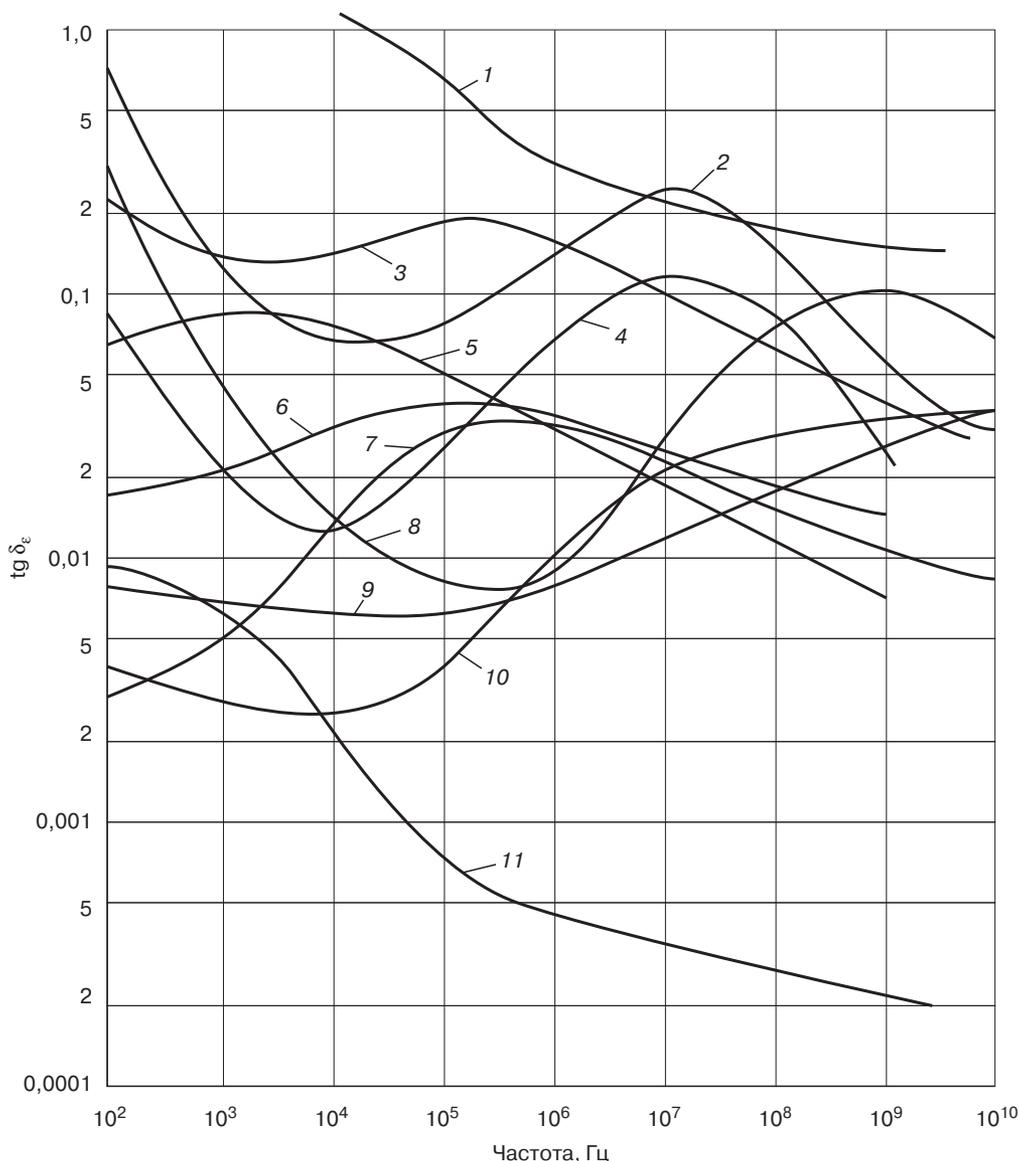


Рис. 2.32. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь для полярных полимеров при 80°C от частоты [5]:

1 — фенольный отвержденный реактопласт; 2 — пластифицированный поливинилхлорид; 3 — гексаметиленадипамид (*Nylon*, ПА-6); 4 — сополимер винилхлорида с винилиденхлоридом; 5 — полиметилметакрилат; 6 — неластифицированный поливинилхлорид; 7 — политрифторхлорэтилен; 8 — композиция на основе полимера 2-хлорбутадиена (неопрен); 9 — пластифицированная этилцеллюлоза; 10 — литьевая композиция на основе эпоксидного связующего (*Araldit B* фирмы *Ciba-Geigy*); 11 — сополимер стирола (50%) и хлорированного дифенила (50%)

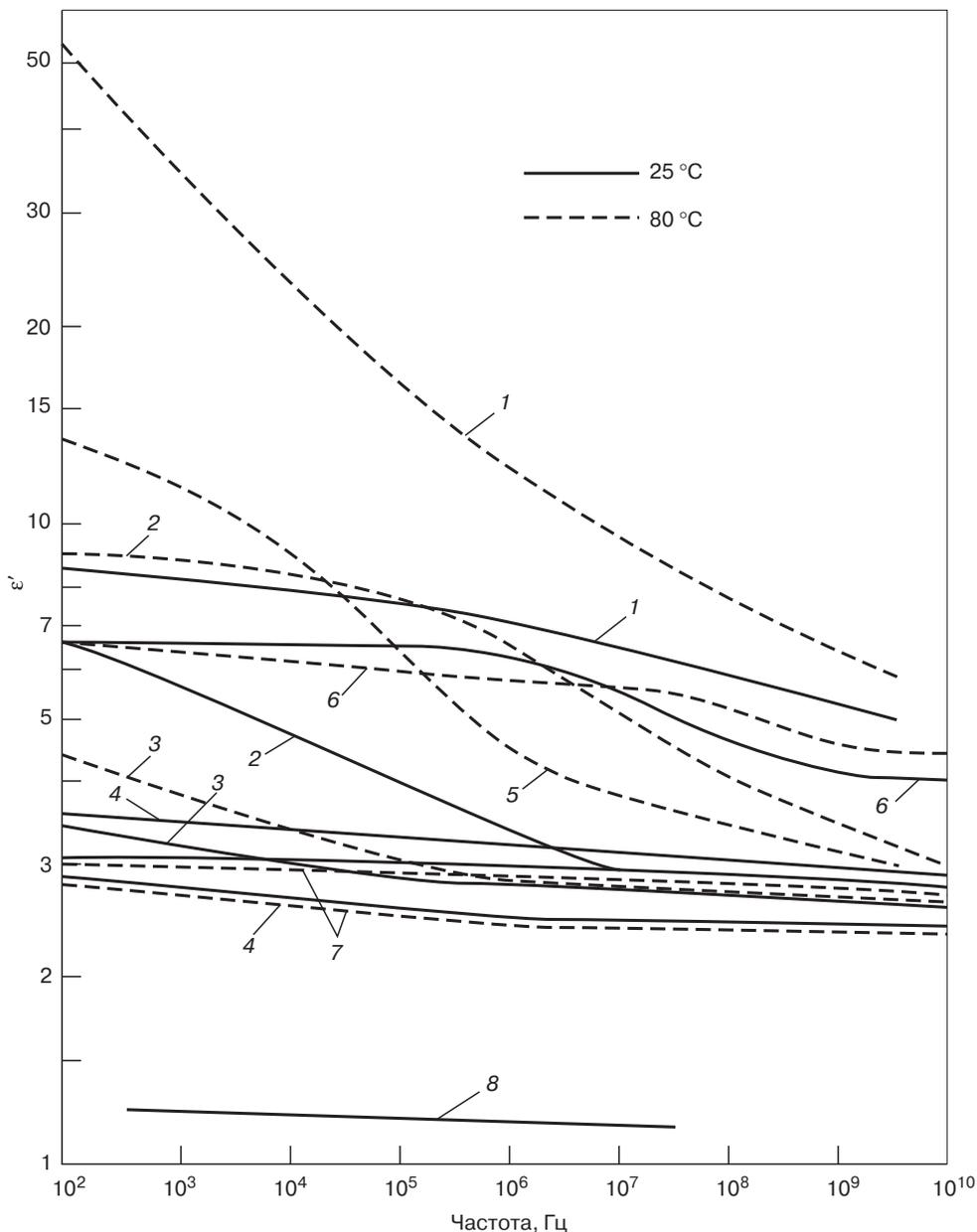


Рис. 2.33. Зависимость диэлектрической проницаемости некоторых полярных полимеров от частоты [5]:

1 — прессованный отвержденный фенопласт; 2 — пластифицированный поливинилхлорид; 3 — полиметилметакрилат; 4 — политрифторхлорэтилен; 5 — гексаметиленадипамид (*Nylon*, ПА-6); 6 — композиция на основе полимера 2-хлорбутадиена (неопрен); 7 — пластифицированная этилцеллюлоза; 8 — 50% полистирола + 50% хлорированного дифенила

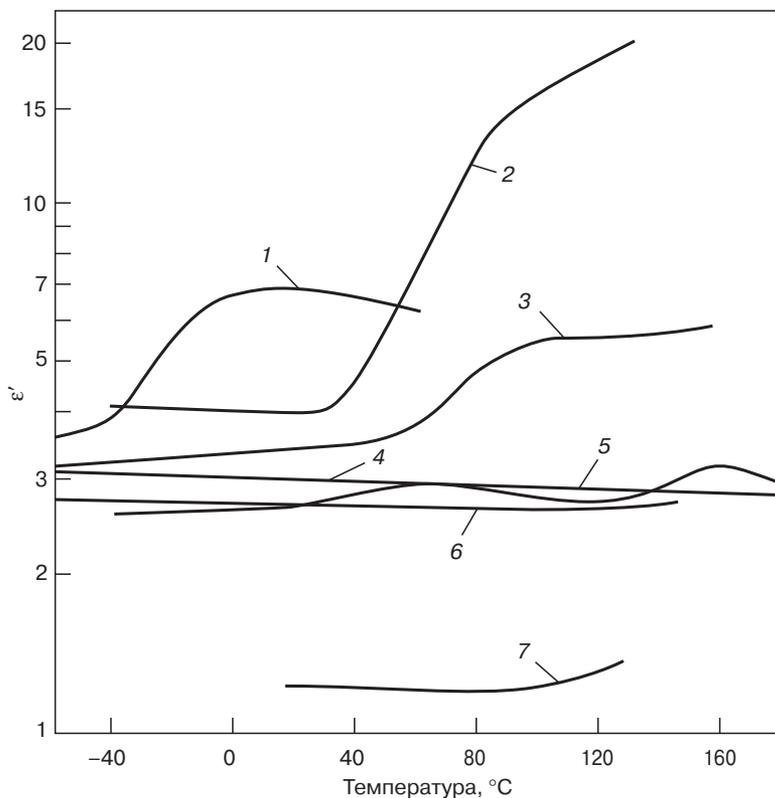


Рис. 2.34. Зависимость диэлектрической проницаемости некоторых полярных полимеров при частоте 1000 Гц от температуры [5]:

1 — полиуретановый каучук; 2 — гексаметиленадипамид (*Nylon-6*, ПА-6); 3 — литьевая полиэфирная композиция; 4 — поликарбонат; 5 — политрифторхлорэтилен; 6 — поли-*p*-хлорстирол; 7 — пенополиуретан плотностью 0,033 г/см³

на основе теплостойких (табл. 2.26) и огнестойких (табл. 2.27) полиариленов и полигетероариленов (табл. 2.24). Термопластичные теплостойкие полимеры перерабатываются при температурах до 400 °С (табл. 2.25, 2.28), имидореактопласты — при температурах 250–350 °С, их диэлектрические свойства стабильны и высоки в широком диапазоне температур и частот (табл. 2.29–2.37; рис. 2.39, 2.40). Например, материалы на основе полифениленоксида (Арилоксы, *Noryl*) имеют стабильные и высокие свойства при температурах от –200 до +200 °С при частотах 10–10¹¹ Гц (теплостойкий термопласт для СВЧ) (табл. 2.12, 2.29, 2.30; рис. 2.39). Полиимиды являются среднечастотными диэлектриками в интервале температур от –200 до +350 (400)°С, модифицированные — до 450 °С. Например, пенополиимид, ППИ-2 на основе полиимида структуры 8Б (табл. 2.24) используют в радиопрозрачных укрытиях для мощных излучающих антенн [53]. Разработаны синтактные пенопласты на основе полиимида 2080 (табл. 2.24, 8) [53–57]. Наряду с традиционными термопластами теплостойкие используют при изготовлении электропроводящих экранирующих и антистатических композиций и композиций для экранирования высокочастотных электромагнитных полей [58, 59, 138].

Наиболее полное представление о диэлектрических свойствах полимеров дают так называемые контурные карты, представляющие собой проекции трехмерных диаграмм на

плоскость. С помощью таких карт можно видеть зависимость того или иного электрического параметра системы одновременно от двух независимых переменных. Типичные температурные и частотные зависимости диэлектрических свойств показаны в виде контурных карт на рис. 2.35 (для полярного полимера — ПА-6) и на рис. 2.36 (для неполярного полиэтилена). Использование контурных карт очень удобно на практике, так как они дают возможность легко и быстро определить, каковы максимальные диэлектрические потери в том диапазоне частот и температур, в котором предполагается использовать данный полимер. Так же просто найти значения температуры и частоты, при которых наблюдаются максимальные или минимальные диэлектрические потери.

Диэлектрические свойства стеклопластиков зависят от частоты приложенного поля (рис. 2.37). Поэтому сравнивать можно только диэлектрические показатели, измеренные при одной частоте. Частотные характеристики стеклопластика зависят от типа полимерного связующего (рис. 2.37).

При определенной частоте диэлектрические свойства стеклопластиков определяются диэлектрическими свойствами компонентов и их содержанием в материале.

Относительная диэлектрическая проницаемость однонаправленного стеклопластика ϵ может быть с точностью до 5% определена по формуле

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_C = \frac{1 + C_0 + (1 - C_0)\epsilon_C / \epsilon_B}{1 - C_0 + (1 + C_0)\epsilon_C / \epsilon_B},$$

где ϵ_B и ϵ_A — значения относительной диэлектрической проницаемости связующего и волокна, определенные при одной и той же частоте электромагнитного поля.

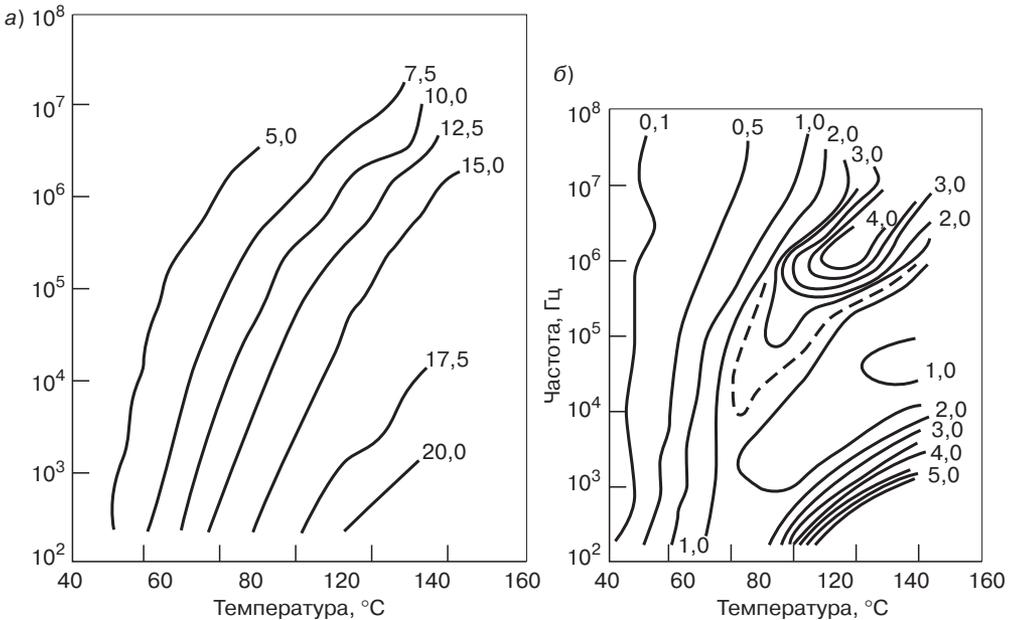


Рис. 2.35. Контурные карты, показывающие зависимость диэлектрических свойств *Nylon 6* от частоты и температуры [5]:

a — $\epsilon' = \text{const}$;

б — $\epsilon'' = \text{const}$

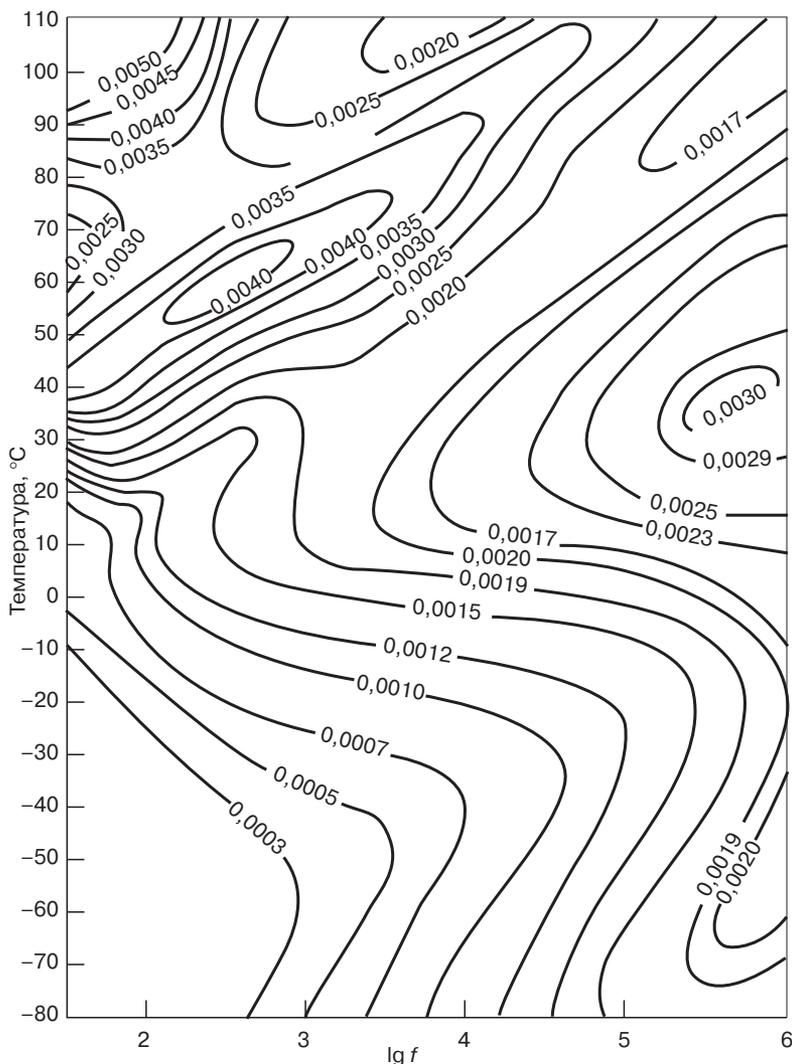


Рис. 2.36. Контурная карта, показывающая зависимость тангенса угла диэлектрических потерь полиэтилена высокой плотности от температуры и частоты $\lg f$ [5]

Наибольшее влияние на диэлектрические свойства стеклопластиков оказывает длительное их пребывание в условиях повышенной влажности (рис. 2.38). Вода является сильно дипольным диэлектриком с $\epsilon' = 80$ и $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,03$, в то время как у основных компонентов стеклопластиков значение $\epsilon' = 3-6$, а $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,01-0,02$. Поэтому, проникнув в стеклопластик, вода может существенно изменить диэлектрические характеристики материала. Свойства некоторых стекло- и органопластиков приведены в табл. 2.18–2.23 и рис. 2.37, 2.38.

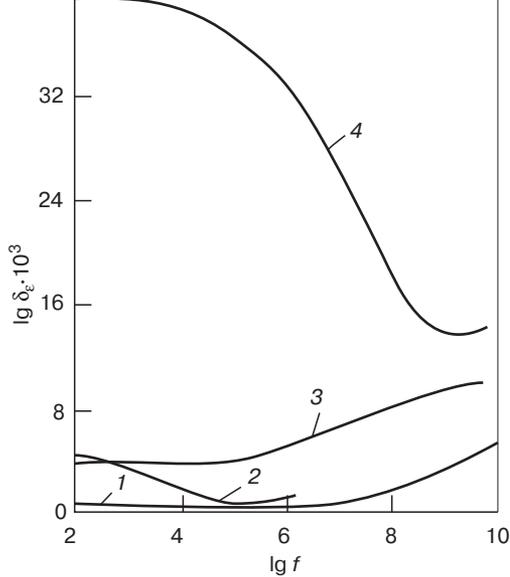


Рис. 2.37. Частотная зависимость $\text{tg } \delta_\epsilon$ стеклопластиков [60]:
 1 — кремнийорганического; 2 — на основе ткани Т-22 и эпоксидной циклоалифатической смолы УП-640Т с отвердителем МТГФА; 3 — меламиноформальдегидного (наполнитель — стекломат); 4 — эпоксидного (ЭДТ-10, многослойная ткань МТБС-5,2)

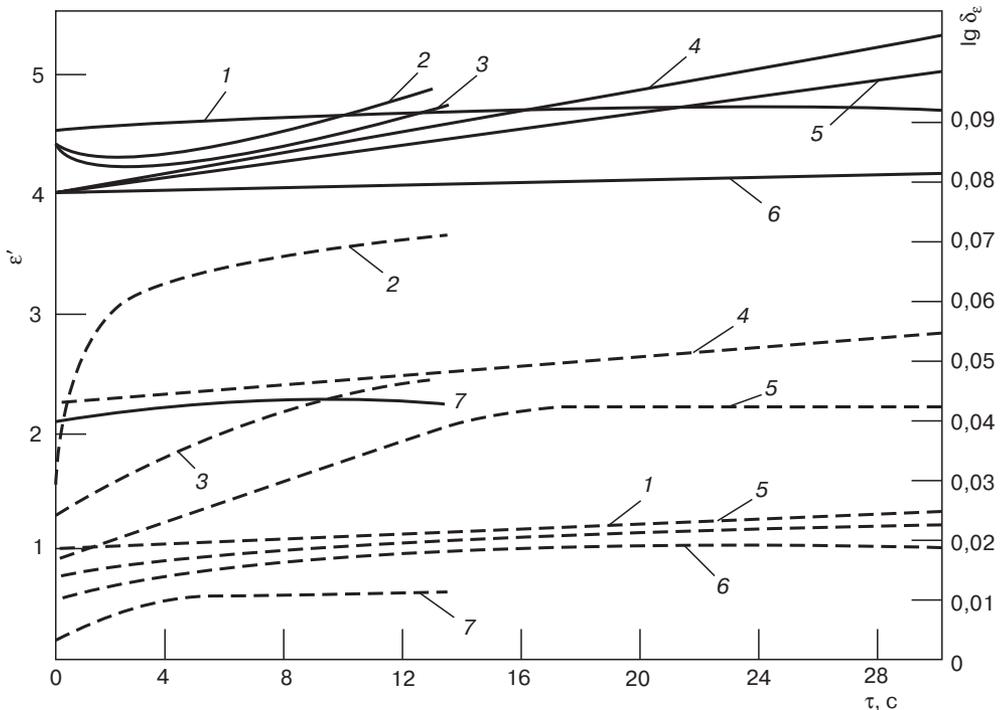


Рис. 2.38. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ' (сплошные линии) и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_\epsilon$ (пунктир) при частоте 10^{10} Гц от времени выдержки при влажности 98% [60]:

1 — стеклотекстолит ЭФ-32-30/А; 2 — стеклотекстолит СТ-911-1; 3 — стеклотекстолит; 4 — стеклопластик СПК-2-27; 5 — стеклопластик АГ-4В; 6 — стеклопластик на связующем ЭДТ-10; 7 — облегченный стеклотекстолит (сетка ГС-1 + связующее К-40)

Таблица 2.18. Диэлектрические свойства органопластиков [61]

| Тип органопластика | ϵ | $\text{tg } \delta_\epsilon$ |
|--|------------|------------------------------|
| На основе волокон из неполярных полиолефинов | 2,2–2,3 | 0,001–0,003 |
| На основе волокон из полярных полимеров | 3,5–3,7 | 0,02–0,03 |
| На основе волокон <i>Kevlar-49</i> (СВМ): | | |
| при 20 °С | 3,45 | 0,010 |
| при 200 °С | 3,56 | 0,04 |

Таблица 2.19. Диэлектрические свойства стеклопластиков¹ [60]

| Тип связующего в стеклопластике | ϵ | | $\text{tg } \delta_\epsilon$ | |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | 10 ⁶ , Гц | 10 ¹⁰ , Гц | 10 ⁶ , Гц | 10 ¹⁰ , Гц |
| Эпоксидные ² : | | | | |
| ЭДТ-10(Т-22-80) | – | 4,7–4,81 | – | 0,011 |
| ЭДТ-10(Т-10П) | – | 3,72–3,87 | – | 0,009–0,01 |
| ЭДТ-10(Т-4П) | – | 3,0–3,16 | – | 0,0069 |
| ЭХД+ТЭАТ (Т-10-80) | 5,35 | – | 0,018 | – |
| ЭФ-32-301 | 4,5 | 4,5–4,7 | 0,027 | 0,014–0,017 |
| Фенольные ³ : | | | | |
| (ЛБС-А+К-9(СК-9Ф) | 4,7–5,3 | – | 0,008 | – |
| (СТФЭ-2) | 7,6 | – | 0,026 | – |
| ФН | – | 3,8–4,2 | – | 0,016 |
| ВФТ | – | 4,0–4,2 | – | 0,019 |
| БФ-2 | 2,8 | 2,91 | 0,01 | 0,017 |
| Кремнийорганические ⁴ : | | | | |
| СКМФ-29 | 3,6–4,5 | – | 0,003 | – |
| СКС-9 | 3,8 | – | 0,018 | – |
| ЭМР-К (кварц) | – | 3,3 | – | 0,009 |
| ЭМР | – | 4,2 | – | 0,014 |
| СК-9Ф | 4,7–5,3 | 4,01 | 0,008 | 0,016 |
| Олигоэфирные ⁵ : | | | | |
| СГ-911С | 4,9–5,1 | 4,3–4,8 | 0,023 | 0,015 |
| СГ-39 | 3,9–4,5 | 3,85–4,3 | 0,014 | 0,010 |
| Полиимидные: | | | | |
| СП-6,97 | 4,0–4,5 | – | 0,004–0,005 | – |

¹ Диэлектрическая проницаемость ϵ стеклотканей при 10¹⁰ Гц: Т-10 сатин 8/3 – 3,6; Т-11 сатин 8/3, 5/3 – 3,7; Т-12 сатин 8/3, 5/3 – 3,4; А-1 полотно – 3,2; Т-14 полотно – 3,2; Т-14 полотно – 3,9; Т4-ПР полотно – 3,1; Т-15П-76 полотно, капиллярное волокно – 2,6.

² В скобках – тип стеклоткани.

³ Используют также связующие БФ-2(1:1), БФ-4(3:1), 20 %-ные растворы; ВФТ (резольная ФФС + ПВА + алкоксисилан, раствор в ацетоне, толуоле), ФН. Улучшают взаимодействие с наполнителем введением аminosиланов и продуктов с –ОН– группами (АМ-2, МР-1) и используя смеси с $\epsilon_{\text{ред}} 5-7$ (ПЭ2,1-2,3), $\epsilon_{\text{нов}} 38-30$; в скобках – тип стеклопластика.

⁴ Типы стеклопластиков; связующее К-9-70 (раствор метилфенилсилоксана в тетраэтоксисилане) с кварцевой тканью ТС-8/3-К-ТО используют для эрозионностойких поверхностных слоев из цельнотканного кварцевого чехла объемного плетения.

⁵ Типы стеклопластиков; для «холодных» АО: ПН-1,3, ЗСП-3, ПН-609-21М, олигоаллилаты.

Таблица 2.20. Диэлектрические свойства стеклопластиков (стекло Al-B-Si) [10]

| Свойства | Тип связующего в стеклопластике | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Фенолоформальдегидное | Эпоксидное | Полиэфирное | Кремнийорганическое | Полиимидное |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$, 1МГц | 0,01–0,05 | 0,01–0,04 | 0,02–0,06 | 0,01–0,03 | 0,01–0,02 |
| ϵ , 1 МГц | 3,8–8,0 | 3,8–5,0 | 3,8–7,0 | 3,5–4,5 | 3,8–5,0 |
| ρ_σ , Ом | 10^{11} – 10^{13} | 10^{13} – 10^{14} | 10^{10} – 10^{14} | 10^{12} – 10^{15} | 10^{13} – 10^{14} |
| ρ_V , Ом·см | 10^{11} – 10^{13} | 10^{13} – 10^{14} | 10^{11} – 10^{14} | 10^{12} – 10^{15} | 10^{13} – 10^{14} |

Таблица 2.21. Диэлектрические свойства стеклотекстолитов (ткань Т-10-80) на основе кремнийорганических связующих [60]

| Свойства при 10^6 Гц | Типы стеклотекстолитов | | |
|------------------------------|------------------------|---------|--------|
| | СК-9П | СК-9ХК | СК-9ФЛ |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$ | 0,0029 | 0,0025 | 0,0028 |
| ϵ | 3,5 | 4,4–4,7 | 5,05 |

Таблица 2.22. Диэлектрические свойства стеклотекстолита СК-9Ф [60]

| | | |
|------------------------------|------------------|---------|
| $\text{tg } \delta_\epsilon$ | при 10^{10} Гц | 0,016 |
| | 10^6 Гц | 0,008 |
| | 10^3 Гц | 0,011 |
| ϵ | при 10^{10} Гц | 4,01 |
| | 10^6 Гц | 4,7–5,3 |
| | 10^3 Гц | 4,4–5,1 |

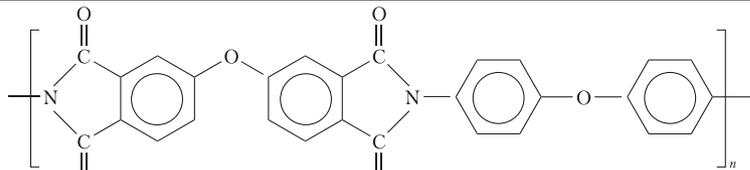
Таблица 2.23. Диэлектрические свойства стеклотекстолитов на основе модифицированных кремнийорганических связующих

| Тип, $\sigma_{\text{вл}}$, МПа | $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 10^{10} Гц | ϵ при 10^{10} Гц | Температурный индекс |
|---------------------------------|---|-----------------------------|---|
| СК-9Х ¹ , 195 | 0,0023 | 4,55 | 350 °С 100 ч |
| СК-9Х ² , 200 | 0,0054 | 3,85 | 300 °С 2000 ч |
| СК-9ВФ ¹ , 260 | 0,0052 | 4,46 | 600 °С – 100 ч, 500 °С – 200 ч, 400 °С – 10 ч |
| СК-9-70, 70С ³ , 280 | 0,0046 | | 300 °С – 2000 ч |

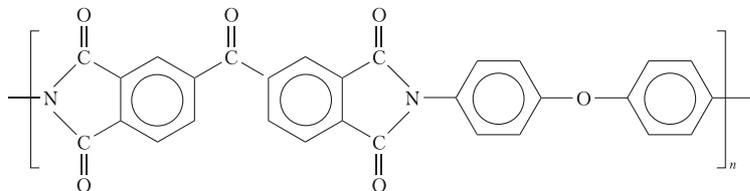
¹ Ткань ТС-8/3-250 (Т-10), связующее ПМФКС.² Ткань ТК-11-С (КО связующее, отвердитель – силазан).³ Кварцевая ткань ТЗ-8/3-К, связующее – смесь ОМФС.

Таблица 2.24. Теплостойкие термопластичные полиарилены и полигетероарилены [137]

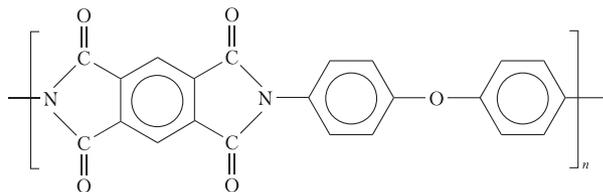
1) Полиимид ПМ-67 (НИИПМ, Россия),
 $T_c = 275\text{--}285\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{18,6} = 175\text{ }^\circ\text{C}$



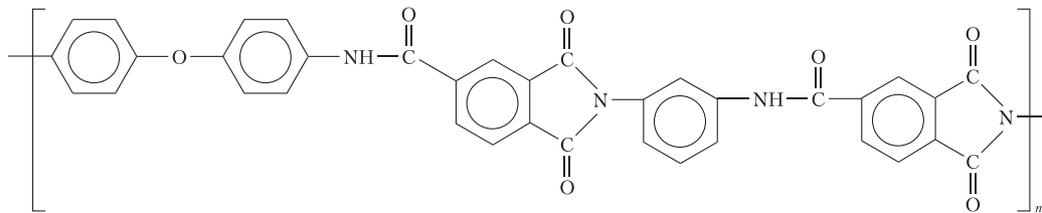
2) Полиимид ПМ-69 (НИИПМ, Россия),
 $T_c = 285\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{18,6} = 180\text{ }^\circ\text{C}$



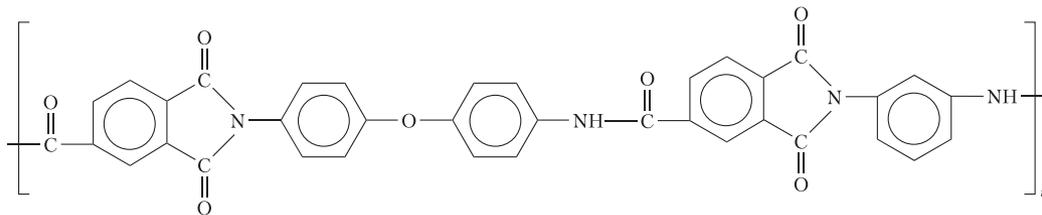
3) Полиимид *VespeI*, пленка *Kapton* (DuPont, США),
 $T_c = 360\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{18,6} = 260\text{ }^\circ\text{C}$



4) Полиамидоимид *Torlon* 4000 T, 4002, 4200, 9040 (Amoco, США)
TI-5000, 1000 (*Toray*)
HI-400 (*Hitachi*)
 $T_c = 260, 275 (280)\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{эксн}} = 190, 220 (284)\text{ }^\circ\text{C}$, сохраняет 30% σ^+ при 300 $^\circ\text{C}$



5) Полиамидоимид ПАИ-7 (НИИПМ, Россия)
 $T_c = 270\text{ }^\circ\text{C}$

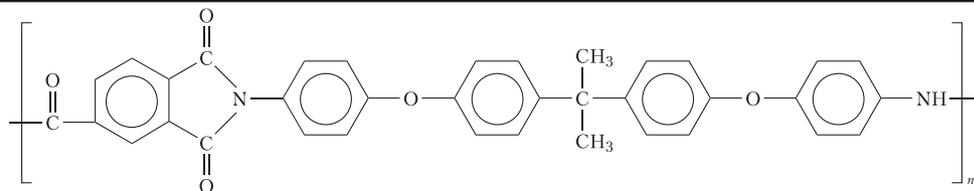


Окончание табл. 2.24

6) Полиамидоимид ПАИ-4

(НИИПМ, Россия)

$T_c = 220\text{ }^\circ\text{C}$



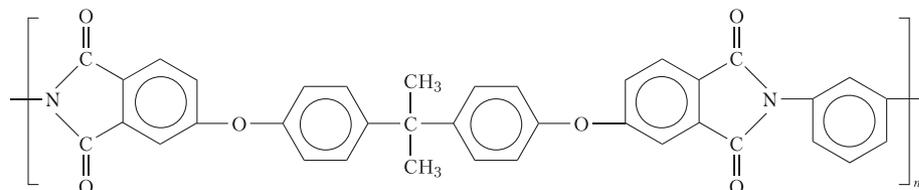
7) Полиэфиримид *Utem 1000*

$T_c = 220\text{ }^\circ\text{C}$, $G_{lc} = 1900\text{ Дж/м}^2$

2100, 2200, 2300, 2400, 6000, 6200

(*General Electric*, США)

$T_c = 260\text{--}277\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{раб}} = 170\text{--}223\text{ }^\circ\text{C}$

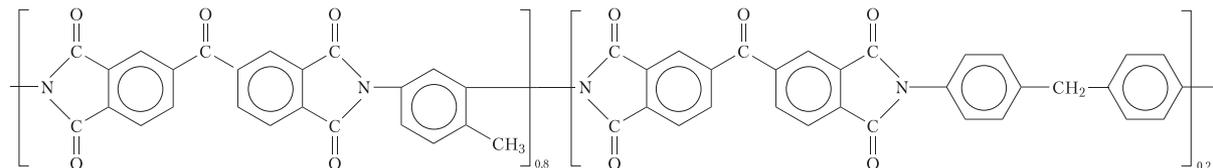


8) Полиимид *PI 2080 (Upjohn, Dow*

Chemical, США), *KERMEL (Rhone*

Poulenc, Франция)

$T_c = 310\text{--}316\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{18,6} = 270\text{--}280\text{ }^\circ\text{C}$



На основе 2,4-толуолдиизоцианата и 4,4-дифенилметандицианата (мольное соотношение (4:1).

$\alpha = 50 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, твердость *E Rockwell 99*, $\epsilon = 3,27\text{--}3,43$

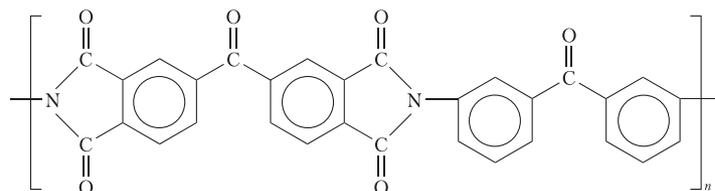
9) Полиимид *LARC-TPI, TPI*, дю-

римид 120 (*NASA Langley*, США,

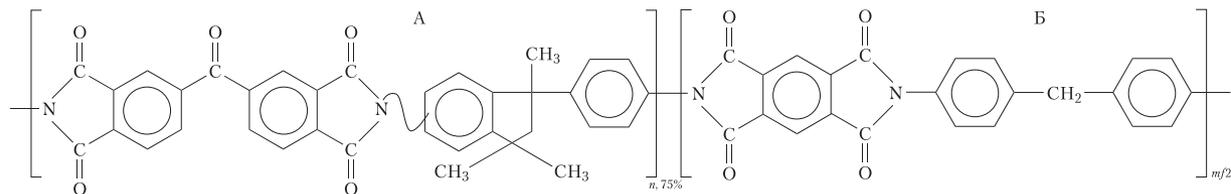
Mitsui Toatsu Chemicals, Япония)

$T_c = 255\text{--}275\text{ }^\circ\text{C}$ (в зависимости

от т.о.)



10) *Matrimid 5218*

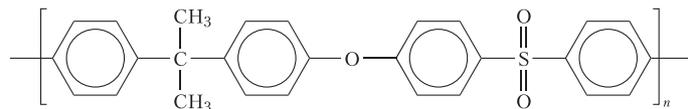


В XU318 только структура «А» на основе изомеров 5(6)-амино-1,4'-аминофенол-1,3,3-триметилиндана

Полиимид *Matrimid 5218*
XU 213, 218 (*Ciba-Geigy*, США) $T_c = 260\text{ }^\circ\text{C}$

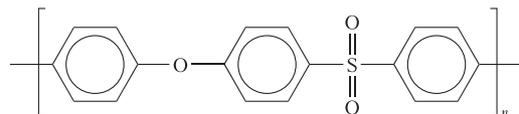
11) Полисульфон *Udel ПСН* (Россия)

$T_c = 190\text{ }^\circ\text{C}$, $G_{Ic} = 1700\text{ Дж/м}^2$



12) Полиэфирсульфон 200Р,
Victrex 3600G

$T_c = 215\text{--}245\text{ }^\circ\text{C}$, $G_{Ic} = 100\text{ Дж/м}^2$



13) Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК)

$T_c = 143\text{--}146\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{пл} > 280\text{ }^\circ\text{C}$

$G_{Ic} 2000\text{ Дж/м}^2$

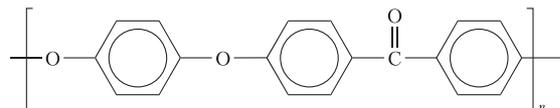


Таблица 2.25. Технологические свойства теплостойких термопластов [137]

| № | Тип полимера | Метод переработки | Температура, °С | Вязкость расплава, Па·с | Давление, МПа |
|-----|----------------------|---|--------------------|---------------------------------------|------------------|
| 1. | ПМ-67 | Прессование, литьевое прессование | 360–390 400–420 | 10^7 – 10^8 10^6 – 10^7 | 20–70 100–200 |
| 2. | ПМ-69 | Прессование | 380–400 | 10^7 – 10^8 | 50–100 |
| 3. | <i>Vespel</i> | Спекание | 400 20 | $>10^8$ $>10^9$ | 210 700 |
| 4. | <i>Torlon 4000T</i> | Прессование | 325–380 | $7 \cdot 10^3$ (380 °С) ¹⁾ | 21 |
| | <i>Torlon 4002</i> | Экструзия | 315–340 | 10^4 – $5 \cdot 10^6$ ¹⁾ | 28 |
| | <i>Torlon 4200</i> | Литье под давлением | 340–370 | то же | 140 |
| 5. | ПАИ-7 | Прессование | 290–330 | $3 \cdot 10^{6,2)}$ | До 100 |
| 6. | ПАИ-4 | Литьевое прессование | 290–330 | $3,2 \cdot 10^{4,2)}$ | До 100 |
| 7. | <i>Utem1000</i> | Прессование ³⁾ | 340–425 | 10^5 – 10^6 | 7 |
| 8. | ПИ 2080 | Прессование, экструзия | 350 | 10^4 – 10^5 | 20–35 |
| 9. | <i>LARC-TP1</i> | Прессование, литьевое прессование | 260–355 | 10^4 – 10^5 | 4–74 |
| 10. | <i>Matrimid 5218</i> | Литье под давлением, литьевое прессование | 250–320 | 10^3 – 10^4 | до 100 |
| 11. | <i>Udel</i> , ПСН | Литье под давлением | 340–380 | 700–200 | — |
| 12. | Полиэфирсульфон 200Р | Литье под давлением | 340 | 1050 | — |
| 13. | ПЭЭК | Литье под давлением | 340–380 | 8000–500 | — |

¹⁾ Вязкость расплава 10^4 Па·с при скорости сдвига 10^4 с⁻¹; $5 \cdot 10^6$ Па·с при скорости сдвига 10 с⁻¹; температура формы 200–260 °С.

²⁾ При скорости деформирования 10 с⁻¹.

³⁾ Перерабатываются также литьевым прессованием, литьем под давлением, экструзией, выдуванием.

1, 2, 3, 8, 9, 10 — полиимиды; 4, 5, 6 — полиимидамиды; 7 — полиимидэфир; 11, 12 — полиарилсульфоны; 13 — полиэфирэфиркетон ароматический.

Таблица 2.26. Температуры стеклования полимерных матриц [80, 137]

| Матрица | T_g , °С | Матрица | T_g , °С |
|-------------------------|------------|--------------------------|------------|
| <i>Термопластичные:</i> | | <i>Бисмалеинимидные:</i> | |
| Полисульфон P1700 | 190 | K 601 | 290–315 |
| Полиэфирсульфон | 230–245 | C 896 | 285 |
| Полиарилсульфон 360 | 285 | F 178 | 350 |
| ПИ 2080 | 310 | <i>Matrimid 5292</i> | 290–350 |

Окончание табл. 2.26

| | | | |
|------------------------|---------|--------------------------------|---------|
| <i>Torlon 4000T</i> | 260 | <i>C 183</i> | 260–295 |
| <i>Avimid N</i> | 340–370 | <i>K 353</i> | 285 |
| <i>Avimid K-2</i> | 280 | <i>H 795</i> | 290 |
| <i>Avimid K-3</i> | 250 | <i>5245 C</i> | 230 |
| <i>Matrimid 5218</i> | 320 | <i>C 65 FWR</i> | 265 |
| ПЭИ <i>Ultem1000</i> | 220 | <i>Disbimid RTM</i> | 250 |
| <i>Терморективные:</i> | | <i>BT</i> | 230–310 |
| Эпоксидные (ТМА) | | <i>V 378 A</i> | 370 |
| ЭДТ-69Н | 125 | <i>K 711</i> | 280 |
| ЭДТ-10 | 100 | <i>Полиимидные:</i> | |
| УП 2217 | 150 | <i>PMR-15</i> | 330–390 |
| ЭХД-МК | 160 | <i>Therimid 600</i> | 315 |
| ЭХД-МД | 150 | <i>Therimid 602</i> | 330 |
| УП-352 | 160 | <i>LARC-13</i> эластифицирован | 280 |
| УЛ-318 | 70 | <i>Skybond, СП</i> | 300–400 |
| ЭНФБ | 160 | <i>АПИ-1,2,3</i> | 300–400 |
| ВС-2526 2561 | 200–210 | | |

* Метод определения T_c — ТМА (торсионный анализ).

Таблица 2.27. Кислородный индекс и дымообразование при горении полимеров [81, 137]

| Матрица | Кислородный индекс, КИ, % | Коэффициент дымообразования, Π л м ³ /кг | Содержание водорода, % масс. |
|--|---------------------------|---|------------------------------|
| <i>Термопластичные полимеры:</i> | | | |
| Полиэтилен | 17–17,5 | 1280 | 14,4 |
| Полипропилен | 17 | 1960 | 14,4 |
| Полиамиды алифатические | 15–29 | 320–800 | 9,5–12 |
| Полиамиды ароматические | до 48 | – | 5–7 |
| Полиуретаны | 15 | 740 | 8,2 |
| Полисультфоны | 21–40 | – | 5–7 |
| Полиметилметакрилат | 17 | 350 | 8 |
| Полиэфирэфиркетон | 40 | 50–60 | 4 |
| Полистирол | 18 | 1600 | 7,7 |
| Поликарбонат | 27 | 680 | 5,4 |
| Полифениленоксид | 29 | 680 | 4,4 |
| Поливинилхлорид | 49 | 950 | 4,8 |
| Полиамидимиды, полиэфиримиды | 42–47 | 150–350 | 3,5–4,0 |
| Политетрафторэтилен | 95 | 190 | 0,9 |
| <i>Терморективные отвержденные полимеры:</i> | | | |
| Эпоксидные | 20 | 1260 | 7,1 |

Окончание табл. 2.27

| Матрица | Кислородный индекс КИ, % | Коэффициент дымообразования, $\text{Нп м}^3/\text{кг}$ | Содержание водорода, %масс. |
|------------------------------|--------------------------|--|-----------------------------|
| Фенолоальдегидные новолачные | 45 | 60 | 6,6 |
| Фенолоальдегидные резольные | 20 | 60 | 6,6 |
| Кремнийорганические | 30–40 | 270–370 | 5,7–7,8 |
| Аминоальдегидные | 50 | 160 | 2,1 |
| Малеинимидные | 30–40 | 50–150 | 2,1 |
| Полиимидные | 34–44 (до 55) | 50–100 | 2–3 |

Таблица 2.28. Теплостойкость (T_c , $T_{18,5}$) и температурные диапазоны переработки теплостойких полимеров [65]

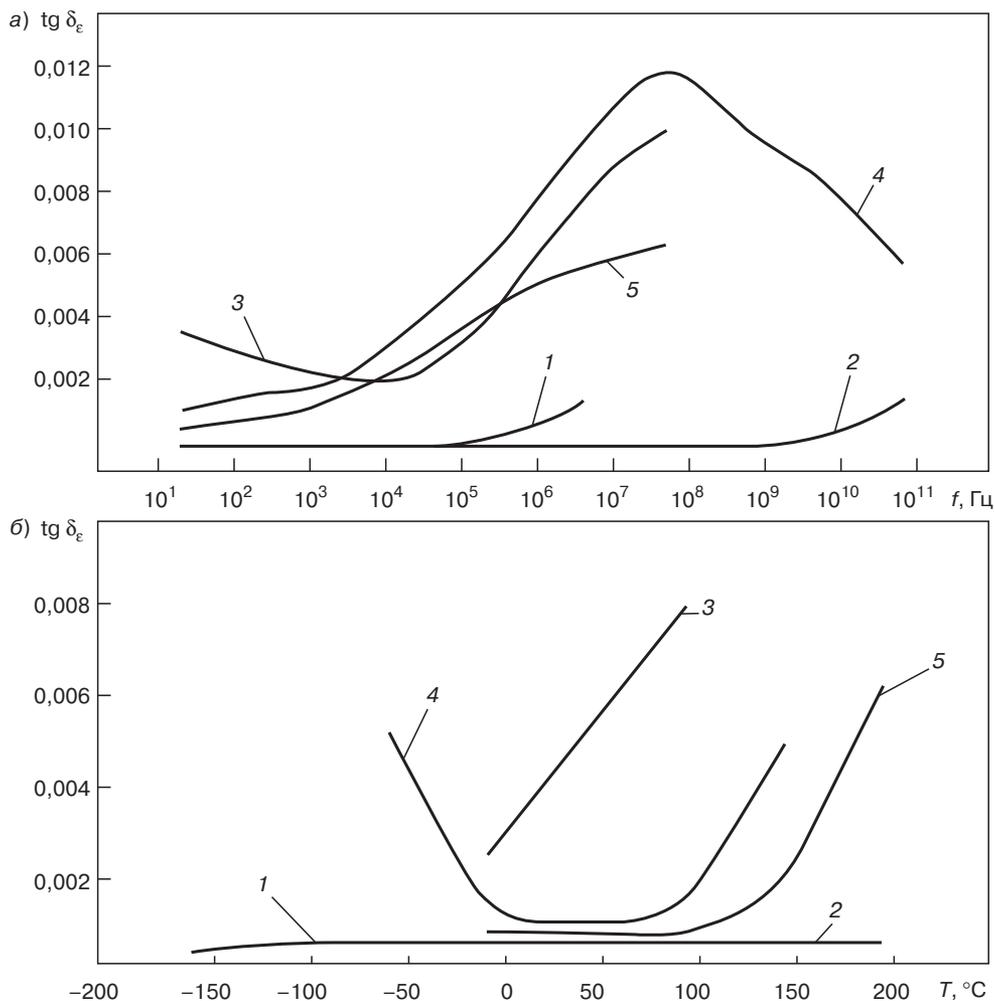
| Тип полимера | T_c , °C | $T_{18,5}$, °C | $T_{\text{переработки}}$, °C |
|--|------------|-----------------|-------------------------------|
| Полисульфон <i>Udel P-1700</i> | 180–190 | 174 | 290–370 |
| Полиэфирсульфон <i>Victrex PE S 4100</i> | 230 | 203 | 315–370 |
| Полиарилсульфон <i>Radel A-400</i> | 220 | 204 | 330–370 |
| Полиэфирэфиркетон <i>Victrex PEEK 45y</i> | 143 | 142 | 370–400 |
| Полиариленкетон <i>PXM-8505</i> | 265 | – | – |
| Полифениленсульфид <i>Ryton PPS</i> | 90 | 115 | 315–340 |
| Полиариленсульфид <i>Ryton PAS-2</i> | 215 | 198 | 325–330 |
| Полиамидимид <i>Torlon</i> | 275 | 274 | 330–400 |
| Полиамидимид <i>Torlon AIX 638/696</i> | 243 | – | 325–350 |
| Полиэфиримид <i>Utem 1000</i> | 117 | 200 | 340–400 |
| Полиимид <i>LARC-TPI</i> | 264 | – | 340–427 |
| Полиариленимид <i>Avimid K-III</i> | 251 | – | 340–400 |
| Полиариленимид <i>Avimid N</i> | 360 | – | 350–400 |
| Жидкокристаллический ПМ <i>Vectra A-IJ5</i> | – | 214 | 350–400 |
| Жидкокристаллический ПМ <i>Xydar SRT 300</i> | – | 355 | 360–430 |

Таблица 2.29. Диэлектрические свойства термопластов [62, 63]

| Свойства | ПФО | Поликарбонат | Полиэтилен | Полистирол |
|--|-----------|-------------------|---------------------|---------------|
| Электрическая прочность, В/0,025 мм | 400–500 | 300–600 | 440–700 | 500–700 |
| ρ_V , Ом·см | 10^{17} | $2 \cdot 10^{16}$ | $10^{17} - 10^{19}$ | 10^{17} |
| ϵ при 60 Гц и 20 °C | 1,58 | 3,17 | 2,3 | 3,45–2,65 |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 60 Гц и 20 °C | 0,00035 | 0,0009 | 0,0001–0,0006 | 0,0001–0,0003 |

Таблица 2.30. Зависимость диэлектрической проницаемости полифениленоксида С-1001 (2103 СВЧ, 2115) от частоты и температуры [62, 63]

| | | | | | |
|---|------|--------|--------|--------|--------|
| Частота, Гц | 60 | 10^3 | 10^4 | 10^6 | 10^9 |
| Диэлектрическая проницаемость | 2,56 | 2,55 | 2,55 | 2,55 | 2,59 |
| Температура, °С | 180 | 90 | 20 | 10 | -196 |
| Диэлектрическая проницаемость при 60 Гц | 2,52 | 2,54 | 2,56 | 2,55 | 2,53 |

**Рис. 2.39.** Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты а и температуры б для термопластов [62, 63]:

1 — Полифениленоксид С-1001; 2 — Полифениленоксид ВЧ назначения типа 2103; 3 — Полиацеталь; 4 — Поликарбонат; 5 — Полисульфон (ПСН, Udel)

Таблица 2.31. Диэлектрические и другие свойства модифицированных полистиролом полифениленоксидов [62]

| Свойства | Полифениленоксиды | | | | | | | |
|---|-------------------|-----------|-----------|-------|--------------|-----------|------|-----------|
| | <i>Xyron</i> | | | | <i>Noryl</i> | | | |
| | 100V | 300V | 500V | G702H | H0111 | N190 | N300 | GFN3 |
| $T_{18,5}$, °C | 80 | 100 | 120 | 140 | 136 | 88 | 149 | 158 |
| ρ_V , Ом·м | 10^{16} | 10^{16} | 10^{17} | — | — | 10^{15} | — | 10^{17} |
| ρ_S , Ом | 10^{16} | 10^{16} | 10^{17} | — | — | 10^{15} | — | 10^{17} |
| ϵ при 10^6 Гц | 2,8 | 2,7 | 2,7 | — | — | 2,7 | 2,6 | 2,85 |
| ПН, мВ/мм | 29 | 29 | 29 | 43 | — | 24,8 | 20,0 | — |
| ВП, вода, 24 ч, % | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,06 | — | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| Огнестойкость (образцы 1,5 мм по UL-94) | V-1 | V-1 | V-1 | — | V-0 | V-0 | V-0 | HB |

ПН — пробивное напряжение; ВП — водопоглощение.

Таблица 2.32. Диэлектрические и другие свойства полифениленсульфидов ПФС и полифениленсульфонов ПФСН [64–67]

| Свойства | ПФС + 40% стекл. волокон. (СВ) | Полиэфирсульфон PES | | ПФСН Udel | | Udel + УПС* |
|--|--------------------------------|---------------------|------------|---------------|-------------|-------------|
| | | ненаполненный | 30% СВ | ненаполненный | 30% ст. вол | |
| | | | | | | |
| ρ , г/см ³ | 1,6–1,67 | 1,36–1,37 | 1,58–1,6 | 1,24–1,25 | 1,44–1,45 | 1,13 |
| $T_{18,5}$ (HTD/A), °C | 260 | 200–205 | 210–225 | 170–175 | 185 | 150 |
| Огнестойкость по UL94 | V-0 | V-0 | V-0 | V-2 / HB | V-0 / V-1 | HB |
| ϵ при 100 Гц | 3,9–4,8 | 3,5–3,7 | 3,9–4,2 | 3,2 | 3,5–3,7 | 3,1–3,3 |
| $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 100 Гц · 10 ⁻⁴ | 10–20 | 10–20 | 20–30 | 8–10 | 10–20 | 40–50 |
| ρ_V , Ом·м | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ |
| ρ_S , Ом | $>10^{14}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{15}$ | $>10^{15}$ | $>10^{14}$ |
| ПН, кВ/мм | 20–30 | 20–30 | 20–30 | 20–30 | 20–30 | 20–30 |
| Утечка тока СТИ/А | 125–150 | 100–150 | 125–175 | 125–150 | 150–175 | 175 |
| ВП, %, 23 °C, равновесное | $>0,1$ | 1,9–2,3 | 1,5 | 0,6–0,8 | 0,4–0,5 | 0,3 |
| ВП, %, 23 °C, 50% H ₂ O | $>0,05$ | 0,6–0,8 | 0,6 | 0,25–0,3 | 0,15–0,2 | 0,1 |

* УПС — ударопрочный полистирол.

Таблица 2.33. Диэлектрические и другие свойства теплостойких термопластов [64–67]

| Свойства | ПФС <i>Ryton R-6</i> ненаполненный | <i>Ryton R-4</i> (40% ст. вол) | <i>Udel</i> | <i>Torlon</i> |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------|---------------|
| ρ , г/см ³ | 1,3–1,34 | 1,6–1,65 | 1,2 | 1,4 |
| $T_{18,5}$, °C | 135–138 | 220–260 | 174 | 360 |
| ВП, %, 25 °C | <0,02 | <0,05 | 0,22 | 0,32 |
| ϵ , 1 кГц | 3,1 | 3,9 | 3,1 | 3,4 |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, 1 кГц | 0,0005 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, 1 МГц | 0,0009 | 0,0013 | 0,0034 | 0,005 |
| ПН, кВ/мм | 15 | 14 | 17 | 22 |
| ρ_V , Ом·см·10 ¹⁶ | 4,5 | 4,5 | 5 | 3 |

Таблица 2.34. Диэлектрические и другие свойства полисульфонов ОАО «НИИПМ» [67–69]

| Свойства | ПСФ-150 | ПСФ-150-1 | ПС-КС |
|--|------------------|------------------|------------------|
| $T_{18,5}$, °C | 155–165 | 160–165 | 160 |
| КИ, % | 30 | 34–36 | 35 |
| ρ_V , Ом·см | 10 ¹⁶ | 10 ¹⁷ | 10 ¹⁷ |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, 1 МГц | 0,004 | 0,004–0,007 | 0,006 |
| ϵ , 1 МГц | 3,0 | 2,9–3,1 | 3,1 |
| ВП, 24 ч, вода, % | 0,3 | 0,2 | 0,2–0,4 |

Таблица 2.35. Диэлектрические и другие свойства полисульфонов [67, 68]

| Свойства | Полисульфон (типа ПСН, <i>Udel 1700, Mindel A650,</i> <i>Arilon T</i>) | Полиэфирсульфон, <i>Victrex 200P</i> | Полиарилсуль- фоны <i>Radel</i> <i>Astrel 360</i> |
|---|---|---|---|
| ρ , г/см ³ | 1,14–1,25 | 1,37–1,40 | 1,36–1,40 |
| $T_{18,5}$, °C | 150–180 | 210–225 | 205–275 |
| ВП, 23 °C, 24 ч, % | 0,02 | 0,43 | 1,8 |
| ρ_V , Ом·см | (1,5–5)·10 ¹⁶ | 10 ¹⁷ | (3–3,2)·10 ¹⁶ |
| ϵ , при 60 Гц | 3,14 | 3,5 | 3,94 |
| ϵ , при 1000 Гц | 2,85–3,13 | 3,5 | 3,8 |
| ϵ , при 10 ⁶ Гц | 3,10–3,14 | 3,5 | 3,7 |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, при 60 Гц | 0,006–0,008 | 0,01 | 0,003 |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, при 1000 Гц | 0,001–0,004 | 0,035 | 0,0033 |
| $\text{tg } \delta_{\epsilon}$, при 10 ⁶ Гц | 0,007–0,0056 | 0,06 | 0,013 |

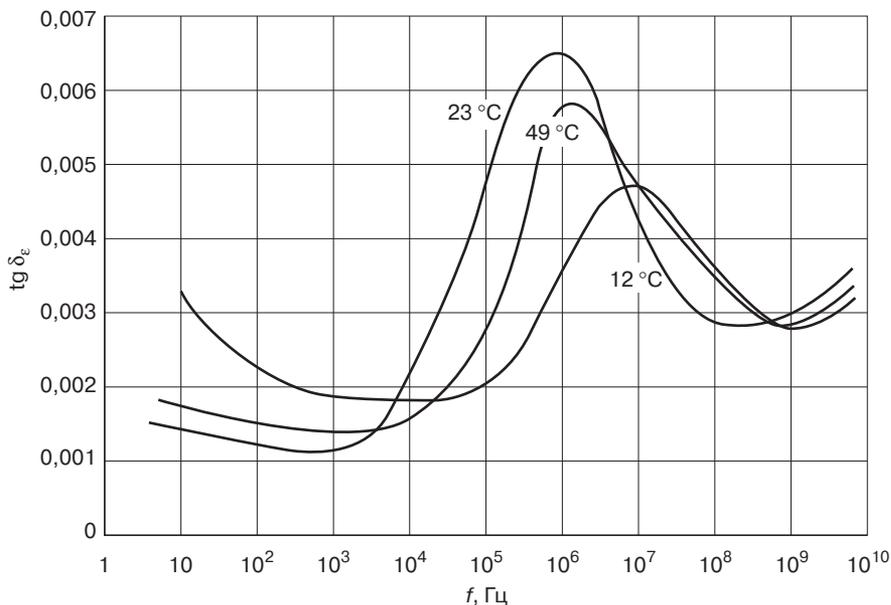
Таблица 2.36. Диэлектрические свойства ароматических полиамидов [68]

| Свойства | Фенилон П | Фенилон С1 | Фенилон С2 |
|-------------------------------------|--|--|--|
| ρ , г/см ³ | 1,33–1,35 | 1,35 | 1,35 |
| T_B , °С | 260–270 | 270 | 300 |
| ϵ , при 1000 Гц | 5,5 | – | – |
| $\text{tg } \delta_e$, при 1000 Гц | 0,015 | – | – |
| $\rho_s \cdot 10^4$, Ом | 1,2 (220 °С–4·10 ¹³) | 1,2 | 1,2 |
| ρ_V , Ом·см | 3,5·10 ¹³ (1000 ч, 200 °С) 1,3·10 ¹⁴ (1000 ч, 200 °С) | 8·10 ¹³ –1,3·10 ¹⁴ | 8·10 ¹³ –1,3·10 ¹⁴ |
| ПН, мВ/м | 27 | 24–27 | 24–27 |
| ВП, %, 24 ч | 0,3–0,5 | 0,5 | – |

Таблица 2.37. Диэлектрические свойства полиэфиримида *Ultem* [71–73]

| Свойства | Типы <i>Ultem</i> | | | |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 1000 | 2100 (10% ст. вол) | 2200 (20% ст. вол) | 2300 (30% ст. вол) |
| ϵ , 1 кГц | 3,15 | 3,5 | 3,5 | – |
| $\text{tg } \delta_e$, 1 кГц | 0,0013 | 0,0014 | 0,0015 | 0,0015 |
| $\text{tg } \delta_e$, 2450 кГц | 0,0025 | 0,0046 | 0,0053 | – |
| ρ_V (1,6 мм), Ом·м | 6,7·10 ¹⁵ | 1,0·10 ¹⁵ | 7,0·10 ¹⁴ | 3,0·10 ¹⁴ |

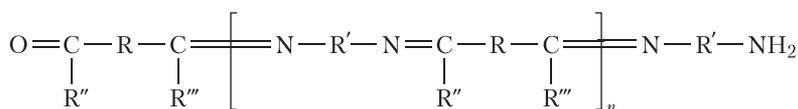
Ст. вол — стеклянные волокна.

Рис. 2.40. Зависимость $\text{tg } \delta_e$ полиэфиримида *Ultem* 1000 от частоты [71]

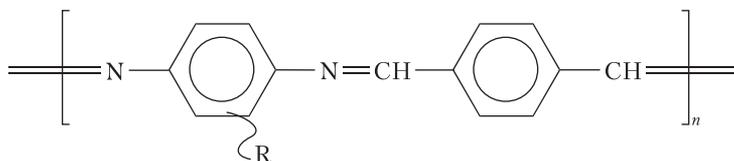
2.2.2. Электропроводящие полимеры

Электропроводящие полимеры с «внутренней» (собственной) электрической проводимостью (*ICP, Intrinsic Conductive Polymers*) перспективны для использования не только в качестве компонентов интеллектуальных материалов молекулярного уровня, материалов молекулярной электроники и оптоэлектроники, обеспечивающих предельную миниатюризацию систем получения, анализа, отображения, хранения информации (см. раздел 1.3.1.1), но и в качестве компонентов радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов.

К эффективным поглощающим ЭМЭ электропроводящим полимерам относятся полиазометины (полишиффовы основания) и металлокомплексные фенопласты. Наличие в цепях системы сопряженных двойных связей в полиазометинах (молекулярная масса — несколько тысяч) обуславливает их полупроводниковые свойства. Удельная объемная электрическая проводимость γ лежит в пределах $1 \cdot 10^{-15} - 3 \cdot 10^{-20}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$. Концентрация парамагнитных частиц $10^{15} - 10^{19}$ спин/г [10]. Полиазометилены (полишиффовы основания)



R – алкил, арил; R', R'', R''' – H, алкил, арил.



поглощают высокочастотное электромагнитное излучение и могут быть использованы в качестве компонентов радиопоглощающих материалов и покрытий [66].

Допированные полиазометины (соли оснований) значительно легче ферритов (см. далее), на их основе легко изготовить композиции, наносимые по лакокрасочной технологии. Они превосходят ферриты по способности поглощать ВЧ- и СВЧ-излучения, причем малый уровень коэффициента отражения достижим при меньшей (примерно в 10 раз) массе РПП, которые, предположительно, позволят уменьшить отражательную способность объекта на 80%. Эти материалы имеют черный цвет, по своим физическим свойствам они напоминают графит и характеризуются высокой полярностью, а частота поглощаемого электромагнитного излучения зависит от их химического состава. Смешивая несколько материалов, можно получить РПП, которое способно сделать объект малозаметным для РЛС обнаружения и широком диапазоне частот, при этом тепло, выделяемое при поглощении полимером ВЧ- и СВЧ-энергии, приводит к незначительному повышению температуры поверхности объекта, что практически не изменит его ИК-заметность [92].

Материалы на основе электропроводящих полимерных связующих (допированный натрием полиацетилен, 7,7,8,9-тетрафтальцианинметан), металлизированных тканей (толщина 0,05–20 мкм), полупроводниковых порошков с γ $10 - 10^4$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ обеспечивают защиту от ЭМИ в полосе частот $10^4 - 10^{11}$ ГГц, устраняют паразитные электромагнитные волны на частоте 50 Гц и поглощают ЭМИ на частоте 1 ГГц до уровня 45–55 дБ [26, 93].

Для создания магнитных металлокомплексных композиций опробованы комплексы MeTMФ, содержащие ионы Fe, Ni и Co. Ионы Fe способны образовывать ферромагнитные оксиды ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4) с высокой магнитной восприимчивостью и повышенной температурой перехода в парамагнитное состояние (точкой Кюри). Такое сочетание свойств, а также дешевизна и доступность солей, делают выбор ионов Fe, Ni и Co предпочтительным по сравнению с ионами редкоземельных элементов (Gd, Tb, Dy, Ho, Er), которые хотя и имеют

значительно более высокий магнитный момент, но образуют ферромагнетики с низкой точкой Кюри. Так, Gd имеет самую высокую точку Кюри среди редкоземельных ферромагнетиков, равную 290 К [11].

Ионно-кластерная (плоские циклы шириной до 1 нм) и ионно-доменная (ионные домены, не менее 1 мкм) структура металлокомплексных композиций определяет низкий коэффициент отражения R , что обусловлено большим отношением μ^*/ϵ^* , значениями магнитной индукции и проницаемости (таблица), относительно высокими диэлектрическими ϵ'' и магнитными μ'' потерями [157].

| MeПМФ | Магнитная индукция, Тл·10 ³ | Магнитная проницаемость, μ |
|-------|--|--------------------------------|
| FeПМФ | 1,32 | 3,5 |
| NiПМФ | 0,53 | 1,4 |
| CoПМФ | 0,57 | 1,5 |

Покртия из полимерных капсулированных гелей на основе электроактивных полимеров (см. раздел 1.3.1.2) позволяют регулировать рельеф поверхности, обеспечивая диффузное отражение ЭМЭ.

2.2.3. Углеродные материалы

В качестве наполнителей материалов, поглощающих и экранирующих ЭМЭ радиодиапазона широко используют токопроводящие углеродные материалы: технический углерод, графиты, сажи, углеродные и графитизированные волокна, в том числе металлизированные и различные текстильные формы из них (нити, жгуты, ленты и ткани).

Для углерода характерно образование различных аллотропных структур: алмаз, графит, карбин, переходные формы (гомогенно-неграфитизирующие, гомогенно-кристаллизующиеся и другие).

Алмаз (sp^3 -гибридизация) — пространственный полимер с тетраэдрическим расположением валентных связей, кубическая гранецентрированная ($a = 0,35597$ нм) трехмерная сетка ковалентных тетраэдрических (sp^3 -гибридных) связей с расстоянием C—C 0,15445 нм. $\sigma_{\text{теор}}^+ = 200$ ГПа; $E_{\text{теор}}^+ = 1220$ ГПа.

Графит (sp^2 -гибридизация) — «паркетный» полимер, состоящий из атомов углерода sp^2 -гибридизации, расположенных в одной плоскости (решетка двухмерная, гексагональная упаковка, $\rho_{\text{теор}} = 2,27$ г/см³). Имеет высокий модуль упругости ($\sigma_{\text{I теор}}^+ = 140$ ГПа; $E_{\text{I теор}}^+ = 1060$ ГПа) благодаря высокой (710 кДж/моль) энергии связи C—C в плоскости атомных слоев (ковалентные связи в базисных плоскостях). Длина связи C—C 0,1415 нм. В графите между плоскостями — физические связи ($G_{\text{сд}} = 4,5$ ГПа; $E_{\perp} = 36,5$ ГПа). Кристалл может быть легко изогнут (турбостратный углерод) из-за смещения ориентации базисных осей. Дефекты повышают $G_{\text{сд}}$, но являются зародышами трещин. В плоскостях — делокализация валентных π -электронов (полупроводник).

Карбин (sp -гибридизация) — полимер с линейными (длина 50–250 нм, до 2000 атомов углерода) цепочками полиинового —C=C=C=C— и (или) кумуленового =C=C=C= типа. $\sigma_{\text{теор}}^+$ до 230 ГПа. При $T \approx 2800$ °C в аргоне превращается в графит ($\rho = 1,9\text{--}2,2$ г/см³).

К переходным формам углерода относятся гомогенно-неграфитизирующиеся формы (углеродные волокна), гомогенно-кристаллизующиеся, графитизирующиеся формы (графитизированные волокна), аморфные и частично кристаллизующиеся формы (пироуглерод), пирографит, стеклоуглерод, сажи, коксы, фуллерены (букиболы), нанотрубки, астралены (фуллереноидные многослойные углеродные наночастицы, см. раздел 1.4).

Электрические свойства переходных форм углерода, как органических полупроводников, определяются делокализованными π -электронами. По величине ($10^2\text{--}10^{10}$ Ом⁻¹·см⁻¹) и характеру электропроводимости углеграфитовые тела причисляют к полупроводникам,

причем углеродные волокна относят по типу проводимости к органическим полупроводникам, а графит и графитизированные волокна охватывают область от полупроводников до проводников.

Структура углерода в его волокнистых формах предопределяет высокие значения их упруго-прочностных свойств:

Таблица 2.38. Свойства углеродных материалов [156]

| Углеродные материалы | $\sigma_{\text{теор}}^+$ | $E_{\text{теор}}^+$ | $\sigma_{\text{практ}}^+$ | $E_{\text{практ}}^+$ |
|---|--------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| Карбин (сверхкороткие кристаллы) | 220–230 | — | — | — |
| Алмаз | 200 | 1220 | — | — |
| Графитовые кристаллы (плотность идеального графита 2,27 г/см ³) | 140 | 1060 | — | — |
| Стеклоуглерод | 300 | ≈1000 | — | — |
| Нитевидные кристаллы («усы») | — | — | 20 | 900 |
| Промышленные УВ НТ/НМ | 70/25 | 500/1060 | 2–2,8 (до 5–7) | 180–500 |
| Сверхвысокомодульные УВ из ЖК-пеков типа <i>P-UHM</i> | 25 | ≥1000 | 2,2–2,5 (до 4) | 700–1000 |
| Нанотрубки однослойные/многослойные | — | — | 45/7 | 1280–1800/600 |

2.2.3.1. Углеродные и графитизированные волокна (УВ)

Наряду с высокими упруго-прочностными свойствами УВ представляют большой интерес для техники в связи с ценным комплексом эксплуатационных свойств: электропроводность, радиопоглощение (использование в силовых и радиопоглощающих конструкциях технологии *Stealth*), химическая и радиационная стойкость, теплопроводность, абляционные и триботехнические свойства, адсорбционная активность.

Высокопрочные и высококомодульные УВ (и текстильные формы из них) — компоненты многофункциональных углепластиков (углеволокнитов) конструкционных и специальных (радиопоглощающие, экранирующие, интеллектуальные) ПКМ, ВПКМ, ИПКМ.

Упруго-прочностные и электрические свойства УВ определяются условиями их получения.

Углеродные волокна (температура термообработки $T_{\text{то}}^+ < 1700$ °С, $E_{\text{п}}^+ \leq 345$ ГПа) — переходная гомогенно-неграфитизирующаяся форма углерода sp^2 -, sp^3 - (в области сконцентрированных шестичленных ароматических циклов, гексагонов, «паркетные» плоскости, слои), sp -гибридизированных связей С–С с анизотропной фибриллярной структурой. В углероде неграфитизирующихся форм монослои ароматического углерода «сшиты» термически прочными полииновыми –С≡ и кумуленовыми =С= цепочками углерода (с двумя σ -связями, π -связями) в пространственный полимер, неспособный к гомогенной кристаллизации в графитоподобную структуру, но базисные плоскости образуют пачки параллельных турбостратных графитовых кристаллов («паркетные» плоскости в микрофибрилле).

Графитовые (графитизированные) волокна ($T_{\text{то}}^+ > 1700$ °С, $E_{\text{п}}^+ \geq 345$ ГПа), выше 1900 °С — гомогенная кристаллизация, графитизация ($E_{\text{акт}} = 82$ кДж/моль) с формированием трехмерно-упорядоченной структуры. Монослои «сшиты» тремя σ -связями и одной π -связью полиенового типа –СН=СН–. При графитизации из-за их деструкции происходит поворот монослоев и укладка углеродных ароматических слоев в графитоподобную структуру. Межплоскостное расстояние d_{002} для предельно графитизированного (при 2000–2500 °С) графита составляет 0,3358 нм.

Процесс получения УВ включает несколько стадий (на примере пиролиза ПАН) (рис. 2.41).

1. Пряжа из ПАН ($\rho_v = 10^8$ Ом·м) после переработки в ПАН-волокно (1 %об. пор) при 160–270 °С подвергается контролируемому низкотемпературному окислению с растяжением (ПАН набирает до 8 %масс. кислорода с последующим соединением параллельно ориентированных макромолекул); стабилизация ПАН-волокон; окислительная дегидратация, циклизация, окисление, вытяжка в водяном паре), для получения волокон диаметром 5–8 мкм, плотность 1,36 г/см³, деформацией > 3% (иначе трещины и обрывы).

2. Карбонизация включает несколько стадий: образование лестничных полимеров, нафтининовых структур, полимеризация по группам $-C\equiv N$ с образованием полициклов. При карбонизации при 1000–1500 °С в азоте происходит выделение H_2 , NH_3 , H_2O , HCN , CH_4 , CO_2 , CO , углеводородов (потеря массы 40–45%, до 60% при 1600 °С). При $T > 600$ °С – начало деазотирования, 900 °С – максимальное выделение азота, при 1000 °С в волокне содержится 94% углерода, 6% азота, после 1200–1300 °С – 80–95% (до 98%) углерода, при 1300 °С < 0,3% азота. Азот формирует электрические свойства УВ (N-ловушка для электронов). Диазотирование при 600–1300 °С приводит к резкому падению электросопротивления из-за высокой проводимости базовых графитовых плоскостей. При 1750 °С имеет место резкое изменение электронной структуры углерода в волокне (повышение значений относительной поперечной термо-ЭДС, снижение ρ_v , электросопротивление волокон становится равным электросопротивлению нихрома, а теплопроводимость УВ в продольном направлении – теплопроводимости стали). Температуры пиролиза 1200–1400 °С обеспечивают максимальное значение прочности волокон. Выше 1400 °С σ^* снижается из-за трещин вдоль оси волокна, анизотропии физического сжатия при охлаждении волокна после термообработки.

3. Графитизация при $T > 1800$ °С, до 2500–2800 °С (2100 °С – с кристаллизаторами, пропитка солями металлов), азот, вакуум. Содержание углерода в волокне до 99%, вытяжка до 30% до 2250 °С, $\rho_v = 0,1$ Ом·м. Образование в карбонизированных (углеродных) и «графитизированных» волокнах фибрилл-лентоподобных (ширина 10–100 нм и более) изогнутых базисных плоскостей (ленточные структуры в скелете фибриллярной сетки). Фибриллы – длинные волнистые ленты из конденсированных углеродных полициклов нескольких типов: длина и амплитуда лент мала – турбостратный углерод в оболочке волокон (0,3–0,5 диаметра волокна 800–15 000 нм); длина и амплитуда лент велики – стеклоуглерод в ядре волокна.

Толщина ленты 2,9–9,0 нм определяется числом слоев (5–30) с расстоянием между плоскостями 0,337–0,345 нм, в монокристалле – 0,335 нм. Эти характеристики и, особенно, угол разориентации лент определяют σ^* и E^* волокон.

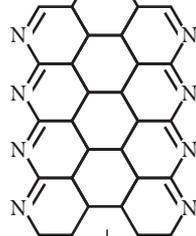
Волокна содержат неорганические и органические включения, пустоты, иглообразные и цилиндрические поры (удаление растворителей) длиной до 30 нм, диаметром 0,1–2 нм. Активность углерода в базисных графитовых плоскостях в 10–12 раз ниже, чем у углерода в торцах (используется для активации поверхности волокон, $\gamma_F = 20$ эрг/см², например, метод ЭХО). Структурные параметры УВ приведены на рис. 2.41.

2.2.3.2. Сажи

Использование технического углерода в виде саж и графита обусловлено высокой дисперсностью таких углеродных материалов и их большим электросопротивлением.

Ценной особенностью некоторых видов саж является их способность структурироваться в цепочки. Структура и свойства различных саж оказывают решающее значение на свойства экранирующих и поглощающих ЭМЭ материалов, поэтому всегда следует учитывать виды и технологию приготовления различных саж и графита.

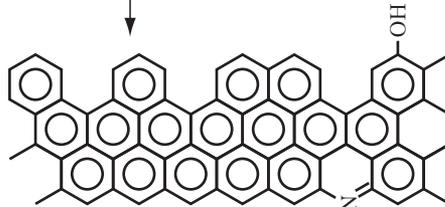
Сажа является продуктом неполного сгорания органических веществ или, что более часто встречается, их термического разложения и представляет собой мелкодисперсный углерод с незначительным содержанием примесей (поликонденсированных ароматических соединений). Размеры частиц сажи находятся в пределах от 100 до 3000 нм.



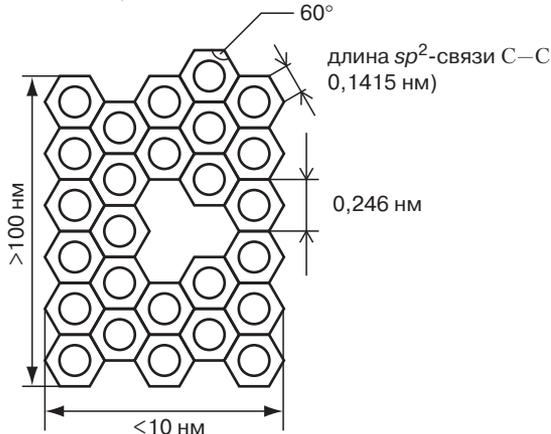
Полимеризация по группам $-C=N$ с образованием лестничных азотосодержащих структур после $1300^\circ C$

80–95% углерода; азот в торцах мешает дальнейшей циклизации

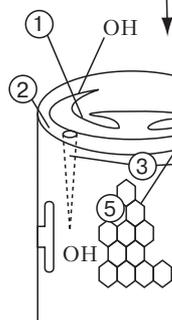
$-N_2$ (деазотирование)
 $800-1300^\circ C$



Графитизация $> 1800^\circ C$, $2500-2800^\circ C$
с катализатором $2100^\circ C$ (пропитка солями)
 N_2 или вакуум
 $-N_2$ (степень деазотирования зависит от T_{To})



При $1600^\circ C$ потеря массы 55–60%.
При $1750^\circ C$ резкое изменение электронной структуры в волокне (содержание углерода $\geq 99\%$ масс, высокая проводимость базовых графитовых плоскостей после деазотирования, удаления атомов азота, «ловушек» электронов). Изменение радиотехнических свойств (радиопоглощение). Графитизированные волокна отражают радиоволны. Углеродные (карбонизированные) волокна поглощают радиоволны.
 ρ_V 0,003–0,6 Ом·см, $\text{tg } \delta_\epsilon$ (10^{10} Гц) 0,25–0,33, λ 83,74–125,8 Вт/м·К

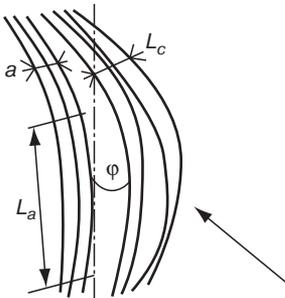


- 1 — ядро (сердцевина); фибриллы не параллельны поверхности — стеклоуглерод
- 2 — оболочка («шкурка», 0,3–0,5 диаметра волокна); фибриллы параллельны поверхности — турбо-стратный углерод
- 3 — внутренние и поверхностные трещины, поры: L до 30 нм, d 0,1–2 нм
- 4 — торцы базисных плоскостей
- 5 — базисные плоскости

Образование лестничных нафтиндиновых структур

Деазотирование (начало $600^\circ C$, максимум — $900^\circ C$).

При T_{To} $1200-1400^\circ C$ максимальное значение прочности σ углеродных волокон (в высокопрочных волокнах Hercules AS1-AS6 3K-12K при содержании азота 3–4%, 85% C, 11% O; ρ_V 0,04–0,7 Ом·см, $\text{tg } \delta_\epsilon$ (10^{10} Гц) 0,17–0,32



L_c — толщина ленты графита, число слоев 5–30 (2–9 нм)

L_a — длина «прямого» участка базовых плоскостей в ленте

a — расстояние между плоскостями 0,337–0,345 нм (монокристалл 0,335 нм)

ϕ — угол разориентации

Рис. 2.41. Химизм процесса получения углеродных волокон при пиролизе ПАН и их структура [77, 96, 97]

Важнейшими характеристиками сажи, определяющими электрические свойства наполненной полимерной композиции, являются: дисперсность, малый размер первичной структуры, малое количество примесей, формирование вторичных структур, электропроводность.

Используют три основных типа саж:

- 1) диффузионные газовые сажи (капельные), получаемые осаждением на движущиеся поверхности из диффузионного пламени природного газа при свободном доступе воздуха;
- 2) турбулентные сажи (печные), получаемые осаждением на стенках камеры при неполном сгорании жидкого топлива или его смеси с природным газом;
- 3) ацетиленовая сажа (взрывная), получаемая взрывом ацетилена в закрытых объемах с помощью электрического запала; отличается почти полным отсутствием примесей, сильным структурированием и большой электропроводностью (табл. 2.39).

Ассортимент углеродных саж постоянно расширяется в связи с их широким использованием не только в качестве пигментов и технологических добавок, но прежде всего для снижения электросопротивления ПМ и улучшения электропроводящих свойств саженаполненных полимерных композиций (сверх- и суперэлектропроводящие углеродные сажи) [138].

Массовое использование электронных устройств, сотовых телефонов, компьютеров стимулирует разработку полимерных композиций, в которых электропроводность необходима для защиты элементов интегральных схем от статических разрядов и экранирование их от электромагнитных полей.

Другой постоянно расширяющейся сферой применения проводящих полимеров и ПМ остается производство кабелей и проводов, где использование проводящих саж необходимо для создания полупроводящих конструкций, выполняющих роль защитного слоя между проводящей металлической жилой и непроводящим полимерным изолятором.

Дальнейшее расширение применения углеродных саж ожидается в автомобильной промышленности. Для нанесения покрытия как на металлическую, так и на полимерную поверхность за одну операцию полимерная поверхность должна обладать проводимостью, что достигается благодаря предварительному покрытию полимерных частей проводящим грунтом или использованию полимера, которому проводимость придана за счет введения углеродной сажи, нанотрубок [156, 159].

Факторами, определяющими электропроводность сажи (рис. 2.42), являются площадь поверхности (суммарная площадь внешних и внутренних, в микропорах, поверхностей

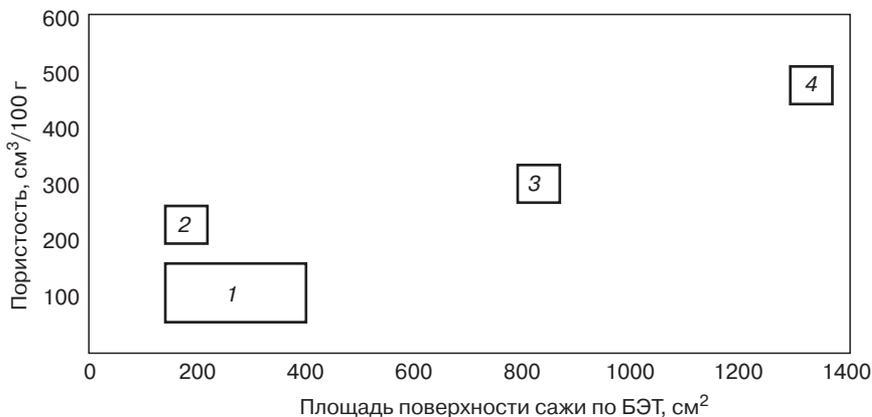


Рис. 2.42. Значения пористости и удельной площади поверхности для различных видов саж [138]: 1 — печная сажа; 2 — ацетиленовая сажа; 3 — электропроводящие сажи; 4 — суперэлектропроводящие сажи

углеродных частиц, объединенных в первичные агрегаты; БЭТ по поглощению азота и йода), структура (склонность углеродных частиц агрегировать в разветвленные войлокоподобные образования; степень структурирования, пористость в $\text{см}^3/100 \text{ г}$ определяется по поглощению дибутилфталата) и химическая природа поверхности сажи (электропроводность саж уменьшается с увеличением концентрации на поверхности кислородсодержащих групп—лактонных, хинонных, гидроксильных, карбоксильных; мерой измерения этих параметров является степень летучести). Кроме химической чистоты электропроводность саж зависит от содержания золы, металлов, серы.

Электропроводящая углеродная сажа может быть представлена как вещество, построенное из отдельных блоков. Самые маленькие блоки представляют собой углеродные частицы в виде микросфер диаметром приблизительно 30 нм, сформированные слоями атомов углерода. Они могут быть как цельными, так и полыми. Чем базовые частицы более полые, тем более развитой поверхностной площадью они обладают (йодная абсорбция).

Большое количество углеродных частиц образует первичные агрегаты, ответственные за структуру вещества. Их размер варьируется от 100 до 1000 нм. Если в процессе переработки первичные агрегаты разбиваются, часть электропроводных свойств теряется.

Большинство первичных агрегатов совместно образуют агломераты, размеры которых находятся в диапазоне от 10 до 100 мкм. Во многих случаях сажа поставляется в виде гранул. Гранулы и агломераты легко разбиваются в ходе компаундирования и/или технологических операций, таких как перемешивание или экструдирование.

В процессе смешивания с полимерами необходимо обеспечить дробление агломератов сажи на первичные агрегаты и равномерное распределение последних в смеси. При слишком низкой степени наполнения композиции сажей расстояние между первичными агрегатами достигает значений, не допускающих беспрепятственного перемещения электронов в смеси (что, собственно, и является электропроводностью). При критических и выше концентрациях сажи межагрегатное расстояние сокращается настолько, что между частицами сажи формируются электропроводящие пути.

Таблица 2.39. Характеристики саж, применяемых в производстве электропроводящих полимерных материалов [94, 95]

| Характеристики | Диффузионные (канальные), газовые высокодисперсионные | | Диффузионная газовая | Турбулентные печные | | | Ацетиленовая взрывная | |
|---------------------|---|-----------|----------------------|---------------------|-------|-------|-----------------------|------------|
| | КГ-300 | КГ-200 | ДГ-100 | ТМ-70 | ТМ-30 | ТМ-15 | — | |
| Дисперсность | Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$ | 300 | 200 | 78÷117 | 70÷80 | 30 | 15 | 60 |
| | Размер частиц, нм | 10 | 15 | 2,7÷45 | 40÷45 | 100 | 200 | 46÷52 |
| Первичная структура | Длина кристаллитов, нм | 2,95 | | 2,6÷2,8 | 2,38 | — | | 3,4/4,7 |
| | Толщина кристаллитов, нм | 1,32÷1,37 | | 1,22÷1,37 | 1,45 | — | | 2,46÷2,66 |
| | Межплоскостное расстояние, нм | 0,72÷0,77 | | 0,72÷0,723 | 0,713 | — | | 0,68÷0,686 |

Окончание табл. 2.39

| Характеристики | Диффузионные (канальные), газовые высокодисперсионные | | Диффузионная газовая | Турбулентные печные | | | Ацетиленовая взрывная |
|---------------------|---|---------------|----------------------|---------------------|---------|---------|-----------------------|
| | КГ-300 | КГ-200 | ДГ-100 | ТМ-70 | ТМ-30 | ТМ-15 | — |
| Вторичная структура | Объемное число до грануляции, см ² /г | 8 | 14 | — | 8÷10 | 5÷6 | |
| | После грануляции | — | 2,5÷3,0 | 2,5÷3,0 | — | — | |
| | Маслоемкость, мл/г | 1,3 | 0,9÷1,0 | 1,1÷1,2 | — | 1,2÷1,4 | |
| Летучие | Летучие, % | 7,4÷14,0 | 4,5÷6,0 | 0,5 | 3 | 0,3 | |
| | Летучие после прокаливания при 1700 °С, % | 1,5÷1,8 | 1,0÷1,6 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | |
| | РН до прокаливания | 2,4÷4,1 | 3,6÷4,6 | 7÷8 | 6÷7 | 8÷10 | |
| Электропроводность | ρ_v в насыщенном виде, Ом·см | 10 000÷40 000 | 1500÷15000 (гранул.) | 40÷60 (гранул.) | 100÷500 | 120÷600 | |
| | То же после прокаливания | 100÷200 | 40÷50 (гранул.) | 30÷40 (гранул.) | 30÷40 | 30÷40 | |
| | То же при давлении 10 МПа | 4÷5 | 1,5÷3,0 | 1÷2,5 | 1÷2 | 1÷2 | |

Чтобы электроны могли перемещаться по токопроводящим путям, агрегаты не обязательно должны контактировать физически, достаточно уменьшить зазор до нескольких нанометров. Электроны могут преодолевать такие межагрегатные зазоры скачком за счет так называемого «туннельного эффекта». С увеличением наполнения полимера сажей удельное сопротивление (электропроводимость) фактически не изменяется до того момента, пока не будет построена электропроводящая сеть, обеспечивающая «туннелирование» электронов. Данное состояние называется «перколяционным порогом» или «точкой флокуляции».

Повышение степени наполнения приводит к резкому снижению значений удельного сопротивления. Однако при определенных уровнях наполнения происходит насыщение электропроводящей сети и дальнейшее увеличение саженалопнения практически не сказывается на изменении сопротивления. Значение перколяционного порога зависит от типов углеродной сажи и полимера, технологии производства так же, как и от присутствия других добавок.

Дисперсность частиц сажи является ключевым параметром, отражающим проводимость композиции. При уменьшении размеров частиц (вплоть до наноразмерных) их содержание в композиции для получения требуемого удельного сопротивления снижается.

С использованием суперэлектропроводящих углеродных саж изготавливают изделия с низкими значениями ρ_s и (или) ρ_v для предотвращения накапливания статических зарядов

Таблица 2.40. Свойства некоторых типов зарубежных электропроводящих саж [138]

| Свойства | <i>Ketjenblack EC 300J</i> , фирма <i>Akzo Nobel</i> | <i>Ketjenblack EC 600JD</i> , фирма <i>Akzo Nobel</i> | <i>Printex XE2</i> , фирма <i>Degussa</i> | <i>Ensaco 350</i> , фирма <i>MMM</i> | <i>Ensaco 250</i> , фирма <i>MMM</i> | <i>Denka Black</i> , фир- ма <i>Denka</i> |
|------------------------------------|---|--|--|---|---|--|
| Адсорбция J_2 , мг/г | 775 | 1075 | 923 | 775 | 96 | 98 |
| Адсорбция ДБФ, мл/100 г | 324 | 490 | 325 | 274 | 175 | 193 |
| Летучесть, % | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,3 |
| pH | 8,6 | 9,0 | 7,0 | 7,8 | 7,2 | 6,9 |
| Насыпная плотность, г/л | 134 | 107 | 134 | 134 | 170 | 207 |
| Объемное сопротивление, Ом·см | 19(10%)* | 22(6%) | 17(10%) | 20(10%) | 14(20%) | 54(20%) |
| Содержание золы, % | 0,01 | 0,02 | 0,23 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Содержание серы, % | 0,03 | 0,06 | 0,14 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Содержание Na, K, Ca, Mg, мг/кг | 9 | 19 | 270 | 28 | 35 | 1 |
| Содержание тяжелых металлов, мг/кг | 7 | 6 | 510 | 16 | 2 | 1 |

*%об. сажи в полипропилене.

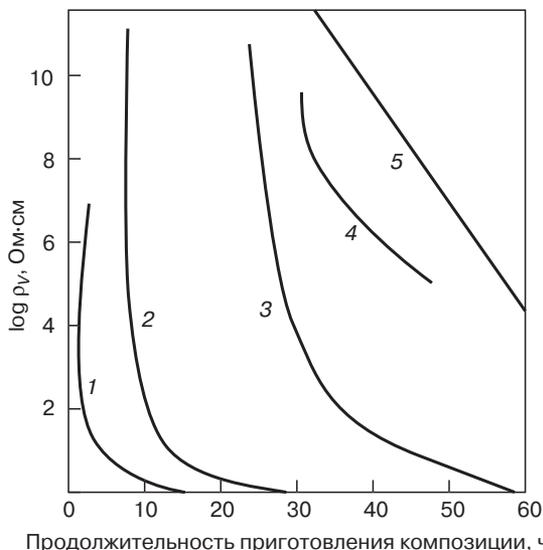


Рис. 2.43. Зависимость электропроводности токопроводящих композиций на основе полипропилена от продолжительности приготовления композиции и типа сажи [138]:

1 — сажа EC-600JD; 2 — сажа EC-300J; 3 — сверхпроводящая печная сажа; 4 — ацетиленовая сажа; 5 — высокоактивная печная сажа

(топливные баки из ПЭВД, ПЭНД; трубопроводы из ПВХ, эпоксидные покрытия полов, основа ковров из ПВХ) и для защиты от электромагнитных полей (фольга, пенопласты из ПП, ПВХ; микросхемы из полиамидов; кабели из ПЭ, ПВХ).

Перспективно использование в радиопоглощающих токопроводящих материалах углеродных наноматериалов-фуллеренов, астраленов (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы), углеродных нанотрубок, нановолокон, благодаря их высокой электропроводности (см. раздел 1.4). Концентрационный порог протекания в полимерной токопроводящей композиции фононов и π -электронов (перколяции) не более 1 %об. благодаря огромной удельной поверхности наночастиц (600 м²/г, при применении технического углерода перколяционный порог достигается при степени наполнения в 20 %об.) [139, 140, 156, 158].

В структуре сажи, полученной лазерным пиролизом бензола, присутствуют сферические и полигональные частицы, подобные фуллеренам с многослойными стенками (двойная сфера, диаметром 1,4 нм, C₆₀ внутри C₂₄₀; тройная сфера диаметром 2 нм, C₆₀ в C₂₄₀, C₈₀ в C₂₄₀ в C₅₆₀). После прокалки сажи в вакууме при 1600 °С в ней обнаружены фуллерены диаметром 0,81 нм (C₈₀) и 1,19 нм (C₁₈₀) и сверхфуллерены, подобные присутствующим в карельском минерале «шунгите».

Электропроводящие полимерные материалы имеют $\rho_v \leq 10^6$ Ом·см. В зависимости от концентрации углеродных токопроводящих наполнителей их ρ_v можно уменьшить на 13 порядков.

В радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалах в качестве наполнителей для поглощения ЭМИ в диапазоне 10⁷–10¹¹ Гц используют графит и ацетиленовую сажу, при этом их содержание увеличивают до 25–50 %об. Графит представляет собой кристаллический материал с минимальным размером кристаллита 500 нм (у коллоидного графита). На практике применяются графиты со значительно большими размерами частиц от 5 до 30 мкм.

При поглощении более высоких частот предпочтительно использовать печные сажи, при этом их содержание в пленке понижают до 8–25 %об.

Введение графита или углеродных волокон вместе с сажей понижает электросопротивление [17, 24, 94, 95]. Дальнейшее совершенствование РП и РЭ материалов связано с использованием нанодисперсных токопроводящих наполнителей.

2.2.3.3. Углеволокнистые материалы

В высокотемпературном процессе пиролиза волокон ПАН и ГЦ, проходят сложные химико-физические превращения с изменением электрофизических свойств на всех этапах термообработки (рис. 2.41).

После карбонизации при 1000 °С в волокне присутствует 94% углерода и 6% азота. После образования карбонизованного волокна в результате полимеризации по группам CN с образованием полициклов ρ_v исходного ПАН, равное 10⁸ Ом·м, снижается до 0,003–0,6 Ом·см. $\text{tg } \delta_e$ составляет при 10¹⁰ Гц 0,25–0,33 (коэффициент теплопроводности 83,74–125,6 Вт/м·К). В интервале 600–1300 °С идут процессы деазотирования (600 °С – начало, максимум при 900 °С, при 1300 °С содержание азота 0,3%). Азот формирует электрические свойства волокон (атомы азота – «ловушка» для электронов). При 1600 °С потеря массы исходного полимера составляет 55–60%. Уже при 1300 °С наблюдается резкое изменение электросопротивления, а при 1750 °С – резкое изменение электронной структуры в волокне. При содержании углерода в волокне на уровне 99% реализуется высокая проводимость базовых графитовых плоскостей после полного деазотирования, повышение значений относительной поперечной термо-ЭДС (рис. 2.44–2.46). Углеродные (карбонизированные) волокна поглощают радиоволны. Электропроводность волокон становится равной электропроводности нихрома, теплопроводность λ_{11} – теплопроводность стали. Формируется и структура, определяющая упруго-прочностные свойства (образование в волокне фибрилл – лентоподобных изогнутых базисных плоскостей, ядро из стеклоуглерода, фибриллы не параллельны поверхности, оболочка из турбостратного углерода, фибриллы параллельны поверхности; внутренние и поверхностные трещины l до 30 нм, d 0,1–2 нм).

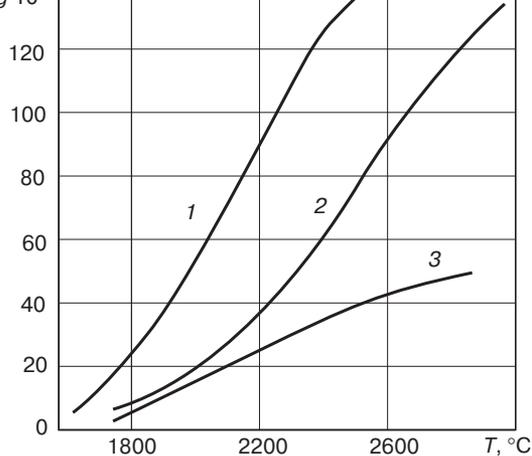


Рис. 2.44. Изменение анизотропии g -фактора ($\Delta g = g_{\perp} - g_{\parallel}$, характеризует особенность графитизации мезоморфной структуры) углеродных волокон из пека (1 — длительная, 2 — кратковременная термообработка и ПАН (3). Спектры ЭПР [96]

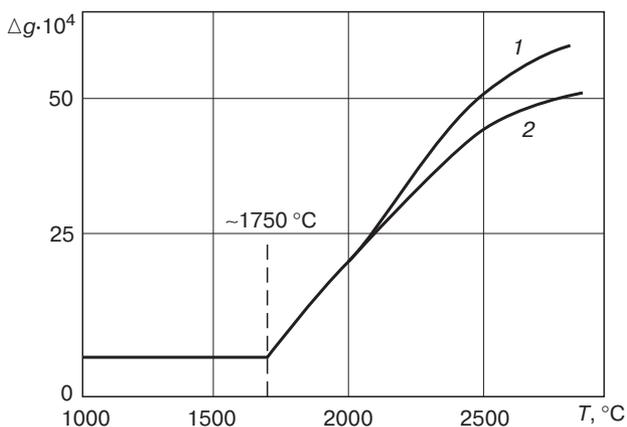


Рис. 2.45. Изменение анизотропии g -фактора в спектрах ЭПР углеродных волокон на основе ПАН в зависимости от температуры термообработки (измерение при 300 К — 1, при 77 К — 2) [96]

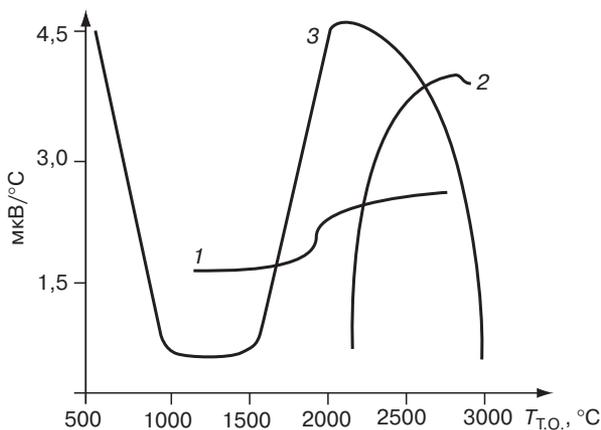


Рис. 2.46. Зависимость термо-ЭДС углеродных волокон (УВ) от температуры термообработки [96, 99]: 1 — УВ из ГЦ волокна; 2 — УВ из ГЦ волокна, легированного бором (0,1–0,7 % масс.); 3 — УВ из нефтяного кокса

К графитированным волокнам с определенными допущениями может быть применена зонная теория проводимости. Согласно зонному механизму носители заряда движутся по обобщенным энергетическим зонам S -электронов всего полимера. Концентрация носителей в зоне проводимости зависит от энергии вырывания электрона из S -сопряженной системы с переходом его в проводящее состояние, и увеличивается с ростом температуры.

Однако углеродные УВ представляют собой не чистый углерод, и в них велика доля «аморфного» углерода. В этом случае делокализация π -электронов скорее всего ограничивается кристаллами, разделенными изолирующими цепочками «аморфного» углерода с включением гетероатомов.

Поэтому для УВ наиболее вероятен перескоковый механизм проводимости, когда носители тока из одной области «хорошей» проводимости перескакивают в другую с активным преодолением энергетических барьеров, создаваемых плохо проводящими областями. По каждому из механизмов проводимости в роли носителей тока могут выступать как электроны, так и «дырки», обладающие разной степенью подвижности.

Чаще всего электрофизические свойства УВ и углеродных волокнистых материалов характеризуют не проводимостью, а электрическим сопротивлением.

Измерение электрического сопротивления углеродных волокнистых материалов (УВМ) осуществляется различными методами, которые можно разделить на четыре группы.

1. Измерение сопротивления одиночного волокна путем присоединения его концов к контактам измерительной схемы.
2. Измерение сопротивления отрезка нити, шнура, жгута и т. д. с помощью ножевых электродов по двух- или четырехзондовому методу.
3. Измерение поверхностного сопротивления квадратного участка листовых УВМ (тканей, нетканых материалов, плит, бумага).
4. Измерение сопротивления углеродного волокна в пресс-форме подобно тому, как это делается для порошковых углеграфитовых материалов.

Однако значения объемного сопротивления ρ_v , полученного различными методами для УВ одного и того же типа, существенно отличаются друг от друга.

На величину электрической проводимости УВ влияет температура термообработки в процессе их получения так же, как и для других углеграфитовых материалов (рис. 2.47).

Общим для всех кривых является резкое (на 7–17 порядков) падение величины электрического сопротивления в интервале температур 300–800 °С, замедление падения при 800–900 °С и плавный, почти горизонтальный ход кривой при температуре выше 900–1200 °С. При росте температуры с 1500 до 3000 °С величина ρ_v изменяется не более чем на 40–60%.

Изменение электрического сопротивления является показателем структурных превращений в углеродном материале, происходящих при карбонизации и графитации.

При сравнительно низкой температуре термообработки, когда химическое строение УВ еще находится на промежуточной стадии между строением исходного и углеродного полимера, можно получать УВ с повышенной электрической проводимостью путем направленной модификации химической структуры исходного полимера.

Полимеры, содержащие гетероатомы в цепи сопряжения (гидроцеллюлоза), имеют более высокую электрическую проводимость, чем системы, не содержащие гетероатомов (УВ на основе ПАН), за счет дополнительных неподеленных пар электронов (рис. 2.48).

Для повышения электрической проводимости готовых УВ на их поверхность или внутрь их вводят из газовой фазы подходящий металл или его соль, в ряде случаев с образованием на его поверхности карбидов.

Для получения стойких в атмосферных условиях материалов УВ модифицируют бором непосредственно в процессе получения волокон. Сущность происходящего процесса — замещение бором атома углерода в кристаллической решетке (базисной плоскости), то есть получение соединения включения, а не внедрения. При введении бора в низкомолекулярное УВ на основе ГЦ возрастает количество дырок, содержащихся в валентной π -зоне, так как бор

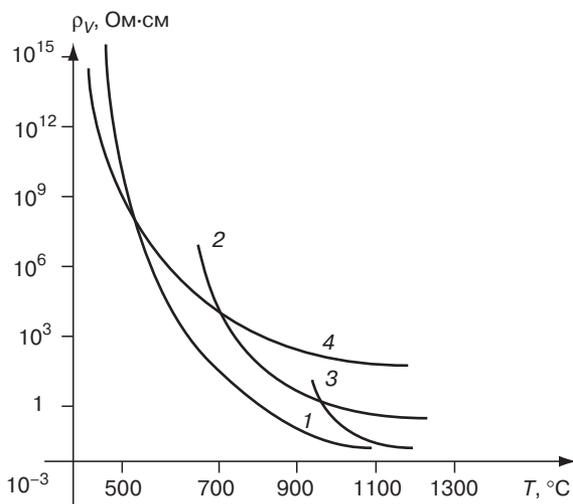


Рис. 2.47. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры термообработки [96]: 1 — полиакрилонитрил (ПАН); 2 — лигнин; 3 — пек из поливинилхлорида; 4 — нефтяной пек

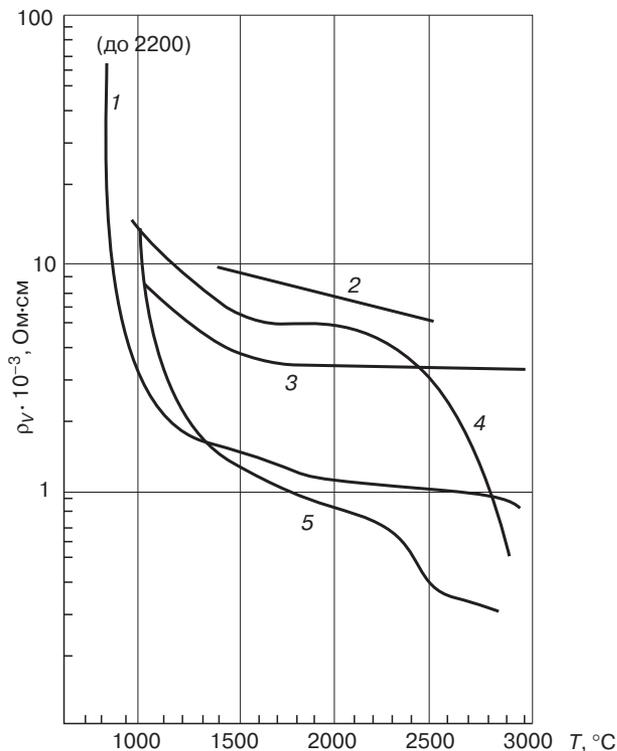


Рис. 2.48. Зависимость удельного электрического сопротивлений углеродных волокон (ρ_v) от температуры термообработки исходных волокон из [96, 97]: 1 — ПАН; 2 — ГЦ; 3 — изотропный пек; 4 — графитизированные волокна из ГЦ и пека; 5 — ЖК-пек

является акцептором электронов для углеродистых тел. В то же время в присутствии бора ускоряются структурные превращения в УВ, происходящие с ростом температуры термообработки ($T_{\text{то}}$), то есть процесс графитизации. Легированное бором волокно имеет в диапазоне $T_{\text{то}}$ 2000–3000 °С на 40–50% меньшую величину удельного электрического сопротивления и иные термоэлектрические свойства. При введении бора в высокомодульные УВ прочность не меняется, модуль увеличивается, а удельное электрическое сопротивление снижается.

При использовании УВ в электротехнике имеет значение характер изменения величины электрического сопротивления при изменении температуры, то есть знак и величина ТКС. Эти данные позволяют получить дополнительные сведения о структурных превращениях, происходящих в УВ при термообработке (рис. 2.49). Взаимосвязь между электропроводностью, условиями $T_{\text{то}}$ и модулем упругости приведена на рис. 2.50–2.52.

Для этих УВ характерна перемена знака ТКС. Кривые проходят через минимум. Этот минимум с увеличением $T_{\text{то}}$ образцов, то есть с ростом кристаллитов, последовательно смещается в сторону низких температур измерений.

При измерениях ТКС карбонизованных и углеродных сульфированных волокон на основе монокарбоксилцеллюлозы (МКЦ) установлено, что с ростом температуры измерения электрическое сопротивление волокон уменьшается на всем интервале температур измерения.

Карбонизованное волокно ведет себя так же, как угольный электрод, волокно с $T_{\text{то}} = 3000$ °С имеет положительную величину ТКС так же, как металлы, а для всех остальных образцов характерно промежуточное состояние с переменной знака ТКС. С ростом $T_{\text{то}}$ и соответственно с совершенствованием структуры минимумы на кривых смещаются в сторону низ-

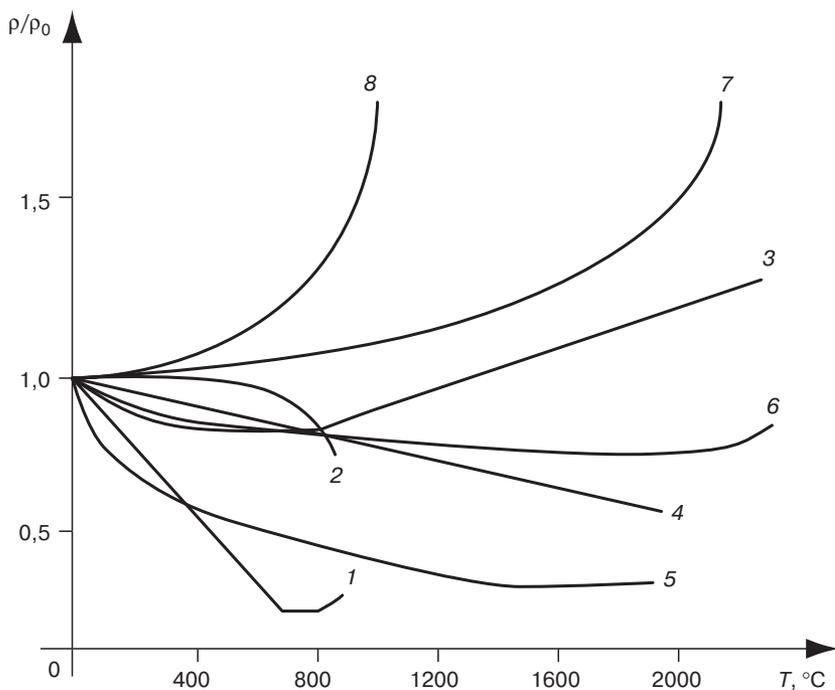


Рис. 2.49. Зависимость ρ/ρ_0 углеродных материалов от температуры [98, 99]:

1 – графитизированное волокно ($T_{\text{то}}$ 2000 °С); 2 – карбонизованное волокно ($T_{\text{то}}$ 1400 °С); 3 – поликристаллический графит; 4 – углеродный электрод; 5 – углеродная нить с $T_{\text{то}}$ 2000 °С; 6 – углеродная нить с $T_{\text{то}}$ = 2200 °С; 7 – углеродная нить с $T_{\text{то}}$ = 2500 °С; 8 – углеродная нить с $T_{\text{то}}$ = 3000 °С

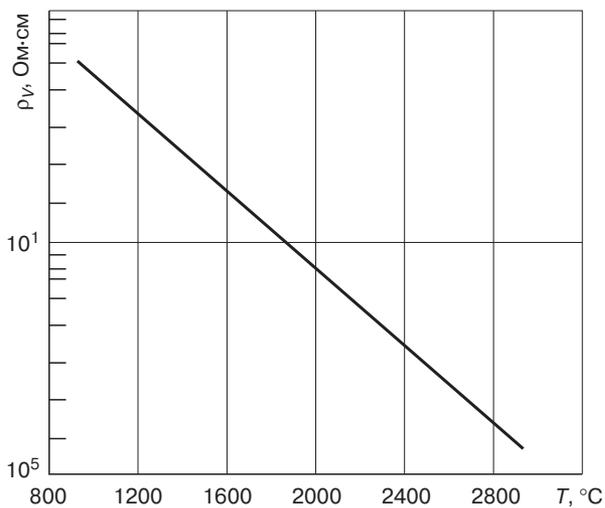


Рис. 2.50. Зависимость удельного сопротивления ρ_v углеродных волокон из пека от температуры термообработки [96]

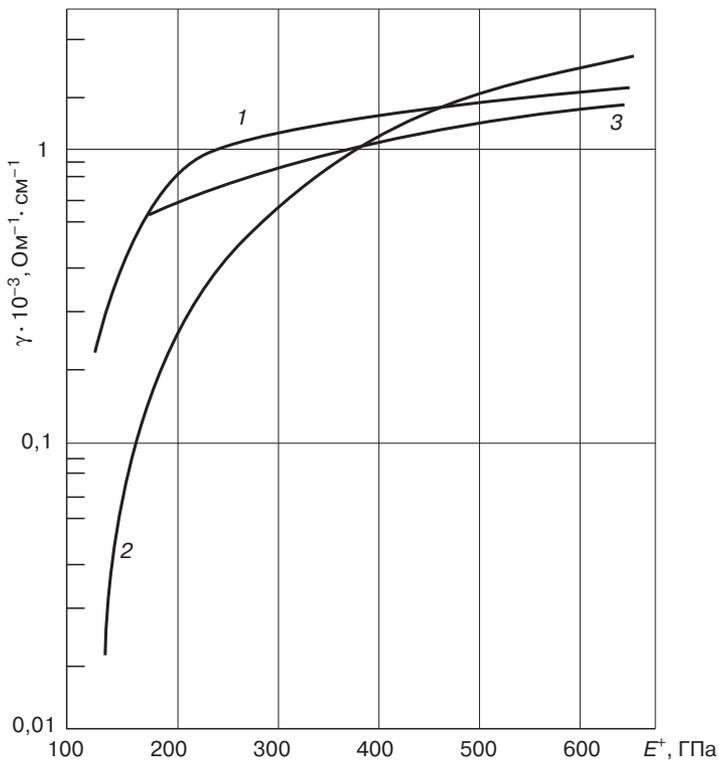


Рис. 2.51. Соотношение между удельной электропроводностью γ углеродных волокон на основе пека (1), ПАН (2), вискозы (3) и модулем упругости при растяжении E^+ этих волокон [96]

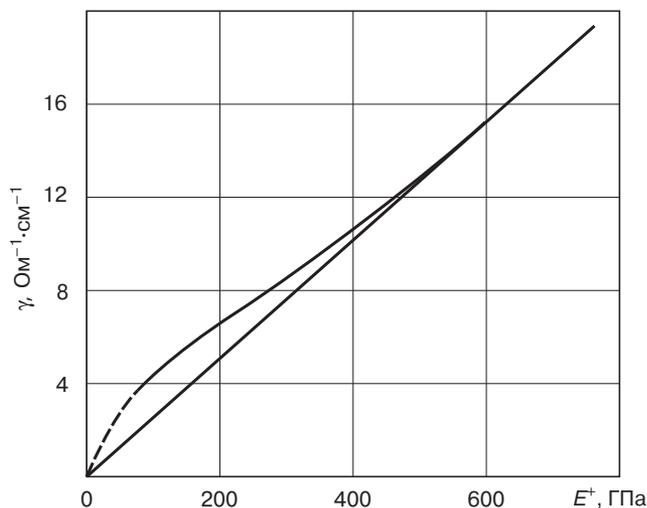


Рис. 2.52. Соотношение между удельной электропроводностью γ и модулем упругости при растяжении E^+ углеродных волокон на основе вискозы (гидратцеллюлозы) [96]

ких температур измерений. Исчезновение минимума на кривой 8 связано с высокой степенью графитации нити (см. рис. 2.49).

Легирование бором и некоторые другие химические воздействия на углеродные тела существенно сказываются на зависимости электрической проводимости от температуры. ТКС волокон, легированных бором, на порядок ниже ТКС обычных волокон.

Для углеродных тел чрезвычайно характерны изменения термо-ЭДС и коэффициента Холла R_H при изменении T_{10} (рис. 2.46). В зависимости от вида кокса, его химической чистоты и условий коксования эти показатели могут варьироваться. Однако для хорошо графитирующихся материалов не меняется характер кривых этих зависимостей, так как оба параметра связаны с концентрацией носителей тока. Их знак позволяет получить представление о преобладающем в исследуемом веществе типе носителей (электронов в случае отрицательных и дырок в случае положительных значений).

Для УВ без добавки бора и нефтяного кокса в области $T_{10} = 1100\text{--}3000^\circ\text{C}$ ход кривых термо-ЭДС во многом аналогичен. В низкотемпературной зоне (до 900°C) термо-ЭДС нефтяного кокса имеет положительные значения, непрерывно уменьшается с ростом ТТО и достигает минимума при температуре 1200°C . Наряду с данными коэффициента Холла для кокса это свидетельствует о росте числа носителей тока за счет формирования новых сопряженных связей. Электронная проводимость, наблюдаемая у коксов после их прокалики при температуре $900\text{--}1500^\circ\text{C}$, объясняется освобождением большого количества периферийных атомов водорода. Рост термо-ЭДС в интервале температур $1500\text{--}2000^\circ\text{C}$ свидетельствует о постоянном уплотнении материала и о постоянном уменьшении концентрации носителей. Концентрация носителей уменьшается за счет роста размеров кристаллитов и соответствующего падения концентраций σ -электронов, которая зависит от относительного количества периферийных атомов и связана с удалением примесей при нагревании.

Другим возможным объяснением дырочной проводимости при T_{10} выше 1700°C является возникающая при этой температуре и далее увеличивающаяся электронная эмиссия углеродных материалов. Лишь при $T_{10} 2000\text{--}2500^\circ\text{C}$ рост кристаллитов компенсирует недостаток электронов в веществе. Последующее увеличение их подвижности обуславливает при T_{10} выше 1700°C выравнивание концентраций дырок и электронов, что приводит к электронной проводимости коксов (УВ) за счет большой подвижности электронов. Для нефтяного кокса с

ростом температуры измерения максимум термо-ЭДС смещается в сторону меньших температур термообработки. Это объясняется ростом подвижности электронов.

При легировании УВ бором существенно меняется характер зависимости термо-ЭДС от $T_{то}$. Все структурные превращения протекают при более низкой температуре.

Поскольку электрическая проводимость УВ зависит в первую очередь от температуры термообработки, а для различных целей выпускаются низкоомные УВМ (углеродные волокнистые материалы) частично карбонизованные, углеродные и графитированные, то промышленный ассортимент УВМ включает материалы с различной электрической проводимостью. В табл. 2.41 приведены данные для углеродных тканей и войлоков. Как видно из таблицы, электрическое сопротивление углеродных тканей иногда различается по величине на 4–5 порядков.

Учитывая характер зависимости электрического сопротивления УВ от температуры термообработки, можно заключить, что получение материалов с равномерным электрическим сопротивлением при низкой температуре термообработки весьма затруднительно. В этом случае незначительные колебания температуры при карбонизации или даже наличие небольшого температурного градиента по высоте или сечению реактора может привести к большому разбросу величины электрического сопротивления по сечению или длине УВМ.

Поэтому, как правило, широкие углеродные ткани, особенно полученные при низких температурах термообработки, неравномерны по электрическому сопротивлению. В электротехнике в связи с этим чаще всего применяют графитизированные ткани.

Кроме тканей и пряжи в разных странах выпускают другие УВМ с заданной величиной электрической проводимости.

В России выпускают, например, углеродные жгуты из волокна «углен» и «грален» с удельным электрическим сопротивлением соответственно 0,2 и 0,05 Ом·см, шнур и тесьму с электрическим сопротивлением отрезка длиной 100 мм 14–80 и 25–60 Ом соответственно, модифицированную нить с сопротивлением отрезка длиной 25 мм 300–600 Ом, углеволокнистую бумагу с сопротивлением квадрата 100×100 мм 45–600 Ом, а также другие материалы (табл. 2.42, 2.43).

Таблица 2.41. Электрическое сопротивление низкоомных УВМ [98]

| Тип углеродного материала | Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·см | Относительное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом/м ² |
|----------------------------|---|--|
| 1) Ткань углеродная С К | — | 0,4 |
| 2) Ткань углеродная СА | — | 0,5 |
| 3) Войлок углеродная | — | 20–10 ⁵ |
| 4) Войлок графитовый | — | 0,3–0,6 |
| 5) Ткани ТГ-1,2 | 10 ⁻² | — |
| 6) Углеродная Ткань ТГМ-2М | 5·10 ⁻² –7 | — |
| 7) Ткань ТМП-1,3,4 | 10 ⁻² –2·10 ⁻² | — |
| 8) Ткань УТМ-8 | 50 | — |
| 9) Ткань УТМ-Б | 5 | — |

Примечание: 1–4 — фирма *Union Carbide*; 5–9 — Россия.

Таблица 2.42. Свойства некоторых низкоомных УВМ [98]

| Наименование материала | Толщина, мм | Масса квадратного метра, г | Масса погонного метра, г | Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м | Погонное электрическое сопротивление, Ом/м | Модуль упругости, кПа |
|------------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|---|--|-----------------------|
| <i>Ткани:</i> | | | | | | |
| УУТ-2 | 0,6 | 350–390 | — | 0,1–0,3 | — | — |
| УВМ-4 | 2,3–2,6 | 1200–1250 | — | 0,1–0,3 | — | — |
| ВГ | 0,5–0,6 | 320–420 | — | $5 \cdot 10^{-2}$ | — | — |
| УТМ-8 | 0,9 | 400 | — | 50 | — | — |
| ТГ-2 | 0,7 | 200–300 | — | $1 \cdot 10^{-2}$ | — | — |
| <i>Жгут:</i> | | | | | | |
| Углен | — | — | 10–15 | 0,2 | — | 20 |
| Грален | — | — | 9–14 | $5 \cdot 10^{-2}$ | — | 40–50 |
| Модифицированный жгут | — | — | 25–30 | $1 \cdot 10^{-2}$ | — | 80–120 |
| <i>Шнур:</i> | | | | | | |
| Жила 98П | 2 | — | 0,5–0,7 | — | 110 | — |
| УЭШ-21 | 2 | — | — | — | 250–260 | — |

Таблица 2.43. Свойства электропроводящих углеродных и углеродсодержащих материалов [98]

| Углеродный наполнитель | Толщина, мм | Ширина, мм | Удельное сопротивление, $R_{\text{осн}}/R_{\text{ут}}$, Ом | Максимальная температура длительной эксплуатации, °С |
|---|-------------|------------|---|--|
| Ленты углеродные ЛУ, ЛЖУ, УОЛ | 0,1–0,35 | 270–330 | Менее 0,2 | 350 |
| Ленты углеродные ВИСКУМ | 0,3–0,5 | 20–40 | 0,5–1,5 | 350 |
| Ткани углеродные УРАЛ, ТГН, УУТ-2, ВИСКУМ ТО-15 | 0,3 | 500 | $\frac{0,28–0,35}{0,3–0,54}$ | 350 |
| Ткани углеродные ДЕСНА, ВИСКУМ Т-1-15 | 0,5 | 500 | 0,52–0,54 | 350 |
| <i>Ткани углеродные:</i> | | | | 350 |
| УТ-900-2,5 | 0,25 | 900 | 0,25–0,27 | |
| УТ-900-5 | 0,5 | 900 | 0,18–0,2 | |
| <i>Стеклоткани с пироуглеродным покрытием:</i> | | | | |
| КЛШ-11-290-ПУ | 0,2–0,3 | 290 | Набор тканей от 20 до 530 Ом | 350 |
| РПС (ТУ 6-0,2-106-76) | | 290–800 | | |

Окончание табл. 2.43

| Углеродный наполнитель | Толщина, мм | Ширина, мм | Удельное сопротивление, $R_{\text{осн}}/R_{\text{ут}}$, Ом | Максимальная температура длительной эксплуатации, °С |
|---|-------------|------------|---|--|
| Стеклоткань, пропитанная электропроводящим связующим ТПС-7 ОГС «А» | 0,5 | 900 | $\frac{237}{294}$ | 140 |
| Ткани из полимерных волокон электропроводящие (волокно БИКАРБОН) РН-1 | 0,35 | 2000 | Набор тканей 30–300 | 100 |
| <i>Бумаги электропроводящие:</i> | | 500 | Набор бумаг | |
| углеродфенилоновые | 0,1 | | 60–1000 | 200 |
| углестекловолоконистые | 0,2–0,5 | | 200–1000 | 350 |
| углеродцеллюлозные | 0,3 | | 30–300 | 90 |

Возможность регулирования электрофизических свойств углеродных волокон позволяет использовать их в поглощающих и экранирующих ЭМИ радиодиапазона материалах и эффективно использовать для придания антистатических свойств (углеродные волокна на 5–10% эффективнее сажи благодаря снижению ρ_v) (рис. 2.53). При частотах ниже 1 ГГц эпоксидные углепластики отражают радиоволны.

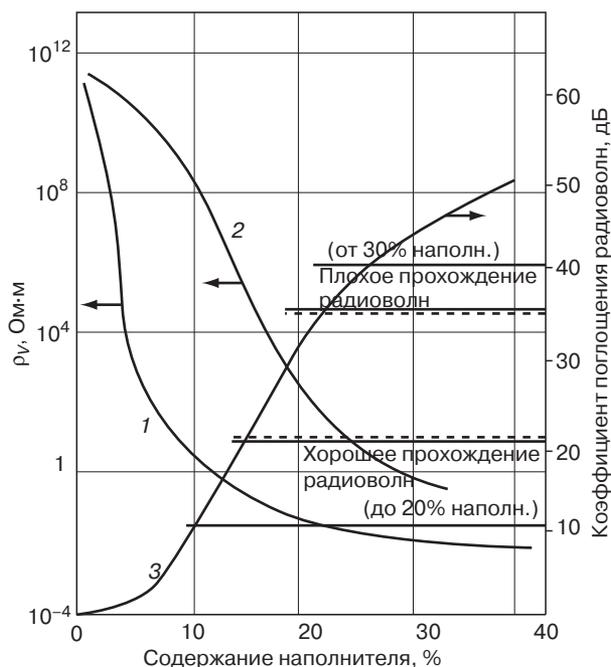


Рис. 2.53. Зависимость удельного электрического сопротивления углепластиков (1 и 3 — ПА66 + УВ; 2 — ПА66 + газовая сажа) и коэффициента поглощения радиоволн (3, 10 МГц, толщина образца 3 мм) от содержания наполнителя [77, с. 82]

2.2.4. Материалы с особыми магнитными свойствами

Теоретические представления о материалах с особыми магнитными свойствами рассмотрены ранее в разделах 2.1.3 и 2.1.4. Магнитотвердые материалы используют для изготовления постоянных магнитов. Литьевые (Fe–Ni–Al), порошковые (Fe_x–Ni–Al, спекание при 1300 °С в защитной атмосфере; FeO–BaO–CoO – ферриты-диэлектрики работают в высокочастотных магнитных полях без тепловых потерь; для достижения больших значений магнитной энергии от 55–72,5 кДж/м³ для материалов на основе сплавов системы Sm–Co, до 256–400 кДж/м³ – на основе Nd₂Fe₁₄B); деформируемые (Fe–Cr–Co, Cu–Ni–Co) магнитотвердые материалы намагничиваются в сильных полях $H > 1000$ кА/м, имеют большие потери при перемагничивании, остаточную индукцию $B_r = 0,1–1,0$ Тл и коэрцитивную силу $H_c \leq 560$ кА/м.

Магнитомягким называют магнитный материал с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м. Магнитомягкие материалы имеют высокое значение начальной магнитной проницаемости, способны намагничиваться до насыщения в слабых полях. Они используются в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля и применяются в электромашиностроении, трансформаторостроении, в электротехнической и радиотехнической промышленности, измерительной технике, системах автоматики и телемеханики, вычислительной технике. К магнитомягким материалам относят ферромагнитное особо чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали (нелегированные и кремнистые), прецизионные низкокоэрцитивные сплавы на железной и железоникелевой основе, порошковые ферро- и ферримагнитные и композиционные магнитодиэлектрические материалы, которые классифицируют по основному нормируемому магнитному параметру.

Магнитомягкие материалы намагничиваются в слабых магнитных полях ($H \leq 5 \cdot 10^4$ А/м) вследствие большой магнитной проницаемости ($\mu'_H \leq 70 \cdot 10^3$ и $\mu'_{\max} \leq 240 \cdot 10^3$) и малых потерь на перемагничивание.

При перемагничивании ферромагнетиков в магнитном поле возникает несколько видов энергетических потерь. Потери на гистерезис или перемагничивание для магнитомягких материалов невелики, в отличие от тепловых удельных потерь, связанных с возникновением токов Фуко.

При заданной напряженности магнитного поля H тепловые потери растут пропорционально квадратам амплитуды магнитной индукции B_m , частоты магнитного поля f , толщины сердечника d и обратно пропорционально удельному электрическому сопротивлению ρ .

В переменных полях появляется еще один вид потерь как результат сдвига по фазе индукции B и напряженности поля H . В таком поле магнитная проницаемость выражается комплексным числом $\mu = \mu' + i\mu''$.

Потери энергии характеризует $\operatorname{tg} \delta_\mu = \mu''/\mu'$. С ростом частоты поля μ' снижается интенсивнее, чем растет μ'' .

Тепловые потери и значение $\operatorname{tg} \delta_\mu$ определяют допустимые рабочие частоты, поэтому магнитомягкие материалы подразделяют на низко- и высокочастотные.

Энергия Q , которая выделяется при одном цикле воздействия магнитного поля на ферромагнетик пропорциональна $\operatorname{tg} \delta_\mu$, который характеризует поглощение магнитной составляющей электромагнитной энергии в магнитомягком ферромагнетике.

$$Q = \frac{H^2}{8\pi} \omega \mu'' = \frac{H^2}{8\pi} \omega \mu' \operatorname{tg} \delta_\mu,$$

где ω – угловая частота.

Поглощение магнитной энергии обуславливает магнитный нагрев («потери» – переход ЭМЭ в тепловую).

В диэлектрической компоненте магнитодиэлектриков энергия Q , которая выделяется при одном цикле воздействия электрического поля на диэлектрик

$$Q = \frac{E^2}{8\pi} \omega \epsilon'' = \frac{E^2}{8\pi} \omega \epsilon' \operatorname{tg} \delta_\epsilon$$

пропорциональна $\operatorname{tg} \delta_e$, который характеризует поглощение электрической составляющей электромагнитной энергии в диэлектрике. Поглощение электрической энергии обуславливает диэлектрический нагрев («потери» — переход ЭМЭ в тепловую).

Низкочастотные (с высокой индукцией насыщения сплавы на основе железа, $\text{Fe}(\text{CO})_5$, не легированных и легированных электротехнических сталей и сплавы систем Fe–Ni, пермаллой, Fe–Co, Fe–Al, альсиферы с высокой магнитной проницаемостью) применяют для изготовления сердечников катушек электромагнитов, трансформаторов, динамомашин, в качестве компонентов (порошки, хлопья, волокна) поглощающих и экранирующих ЭМЭ композиций.

Магнитомягкие сплавы с большой магнитострикцией используют в ультразвуковой и гидроакустической аппаратуре для изготовления излучателей, ультразвуковых преобразователей энергии, линий задержки в электрических цепях и электромеханических фильтров. Применение каждого магнитострикционного сплава определяется комплексом магнитных и механических свойств, а также сохранением этого комплекса во всем интервале рабочих температур. Коэффициент магнитной связи $k = E_1/E_2$ показывает, какая доля подведенной магнитной или механической энергии E_2 преобразуется соответственно в механическую или магнитную энергию E_1 (без учета магнитных и механических потерь).

Добротность магнитострикционного материала характеризует магнитострикционная постоянная $a = \sigma/B$, где σ — напряжение, Па; B — соответствующая этому напряжению индукция, Тл. Измеряют a в процессе намагничивания сердечника при его фиксированной деформации, то есть когда сердечник предварительно упруго сжат.

Величина B/σ , обратная a , называется динамической постоянной чувствительности.

Потери энергии при магнитострикционных колебаниях превращаются в теплоту и вызывают нагрев изделий. Чем выше температура точки Кюри θ , тем меньше изменяются магнитные свойства из-за этого нагрева. Например, у сплава 49К2Ф удельные потери при $B = 1$ Тл и f , равной 100 и 1000 Гц, составляют 2 и 20 Вт/кг соответственно, а при $B = 2$ Тл и таких же значениях $f = 6$ и 60 Вт/кг.

Интенсивность намагничивания у магнитомягких термомагнитных сплавов уменьшается с повышением температуры, поэтому, чтобы компенсировать ошибки приборов, обусловленные изменением магнитного потока при изменении температуры, в магнитную цепь вводят шунты. Магнитная индукция ферромагнетиков очень резко изменяется вблизи точки Кюри, поэтому материал шунта должен иметь температуру точки Кюри в интервале рабочих температур. Этим условием удовлетворяет сплав $\text{Fe}^+ (30\text{--}35\%) \text{Ni}$, который перестает быть ферромагнитным при 100 °С. Введение в сплав хрома или алюминия дополнительно снижает температуру точки Кюри.

Высокочастотные магнитомягкие материалы представляют собой большую группу магнитных керамических материалов. Магнитодиэлектрики на их основе в сердечниках индукционных катушек устраняют потери на токи Фуко. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса применяют в вычислительной технике (в марке буквы ВТ). Маркируют их по значению коэрцитивной силы: число в марке — значение H_c в А/м (табл. 2.44).

Таблица 2.44. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса [100]

| Марка феррита | H_c , А/м | B_r , Тл | α | θ , °С |
|---------------|-------------|------------|----------|---------------|
| 10ВТ | 9,6 | 0,20 | 0,91 | 115 |
| 30ВТ | 29,6 | 0,14 | 0,93 | 145 |
| 56ВТ | 56,0 | 0,23 | 0,93 | 160 |
| 100ВТ | 104 | 0,23 | 0,91 | 160 |
| 140ВТ | 140 | 0,21 | 0,90 | 200 |
| 180ВТ | 184 | 0,13 | 0,89 | 224 |

Ферриты с низким значением коэрцитивной силы (10ВТ, 30ВТ, 56ВТ) применяют в переключающих устройствах, с высоким (100ВТ, 140ВТ, 180ВТ) — в запоминающих устройствах. У последних выше температурная стабильность (выше точка Кюри), поэтому они более надежны для хранения информации.

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса имеют коэффициент прямоугольности $\alpha = B_r/B_s$, близкий к единице и, как следствие, малое время перемагничивания.

Наибольшее применение получили ферриты из оксидов магния и марганца. Наилучшие характеристики наблюдаются у ферритов состава $MgO \cdot 3MnO \cdot 3Fe_2O_3$, а также у полиферритов, содержащих дополнительно оксиды цинка, кальция, лития. Для этих ферритов характерна спонтанная прямоугольная петля гистерезиса. Магнитная текстура (параллельная ориентация вектора магнитных моментов в объеме феррита) формируется у них непосредственно при охлаждении после спекания в результате магнитострикционных явлений.

Устройства вычислительной техники из ферритов изготавливают в виде тонких пленок или слоистых матриц, что обеспечивает их малые габариты и высокое быстродействие. Тонкие пленки получают испарением в вакууме или катодным распылением с осаждением на подложке.

Но основное назначение ферритов, как компонентов магнитодиэлектриков, связано с эффективным поглощением ими энергии радиодиапазона при высоких (до 800 МГц) и сверх-высоких (от 800 МГц) частотах.

2.2.4.1. Низкочастотные магнитомягкие материалы [18, 100]

Низкочастотные магнитомягкие материалы подразделяют на низкочастотные с высокой индукцией насыщения B_s и низкочастотные с высокой магнитной проницаемостью μ (начальной μ_H и максимальной μ_{max}).

К материалам с высокой индукцией насыщения относят железо, легированные и легированные электротехнические стали. Благодаря большой магнитной индукции ($B_s \leq 2,15$ Тл), малой коэрцитивной силе ($H_c \leq 100$ А/м), достаточно высокой магнитной проницаемости ($\mu'_{max} \leq 63 \cdot 10^3$) и хорошей технологичности их применяют в электротехнике для магнитных полей напряженностью от 10^2 до $5 \cdot 10^4$ А/м.

Наибольшее количество примесей содержит технически чистое железо. Технически чистым называют железо с суммарным содержанием примесей до 0,08–0,1%, в том числе углерода до 0,05%. Железо имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, в связи с этим его используют для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, магнитопроводы реле).

Технически чистое железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. Магнитные свойства железа определяются количеством и составом примесей, наиболее вредными из которых являются углерод, кислород, сера, азот и водород. При содержании 0,02–0,04% С и остальных примесей в количестве 0,6% железо обладает достаточно хорошими магнитными свойствами: $H_c = 64$ А/м и $\mu'_{max} = 7,2 \cdot 10^3$. В процессе изготовления проката в нем возникают остаточные напряжения, а в решетке — большое количество дислокаций, что ухудшает магнитные свойства железа. Отжиг в вакууме или водороде устраняет дефекты и напряжения.

Особо чистое железо получают двумя методами: электролизом раствора сернокислого или хлористого железа и термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ с последующим спеканием. Существенное улучшение магнитных свойств можно получить после очистки железа от углерода и примесей электролизом. Такое железо, особенно переплавленное в вакууме, имеет более высокую магнитную проницаемость, которая почти на порядок выше, чем в технически чистом железе. В той же степени снижается H_c . Полученное железо называют соответственно электрическим и карбонильным. Карбонильное железо используют в виде порошка в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных магнитодиэлектриков и в виде листов различной толщины.

Таблица 2.45. Состав и магнитные свойства железа

| Тип железа | Содержание примесей, %масс. | | Магнитные свойства | | |
|--|-----------------------------|----------|--------------------|--------------------|-------------|
| | Углерод | Кислород | μ_{H} | μ_{max} | H_c , А/м |
| Технически чистое | 0,020 | 0,060 | 250 | 7 000 | 64,0 |
| Электролитическое | 0,020 | 0,010 | 600 | 15 000 | 28,0 |
| Карбонильное | 0,005 | 0,005 | 3 300 | 21 000 | 6,4 |
| Переплавленное в вакууме электролитическое | 0,010 | — | — | 61 000 | 7,2 |
| Обработанное в водороде | 0,005 | 0,003 | 6 000 | 200 000 | 3,2 |
| Обработанное в водороде особо тщательно | — | — | 20 000 | 340 000 | 2,4 |
| Монокрисалл чистейшего железа, обработанный в водороде особо тщательно | — | — | — | 1 430 000 | 0,8 |

μ_{H} — относительная начальная магнитная проницаемость; μ_{max} — относительная максимальная магнитная проницаемость; H_c — коэрцитивная сила.

Таблица 2.46. Магнитные свойства железа [18, 100]

| Тип железа | C, % | $\mu'_{\text{H}} \cdot 10^{-2}$ | $\mu'_{\text{max}} \cdot 10^{-3}$ | H_c , А/м |
|---|------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| Карбонильное радиотехническое | 0,005–0,01 | 32 | — | 6,4 |
| Электролитическое, переплавленное в вакууме | 0,01 | — | 63 | 7,2 |
| Электролитическое | 0,02–0,025 | 6,4 | 15 | 28 |
| Технически чистое (в отожженном состоянии) | 0,02–0,04 | 2,4 | 7,2 | 64 |

Магнитные свойства различных типов железа приведены в табл. 2.45, 2.46.

Нелегированную сталь применяют в электротехнической промышленности. Однако низкое удельное электрическое сопротивление ($\rho \leq 0,1$ мкОм·м) увеличивает тепловые потери при перемагничивании, а это ограничивает ее применение устройствами с постоянным магнитным полем.

Нелегированные электротехнические стали изготавливают теми же металлургическими способами, что и технически чистое железо; содержание углерода и примесей в них допускается в тех же количествах. Электротехнические стали поставляют с гарантированными магнитными свойствами для электротехнической промышленности. Промышленность выпускает стали различного ассортимента, в том числе тонкий лист.

Электролитическую нелегированную сталь изготавливают в виде горячекатаных листов (толщиной 2,0–3,9 мм), холоднокатаных листов (толщиной 0,5–3,9 мм, шириной 500–1250 мм) и лент (толщиной 0,1–2,0 мм). Содержание основных элементов в стали не превышает: 0,04% С, 0,3% Si; 0,3% Mn; остальное железо. Сталь применяют в магнитных целях электрических аппаратов и приборов. Магнитные свойства стали определяют на термически обработанных образцах: максимальная температура отжига 950 °С, максимальное время охлаждения до 600 °С, 10 ч. Старение (увеличение коэрцитивной силы образца) стали марок 11832, 21832, 11864, 21864, 11880, 11848, 21880, 11895, 21895 не превышает 6 А/м.

Холоднокатаную ленту и листовую сталь изготавливают без термической обработки (негартованными). Горячекатаную сталь изготавливают с травленной поверхностью.

Сортовую электротехническую нелегированную сталь изготавливают следующих марок: 10864, 20864, 10880, 20880, 10895, 20895, 11864, 21864, 11880, 21880, 11895, 21895. Сталь поставляют без термической обработки. В обозначении марки первая цифра указывает класс по виду обработки давлением (1 — горячекатаная и кованая; 2 — калиброванная). Остальные четыре цифры аналогичны обозначениям для марок тонколистовой электротехнической нелегированной стали (указаны в примечании к табл. 2.47). Магнитные свойства стали, определенные на термически обработанных образцах, приведены в табл. 2.48. Коэффициент старения стали марок 11880, 21880, 11895, 21895 не более 10%. Электротехническая кремнистая сталь классифицируется по следующим параметрам: по структурному состоянию — первая цифра в обозначении марки (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная изотропная с ребровой структурой); по содержанию кремния — вторая цифра в марке (содержание кремния в %: цифры 0 до 0,04; 1 — св. 0,4 до 0,8 включ.; 2 — св. 0,8 до 1,8 включ.; 3 — св. 1,8 до 2,8 включ.; 4 — св. 2,8 до 3,8 включ.; 5 — св. 3,8 до 4,8 включ.); по основной нормируемой характеристике — третья цифра в марке (0 — удельные потери p при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц; 1 — $p_{1,5/50}$; 2 — $p_{1,0/400}$; 6 — магнитная индукция B в слабых магнитных полях при напряженности 0,4 А/м; 7 — B_{10}). Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь предназначена для магнитных цепей электрических машин, трансформаторов, аппаратов и приборов.

Магнитные свойства нелегированных сталей приведены в табл. 2.47–2.49.

Таблица 2.47. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали

| Сталь | Толщина, мм, включительно | H_c , А/м, не более | μ_{\max} |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------|
| 10895, 20895, 11895, 21895 | 0,1–3,9 | 95 | 3000 |
| 10880, 20880, 11880, 21880 | 0,1–3,9 | 80 | 4000 |
| 10864, 20864, 11864, 21864 | 0,1–3,9 | 64 | 4500 |
| 10848, 20848, 11848, 21848 | 0,7–3,9 | 48 | 4800 |
| 10832, 20832, 11832, 21832 | 0,7–3,9 | 32 | 5000 |

Примечание: Магнитная индукция при напряженности магнитного поля: 1,38 Тл при 500 А/м; 1,62 Тл при 2500 А/м; 1,71 Тл при 5000 А/м; 1,81 Тл при 10 000 А/м.

Таблица 2.48. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали

| Марка стали | H_c в разомкнутой цепи, А/м, не более | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля в замкнутой цепи, А/м | | |
|----------------------------|---|---|------|------|
| | | 500 | 1000 | 2500 |
| 10895, 20895, 11895, 21895 | 95 | 1,32 | 1,45 | 1,54 |
| 10880, 20880, 11880, 21880 | 80 | 1,36 | 1,47 | 1,57 |
| 10864, 20864, 11864, 21864 | 64 | 1,40 | 1,50 | 1,60 |

Таблица 2.49. Магнитные свойства нелегированной электротехнической тонколистовой стали [18, 100]

| Марка стали | H_c , А/м | $\mu'_{\max} \cdot 10^{-3}$ | B , Тл, при $H = 30$ кА/м |
|----------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10895 20895 | 95 | 3 | 2,05 |

Окончание табл. 2.49

| Марка стали | H_c , А/м | $\mu'_{\max} \cdot 10^{-3}$ | B , Тл, при $H = 30$ кА/м |
|----------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10864 20864 | 64 | 4,5 | 2,05 |
| 10848 20848 | 48 | 4,8 | 2,05 |

Таблица 2.50. Свойства электротехнической холоднокатаной изотропной тонколистовой стали при толщине листа 0,5 мм

| Сталь | Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более | | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля А/м | | | $\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м |
|-------|--|--------------|---|------|-------|----------------------------|
| | $P_{1,0/50}$ | $P_{1,5/50}$ | 1000 | 2500 | 10000 | |
| 2011 | 3,5 | 8,0 | 1,49 | 1,60 | 1,80 | 0,14 |
| 2012 | 2,9 | 6,5 | 1,50 | 1,62 | 1,82 | 0,14 |
| 2013 | 2,5 | 5,6 | 1,54 | 1,65 | 1,85 | 0,14 |
| 2014 | 2,2 | 5,0 | 1,52 | 1,62 | 1,82 | 0,14 |
| 2111 | 3,5 | 8,0 | 1,46 | 1,58 | 1,78 | 0,17 |
| 2112 | 2,6 | 6,0 | 1,46 | 1,60 | 1,77 | 0,17 |
| 2211 | 2,2 | 5,8 | 1,40 | 1,56 | 1,76 | 0,25 |
| 2212 | 2,2 | 5,0 | 1,42 | 1,60 | 1,77 | 0,25 |
| 2311 | 1,9 | 4,4 | 1,38 | 1,54 | 1,74 | 0,40 |
| 2312 | 1,75 | 4,0 | 1,40 | 1,56 | 1,74 | 0,40 |
| 2411 | 1,6 | 3,6 | 1,37 | 1,49 | 1,73 | 0,50 |
| 2412 | 1,3 | 3,1 | 1,35 | 1,50 | 1,70 | 0,50 |
| 2413 | — | 2,9 | 1,35 | 1,50 | 1,70 | 0,50 |

Промышленность выпускает холоднокатаную электротехническую тонколистовую анизотропную сталь, изотропную сталь и холодную стальную анизотропную ленту. Холодную анизотропную сталь изготавливают в виде рулонов и листов толщиной 0,27–0,80 мм и лент толщиной 0,05–0,20 мм и 0,27–0,50 мм. Тонколистовую сталь и ленты поставляют в термически обработанном состоянии (за исключением нелегированной стали) с электроизоляционным термостойким покрытием и без покрытия. Магнитные свойства сталей, приведены в табл. 2.50, 2.51.

Электрическое сопротивление холоднокатаной анизотропной электротехнической стали, составляет $(0,45–0,50) \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Прецизионные сплавы. Прецизионные магнитомягкие сплавы классифицируют на восемь групп, из них семь групп — классы по основному магнитному параметру, восьмая группа — коррозионностойкие сплавы. В табл. 2.52–2.60 приведены свойства прецизионных магнитомягких сплавов.

Таблица 2.51. Свойства электротехнической анизотропной стали

| Сталь | Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более | | | Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля А/м | | |
|---|---|--------------|---------------|--|------|------|
| | $P_{1,5/50}$ | $P_{1,7/50}$ | $P_{1,5/400}$ | 100 | 400 | 2500 |
| <i>Тонколистовая сталь (для листа толщиной 0,35 мм)</i> | | | | | | |
| 3411 | 1,75 | — | — | — | — | 1,75 |
| 3412 | 1,50 | — | — | — | — | 1,80 |
| 3413 | 1,30 | — | — | 1,58 | — | 1,85 |
| 3414 | 1,10 | — | — | 1,60 | — | 1,80 |
| 3415 | 1,03 | — | — | 1,61 | — | 1,90 |
| 3404 | — | 1,60 | — | 1,60 | — | — |
| 3405 | — | 1,50 | — | 1,61 | — | — |
| 3406 | — | 1,43 | — | 1,62 | — | — |
| 3407 | — | 1,36 | — | 1,68 | — | — |
| 3408 | — | 1,30 | — | 1,71 | — | — |
| <i>Стальная лента (для ленты толщиной 0,15 мм)</i> | | | | | | |
| 3421 | — | — | 23,0 | — | 1,30 | 1,70 |
| 3422 | — | — | 20,0 | — | 1,40 | 1,75 |
| 3423 | — | — | 19,0 | — | 1,55 | 1,82 |
| 3424 | — | — | 18,0 | — | 1,55 | 1,82 |
| 3425 | — | — | 17,0 | — | 1,65 | 1,82 |

Таблица 2.52. Упругопрочностные свойства и другие параметры прецизионных магнитомягких сплавов

| Сплав | НВ | σ^+ | σ_T | E, ГПа | ε | ψ | $\theta, ^\circ\text{C}$ | $\rho_V \cdot 10^6$ Ом·м |
|---|-----------|------------|------------|-----------|---------------|--------|--------------------------|-----------------------------|
| | МПа | | | | % | | | |
| Группа I. Сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях | | | | | | | | |
| 79НМ | 2100/1200 | 1050/150 | 1000/150 | 210 | 3/50 | — | 430 | 0,55 |
| 80НХС | 2400/1300 | 950/550 | 900/150 | — | 4/40 | 15 | 330 | 0,62 |
| 83НФ | — | 950/550 | —/150 | 220 | — | — | 360 | 0,70 |
| 81НМА | 2600/1600 | 1300/650 | 1250/250 | 210 | 2/50 | — | 260 | 0,80 |
| Группа II. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электрическим сопротивлением | | | | | | | | |
| 50НХС | 1900/1250 | 900/500 | 850/150 | — | 2/40 | — | 360 | 0,90 |
| Группа III. Сплавы с повышенной магнитной проницаемостью и повышенной индукцией технического насыщения | | | | | | | | |
| 45Н | 1700/1300 | 750/— | 750/— | 200 | 3/— | 15/— | 450 | 0,54 |
| 50Н | 1700/1300 | 800/450 | 700/150 | 160 | 3/35 | 15/60 | 500 | 0,44 |

Окончание табл. 2.52

| Сплав | НВ | σ_B | σ_T | Е, | ϵ | ψ | $\theta, ^\circ\text{C}$ | $\rho_v \cdot 10^6$ Ом·м |
|--|-------------|------------|------------|-----|------------|--------|--------------------------|-----------------------------|
| | МПа | | ГПа | | % | | | |
| Группа IV. Сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса (обладают анизотропией магнитных свойств) | | | | | | | | |
| 50НП | 1700/1300 | 800/450 | 700/150 | 160 | 3/35 | 15/60 | 500 | 0,45 |
| 68МНП | 2300/1200 | 950/550 | —/150 | — | 3/50 | 5/— | 580 | 0,45 |
| 34НКМП | 1550/1300 | 950/550 | 900/— | — | 4/40 | 5/40 | 580 | 0,50 |
| 35НКХСП | 1700/1300 | 900/500 | 900/150 | 170 | 4/40 | — | 560 | 0,60 |
| 40НКМП | —/1000 | 1000/550 | 1000/150 | 180 | 4/50 | — | 580 | 0,55 |
| 65НП | 2000/1300 | 900/550 | 900/150 | 190 | 3/40 | — | 600 | 0,25 |
| Группа V. Сплавы с высокой магнитной индукцией технического насыщения | | | | | | | | |
| 27КХ | HRG40/HRB90 | 1100/600 | —/300 | 220 | 2/20 | — | 940 | 0,20 |
| 49КФ | HRC35/HRB90 | 1350/500 | —/350 | 220 | 1/1 | — | 960 | 0,40 |
| 49К2ФА | | | | | | | | |
| 49К2Ф | | | | | | | | |
| Группа VI. Сплавы с низкой остаточной магнитной индукцией | | | | | | | | |
| 47НК | 1600/1300 | 900/500 | —/150 | 200 | 3/40 | — | 700 | 0,20 |
| 47НКХ | — | 900/500 | — | — | 3/35 | — | 600 | 0,48 |
| 64Н | 2000/1300 | 900/550 | 900/150 | 190 | 3/40 | 10/— | 600 | 0,20 |
| Группа VII. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью | | | | | | | | |
| 78НЗМ | 2100/1200 | 1050/500 | 1000/150 | 210 | 3/50 | — | 460 | 0,50 |
| Группа VIII. Сплавы с высокой коррозионной стойкостью | | | | | | | | |
| 16Х | 1850/— | 400/250 | —/200 | 220 | 5/25 | —/65 | 680 | 0,44 |
| 36РНМ | 1700/— | —/500 | —/250 | — | —/45 | —/70 | 570 | 0,48 |

Примечание: в числителе приведены свойства сплавов до термической обработки, в знаменателе — после нее.

Таблица 2.53. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов группы марок 79НМ и 80НХС

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 79НВ | | | Сплав 80НХС | | |
|--|------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|
| | μ_n | μ_{max} | $H_c, \text{А/м,}$ | μ_n | μ_{max} | $H_c, \text{А/м,}$ |
| | Не менее | | не более | Не менее | | не более |
| Холоднокатаные ленты и листы (класс 1) | | | | | | |
| 0,005 | 7000 | 20 000 | 8,0 | 8000 | 20 000 | 8,0 |
| 0,01 | 14 000 | 60 000 | 5,6 | 14 000 | 50 000 | 5,6 |
| 0,02 | 16 000 | 70 000 | 4,0 | 18 000 | 70 000 | 4,0 |
| 0,05; 0,08 | 16 000 | 90 000 | 3,2 | 12 000 | 90 000 | 3,2 |
| 0,10; 0,15 | 20 000 | 120 000 | 2,4 | 22 000 | 120 000 | 2,4 |
| 0,20 | 22 000 | 130 000 | 1,6 | 28 000 | 130 000 | 1,6 |
| 0,35; 0,5 | 25 000 | 150 000 | 1,6 | 35 000 | 150 000 | 1,2 |
| 1,0 | 25 000 | 150 000 | 1,6 | 30 000 | 170 000 | 1,0 |
| 1,5 | 22 000 | 130 000 | 1,6 | 25 000 | 150 000 | 1,2 |
| 2,0; 2,5 | 22 000 | 130 000 | 1 | 25 000 | 150 000 | 1,2 |

Окончание табл. 2.53

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 79НВ | | | Сплав 80НХС | | |
|--------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | μ_n | μ_{max} | $H_c, A/м,$ | μ_n | μ_{max} | $H_c, A/м,$ |
| | Не менее | | не более | Не менее | | не более |
| Горячекатаные сплавы (класс 1) | | | | | | |
| 3–22 | 20000 | 80000 | 3,2 | 20000 | 70000 | 3,2 |
| Прутки | | | | | | |
| 8–100 | 20000 | 80000 | 3,2 | — | — | — |

Таблица 2.54. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов II группы марки 50НХС и III группы марки 50Н

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 50НХС | | | Сплав 50Н | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| | μ_n | μ_{max} | $H_c, A/м,$ | μ_n | μ_{max} | $H_c, A/м,$ |
| | Не менее | | не более | Не менее | | не более |
| Холоднокатаные ленты и листы (класс 1) | | | | | | |
| 0,005 | — | — | — | 1000 | 8000 | 56 |
| 0,01 | — | — | — | 1300 | 10000 | 40 |
| 0,02 | — | — | — | 1500 | 15000 | 20 |
| 0,05; 0,08 | 2000 | 20000 | 20 | 2000 | 20000 | 16 |
| 0,10; 0,15 | 2300 | 25000 | 16 | 2500 | 15000 | 13 |
| 0,20 | 2300 | 30000 | 12 | 3000 | 18000 | 10 |
| 0,35; 0,5 | 2600 | 35000 | 10 | 3200 | 30000 | 8 |
| 1,0 | 3000 | 30000 | 12 | 3000 | 20000 | 10 |
| Горячекатаные сплавы (класс 1) | | | | | | |
| 3–22 | 2500 | 20000 | 24 | — | — | — |
| Прутки | | | | | | |
| 8–100 | 2500 | 20000 | 24 | — | — | — |

Таблица 2.55. Магнитные свойства некоторых сплавов IV группы

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 50НХС | | | Сплав 50Н | | |
|--|---------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | B_r/B_{800} | μ_{max} | $H_c, A/м,$ | B_r/B_{800} | μ_{max} | $H_c, A/м,$ |
| | Не менее | | более | Не менее | | не более |
| Холоднокатаные ленты и листы (класс 1) | | | | | | |
| | Сплав 50НП | | | Сплав 34 НКМП | | |
| 0,005 | 0,80 | 15 000 | 40 | 0,90 | 15 000 | 80 |
| 0,01 | 0,83 | 20 000 | 32 | 0,92 | 35 000 | 24 |
| 0,02 | 0,85 | 40 000 | 20 | 0,90 | 40 000 | 16 |
| 0,05 | 0,85 | 40 000 | 18 | 0,87 | 60 000 | 12 |
| 0,10 | 0,85 | 40 000 | 18 | 0,85 | 100 000 | 8 |
| 0,20 | — | — | — | 0,85 | 120 000 | 6,4 |
| 0,35; 0,5 | — | — | — | 0,85 | 120 000 | 6,4 |

Окончание табл. 2.55

| Толщина или диаметр, мм | Сплав 50НХС | | | Сплав 50Н | | |
|-------------------------|---------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|-------------|
| | B_r/B_{800} | μ_{max} | $H_c,$ А/м, не | B_r/B_{800} | μ_{max} | $H_c,$ А/м, |
| | Не менее | | | Не менее | | |
| | Сплав 65НП | | | Сплав 40НKM | | |
| 0,01 | — | — | — | 0,93 | 100 000 | 6,4 |
| 0,02 | 0,90 | 70 000 | 6,4 | 0,93 | 200 000 | 4,0 |
| 0,05 | 0,90 | 100 000 | 3,2 | 0,92 | 300 000 | 3,2 |
| 0,10 | 0,90 | 200 000 | 2,8 | 0,93 | 400 000 | 2,4 |
| 0,20 | 0,90 | 250 000 | 2,4 | — | — | — |

Примечание. B_r/B_{800} — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, при $H_c = 800$ А/м

Таблица 2.56. Магнитные свойства прецизионных сплавов V группы

| Сплав | Толщина или диаметр, мм | B , Тл, в полях, А/м | | H_c , А/м, не более |
|----------------------|-------------------------|------------------------|-------|-----------------------|
| | | 2500 | 15000 | |
| | | Не менее | | |
| Холоднокатаная лента | | | | |
| 27КХ | 0,20; 0,35; 0,70 | 1,80 | 2,15 | — |
| 49К2Ф | 0,20 | — | 2,25 | 160 |
| 49К2ФА | 0,10 | 2,20 | — | 140 |
| Прутки и поковки | | | | |
| 27КХ | 30-100 | 1,75 | 2,05 | — |
| 49КФ | 0-80 | 1,90 | 2,10 | 160 |

Таблица 2.57. Магнитные свойства прецизионных сплавов VI группы (холоднокатаные ленты)

| Сплав | Толщина, мм | μ_n , не менее | μ_{max}/μ_n | B_r/B_{800} | T , Кμ, % $(^\circ\text{C})^{-1}$ |
|-------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|--|
| | | | Не более | | |
| | | | 47НК | 0,01; 0,02; 0,1 | |
| 47НКХ | 0,02; 0,1 | 1500 | 1,20 | 0,05 | 0,03 |
| 64Н | 0,01; 0,02; 0,1 | 2000 | 1,20 | 0,07 | 0,06 |

Примечание. T Кμ для интервала температур от -60 до $+120$ $^\circ\text{C}$.

Таблица 2.58. Магнитные свойства прецизионных сплавов VII группы (холоднокатаные ленты)

| Сплав | Толщина, мм | B_{800} , Тл, не менее | B_r/B_{800} не более | Импульсивная проницаемость в поле, А/м | |
|-------|-------------|--------------------------|------------------------|--|-------|
| | | | | 20 | 80 |
| | | | | 7/3НМ3 | 0,005 |
| | 0,1 | 0,8 | 0,30 | 7000 | — |
| | 0,02 | 0,08 | 0,15 | 8000 | — |
| 68НМ | 0,02 | 1,15 | 0,2 | — | 6000 |

Примечание. Температурный коэффициент импульсной проницаемости в интервале температур от -60 до $+60$ $^\circ\text{C}$ для сталей 79НМ3 и 68НМ составляет $0,25\%*(^\circ\text{C})^{-1}$.

Таблица 2.59. Магнитные свойства прецизионных сплавов VIII группы

| Сплав | μ_{\max} | B_{100} | B_{2500} | B_{10000} | H_c А/м |
|-------|---------------|-----------|------------|-------------|-----------|
| 16Х | 7000–15 000 | 0,6 – | 1,2 – | 1,45–1,65 | 12–64 |
| 36КНМ | 45 000–60 000 | 1,2 | 1,45 | – | 40–65 |
| | | 1,3 | 1,45 | | |

Примечание. Цифровой индекс при B указывает напряженность магнитного поля в А/м.

Таблица 2.60. Магнитные свойства сплавов на основе Fe–Al–Si

| Сплав | μ_n | μ_{\max} | H_c , А/м |
|--|--------------------------|---------------|-------------|
| Альсифер 0,6 Si + 5,4 Al (остальное Fe) | 35 400 | 117 000 | 1,76 |
| Промышленный альсифер | 6000–7000 (после отжига) | | – |
| Сплавы альфенол: | | | |
| 12Ю | 1000 | – | 24 |
| 12Ю-ВИ | 10 000 | – | – |
| 16Ю-ВИ | 5500–8000 | 40 000–50 000 | – |

Электрическое сопротивление стали можно повысить легированием кремнием. Растворяясь в железе, он образует твердый раствор. Один процент кремния повышает удельное электросопротивление на 0,12 мкОм·м. При отжиге кремний способствует росту кристаллов и тем самым несколько уменьшает H_c .

Снижение общих потерь при перемагничивании кремнистой стали определяется главным образом увеличением удельного электросопротивления стали, которое продолжает повышаться с увеличением содержания кремния в стали, но при этом сильно падает пластичность. Стали с содержанием кремния выше 4% хрупки, плохо прокатываются, что затрудняет получение тонколистового проката. Для уменьшения тепловых потерь сердечники из кремнистой стали используют в виде тонких (< 1 мм) листов с прослойкой изоляции (полимеры, оксиды).

Магнитные свойства легированной электротехнической стали приведены в табл. 2.61.

Таблица 2.61. Магнитные свойства легированной электротехнической тонколистовой стали [18, 100]

| Сталь | Толщина листа, мм | $p_{1,5/50}^*$, Вт/кг | B , Тл, при H , кА/м, не менее | |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------------|------|
| | | | 2,5 | 30 |
| Горячекатаная изотропная | | | | |
| 1311 | 0,50 | 6,1 | 1,48 | 1,95 |
| 1411 | 0,50 | 4,4 | 1,46 | 1,94 |
| 1511 | 0,50 | 3,5 | 1,46 | 1,90 |
| Холоднокатаная изотропная | | | | |
| 2011 | 0,65 | 10,0 | 1,60 | 2,02 |
| 2111 | 0,65 | 9,0 | 1,58 | 2,0 |
| 2211 | 0,65 | 7,0 | 1,56 | 1,96 |
| 2311 | 0,65 | 5,8 | 1,52 | 1,96 |

* Потери тепловые и на гистерезис при $B = 1,5$ Тл, $f = 50$ Гц.

Окончание табл. 2.61

| Сталь | Толщина листа, мм | $p_{1,5/50}^*$, Вт/кг | B , Тл, при H , кА/м, не менее | |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------------|------|
| | | | 2,5 | 30 |
| 2411 | 0,50 | 3,6 | 1,49 | 1,96 |
| Холоднокатаная анизотропная | | | | |
| 3411 | 0,50 | 2,45 | 1,75 | — |
| 3416 | 0,28 | 0,89 | 1,9 | — |

Первая цифра в марке определяет вид проката и структуру: 1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с кристаллографической текстурой направления [100]. Вторая цифра определяет процентное содержание Si: 0 — < 0,4%, 1 — 0,4–0,8%, 2 — 0,8–1,8%, 3 — 1,8–2,8%, 4 — 2,8–3,8%, 5 — 3,8–4,8%; третья — потери на гистерезис и тепловые потери при определенном значении B и f (например, 1 — удельные потери при $B = 1,5$ Тл и $f < 50$ Гц ($p_{1,5/50}$)); четвертая — тип стали и уровень основной нормируемой характеристики: 1 — нормальный; 2 — повышенный; 3 — высокий и т. д.; чем цифра больше, тем меньше удельные потери $p_{1,5/50}$.

Стальную продукцию изготавливают с защищенной и незащищенной покрытиями поверхностью. Термостойкие покрытия обозначают буквой Г, нетермостойкие — буквой Н. Дополнительно ставится буква Ш, если сталь улучшенной штампуемости. В состоянии поставки стальная продукция разделяется на отожженную и неотожженную (полуготовую). Детали магнитных систем из полуготовой стали отжигают после штамповки и вырубки, при этом снимается краевой наклеп и магнитные характеристики улучшаются. Основную массу продукции (~95%) составляет тонколистовая сталь, используемая при промышленной частоте 50 Гц. Доля тончайшей (0,05–0,15 мм) анизотропной стали составляет ~1%.

Качество электротехнических сталей характеризуется не только магнитными и механическими свойствами, но также точностью листов, лент и свойствами электроизоляционных покрытий.

Магнитные свойства сталей характеризуются потерями на перемагничивание, магнитной индукцией при определенной напряженности магнитного поля, коэрцитивной силой, анизотропией (для холоднокатаной изотропной стали) и допустимым их изменением в процессе эксплуатации (из-за старения).

Для изделий, работающих на частоте 50 Гц, общие потери измеряют при значениях магнитной индукции 1,0; 1,5 и 1,7 Тл. Магнитные потери сталей для высокочастотной аппаратуры определяют при повышенных частотах (до 10 кГц) и заданных значениях магнитной индукции. Как следует из табл. 50, с повышением содержания кремния потери при частоте 50 Гц и магнитная индукция уменьшаются. Потери при частотах 400 и 1000 Гц у тончайшей (0,05–0,15 мм) анизотропной стали, содержащей 2,5–3,8% Si, почти в 10 раз больше, чем при частоте 50 Гц. Для вращающихся магнитопроводов электродвигателей, генераторов и других машин анизотропия стали является причиной дополнительных потерь. Для изотропных сталей допустимую анизотропию свойств оценивают разностью значений B_{2500} , определенных вдоль и поперек направления прокатки при $H = 2500$ А/м.

При эксплуатации магнитопроводы нагреваются и потери возрастают из-за прохождения процесса старения. Коэффициент старения $K_{СТ} = \frac{p_2 - p_1}{p_1} \cdot 100\%$, где p_1 и p_2 — удельные потери до и после старения материала соответственно, Вт/кг.

Для изотропных сталей $K_{СТ} = 4–8\%$, для анизотропных — 2–4%. Чем больше кремния содержит сталь, тем медленнее развивается старение.

Коэффициент заполнения k характеризует плотность сборки магнитопровода. Увеличение его значения на 1% равноценно уменьшению потерь на 2–3% и повышению магнитной индукции на 1–2%. Коэффициент заполнения $k = m/(V \cdot \rho)$, где m — масса образца магнитопровода, кг;

V — объем образца после спрессовывания под давлением 0,35 МПа, м³; ρ — плотность стали, т/м³. Как правило, $k = 92$ –97%, меньшие значения установлены для изотропной стали с покрытиями, большие — для анизотропной стали без покрытий.

Отклонения от плоскостности и заданной толщины, а также дефекты поверхности листов уменьшают коэффициент заполнения и снижают точность сборки и качество магнитопроводов. Повышение силы сжатия при сборке создает напряжения в материале магнитопровода и увеличивает потери. Поэтому установлены нормы на отклонение от плоскостности, толщину листа и размеры поверхностных дефектов.

Потери возрастают при загрязнении электротехнической стали неметаллическими включениями и дисперсными частицами карбидов, поэтому технология ее производства предусматривает меры повышения ее чистоты.

Влияние содержания кремния на удельные потери можно оценить сопоставлением свойств сталей 2011, 2111, 2211, 2311, 2411. Значение $p_{1,5/50}$ с увеличением содержания кремния уменьшается от 8 до 3,6 Вт/кг. С уменьшением толщины листа удельные потери снижаются.

После технологических операций, необходимых для изготовления деталей магнитопровода (резка, штамповка и др.), магнитные свойства сталей ухудшаются, то есть увеличивается коэрцитивная сила, а следовательно, и потери на гистерезис. Для восстановления магнитных свойств применяют отжиг при температуре ниже температуры фазового превращения (880–900 °С) в среде, предохраняющей от окисления и науглероживания. Если отжиг ведут в водородно-азотной атмосфере, то это очищает сталь от вредных примесей, и ее магнитные свойства улучшаются.

Легированные электротехнические стали применяют в электротехнических изделиях, рассчитанных на работу при частотах до 400 Гц. Стали с более низким содержанием кремния 2011, 2211 используют для сердечников, работающих при частотах до 100 Гц и напряженности поля $H \leq 5 \cdot 10^4$ А/м. Стали с повышенным содержанием кремния (2311, 2411 и 1311, 1411) используют при частотах до 400 Гц, но в более слабых полях $H \geq 10^2$ А/м.

Наибольшее значение B_s для ферромагнетиков имеют высоколегированные кобальтовые сплавы. Например, сплав 50КФ2, содержащий 50% Со и 2% V, обладает индукцией насыщения $B_s = 2,3$ Тл в магнитном поле напряженностью $H_s = 8$ кА/м. Железо в таком поле имеет $B = 1,5$ Тл. Дефицитность кобальта ограничивает применение этих сплавов.

Материалы с высокой магнитной проницаемостью (сплавы систем Fe–Ni, пермаллой, Fe–Со, Fe–Al, альсиферы) позволяют получить большие значения индукций в слабых магнитных полях ($H \leq 10^2$ А/м).

Для маркировки сплавов используют буквенно-цифровую систему. Буквами обозначают элементы так, как это принято для маркировки сталей. Дополнительно введены обозначения железа — Ж, рения — И, бериллия — Л, редкоземельных металлов — Ч. Марка сплава содержит число, указывающее среднее содержание в процентах основного элемента (кроме железа), и букву, обозначающую этот элемент. В отличие от сталей, массовые доли других легирующих элементов, как правило, не указывают, а приводят лишь их буквенные обозначения. В конце марки могут стоять буквы А или П, обозначающие повышенное качество сплава и прямоугольность петли гистерезиса соответственно. Например: 79НМ — пермаллой, содержащий 79% Ni, легированный молибденом; 8Ю — железоалюминиевый сплав, содержащий 8% Al; 50НП — пермаллой, содержащий 50% Ni и имеющий прямоугольную петлю гистерезиса.

Магнитомягкие сплавы являются прецизионными: концентрации легирующих элементов поддерживают в узких интервалах, содержание углерода и других примесей ограничено. Частицы карбидов, оксидов и других включений уменьшают μ и повышают H_c . По качеству сплавы разделяют на три класса: I — с нормальными магнитными свойствами; II — с повышенными магнитными свойствами; III — с высокими магнитными свойствами. Соответственно нормальное качество обеспечивается выплавкой в открытых печах, повышенное — в вакууме; высокое — в вакуумных индукционных печах с последующими переплавами.

По уровню основных свойств сплавы разделяют на восемь групп (табл. 2.62).

Таблица 2.62. Характеристики магнитного состояния пермаллоев [18, 100]

| Группа | Марка сплава | B_s , Тл | H_c , А/м | μ'_n | μ'_{\max} | ρ , мкОм·м | θ , °С |
|--|--|------------|-------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| Сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью | 79НМ, 80НХС, 76НХД, 74НДМ, 78Н | 0,5–0,8 | 0,2–4 | $2 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^5$ | 10^5 – 10^6 | 0,55–0,80 | 260–430 |
| Сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенным электросопротивлением | 5НХС, 88НС, 50НХС- ВИ, 12Ю, 12ЮК | 1,0–1,4 | – | $(1,5-6) \cdot 10^3$ | $(15-100) \cdot 10^3$ | 0,9–1,0 | 300–600 |
| Сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения | 50Н, 45Н, 33КМС | 1,3–1,5 | – | $(2-5) \cdot 10^3$ | $(2-50) \cdot 10^4$ | 0,45–0,54 | 250–500 |
| Сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса | 50НП, 37НКДП, 68НМП, 34НКМП, 80Н2М | 1,5 | – | $B_r/B_s =$ $= 0,80..0,94$ | $(4-120) \cdot 10^4$ | 0,25–0,60 | 500–580 |
| Сплавы с высокой индукцией насыщения | 18КХ, 27КХ, 49К2Ф, 48КНФ | 2,4 | – | – | – | 0,20–0,40 | ~1000 |
| Сплавы с высокой магнитной проницаемостью при однополярном полюсном намагничивании | 79НМ, 80Н2М, 77НМД, 80НЮ, 53Н | – | 3,2–48 | $B_r/B_s =$ $= 0,90..0,96$ | – | 0,45–0,50 | 460–500 |
| Сплавы с низкой остаточной индукцией | 47НК, 47НКХ, 68НМ, 53Н | – | – | $B_r/0,05B_s$ | – | 0,20–0,40 | 600–700 |
| Сплавы с высокой коррозионной стойкостью | 16Х | 1,2–1,6 | 12–65 | | $(4,5-15) \cdot 10^3$ | 0,44–0,48 | 570–680 |

Основное применение этих сплавов — сердечники магнитопроводов различного назначения, в том числе испытывающих нагрев и механические нагрузки при эксплуатации.

Пермаллои с содержанием 45–83% Ni характеризуются большой магнитной проницаемостью $\leq 70 \cdot 10^3$; $\mu'_{\max} \leq 247 \cdot 10^3$, что обеспечивает их намагничивание в слабых полях (рис. 2.54). Повышенное удельное электросопротивление по сравнению с чистыми металлами Fe и Ni позволяет использовать эти сплавы в радиотехнике и телефонии при частотах до 25 кГц. Малая коэрцитивная сила ($H_c < 16$ А/м) уменьшает потери на гистерезис при перемагничивании. По значению индукции насыщения сплавы с повышенным содержанием никеля уступают железу и стали. В зависимости от состава B_s изменяется в пределах 0,5–1,5 Тл. Большим достоинством пермаллоев является их высокая пластичность, что облегчает технологию получения полуфабрикатов: тонких листов, лент и проволоки, используемых при изготовлении сердечников.

Магнитные свойства пермаллоев меняются под воздействием даже слабых напряжений. При сжимающих напряжениях всего 5 МПа магнитная проницаемость уменьшается в 5 раз, а коэрцитивная сила возрастает в 2 раза. Поэтому окончательно изготовленные детали надо подвергать термической обработке и в процессе сборки избегать ударов, сильной затяжки или сдавливания обмоткой.

Магнитные свойства пермаллоев зависят от скорости охлаждения. Нейтронно-графическим анализом доказано, что у сплава, содержащего 75% Ni, при медленном охлаждении при температурах ниже 600 °С происходит перестройка в расположении атомов в твердом растворе — неупорядоченный твердый раствор переходит в упорядоченный (последний обладает меньшей магнитной проницаемостью).

Термическую обработку пермаллоев проводят для удаления примесей, остаточных напряжений и укрупнения зерна. Она заключается в медленном нагреве их до 1100–1150 °С в среде, защищающей материал от окисления (вакууме, водороде), выдержке при этой температуре 3–6 ч в зависимости от размера и массы, медленном охлаждении до 600 °С (100 °С/ч) и дальнейшем быстром охлаждении (400 °С/ч), при котором не происходит упорядочения твердого раствора.

Все пермаллои по составу можно разделить на две группы: низконикелевые (45–50% Ni), имеющие высокую магнитную проницаемость ($\mu'_H \leq 3,2 \cdot 10^3$) при относительно высокой

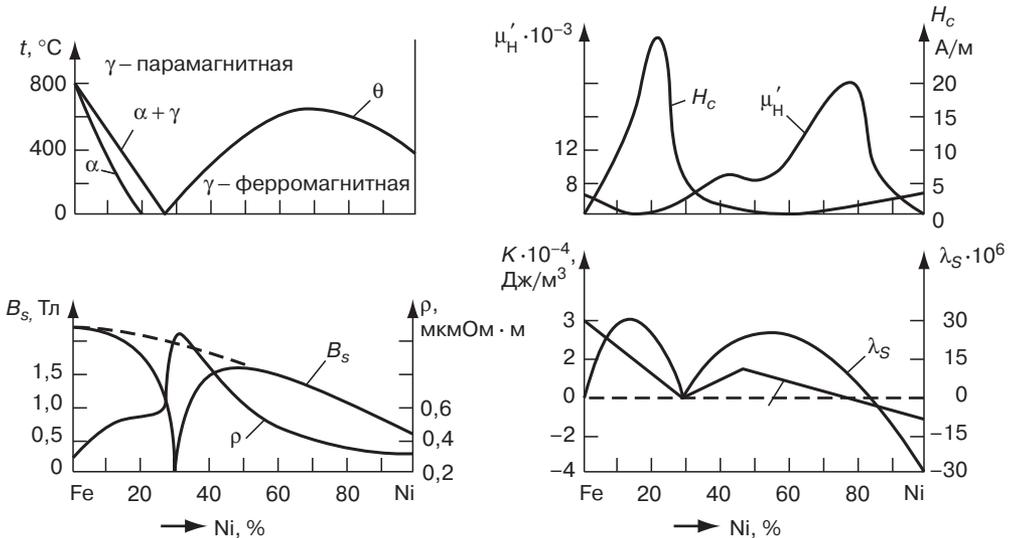


Рис. 2.54. Влияние содержания никеля на магнитные характеристики железоникелевых сплавов [18, 100]

индукции насыщения (1,5 Тл), и высоконикелевые (79–83% Ni) с чрезвычайно высокой магнитной проницаемостью ($\mu'_H \leq 28 \cdot 10^3$), но меньшей индукцией насыщения (0,75 Тл). Железкобальтовые сплавы (18–49% Co) характеризуются большей, чем у железа, индукцией насыщения ($B_s > 2$ Тл) и высокими значениями θ . Их используют в роторах и статорах электрических машин при температурах эксплуатации до 900 °С, магнитопроводах магнетогидродинамических насосов. Для увеличения технологической пластичности железокобальтовых сплавов используют ванадий (1,5–2,0%) в сплавах, содержащих ~50% Co, и хром (0,5–0,7%) в сплавах с 18–27% Co.

Для получения максимальных значений магнитных характеристик сплавы отжигают. В отожженном состоянии их механические свойства характеризуются невысокими прочностью ($\sigma_{\text{вн}} = 450\text{--}550$ МПа, $\sigma_{0,2} = 50\text{--}250$ МПа) и твердостью (120–130 НВ).

Для улучшения магнитных и технологических свойств эти сплавы дополнительно легируют Cr, Mo, Cu, Si, Mn и другими элементами. Легирование повышает электросопротивление, уменьшает магнитострикцию и константу кристаллографической магнитной анизотропии, а также затрудняет упорядочение твердых растворов и упрощает технологию отжига изделий (не требуется ускоренное охлаждение, начиная с 600 °С).

Особую группу составляют пермаллоны с прямоугольной петлей гистерезиса, которые широко используют в вычислительной технике и устройствах автоматического управления. Отличительная особенность таких материалов — большая остаточная индукция B_r , близкая к B_s (коэффициент прямоугольности $\alpha = B_r/B_s$ у них достигает 0,85–0,90 в поле напряженности $H = 800$ А/м):

| Свойства | 50НП* | 65НП | 79НП |
|----------------------------|-----------------|-----------------|------|
| μ'_{max} | $40 \cdot 10^3$ | $20 \cdot 10^3$ | — |
| H_c , А/м | 18 | 2,8 | 9,6 |
| B_s , Тл | 1,5 | 1,3 | 0,61 |
| α при $H = 800$ А/м | 0,85 | 0,90 | 0,90 |

* Толщина ленты из сплавов 50НП и 60НП составляла 0,1 мм, а из сплава 79НМП — 0,003 мм.

Существуют два способа получения материала с прямоугольной петлей гистерезиса: создание кристаллографической или магнитной текстуры. Кристаллографическая текстура достигается посредством холодной пластической деформации при прокатке с большими степенями обжатия, магнитная — путем охлаждения материала при закалке в магнитном поле (термагнитная обработка). Векторы намагниченности при такой закалке ориентируются вдоль поля. При последующем перемагничивании в том же направлении вращение векторов отсутствует. Кристаллографическую текстуру можно создать в любом материале, способном пластически деформироваться. Магнитная текстура возможна только у некоторых сплавов, так как у чистых металлов (Fe, Ni, Co) она не наблюдается. Несмотря на большие практические достижения в области термагнитной обработки, сущность этого явления недостаточно ясна.

Преимущество метода термагнитной обработки состоит в том, что прямоугольную петлю гистерезиса можно получить у ленты любой толщины и в любом направлении, а не только в направлении прокатки. У сплава 50НП прямоугольность петли достигается прокаткой, а у сплавов 65НП и 79НМП — путем обработки в магнитном поле (рис. 2.55). Сердечники, изготовленные из анизотропных лент толщиной 3 мкм, могут работать при частотах 700 кГц, а при толщине 1,5 мкм — до 1 МГц. Такие ленты в основном изготавливают из сплава 79НМП. Коэффициент прямоугольности этого сплава при таких толщинах составляет ~0,9. Из-за дороговизны тонких ленточных сердечников и невозможности прокаткой получить ленты толщиной менее 0,5 мкм разработаны методы создания тончайших пленок (1–10 мкм) путем напыления таких сплавов в вакууме на подложку немагнитного металла.

Железоалюминиевые сплавы со структурой однофазного твердого раствора с ОЦК решеткой характеризуются аномалиями магнитных свойств, что отражает сложность взаимодействия

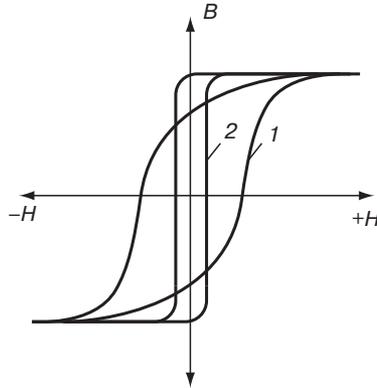


Рис. 2.55. Петля гистерезиса сплава 65НП до (1) и после (2) обработки в магнитном поле [18, 100]

обоих компонентов. При увеличении содержания алюминия понижается θ и уменьшается B_s (при 18% Al $B_s = 0$). В сплаве, содержащем 12% Al, магнитная анизотропия не проявляется ($K = 0$), но λ_s достигает максимального для этих сплавов значения. При концентрации Al 16–17% константы K и λ_s имеют значения, близкие к нулю. В сплаве Fe — 8% Al после отжига холоднокатаных лент появляется магнитострикционная анизотропия: значения λ_s вдоль и поперек направления прокатки различные.

Альсиферы при содержании 5,4% Al и 9,6% Si имеют нулевые значения K и λ_s и отличаются высокой магнитной проницаемостью. Оптимальное сочетание магнитных свойств реализуется после упорядочения твердого раствора. Альсиферы имеют следующие значения магнитных характеристик: $B_s = 1,1$ Тл; $\mu'_H = 35 \cdot 10^3$; $\mu'_{\max} = 116 \cdot 10^3$, $H_c = 1,76$ А/м; $\rho = 0,81$ мкОм·м и не уступают пермаллою с высоким содержанием никеля. Преимуществом альсиферов является отсутствие в их составе дорогих или дефицитных элементов.

Альсифер характеризуется высокими твердостью (50 HRC) и сопротивлением изнашиванию. Практическому применению мешает природная хрупкость этих сплавов, что делает их абсолютно недеформируемыми и непригодными для обработки резанием. Изделия получают литьем или порошковой технологией.

Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм приведены в табл. 2.63.

2.2.4.2. Высокочастотные магнитомягкие материалы. Ферриты

Ферриты представляют собой магнитную керамику, получаемую спеканием оксида железа с оксидами других металлов (технологические стадии: смешение порошков ферритообразующих оксидов, обжиг, помол, формование, спекание, измельчение или использование в виде пластин, напыление на подложку, ткань, пленки). Высокоплотные ферриты с регулируемым размером зерен изготавливают горячим прессованием. Характерная особенность свойств ферритов — высокое, как у полупроводников, удельное электрическое сопротивление 10^3 – 10^{11} Ом·м. Вследствие низкой (в 10^8 – 10^{14} раз меньшей, чем у металлических ферромагнетиков) электропроводности потери на вихревые токи у ферритов минимальны, что обусловило их широкое применение в технике высоких и сверхвысоких частот. По магнитным свойствам ферриты уступают металлическим ферромагнетикам и не могут с ними конкурировать в области низких частот. Ферриты имеют невысокую индукцию насыщения ($B_s < 0,4$ Тл), относительно большую коэрцитивную силу ($H_c \leq 180$ А/м) и невысокую температуру точки Кюри ($\theta \leq 300$ °С), что ограничивает их рабочую температуру и ухудшает температурную стабильность свойств. Ферриты — твердые и хрупкие материалы, обрабатывать которые можно только алмазным инструментом.

Таблица 2.63. Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм с начальной магнитной проницаемостью $\geq 40\,000$

| Сплавы | Основные элементы кроме железа | Толщина продукта, мм | μ_n | μ_{\max} | H_g , А/м | B_s , Тл | B , °С | Фирма, страна* |
|-------------------|---|----------------------|--------------------|---------------------|-------------|--------------|----------|----------------|
| <i>PB-25</i> | 48,0 Ni, Mo | – | 10 000–40 000 | 100 000–200 000 | – | 1,40–1,50 | 400 | 4 |
| <i>E-4</i> | 75,5–78,5 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 40 000 | – | – | 0,6–0,8 | 270–400 | 1 |
| Гиперм767 | 75,5–78 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 45 000 | 100 000 | – | 0,8 | 400 | 2 |
| Муметалл | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 45 000 | 120 000 | 1,2 | 0,8 | 400 | 3 |
| <i>YEP-H</i> | – | – | 40 000 | 100 000 | 1,6 | 0,48 | – | 6 |
| FeNi 77-40 | 77–76 Mi, Mo, Cr, Cu | – | 45 000 | 120 000 | 2,0 | 0,8 | 410 | 13 |
| <i>YEP-C</i> | – | – | >40 000 | >150 000 | 1,6 | 0,70 | – | 6 |
| Пермаллой С | 77,0 Ni | 0,1 | 25 000–50 000 | 70 000–150 000 | 2,4 | 0,8 | 380 | 11 |
| <i>TMG</i> | 79,0 Mi, 4 Mo | – | 30 000–50 000 | 200 000–300 000 | 0,8–1,3 | 0,83–0,86 | 460 | 5 |
| <i>TMG</i> | 79,0 Mi, Mo, Cu | 0,5 | 30 000–70 000 | 100 000–300 000 | 0,8–1,6 | 0,65–0,75 | 350 | 5 |
| <i>PC-1, PC-2</i> | 78,0 Ni, Mo, Cr | – | 35 000–80 000 | 130 000–300 000 | 1,6–0,4 | 0,65–0,75 | 350 | 4 |
| <i>PC-3</i> | 80,0 Ni, Mo | – | 35 000–80 000 | 150 000–350 000 | 1,6–0,4 | 0,75–0,85 | 400 | 4 |
| <i>P50000</i> | 76,9–77,2 Ni : 4,0–4,2 Mo | 0,2 | 50 000 | 80 000 | 1,2 | 0,70 | 430 | 12 |
| Гиперм53 | 50,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 120 000 | – | 1,5 | 470 | 2 |
| Пермакс М | 50,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 125 000 | 1,2 | 1,5 | – | 3 |
| Сатимфи | 53,0 Ni | 0,1 | 50 000 | 125 000 | 1,2 | 1,50 | – | 7 |
| Пермеффи 1 | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 50 000 | 140 000 | 1,2 | 0,8 | – | 7 |
| НуМи 80 | 80,0 Ni, 4,0 Mo | Пруток | 50 000 | 200 000 | 1,6 | 0,73 | 460 | 9 |
| Муметалл | 77,0 Ni, Mo | – | 50 000 | 240 000 | 1,0 | 0,77 | 350 | 8 |
| Пермеллой супер С | 77,0 Ni | 0,1 | 50 000–100 000 | 200 000–300 000 | 4,8 | 0,8 | 380 | 11 |
| ТМН | 79,0 Mi, 5 Mo | – | 50 000 100 000 | 300 000 500 000 | 1,3 0,5 | 0,86 0,80 | – | 5 |
| Сплав № 3 | 75,0–78,0 Ni, 2,0–3,0 Cr, 4,0–6,0 Cu | 0,63 0,15 | >55 000 >65 000 | >250 000 375 000 | <1 0,6 | – – | – – | 10 |
| Сплав № 4 | 79,5–8,0 Ni : 3,75–4,8 Mo | 0,63 | >55 000 | >250 000 | <1 | – | – | 10 |

* 1) Германия; 2) *Fr. Krupp Widia-Fabrik*, Германия; 3) *Vacuumpshmelze*, Германия; 4) *Sumitomo Special Metals*, Япония; 5) *Tohoku Metals Industries*, Япония; 6) *Hitachi Metals*, Япония; 7) *Societe Metallurgique d'Imphy*, Франция; 8) *Telcon Metals*, Великобритания; 9) *Carpenter Technology*, США; 10) США; 11) *International Telephone and Telegraph*, США; 12) *Csepeti Femmu*, Венгрия; 13) Германия.

| Сплавы | Основные элементы кроме железа | Толщина продукта, мм | μ_n | μ_{max} | H_g , А/м | B_g , Тл | B , °С | Фирма, страна* |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------|-------------|-------------|------------|----------|-------------------|
| | | 0,15 | >80 000 | >250 000 | <1 | – | – | |
| | | 0,05 | 95 000 | 350 000 | 0,5 | – | – | |
| Гиперном Вакуметр | 80,0 Ni : 4,75 Mo | – | 60 000 | – | – | – | – | 9 |
| HyMi800 | 80,0 Ni : 5,0 Mo | 0,025–0,20 | 60 000 | – | – | – | 460 | 9 |
| FeNi77-60 | 77–76 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 65 000 | 150 000 | 1,5 | 0,8 | 410 | 13 |
| Криоперам Z | 70,0–80,0 Ni | 0,1 | 65 000 | 160 000 | 1,2 | 0,8 | – | 3 |
| Сатмуметалл P70000 | 50,0 Ni | 0,1 | 65 000 | 240 000 | 2,0 | 1,5 | 550 | 8 |
| | – | 0,2 | 70 000 | 100 000 | 0,8 | 0,7 | 430 | 12 |
| Пермемфи ² | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 75 000 | 200 000 | 0,8 | 0,8 | – | 7 |
| Вакоперм100 | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,2 | 75 000 | 250 000 | 0,8 | 0,8 | 400 | 3 |
| Гиперм900 | 75,5–78 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 80 000 | 150 000 | 0,8 | 0,8 | 400 | 2 |
| FeNi77-80 | 77–76 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 85 000 | 180 000 | 1,2 | 0,8 | 410 | 13 |
| YEP-F | – | – | >80000 | >300 000 | 0,8 | 0,7 | – | 6 |
| FeNi77-100 | 77–76 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 110 000 | 250 000 | 1,0 | 0,8 | 410 | 13 |
| Пермемфи ³ | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 110 000 | 250 000 | 0,5 | 0,8 | – | 7 |
| Супермуметалл | 77,0 Ni, Mo | – | 127 000 | 350 000 | 0,6 | 0,77 | 350 | 8 |
| Пермемфи ⁴ | 78,0 Ni, Mo | 0,1 | 130 000 | 300 000 | 0,4 | 0,8 | – | 7 |
| Ультраперм ¹⁰ | 75,0 Ni, Mo, Cr, Cu | 0,05 | 130 000 | 300 000 | 0,4 | 0,78 | 400 | 3 |
| Гипермаксимум | 75,5–78 Ni, Mo, Cr, Cu | – | 140 000 | 280 000 | – | 0,8 | 400 | 2 |

* 1) Германия; 2) *Fr. Krupp Widia-Fabrik*, Германия; 3) *Vacuumpshmelze*, Германия; 4) *Sumitomo Special Metals*, Япония; 5) *Tohoku Metals Industries*, Япония; 6) *Hitachi Metals*, Япония; 7) *Societe Metallurgique d'Imphy*, Франция; 8) *Telcon Metals*, Великобритания; 9) *Carpenter Technology*, США; 10) США; 11) *International Telephone and Telegraph*, США; 12) *Cseperti Femmu*, Венгрия; 13) Германия.

Большинство применяемых ферритов обладают кристаллической структурой шпинели и отвечают формуле: $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, где Me — двухвалентные металлы (Mn , Ni , Mg , Ba , Co , Cu , Zn , Cd). К этой группе относится также феррит одновалентного лития $\text{Li}_2\text{O} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$.

По строению ферриты представляют собой ионные кристаллы. Их кристаллическую решетку образуют отрицательные ионы кислорода и положительные ионы металлов. Элементарная ячейка ферритов типа шпинели состоит из восьми формульных единиц $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Она содержит 32 иона кислорода и 24 иона металлов (8 ионов Me^{2+} и 16 ионов Fe^{3+}). Ионы кислорода образуют ГЦК решетку. Между ионами кислорода имеются 64 тетраэдрические поры (поры A) и 32 октаэдрические поры (поры B), в которых располагаются ионы металлов, занимая 8 пор A и 16 пор B . Между ионами металлов в этих порах существует сильное обменное взаимодействие, приводящее к антипараллельному, как у антиферромагнетиков, расположению спиновых магнитных моментов. Однако в отличие от антиферромагнетиков у ферритов суммарный магнитный момент ионов в порах B не равен суммарному магнитному моменту в порах A . Из-за нескомпенсированного антиферромагнетизма ферриты называют ферримангнетиками. Небольшой результирующий момент определяет невысокую индукцию насыщения ферритов. Результирующий момент обусловлен неодинаковыми магнитными моментами ионов, расположенных в порах A и B , или разным числом ионов в этих порах.

Расположение ионов в порах A и B у большинства ферритов соответствует обращенной или смешанной структуре шпинели. В структуре обращенной шпинели ионы Me^{2+} занимают 8 пор A , а ионы Fe^{3+} — 8 пор B и 8 пор A . Условная формула таких ферритов: $\overleftarrow{\text{Fe}^{3+}}(\overrightarrow{\text{Me}^{2+}} + \overrightarrow{\text{Fe}^{3+}})\text{O}_4^{2-}$ где в скобках указаны ионы, расположенные в порах B , а перед скобками — ионы, находящиеся в порах A . Результирующий магнитный момент создают ионы Me^{2+} , так как магнитные моменты ионов Fe^{3+} компенсируются. Обращенную структуру шпинели имеют никелевый и медный ферриты.

По технологии изготовления, эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям ферриты имеют преимущества перед металлическими сплавами. Физико-механические свойства в сочетании с возможностью получения структуры с заданным размером кристаллических зерен обеспечивают высокую износостойкость ферритов в контакте с абразивным материалом, в частности, при магнитной записи информации.

Основные области применения ферритов — радиоэлектронная и вычислительная техника, техника связи, приборостроение.

Промышленность изготавливает ферритовые сердечники кольцевые, трубчатые, дисковые, стержневые, подстрочные, Ш-, Е-, Г-, О-, П-образные, сложной конфигурации, для магнитных головок.

Низкокоэрцитивные ($H_c < 4$ кА/м) ферриты образуют 4 класса оксидных ферримангнетиков: 1) магнитомягкие ферриты никель-цинковой и марганец-цинковой систем для радиочастот; 2) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); 3) магнитострикционные ферриты; 4) сверхвысокочастотные ферриты (СВЧ).

У ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (ферриты ППГ) отношение остаточной индукции и максимальной индукции на предельной статической петле гистерезиса не менее 0,85. Сердечники из ферритов ППГ с малой коэрцитивной силой ($H_c < 40$ А/м) применяют, как правило, в переключающих и накопительных элементах и магнитных усилителях, а сердечники с большой коэрцитивной силой (H_c более 40 А/м) — в оперативных запоминающих устройствах. Кольцевые сердечники (наружный диаметр 0,3–10,0 мм, высота 0,06–5,0 мм) применяются в устройствах автоматизации и вычислительной техники. Ферриты ППГ по химическому составу разделяют на пять групп (табл. 2.64).

Магнитострикционные ферриты имеют сильно выраженную магнитострикцию в слабых переменных магнитных полях. Применяются в прецизионных фильтрах, в том числе широкополосных, в качестве преобразователя колебаний магнитного поля в механические (продольные или крутильные) и наоборот. Способность ферритового материала преобразовывать

Таблица 2.64. Свойства ферритов ППГ

| Типы ферритов | H_c , А/м | B_r , Тл | H_m/H_c^* | θ , °С | p_1 , Ом·м, не менее |
|-----------------------------|-------------|------------|-------------|---------------|------------------------|
| Ферриты системы Li–Na | | | | | |
| 100П | 143–1194 | 0,2–0,28 | 0,75 | 630 | $1 \cdot 10^6$ |
| 101П | 143–1194 | 0,2–0,28 | 0,75 | 630 | $1 \cdot 10^6$ |
| 104П | 143–1194 | 0,24–0,32 | 0,75 | 600 | $5 \cdot 10^6$ |
| 105 | 56–1194 | 0,2–0,32 | 0,75 | 500 | $1 \cdot 10^6$ |
| Ферриты системы Mg–Mn–Ca | | | | | |
| 300П | 12–56 | 0,19–0,27 | 0,75 | 250 | $2 \cdot 10^3$ |
| Ферриты системы Li–Mg–Mn | | | | | |
| ЗВТ | 223–227 | 0,19–0,27 | 0,75 | 500 | $5 \cdot 10^5$ |
| БВТ | 346–450 | 0,18–0,26 | 0,75 | 500 | $1 \cdot 10^6$ |
| Ферриты системы Mg–Mn | | | | | |
| 2.1ВТ | 151–199 | 0,16–0,23 | 0,72 | 240 | $5 \cdot 10^4$ |
| 1.3ВТ | 92–123 | 0,18–0,26 | 0,75 | 250 | $5 \cdot 10^2$ |
| Ферриты системы Mg–Mn–Zn–Ca | | | | | |
| 0,9ВТ | 64–80 | 0,20–0,30 | 0,75 | 230 | $2 \cdot 10^2$ |
| 0,3ВТ | 20–28 | 0,17–0,25 | 0,70 | 170 | $1 \cdot 10^4$ |
| 0,27ВТ | 17–25 | 0,16–0,23 | 0,72 | 110 | $2 \cdot 10^3$ |
| 0,16ВТ | 10–16 | 0,16–0,23 | 0,72 | 130 | $5 \cdot 10^2$ |
| 0,12ВТ | 7,9–11,0 | 0,16–0,23 | 0,65 | 110 | $6 \cdot 10^4$ |

* H_m/H_c – отношение напряженности поля трогания к коэрцитивной силе.

Таблица 2.65. Свойства магнитострикционных никель-кобальтовых ферритов

| Типы ферритов | $K_{св}$, % | Q | $V_{ } \cdot 10^{-3}$ м/с | $V_{\kappa} \cdot 10^{-3}$ м/с | t , °С, для определения ТКЧ | ТКЧ $\cdot 10^6$ |
|---------------|--------------|------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|
| 601С | 13,0 | 2800 | 5,4–5,75 | – | 20÷60 | –3÷+15 |
| 602С | 12,0 | 2500 | – | 3,1–3,6 | 20÷5 | –10÷+60 |
| | | | | | +20÷–10 | –15÷+15 |
| 605С | 12,0 | 2800 | 5,4–5,75 | – | 20÷70 | –60÷+60 |
| | | | | | +20÷–10 | |
| | | | | | +20÷–10 | –12÷+12 |
| | 10,0 | 2000 | – | 3,1–3,5 | 20÷50 | |
| | | | | | +20÷–60 | –25÷+25 |
| 606С | 12,0 | 3500 | 5,4–6,0 | – | 20÷85 | |
| | | | | | +20÷–10 | –14÷+14 |
| | | | | | 20÷50 | |
| | 10,5 | 4500 | – | 3,3–3,6 | +20÷60 | 0÷+60 |
| | | | | | 20÷85 | –10÷+10 |
| | | | | | +20÷65 | –25÷+25 |
| | | | | | 20÷85 | |

Примечание: Q – добротность; $V_{||}$, V_{κ} – скорости распространения продольных и крутильных колебаний соответственно; ТКЧ – температурный коэффициент резонансной частоты.

магнитную энергию в упругую оцениваются с помощью коэффициента магнитомеханической $K_{св}$, определяющего отношение энергии, превращенной в упругую, и всей подведенной магнитной энергии: $K_{св}^2 = W_{упр} / W_{магн}$. Магнитострикционные ферриты изготавливают на основе никелевых ферритов с различными малыми присадками: $CoO \sim 1,25\% \text{ мол.}$, $CuO \sim 0,15\% \text{ мол.}$, $V_2O_5 \leq 0,5\% \text{ мол.}$ Наиболее эффективной является добавка CoO , которая имеет положительную константу кристаллографической анизотропии K_1 , близкой к нулю. Точка Кюри этих ферритов 530–590 °С. Свойства магнитострикционных ферритов приведены в табл. 2.65.

2.2.4.2.1. Ферриты для поглощения радиочастот

Для поглощения ЭМИ радиочастот используют марганцево-цинковые и никель-цинковые ферриты. Марганцево-цинковые ферриты обладают высокой магнитной проницаемостью, но имеют относительно небольшое удельное электрическое сопротивление (10^3 до 10^5 Ом·м), что ограничивает их использование при высоких частотах (до 3 МГц).

Для смешанной структуры шпинели характерно, что ионы Me^{2+} и Fe^{3+} располагаются как в порах Б, так и в порах А. Расположение ионов в таких ферритах отвечает формуле $Me_n^{2+} + Fe_{1-n}^{3+} (Me_{1-n}^{2+} + Fe_{1+n}^{3+}) O_4^{2-}$ (где n — коэффициент, характеризующий меру обращенности). При $n = 0$ получается обращенная структура шпинели, при $0 < n < 1$ — смешанная. Значение n зависит от технологии получения ферритов.

В технике преимущественно применяют не простые (однокомпонентные), а сложные ферриты, получаемые из смеси нескольких оксидов двухвалентных металлов. Ценными свойствами обладают ферриты, представляющие твердые растворы ферритов цинка и кадмия. В состав сложных ферритов вводят также оксиды трехвалентных металлов (Cr, Al). Многообразие сочетаний исходных компонентов предоставляет возможность получать ферриты с разнообразными свойствами. На рис. 2.56 в качестве примера показано изменение свойств никель-цинкового феррита при изменении в нем концентрации оксида цинка. Немагнитный цинковый феррит, добавленный в никелевый феррит, понижает θ , H_c и резко увеличивает μ'_H , поэтому состав феррита должен быть точно выдержан. Этот фактор предъявляет повышенные

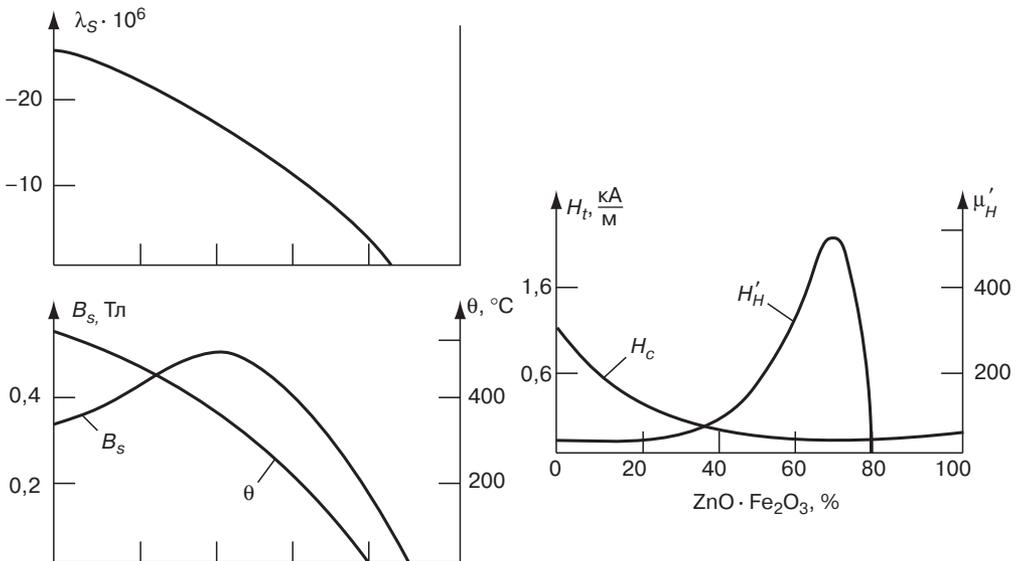


Рис. 2.56. Влияние содержания цинкового феррита $ZnO \cdot Fe_2O_3$ в никелевом феррите $NiO \cdot Fe_2O_3$ на магнитные свойства последнего [18, 100]

требования к технологии получения ферритов, включая и необходимость точного поддержания всех технологических параметров — температуры спекания, размера частиц порошков и т. д.

Особенность свойств ферритов состоит в том, что при нагреве начальная магнитная проницаемость сначала возрастает, а затем резко падает при температуре точки Кюри (рис. 2.57), которая и определяет допустимую рабочую температуру феррита.

Важной характеристикой ферритов, влияющей на область их применения, является критическая частота $f_{кр}$, при которой начинается резко возрастать тангенс угла потерь. Граничной принято считать частоту, при которой $\text{tg } \delta_{\mu} \leq 1$.

Никель-цинковые ферриты отличаются высоким удельным электрическим сопротивлением (до 10^{-11} Ом·м) и малыми потерями; поэтому их используют при более высоких частотах (до 200 МГц) и подразделяют на три группы.

Ферриты первой группы (1000НН, 400НН) не содержат специальных присадок и применяются для работы в слабых и средних полях на частотах до 2 МГц. Ферриты второй группы (300НН, 60НН) содержат 50% Fe_2O_3 и 1–8% других оксидов. Их применяют для работы на частотах до 55 МГц. Ферриты третьей группы (100ВЧ, 30ВЧ2) содержат избыток Fe_2O_3 (54–59%), а также присадки кобальта и других оксидов. Они имеют меньше потери на вихревые токи и предназначены для использования в слабых полях на частотах до 220 МГц. Из-за высокой температуры точки Кюри они обладают малым температурным коэффициентом магнитной проницаемости в широком интервале температур.

Магнитомягкие ферриты для радиочастот по назначению и магнитным свойствам классифицируют на десять групп. В табл. 2.66 в соответствии с классификацией приведены плотность и электромагнитные свойства ферритов промышленных марок никель-цинковой (группы марок НН, НТ, ВН, ННС) и марганец-цинковой (группы НМ, МТ, НМС) систем семи групп. Восьмая группа включает ферриты для датчиков температуры с заданной точкой Кюри. Эта группа включает ферриты марок 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН, имеющие точку Кюри ($^{\circ}\text{C}$) соответственно 70, 90, 60, 75, 185. В девятую и десятую группы входят соответственно ферриты для магнитного экранирования марок 800ВНРП, 200НРП и ферриты для перестраиваемых контуров мощных радиотехнических устройств (группы марок ВНРП) с магнитной проницаемостью в диапазоне 10–300.

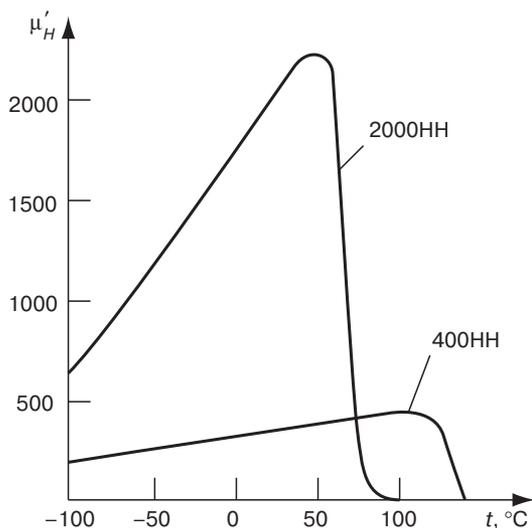


Рис. 2.57. Влияние температуры нагрева на магнитную проницаемость никель-цинковых ферритов [18, 100]

Кольцевые сердечники из магнитомягких ферритов изготавливают с наружным диаметром 3–180 мм, внутренним — 2–115 мм, высотой 1,5–12 мм. Марганец-цинковые нетермостабильные ферритовые сердечники предназначены для магнитопроводов, применяемых в изделиях электронной техники. Сердечники предназначены для работы в слабых синусоидальных полях напряженностью 8–24,0 А/м и на частотах от 0,06 МГц (для сердечников из феррита марки 6000 НМ), до 1,0 МГц (для сердечников из феррита марки 1000НМ). Сердечники могут применяться в элементах и устройствах аппаратуры, эксплуатирующейся в условиях воздействия на них механических факторов: вибрационных нагрузок частотой от 1 до 5000 Гц с ускорением не более 392 м/с^2 , линейных (центробежных) нагрузок с ускорением не более 4905 м/с^2 .

При воздействии на сердечник механических нагрузок в них возникают механические напряжения, вызывающие отклонение электромагнитных параметров.

Отклонение начальной магнитной проницаемости при воздействии на сердечник механических нагрузок обратимо. После воздействия механической нагрузки значение начальной магнитной проницаемости сразу же возвращается к значению, несколько превышающему исходное (в ненагруженном состоянии сердечника). С течением времени это превышение исчезает. Сердечники можно эксплуатировать в течение 50 000 ч. Прочность сердечников ($\text{в } 10^{-3} \text{ кПа}$) при растяжении — 9,8; при сжатии — 147; при изгибе — 29,4. Максимальные рабочие температуры от 60 до 155°C — для ферритов марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ; 125°C — для ферритов марок 3000НМ, 4000НМ; 100°C — для феррита марки 6000НМ.

Сердечники из ферритов марок 400НН, 150ВН, 30ВН применяют в магнитных антеннах радиовещательных приемников. Сердечники предназначены для работ на частотах 2,6; 12,0; 100 МГц (соответственно ферритовые сердечники марок 400НН, 150ВН, 30В).

Типы и свойства ферритов для поглощения ЭМИ радиочастот приведены в табл. 2.66–2.69.

2.2.4.2.2. Ферриты для поглощения ВЧ и СВЧ

Ферриты для поглощения высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот, имеют сложный состав; их изготавливают из четырех и более оксидов. К ним также относится литиевый $\text{Li}_2\text{O}\cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ и тройной кобальт-бариевый $(\text{BaCo})\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ферриты с ГП решеткой.

Сверхвысокочастотные ферриты (ферриты СВЧ) характеризуются малыми магнитной кристаллографической анизотропией и коэрцитивной силой, очень высоким удельным электрическим сопротивлением (10^4 – $10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Основным параметром СВЧ ферритов является величина ΔH — ширина кривой ферромагнитного резонанса, определяющая эффективность использования ферритов в устройствах СВЧ (вентили, фазовращатели, циркуляторы). СВЧ-ферриты используют в диапазоне частот от сотен мегагерц до тысяч гигагерц (длины волн от метров до миллиметров).

Применение ферритов в СВЧ диапазоне ($\geq 800 \text{ МГц}$) основано на явлениях эффекта Фарадея и ферромагнитного резонанса.

Эффект Фарадея используют в модуляторах, фазовращателях, циркуляторах и других устройствах антенной техники. Он состоит в повороте плоскости поляризации плоскополяризованной волны, распространяющейся вдоль подмагниченного постоянным полем феррита. Угол поворота ϕ пропорционален длине стержня феррита и напряженности подмагничивающего поля. Чем меньше напряженность поля, требуемая для поворота плоскости поляризации на заданный угол ϕ , тем активнее феррит, выше его функциональные свойства.

Ферромагнитный резонанс возникает в тех случаях, когда на феррит, перемещаемый высокочастотным полем, наложено перпендикулярное постоянное магнитное поле H_0 . Это поле вызывает прецессию орбитального момента электрона, частота которой ω_0 изменяется пропорционально H . При определенной H_0 значение ω_0 совпадает с частотой высокочастотного поля, и наступает ферромагнитный резонанс. Он проявляется в уменьшении μ' и росте μ'' в некоторой области поля ΔH_0 (рис. 2.58). В этой области резко возрастает $\text{tg } \delta_\mu$, и при определенном

Таблица 2.66. Свойства магнитоягких ферритов для радиочастот

| Феррит | μ | $(\text{tg } \delta/\mu_n) \cdot 10^6$, не более при | | | | | $f_{\text{кр}}$, МГц при $\text{tg } \delta$ | Параметры петли гистерезиса в статическом режиме | | | | | P_1 , Ом·М | Θ , °С не менее | $p \cdot 10^{-3}$ кг/м |
|---------------------------------------|---------------------------|---|-----|--------------|-------|-------|--|--|--------------------------------------|-------------------|------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| | | H , А/м | | F , МГц | | | | μ_{max} | H , А/м, при μ_{max} | При $H = 800$ А/м | | | | | |
| | | 0,8 | 8 | | 0,1 | 0,002 | | | | B , Тл | B_c , Тл | H_c , А/м | | | |
| I группа: ферриты общего назначения | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100НН | 100±20 | 125 | — | 7 | 30 | 15 | 850 | 120 | 0,44 | 0,29 | 56 | 10 ⁶ | 300 | 4,7–5,0 | |
| 400НН | 400±50 ¹⁰⁰ | 18 | 50 | 0,1 | 3,5 | 1,5 | 1100 | 64 | 0,25 | 0,12 | 64 | 10 ⁴ | 120 | 4,7–4,9 | |
| 400НШ | 400±80 | 12 | 12 | 0,1 | 6,0 | 3,90 | 1400 | 10 | 0,28 | 0,16 | 48 | 10 ³ | 300 | 4,7–4,9 | |
| 600НН | 600±100 ²⁰⁰ | 22 | 75 | 0,1 | 1,5 | 0,70 | 1600 | 56 | 0,31 | 0,14 | 32 | 10 ⁴ | 110 | 4,8–6,0 | |
| 1000НН | 1000±200 | 50 | 150 | 0,1 | 0,40 | — | 3000 | 32 | 0,27 | 0,15 | 20 | 10 ⁴ | 110 | 4,8–5,3 | |
| 1000НН | 100±200 | 15 | 45 | 0,1 | 0,60 | 0,20 | 1800 | 40 | 0,35 | 0,11 | 20 | 0,5 | 200 | 4,4–4,6 | |
| 1500НМ | 1500±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,6 | 0,10 | 2500 | — | 0,35 | 0,11 | 24 | 0,5 | 200 | 4,4–4,6 | |
| 2000НН | 2000±200 ⁴⁰⁰ | 85 | 270 | 0,1 | 0,1 | — | 7000 | 12 | 0,25 | 0,12 | 8 | 10 | 70 | 4,8–5,3 | |
| 2000НМ | 2000±300 ⁵⁰⁰ | 15 | 45 | 0,1 | 0,5 | 0,05 | 3500 | 20 | 0,38 | 0,13 | 24 | 0,5 | 200 | 4,4–4,6 | |
| 3000НМ | 3000±500 | 35 | 60 | 0,1 | 0,1 | 0,002 | 3500 | 20 | 0,35 | 0,12 | 12 | 0,5 | 140 | 4,6–4,8 | |
| II группа: термостабильные ферриты | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7ВН | 7±1 | 680 | — | 70 | 220 | 150 | 15 | 4400 | 0,07 | 0,06 | 2240 | 10 ⁸ | 450 | 3,8 | |
| 20ВН | 20±4 | 300 | — | 30 | 120 | 65 | 15 | 2000 | 0,20 | 0,10 | 1000 | 10 ⁶ | 450 | 3,7–4,0 | |
| 30ВН | 30±5 | 170 | — | 30 | 200 | 110 | 90 | 1600 | 0,26 | 0,070 | 520 | 10 ³ | 450 | 4,5–4,8 | |
| 50ВН | 50±10 | 180 | — | 20 | 70 | 40 | 170 | 800 | 0,30 | 0,200 | 360 | 10 ⁴ | 450 | 4,5–4,8 | |
| 100ВН | 100±20 | 135 | — | 18 | 35 | 25 | 280 | 480 | 0,36 | 0,150 | 280 | 10 ⁵ | 400 | 4,5–4,8 | |
| 150ВН | 150±20 | 135 | — | 12 | 25,0 | 15 | 330 | 520 | 0,35 | 0,150 | 240 | 10 ⁴ | 400 | 4,5–4,8 | |
| 700НМ | 700±200 | 80 | — | 3 | 5,0 | 2,0 | 1900 | 128 | 0,38 | 0,050 | 240 | 20 | 240 | 4,3 | |
| 1000НМ | 1000±200 | 5 | 15 | 0,1 | 1,80 | 0,60 | 2000 | 80 | 0,33 | 0,100 | 28 | 10 | 200 | 4,3–4,7 | |
| 1500НМ1 | 1500±300 | 15 | 45 | 0,1 | 0,60 | 0,10 | 3000 | 32 | 0,35 | 0,100 | 16 | 5,0 | 200 | 4,3–4,7 | |
| 1500НМ3 | 1500±300 | 5 | 15 | 0,1 | 1,50 | 0,30 | 3000 | 48 | 0,38 | 0,080 | 16 | 20 | 200 | 4,3–4,7 | |
| 2000НМ1 | 2000±300 ⁵⁰⁰ | 15 | 45 | 0,1 | 0,50 | 0,050 | 3500 | 32 | 0,38 | 0,120 | 16 | 5,0 | 200 | 4,3–4,7 | |
| III группа: высокопроницаемые ферриты | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4000НМ | 4000±500 ⁶⁰⁰ | 35 | 60 | 0,1 | 0,1 | 0,005 | 7000 | 16 | 0,35 | 0,13 | 8 | 0,5 | 125 | 4,6–4,8 | |
| 6000НМ | 6000±1200 ²⁰⁰⁰ | 45 | 75 | 0,03 | 0,003 | — | 1000 | 12 | 0,35 | 0,11 | 8 | 0,1 | 110 | 4,6–4,8 | |
| 10000НВ | 10000±2000 | 35 | 90 | 0,02 | 0,05 | 0,0 | 1700 | 8 | 0,35 | 0,11 | 4 | 0,01 | 110 | 4,9–5,0 | |
| 20000НМ | 20000±5000 | 10 | 30 | 0,01 | 0,005 | — | 3500 | 4 | 0,35 | 0,11 | 2 | 0,01 | 110 | 4,9–5,3 | |

IV группа: ферриты для телевизионной техники

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---|---|---|---|------|------|------|----|------|------|----|-----|-----|---|
| 2500НМС1 | - | - | - | - | 0,4 | 0,16 | 4800 | 40 | 0,45 | 0,10 | 46 | 1,0 | 200 | - |
| 3000НМС | - | - | - | - | 0,36 | 0,10 | 4800 | 32 | 0,45 | 0,10 | 12 | 1,0 | 200 | - |

V группа: ферриты для импульсных трансформаторов

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------------------|---|---|---|------|---|------|-----|------|-------|-----|-----------------|-----|---------|
| 300ННИ | 300±50 ⁸⁰ | - | - | - | 2,00 | - | 300 | 240 | 0,30 | 0,28 | 160 | 10 | 240 | 4,7-4,9 |
| 350ННИ | 350±75 | - | - | - | 2,50 | - | 1000 | 80 | 0,26 | 0,12 | 48 | 10 ⁷ | 180 | 4,7-4,9 |
| 450ННИ | 450±50 | - | - | - | 1,00 | - | 2100 | 56 | 0,37 | 0,160 | 40 | 10 ³ | 230 | 4,7-4,9 |
| 1000ННИ | 1000±250 ⁵⁰⁰ | - | - | - | 0,50 | - | 3000 | 32 | 0,30 | 0,090 | 16 | 10 ³ | 120 | 4,7-4,9 |
| 1100ННИ | 1100±250 | - | - | - | 0,40 | - | 3000 | 32 | 0,27 | 0,080 | 20 | 10 | 110 | 4,7-4,9 |
| 1100НМИ | 1100±150 | - | - | - | 0,30 | - | 3000 | 32 | 0,40 | 0,150 | 24 | 0,010 | 180 | 4,7-4,9 |

VI группа: ферриты для широкополосных трансформаторов

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------|---|---|---|----|----|-----|-----|------|------|-----|-----------------|-----|---------|
| 50ВНС | 50±5 ¹⁰ | - | - | - | 80 | 70 | 170 | 800 | 0,17 | 0,02 | 4,8 | 10 ⁴ | 480 | 4,7-4,9 |
| 90ВНС | 90±10 | - | - | - | 40 | 30 | 340 | 640 | 0,28 | 0,08 | 152 | 10 ⁴ | 400 | 4,7-4,9 |
| 200ВНС | 200±20 | - | - | - | 11 | 5 | 650 | 280 | 0,31 | 0,08 | 64 | 10 ⁴ | 350 | 4,7-4,9 |
| 300ВНС | 300±30 | - | - | - | 8 | 4 | 850 | 220 | 0,32 | 0,13 | 80 | 10 ⁴ | 250 | 4,7-4,9 |

VII группа: ферриты для магнитных головок

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------------|---|---|---|------|---|---|---|------|-------|----|-----------------|-----|-----|
| 500НТ | 500 ±100 | - | - | - | 0,50 | - | - | - | 0,35 | 0,200 | 32 | 10 ³ | 150 | 5,3 |
| 500НТ1 | 500 ±200 | - | - | - | 2 | - | - | - | 0,35 | 0,210 | 48 | 10 ³ | 150 | 5,3 |
| 1000НТ | 1000 ±400 | - | - | - | 0,2 | - | - | - | 0,32 | 0,140 | 16 | 10 ² | 140 | 5,3 |
| 100НТ1 | 1000 ±400 | - | - | - | 0,8 | - | - | - | 0,32 | 0,150 | 32 | 10 ³ | 140 | 5,3 |
| 2000НТ | 2000 ±400 | - | - | - | 0,10 | - | - | - | 0,27 | 0,120 | 8 | 10 | 90 | 5,3 |
| 2000МТ | 2000 ±1000 | - | - | - | 0,20 | - | - | - | 0,35 | 0,150 | 5 | 1,0 | 110 | 5,1 |
| 500МТ | 500 ±300 | - | - | - | - | - | - | - | 0,48 | - | 20 | 0,10 | 240 | 5,1 |
| 1000МТ | 1000 ±200 | - | - | - | - | - | - | - | 0,50 | - | 20 | 1,0 | 240 | 5,1 |
| 5000МТ | 5000 ±2000 | - | - | - | - | - | - | - | 0,35 | 0,150 | 5 | 0,10 | 110 | 5,1 |

Примечания: $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла магнитных потерь; $\operatorname{tg} \delta/\mu_n$ — относительный тангенс угла магнитных потерь; $f_{\text{кр}}$ — критическая частота; H — напряженность магнитного поля; θ — температура (точка) Кюри.

Таблица 2.67. Ферритовые материалы для слабых и средних магнитных полей [*www.ferrite.ru*]

| Марка материала | Начальная магнитная проницаемость, μ | Относительный тангенс угла магнитных потерь, $\text{tg } \delta_{\mu}$ | Относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости | Коэффициент дезаккомодации начальной магнитной проницаемости | Точка Кюри, θ , °С | Максимальная магнитная индукция, мТл/Гс | Остаточная индукция, мТл/Гс | Коэрцитивная сила, А/м | Удельное электрическое сопротивление ρ_v , Ом·м | Критическая частота, МГц | Плотность г/см ³ |
|-----------------|--|--|---|--|---------------------------|---|-----------------------------|------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| 9ВН | 9 | <750 (200 МГц) | ÷ | ÷ | >540 | 150÷1500 (50 Э) | 80÷800 | 1600 | 10 ⁷ | 650 | 4,7÷4,9 |
| 50ВН | 50 | <180 (20 МГц) | -5÷+10 (-70÷+155) °С | ÷ | >450 | 300÷3000 (50 Э) | 200÷2000 | 360 | 10 ⁴ | 70 | 4,5÷4,8 |
| 700НМ | 700 | <80 (3 МГц) | -0,2÷+1,2 (-70÷+155) °С | 30 | >240 | 380÷3800 (10 Э) | 50÷500 | 24 | 20 | 5 | 4,3÷4,7 |
| 2000НМ1 | 2000 | <15 (0,1 МГц) | -0,1÷+3,4 (-70÷+155) °С | 10 | >200 | 380÷3800 (10 Э) | 120÷1200 | 16 | 6 | 0,5 | 4,3÷4,7 |
| 2000НМ3 | 2000 | <12 (0,1 МГц) | 0÷2,5 (-70÷+155) °С | 3 | >200 | 360÷3600 (10 Э) | 120÷1200 | 25 | 0,5 | 0,5 | 4,3÷4,7 |
| 600НН | 600 | <22 (0,1 МГц) | 6÷15 (-70÷+100) °С | ÷ | >110 | 310÷3100 (10 Э) | 140÷1400 | 32 | 10 ⁴ | 1,5 | 4,8÷5,0 |
| 1000НН | 1000 | <50 (0,1 МГц) | 2,5÷7,5 (-70÷+85) °С | ÷ | >110 | 270÷2700 (10 Э) | 150÷1500 | 20 | 10 ⁴ | 0,4 | 4,8÷5,1 |
| 4000НМ | 4000 | <35 (0,1 МГц) | 3÷4,5 (-70÷+100) °С | ÷ | >110 | 350÷3500 (10 Э) | 130÷1300 | 8 | 0,5 | 0,1 | 4,5÷4,7 |
| 6000НМ | 6000 | <45 (0,1 МГц) | -0,3÷+2 (-70÷+100) °С | ÷ | >110 | 350÷3500 (10 Э) | 110÷1100 | 8 | 0,1 | 0,005 | 4,6÷4,8 |
| 6000НМ1 | 6000 | <10 (0,1 МГц) | 0÷1,5 (-60÷+100) °С | 2 | >125 | 350÷3500 (10 Э) | 80÷800 | 4 | 1 | 0,1 | 4,6÷4,8 |
| 450ННИ | 420 | ÷ | 4÷17 (20÷+155) °С | ÷ | >230 | 370÷3700 (10 Э) | 160÷1600 | 40 | 10 ⁴ | ÷ | 4,7÷4,9 |
| 200ВНП | 200 | <55 (3 МГц) | 20÷55 (-60÷+100) °С | ÷ | >240 | 400÷4000 (50 Э) | 250÷2500 | 80 | 10 ⁶ | 15 | 4,8÷5,1 |

Таблица 2.68. Свойства ферритов, применяемых для поглощения низких и высоких радиочастотах [18, 100]

| Марка феррита | μ'_H | ρ , Ом·м | $f_{кр}$, МГц, при $\text{tg } \delta = 0,1$ |
|---------------|----------|----------------|---|
| 4000НМ | 4000 | 10^3 | 0,1 |
| 1000НМ | 1000 | $5 \cdot 10^3$ | 1,0 |
| 1000НМЗ | 1000 | 10^5 | 2,2 |
| 1000НН | 1000 | 10^5 | 0,4 |
| 400НН | 400 | 10^6 | 2,0 |
| 300НН | 300 | 10^8 | 5 |
| 60НН | 60 | 10^8 | 55 |
| 100ВЧ | 100 | 10^{10} | 35 |
| 30ВЧ2 | 30 | 10^{11} | 200 |

Примечание: На первом месте в марке стоит число, обозначающее количественное значение μ'_H ; на втором — буквы, определяющие частотный диапазон; *H* — низкочастотные ($f_{кр} = 0,1-20$ МГц); *ВЧ* — высокочастотные ($f_{кр} = 30-300$ МГц); на третьем — буква, обозначающая легирующий оксид: *Н* — никель-цинковый, *М* — марганцево-цинковый. Для высокочастотных ферритов легирующий оксид не указывается, а приводится его разновидность, например: 30ВЧ2 — $\mu'_H = 30$ высокочастотный, разновидность вторая.

Таблица 2.69. Ферритовые материалы для сильных магнитных полей [*www.ferrite.ru*]

| Марка материала | Магнитная проницаемость ($f = 16$ кГц, $B = 0,2$ Тл), μ , мкВт/см ³ ·Гц | Удельные объемные магнитные потери ($f = 16$ кГц, $B = 0,2$ Тл) | Магнитная индукция ($H = 240$ А/М), мТл/Гс | Максимальная магнитная индукция, мТл/Гс | Остаточная магнитная индукция, мТл/Гс | Коэрцитивная сила, А/м | Точка Кюри, θ , °С | Удельное электрическое сопротивление, ρ_V , Ом·м | Критическая частота, f , МГц | Плотность, ρ , г/см ³ |
|-----------------|---|--|---|---|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|---|--------------------------------|---------------------------------------|
| 2500НМС1 | 4500 (+20 °С) | 10,5 (+25 °С) | 290–2900 | 450–4500 | 100–1000 | 16 | >200 | 1 | 0,4 | 4,7–4,9 |
| | 4100 (+120 °С) | 8,7 (+100 °С) | (100 °С) | (10Э) | | | | | | |
| 2500НМС2 | 4500 (+20 °С) | 8,5 (+25 °С) | 330–3300 | — | — | — | >200 | 1 | — | 4,7–4,9 |
| | 4100 (+120 °С) | 6 (+100 °С) | (100 °С) | | | | | | | |
| 3000НМС | 4000 (+20 °С) | 2,5 (+25 °С) | 330–3300 | 450–4500 | 100–1000 | 12 | >200 | 1 | 0,36 | 4,7–4,9 |
| | 2500 (+12 °С) | 2,5 (+120 °С) | (100 °С) | (10Э) | | | | | | |

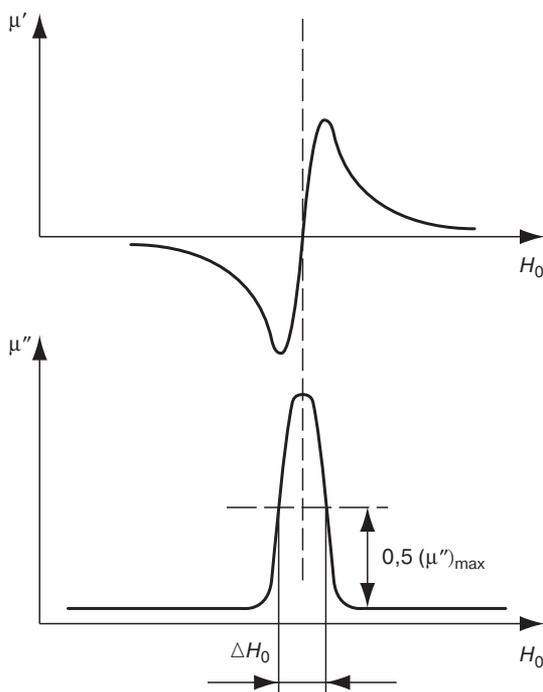


Рис. 2.58. Изменение μ' и μ'' феррита-граната в условиях магнитного резонанса [18, 100]

(обратном) направлении магнитного поля происходит полное поглощение его энергии. На принципе избирательного поглощения основано использование ферритов в резонансных вентилях, фильтрах, быстродействующих переключателях и в других устройствах.

Свойства ферритов характеризует ширина ΔH_0 резонансной кривой на уровне половины высоты резонансного максимума. Ширина интервала ΔH_0 (рис. 2.58) — основная характеристика СВЧ-ферритов. Большинство СВЧ-преобразователей работает в до- и зарезонансных полях, поэтому важно обеспечить узкую резонансную полосу. Значение ΔH_0 тем меньше, чем больше плотность и меньше кристаллографическая анизотропия материала.

Такие свойства можно получить, вводя в состав ферритов оксиды с константой анизотропии противоположного знака. Кроме того, для увеличения плотности их изготавливают не спеканием, а сплавлением порошков в монокристалл, у которого узкая резонансная кривая (малое ΔH_0) получается, если постоянное магнитное поле приложено в направлении трудного намагничивания.

Ферриты для СВЧ выбирают с учетом типа устройств, частотного диапазона, уровня мощности и климатических условий.

Ферриты со структурой шпинель изготавливают спеканием оксидов никеля и магния. Их состав соответствует формуле $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Значение ΔH_0 для таких ферритов оценивают при частотах 3000 МГц. Ферриты, используемые при более высоких частотах, дополнительно легируют трехвалентными металлами: хромом или алюминием. Они описываются формулами $\text{MgO} \cdot (\text{FeCr})_2\text{O}_3$, $\text{MgO} \cdot (\text{FeAl})_2\text{O}_3$ или $\text{NiO} \cdot (\text{FeCr})_2\text{O}_3$, и значение ΔH_0 для них оценивают при частотах 9200 МГц.

Ферриты-гранаты имеют кристаллическую решетку минерала граната, их формула $3\text{Me}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$. В качестве легирующего элемента в них используют редкоземельные металлы (РЗМ). Применение находят поли- и монокристаллы.

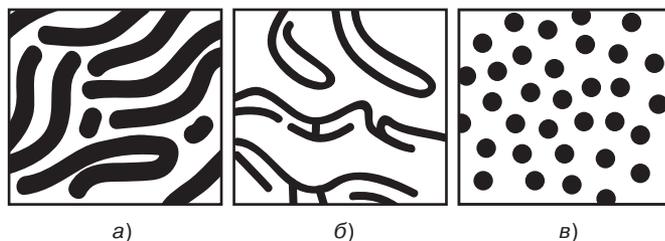


Рис. 2.59. Изменение структуры феррита-граната при намагничивании [18, 100]; а – лабиринтная; б – гантельная; в – цилиндрическая структур доменов:

Поликристаллические ферриты-гранаты изготавливают спеканием оксидов редкоземельных металлов: иттрия, гадолиния и др. Их применяют при длинах волн более 30 см. Для миллиметровых волн (8 мм) применяют монокристаллические ферриты, которые получают методом сплавления порошков оксидов и последующей кристаллизацией их на затравке монокристаллов. Этот же метод используют для изготовления рубиновых монокристаллов для квантовых генераторов (лазеров). Монокристалл иттриевого граната 08КГ при частоте 9200 МГц имеет $\Delta H_0 = 0,6$ кА/м, что значительно ниже значений, указанных в табл. 2.55 для поликристаллических ферритов.

Ортоферриты, как и ферриты-гранаты, изготавливают из оксидов железа, легированных РЗМ. Состав их соответствует формуле $R\text{-FeO}_3$, где R – иттрий, гадолиний, самарий и т. д. Они имеют орторомбическую кристаллическую решетку ($a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), в которой ионы Fe^{+3} расположены в узлах решетки, O^{2-} – на гранях, а R^{3+} – в центре. Монокристаллы ортоферритов получают методом бестигельной зонной плавки.

В монокристаллической пластинке толщиной менее 30 мкм из ортоферритов и ферритов-гранатов РЗМ обнаружена специфическая доменная структура – цилиндрические магнитные домены (ЦМД).

В плоскости пластины, которая перпендикулярна намагничивающему полю и векторам легкого намагничивания, возникает лабиринтовая структура доменов (рис. 2.59). Темные и светлые домены намагничены антипараллельно. С ростом внешнего поля H меняется доменная структура. При определенном значении этого поля $H_{кр}$ темные домены приобретают форму цилиндров (или пузырьков). Это свойство используют в запоминающих устройствах. В таких устройствах ферриты оценивают подвижностью доменов, которая повышает скорость обращения информации, и размером доменов, определяющим плотность информации на пластинах. Подвижность лучше у ортоферритов, а плотность больше у ферритов-гранатов.

Ферриты для СВЧ-устройств должны обладать высоким удельным электросопротивлением ($\rho_v = 10^6\text{--}10^{11}$ Ом·м) и высокой температурой точки Кюри. Маркируют ферриты этой группы по длине волны в сантиметрах, на которой они используются: 1СЧ, 2СЧ, 3СЧ, 4СЧ, 80СЧ.

Для длин волн $\lambda = 1\text{--}3$ см применяют никелевый феррит, двойные ферриты, содержащие оксиды магния и марганца, никеля и магния и другие со структурой шпинели. Они имеют $\Delta H_0 = 10\text{--}100$ кА/м. Для длин волн $\lambda = 4\text{--}10$ см используют тройные ферриты, содержащие оксиды MgO, MnO и ZnO и полиферриты, содержащие, кроме перечисленных, оксиды CuO и CoO. Оксиды меди уменьшают пористость, а оксиды кобальта снижают константу анизотропии. Для длин волн $\lambda > 5$ см для снижения магнитных потерь от ферритов требуется малая намагниченность насыщения. Это требование обеспечивается введением в состав ферритов Cr_2O_3 и особенно Al_2O_3 (магниевые феррохромат и ферроалюминат). Чем больше содержание Al_2O_3 , тем выше ρ_v и температура точки Кюри. Ширина резонансной полосы таких полиферритов составляет 10 кА/м и менее.

Для длин волн $\lambda \geq 10$ см применяют ферриты-гранаты (10СЧ6, 30СЧ3, 40СЧ2, 60СЧ, 80СЧ и др.). Они имеют кристаллическую решетку минерала граната и формулу $3\text{Me}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$,

где Me — иттрий. В некоторых ферритах иттрий частично замещен гадолинием или другим лантаноидом. Ферриты-гранаты иттриевой группы применяют в виде поли- и монокристаллов. Поликристаллические ферриты-гранаты имеют узкую резонансную полосу ($\Delta H_0 = 4$ кА/м). Наиболее ценные свойства у монокристаллических ферритов ($\Delta H_0 = 0,3...0,8$ кА/м), их используют для работы на частотах 4000–5000 МГц.

СВЧ-ферриты по химическому составу и основному рабочему диапазону длин волн образуют шесть групп (табл. 2.70).

2.2.5. Аморфные металлы (металлические стекла)

При высоких скоростях охлаждения из жидкого состояния диффузионные процессы настолько замедляются, что подавляется образование зародышей и рост кристаллов. В этом случае при затвердевании образуется аморфная структура. Металлы с такой структурой получили название аморфные сплавы или металлические стекла.

Аморфное состояние обеспечивает металлическим материалам свойства, значительно отличающиеся от свойств соответствующих материалов с кристаллической структурой.

В остывающем расплаве вязкость повышается, пока не достигнет некоторой величины (обычно 10^{11} – 10^{12} Па·с, при этом металл уже достаточно тверд). По сути дела происходит своего рода замораживание жидкой фазы. Наименьшую для стеклования скорость охлаждения принято называть критической. Температура стеклования, естественно, ниже температуры нормальной кристаллизации. Разница между ними — интервал переохлаждения. Очевидно, чем меньше этот интервал, тем меньше критическая скорость.

Для большинства сплавов с разнородными по свойствам компонентами характерны диаграммы состояния жидкой и твердой фаз с резко выраженным минимумом температуры плавления, то есть с так называемой эвтектикой. Таким образом, появляется возможность снизить температуру кристаллизации и, естественно, интервал переохлаждения, если вместо чистого металла брать его сплавы эвтектического состава. При этом атомы компонентов-присадок должны быть несколько меньше атомов основного металла (примерно на 15–20%). Так достигается наиболее плотная упаковка аморфного сплава.

Этим условиям лучше всего удовлетворяют сплавы металлов с неметаллами (P, C, Si, B), которые принято называть аморфизаторами, хотя существуют и чисто металлические сплавы.

Затвердевание с образованием аморфной структуры принципиально возможно практически для всех металлов. Аморфная структура получена у более чем 20 чистых металлов и полупроводниковых материалов и более 110 сплавов. Это сплавы легкоплавких (Pb, Sn, Al и др.), редкоземельных и переходных (Fe, Co, Mn, Cr и др.) металлов. Для образования аморфной структуры переходных металлов к ним необходимо добавлять так называемые аморфообразующие элементы (C, P, B, N, S и др.). При этом состав аморфного сплава должен отвечать формуле $M_{80}X_{20}$, где M — один или несколько переходных металлов; X — элементы, добавляемые для образования и стабилизации аморфной структуры. Так, известны аморфные сплавы, состав которых отвечает формулам $Fe_{80}P_{13}B_7$; $Fe_{70}Cr_{10}P_{15}B_5$; $Ni_{80}S_{20}$; $Fe_{40}Ni_{40}S_{14}B_6$ и др. [101].

Есть металлические стекла, у которых критическая скорость всего лишь 100–200 К/с, а температура стеклования в несколько раз меньше температуры плавления основного компонента. Таковы, например, двойной сплав $Pd_{80}Si_{20}$, с 20% добавкой кремния, сплавы $Ni_{80}P_{20}$, $Fe_{80}B_{20}$, $Au_{81}Si_{19}$, $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$, $Fe_{72}Cr_8P_{13}C_7$, $Co_{75}Si_{15}B_{10}$ и многие другие. Нетрудно заметить, что содержание металлоидов во всех этих сплавах около 20% [102].

Высокие скорости охлаждения жидкого металла для получения аморфной структуры можно реализовать такими способами, как катапультирование капли на холодную пластину, центрифугирование капли или струи, распыление струи газом или жидкостью с высокой охлаждающей способностью и др. Наиболее эффективными способами получения лент, пригодных для практического применения, считают охлаждение жидкого металла на внешней или

Таблица 2.70. Типы и свойства СВЧ-ферритов

| Феррит | B_s , Тл | H_c , А/м | μ' | θ , °С | ϵ' | $\text{tg } \delta_\epsilon \cdot 10^3$ | $P \cdot 10^3$, кг/м ³ | ρ_v , Ом·м | ΔH , кА/м | |
|---------------------------|------------|-------------|--------|---------------|-------------|---|------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | | | | | | $\lambda = 3$ см | $\lambda = 10$ см |
| Иттриевые ферриты-гранаты | | | | | | | | | | |
| 10СЧ6 | 0,175 | 56 | 100 | 280 | 14,8 | 7 | 5,02 | $1,2 \cdot 10^{10}$ | — | 4,8 |
| 30СЧ3 | 0,120 | 64 | 80 | 230 | 14,6 | 6 | 5,01 | $3,8 \cdot 10^9$ | — | 5,8 |
| 30СЧ6 | 0,130 | 80 | 70 | 280 | 15 | 3 | 5,40 | $3,1 \cdot 10^8$ | — | 8 |
| 40СЧ2 | 0,075 | 56 | 50 | 180 | 14,4 | 5 | 4,97 | $5,1 \cdot 10^{11}$ | — | 4,8 |
| 40СЧ4 | 0,085 | 200 | 30 | 280 | 15,5 | 3 | 5,60 | $9,9 \cdot 10^{10}$ | — | 13 |
| 40СЧ5 | 0,065 | 48 | — | 170 | 14,5 | 4 | 4,96 | — | — | 4,8 |
| 60СЧ | 0,047 | 80 | 30 | 150 | 14 | 4 | 4,92 | $9,0 \cdot 10^9$ | — | 4,8 |
| 80СЧ | 0,030 | 160 | 20 | 120 | 13,5 | 3 | 4,91 | $1,6 \cdot 10^9$ | — | 4,8 |
| 90СЧ | 0,021 | 40 | — | 100 | 13 | 3 | 4,88 | — | — | 4,0 |
| Литиевый феррит | | | | | | | | | | |
| 10СЧ9 | 0,070 | 80 | 20 | 180 | 13 | 3 | 4,89 | $3,0 \cdot 10^8$ | — | 15 |
| Магниеые ферриты | | | | | | | | | | |
| 2СЧ1 | 0,200 | 320 | 20 | 300 | 11,3 | — | 4,05 | $5,0 \cdot 10^8$ | 42 | — |
| 3СЧ | 0,178 | 400 | 13 | 320 | 11,6 | — | 4,1 | $5,5 \cdot 10^8$ | 52 | — |
| 3СЧ1 | 0,170 | 480 | 13 | 380 | 8,2 | — | 3,6 | $1,9 \cdot 10^7$ | 57 | — |
| 3СЧ2 | 0,110 | 560 | 10 | 300 | 6,5 | — | 3,1 | $4,1 \cdot 10^6$ | 64 | — |
| 3СЧ5 | 0,230 | 240 | 50 | 260 | 12,5 | — | 4,20 | $3,9 \cdot 10^6$ | 32 | — |
| 3СЧ6 | 0,330 | 32 | 80 | 180 | 13 | — | 4,70 | $1,1 \cdot 10^5$ | 8 | — |
| 3СЧ7 | 0,190 | 200 | 20 | 320 | 12,2 | — | 4,30 | $3,2 \cdot 10^8$ | 24 | — |
| 3СЧ9 | 0,340 | 32 | 50 | 210 | 13,2 | — | 4,60 | $1,0 \cdot 10^4$ | 9,6 | — |
| 3СЧ15 | 0,220 | 160 | 15 | 370 | 12 | — | 4,50 | $4,7 \cdot 10^7$ | 32 | — |
| 4СЧ3 | 0,110 | 800 | 8 | 350 | 5,4 | — | 2,55 | $1,6 \cdot 10^5$ | 64 | — |
| 4СЧ4 | 0,170 | 280 | 25 | 300 | 10,5 | — | 3,90 | $4,8 \cdot 10^5$ | 40 | — |
| 4СЧ5 | 0,120 | 640 | 15 | 340 | 8,0 | — | 3,05 | $7,0 \cdot 10^8$ | 64 | — |
| 4СЧ11 | 0,220 | 160 | 21 | 300 | 9,5 | — | 4,20 | — | 24 | — |

Примечание: 1. $B_s = \mu_0 J_s$ — измерено при напряженности поля 400–640 кА/м; H_c определено на кольцевых образцах при напряженности поля в образце 4 кА/м при $f = 1,1$ МГц; $\text{tg } \delta_\epsilon$ при $f = 3000$ МГц (все измерения проведены при 20 °С). 2. Обозначения: μ , ϵ — действительные части магнитной и диэлектрической проницаемости соответственно; $\text{tg } \delta_\epsilon$ — тангенс угла диэлектрических потерь; ΔH — ширина резонансной кривой. 3. В марке ферритов для СВЧ на первом месте ставится цифра, указывающая значение длины волны в сантиметрах, при которой используется данный феррит. Например, 3СЧ5 — феррит для работ в полях с длиной волны 3 см, разновидность 5.

| Феррит | B_s , Тл | H_c , А/м | μ' | θ , °С | ε' | $\operatorname{tg} \delta_\varepsilon \cdot 10^3$ | $P \cdot 10^3$, кг/м ³ | ρ_v , Ом·м | ΔH , кА/м | |
|--|------------|-------------|--------|---------------|----------------|---|------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | | | | | | | | $\lambda = 3$ см | $\lambda = 10$ см |
| Никелевые ферриты (для миллиметрового диапазона и коротковолновой части сантиметрового диапазона длины волн) | | | | | | | | | | |
| 1СЧ | 0,450 | 200 | 100 | 300 | 12,2 | — | 4,85 | $8,2 \cdot 10^4$ | 33,5 | — |
| 1СЧ2 | 0,290 | 320 | 20 | 450 | 12,5 | — | 4,95 | $1,7 \cdot 10^7$ | 22,0 | — |
| 1СЧ3 | 0,440 | 240 | 80 | 420 | 11,0 | — | 4,40 | $1,3 \cdot 10^3$ | 32 | — |
| 1СЧ4 | 0,480 | 88 | 80 | 420 | 12,3 | — | 5,05 | $4,8 \cdot 10^6$ | 13,5 | — |
| 1СЧ7 | 0,490 | 120 | 140 | 320 | 12,5 | — | 4,95 | — | 13,5 | — |
| 2СЧ | 0,220 | 720 | 12 | 500 | 10,0 | — | 4,5 | $5,9 \cdot 10^4$ | 56 | — |
| 2СЧ4 | 0,450 | 120 | 50 | 440 | 12,5 | — | 5,0 | $5,3 \cdot 10^8$ | 9,6 | — |
| 3СЧ8 | 0,450 | 320 | 50 | 370 | 11,2 | — | 4,75 | $8,7 \cdot 10^4$ | 36 | — |
| 3СЧ16 | 0,340 | 120 | — | 370 | 12,7 | — | 5,10 | — | 9 | — |
| 4СЧ8 | 0,230 | 350 | 12 | 450 | 12,2 | — | 5,05 | $7,9 \cdot 10^2$ | 48 | — |
| 4СЧ9 | 0,320 | 360 | 30 | 450 | 11,0 | — | 5,0 | $2,0 \cdot 10^8$ | 22 | — |
| 4СЧ10 | 0,220 | 320 | 22 | 500 | 12,4 | — | 5,10 | $7,8 \cdot 10^7$ | 17,5 | — |
| 5СЧ | 0,310 | 96 | 90 | 350 | 12 | — | 5,10 | $3,0 \cdot 10^5$ | 11 | — |
| Магниеые ферроалюминаты (для длинноволновой части диапазона СВЧ) | | | | | | | | | | |
| 4СЧ1 | 0,080 | 440 | 8 | 280 | 4,5 | — | 3,0 | $9,0 \cdot 10^5$ | 72 | — |
| 4СЧ1 | 0,100 | 400 | 10 | 280 | 5,5 | — | 3,20 | $4,0 \cdot 10^5$ | 56 | — |
| 4СЧ6 | 0,120 | 320 | 15 | 280 | 10 | — | 3,75 | $3,6 \cdot 10^6$ | 48 | — |
| 6СЧ1 | 0,145 | 80 | 65 | 180 | 12 | — | 4,20 | $3,0 \cdot 10^8$ | — | 10,4 |
| 8СЧ1 | 0,175 | 360 | 12 | 280 | 9,6 | 3 | 3,85 | $1,5 \cdot 10^5$ | — | 32 |
| 10СЧ | 0,080 | 400 | 10 | 270 | 10 | 2 | 4,00 | $2,0 \cdot 10^7$ | — | 32 |
| 30СЧ2 | 0,110 | 80 | 30 | 150 | 10 | 15 | 4,20 | $1,7 \cdot 10^6$ | — | 13 |
| 30СЧ4 | 0,085 | 160 | 35 | 120 | 10 | 3 | 4,00 | $7,2 \cdot 10^8$ | — | 8 |
| Никелевые и магниеые феррохромиты (для длинноволновой части диапазона СВЧ в высоком уровне мощности) | | | | | | | | | | |
| 4СЧ2 | 0,075 | 520 | 9 | 6,2 | 6,2 | — | 3,00 | $5,2 \cdot 10^8$ | 56 | — |
| 10СЧ1 | 0,065 | 320 | 13 | 8 | 8 | 4 | 3,20 | $6,8 \cdot 10^8$ | — | 24 |
| 10СЧ8 | 0,065 | 128 | 20 | 9,5 | 9,5 | 3 | 3,80 | $5,8 \cdot 10^6$ | — | 16 |
| 10СЧ12 | 0,110 | 640 | 10 | 9,8 | 9,8 | 7 | 4,60 | $5,2 \cdot 10^4$ | — | 20 |
| 15СЧ | 0,120 | 720 | 9 | 4,8 | 4,8 | 6 | 4,5 | $6,8 \cdot 10^4$ | — | 36 |
| 15СЧ1 | 0,065 | 200 | 20 | 6,8 | 6,8 | 3 | 3,00 | $3,2 \cdot 10^5$ | — | 24 |
| 30СЧ | 0,070 | 280 | 13 | 9,5 | 9,5 | 2 | 3,90 | $3,3 \cdot 10^5$ | — | 17,6 |
| 30СЧ1 | 0,130 | 240 | 25 | 11,2 | 11,2 | 5 | 4,40 | $3,0 \cdot 10^8$ | — | 13 |
| 40СЧ | 0,065 | 72 | 60 | 10,2 | 10,2 | 2 | 4,30 | $9,7 \cdot 10^8$ | — | 7 |

внутренней поверхностях вращающихся барабанов, изготовленных из материалов высокой теплопроводности, прокатку между холодными валками металла, подаваемого в виде струи (рис. 2.60).

Тонкий слой аморфного металла получают при расплавлении поверхности изделий лазерным лучом благодаря быстрому отводу теплоты при затвердевании массой основного металла. Металлические материалы с аморфной структурой можно получить не только при затвердевании из жидкого состояния, но и путем сверхбыстрого охлаждения из газовой среды (парообразного или ионизированного состояния), электролизом и катодным распылением с высокими скоростями охлаждения.

При классификации сплавов, склонных к образованию стекол, основанной на принципах кристаллизации, выделены две группы сплавов, наиболее склонных к аморфизации [101].

К первой группе относятся системы металл–металлоид вида $T^2_{1-x}X_x$, где T^2 — Mn, Fe, Co, Ni, Pd, Au или Pt, X — B, C, Si, Ge или P и x изменяется обычно от 0,15 до 0,25. T и X могут быть комбинациями элементов соответствующих групп. Аморфный сплав $Fe_{80}P_{13}C_7$ образуется значительно легче, чем бинарные сплавы Fe–C или Fe–P. В системы такого типа могут быть также добавлены некоторые количества алюминия, других элементов подгруппы и переходных металлов.

Ко второй группе отнесены системы переходных металлов $T^1_{1-x}T^2_x$, где T^2 — поздние переходные металлы Fe, Co, Ni, Rh, Pd, а также Cu; $x = 0,3-0,65$. Системы T^1-T^2 распадаются на три подгруппы. В некоторых из них, таких как Zr–Cu, стекло можно получить закалкой жидкости в широком интервале составов, обогащенных элементом T^1 , как, например, в сплавах Ti–Ni, аморфизирующихся при 30–40% (ат.) Ni. В третьей подгруппе, напротив, преимущество имеют составы, богатые T^2 -элементом; примером служит система Nb–Ni (табл. 2.71).

Исследования в области аморфных сплавов направлены на совершенствование технологии, повышение стабильности аморфной структуры металлических стекол с помощью самых совершенных методов: сверхвысокого давления, взрывных и электромагнитных способов уплотнения.

Аморфные металлические материалы удачно сочетают высокие прочность, твердость и износостойкость с хорошей пластичностью и коррозионной стойкостью. Большое практическое значение имеет также и возможность получения аморфных металлов в виде ленты, проволоки

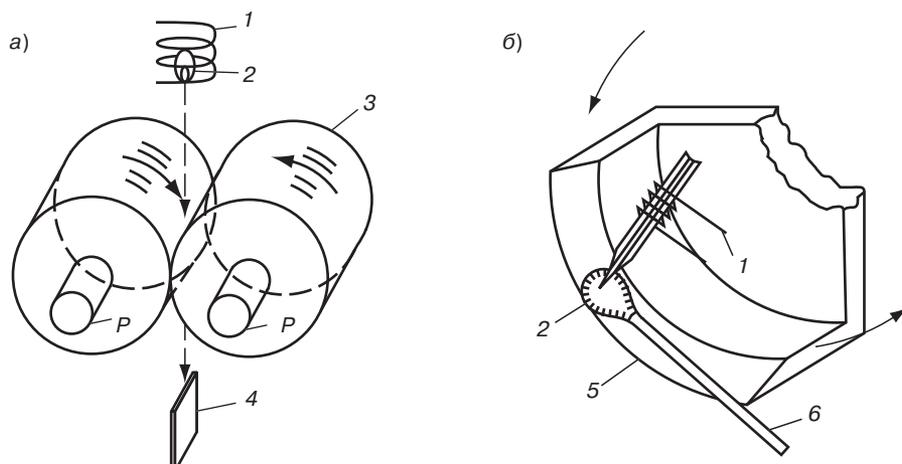


Рис. 2.60. Схемы установок для получения аморфных металлических лент методом закалки между валками (а) и методом спиннингования на центрифуге (б) [100, 101]: 1 — нагреватель; 2 — расплав; 3 — валки; 4 — закаленный образец; 5 — цилиндр; 6 — лента

Таблица 2.71. Системы сплавов, образующие металлические стекла (классификация основана на химической природе компонентов) [101]

| Группа* | Примеры систем | Состав, % (ат.) | Метод получения |
|---|--------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Основные системы: | | | |
| T ² (или благородный металл) + металлрид (X) | Pb-Si, Co-P, Fe-P-C, Ni-P-B | 15-20 | ЗЖ, ЭО |
| T ¹ металл + T ² металл (или Cu) | Zr-Cu | 30-65 Cu | ЗЖ, P |
| | Y-Cu, Ti-Ni | 30-40 T ² , Cu | ЗЖ |
| | Nb-Ni, Ta-Ni | 40-65 Ni | ЗЖ, P |
| Смешанные системы: | | | |
| A металл + B металл | Mg-Zn | 25-35 Zn | ЗЖ |
| T ¹ металл + A металл | (Ti-Zr)-Be | 20-60 Be | ЗЖ |
| Актинид + T ¹ металл | U-V, U-Cr | 20-40 T ¹ | ЗЖ |
| «Термически стабильная» аморфная система, которую нельзя получить закалкой из жидкости: | | | |
| T ² металл + p ³ металл | Co-Gd(-Mo) | Около 20 Gd | P |

Примечания: А металл – металл группы Li, Mg; T¹ металл – ранний переходный металл (группы Sc, Ti, V); T² металл – поздний переходный металл (группы Mn, Fe, Co, Ni); В металл – группы Cu, Zn, Al; металлрид – B, C, Si, P; ЭО – электроосаждение; ЗЖ – закалка из жидкости; P – плазменное распыление.

диаметром несколько микрометров непосредственно при литье, минуя такие дорогостоящие операции, какковка, прокатка, волочение, промежуточные отжиги, зачистки, травление.

Изучение аморфных твердых тел (в частности, металлов) вынудило физиков фактически пересмотреть традиционную схему построения теории твердого тела, «покоящуюся на двух слонах»: представлениях об идеальной кристаллической решетке и о дефектах, связанных с ее нарушениями. В аморфном состоянии нет ни того, ни другого. Поэтому центральной проблемой физики аморфных сплавов была и остается проблема наиболее точного описания их атомной структуры как основы для расчетов и прогнозирования практически всех физических свойств.

Физика металлов обнаружила, что теоретическая прочность металла на полтора-два порядка выше реальной. Оказалось, что низкая прочность металла объясняется дефектами кристаллической решетки (рис. 2.61). Количество дефектов в металле может быть соизмеримо с числом атомов, поэтому в расчетах используют плотность, или концентрацию дефектов в единице объема. Если эта величина близка к нулю, что соответствует идеальному кристаллу, то прочность такого кристалла близка к теоретической. С повышением концентрации дефектов прочность сначала стремительно снижается, а затем начинает снова возрастать, но значительно медленнее. Минимум обычно соответствует реальной прочности чистого металла. Примеси, легирующие добавки, деформация увеличивают концентрацию дефектов и повышают прочность материала (рис. 2.62).

Идеальный кристалл и аморфное тело – два крайних (предельных) состояния твердого вещества: для кристалла характерно термодинамическое равновесие, строгий порядок расположения атомов; аморфное тело, напротив, отличается предельной термодинамической нестабильностью и полным отсутствием порядка.

Реальные металлы состоят из множества по-разному ориентированных кристаллических зерен. Внутри каждого из них соблюдается ближний порядок расположения атомов в пределах десятков атомных диаметров и несколько размытый дальний порядок, действующий на

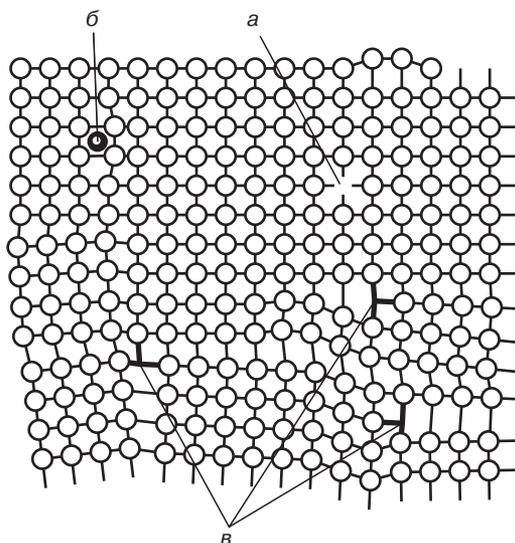


Рис. 2.61. Дефекты кристаллической решетки. Точечные дефекты: пропущенные атомы или вакансии (а), и атомы примеси (б). Линейные дефекты — краевые и винтовые дислокации (в) [102]

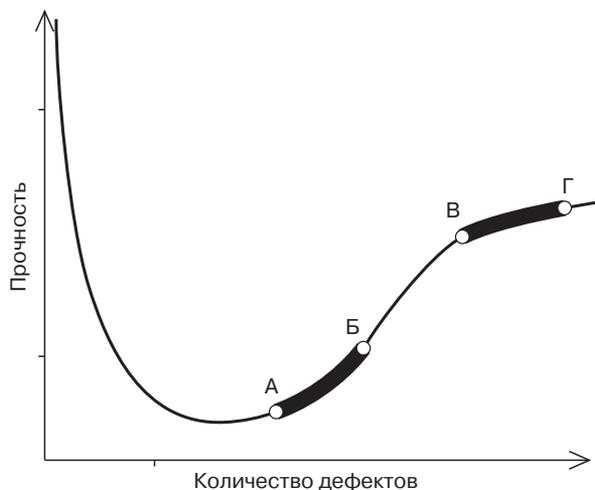


Рис. 2.62. Зависимость прочности металла от количества дефектов в кристаллах [102]. Прочность бездефектного металла составляет примерно четверть модуля сдвига. Для обычных конструкционных металлов с кристаллической структурой прочность в 100–1000 раз ниже (АБ), аморфные металлы с большим количеством дефектов несравненно прочнее (ВГ)

расстоянии сотен и тысяч атомных размеров, из-за накапливающихся дефектов в кристаллической решетке. Получить идеальный кристалл с дальним порядком на всем его протяжении крайне сложно, точно так же трудно создать идеальное аморфное тело с полным беспорядком. Обычно все-таки обнаруживается ближний, в несколько атомных размеров, порядок, зато дальнего нет вовсе. Иными словами, у реального металлического стекла строение промежуточное между идеально аморфным и субмикрорекристаллическим.

Свойства аморфного металла совсем другие по сравнению с кристаллическим металлом. Металл остается металлом, со всеми характерными для него свойствами — блеском, электропроводностью и т. д. Но он становится в несколько раз прочнее, повышается стойкость к коррозии, меняются электромагнитные характеристики и даже одна из самых устойчивых констант — модуль упругости.

Упругие свойства изотропного твердого тела характеризуются двумя независимыми константами. В качестве таковых может быть выбрана жесткость, связанная с изменением формы (модуль сдвига G) и изменением объема (объемный модуль упругости K). Это величины, имеющие простой физический смысл. Связь между этими модулями и двумя другими важными параметрами упругости — коэффициентом Пуассона и одноосной константой упругости E (модулем Юнга) — определяется хорошо известными выражениями: $\frac{3}{E} = \frac{1}{G} + \frac{1}{3K}$, $E = 2G \cdot (1 - \nu)$.

Модуль Юнга (или тесно связанный с ним модуль сдвига) металлического стекла значительно меньше модуля соответствующего твердого раствора или того же сплава после кристаллизации (табл. 2.72).

Переход от аморфного к кристаллическому состоянию оказывает значительно меньшее влияние на объемный модуль упругости K , чем на E или G .

Специфика механизмов пластической деформации в стеклообразных металлах приводит к тому, что их прочность приближается к теоретически допустимому пределу идеальных бездефектных кристаллов. Рекордная прочность, значительная пластичность, высокая износостойкость, малое затухание звуковых волн — таков неполный перечень достоинств аморфных сплавов в смысле их механического поведения.

Аморфный металл в среднем в 5–7 раз ($\sim E/50$) прочнее своего кристаллического аналога. Сплав $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ имеет уникальную $\sigma^+ = 3,7$ ГПа (табл. 2.72), в 10 раз прочнее железа, вдвое прочнее стекла (возможность вырубки, резки, штамповки).

Разрушению металлических стекол при растяжении предшествует сильно локализованная деформация сдвига. Процесс отличается от хрупкого разрушения, наблюдаемого в случае нематаллических стекол и высокопрочных кристаллических металлов, обычно сопровождающегося зарождением и распространением трещины. Предел текучести изменяется пропорционально модулю упругости. Некоторые сплавы ($\text{Ti}_{50}\text{V}_{40}\text{Zr}_{10}$) при $\sigma^+ = 2,4$ ГПа и $\rho = 4,1$ г/см³ имеют высокие значения σ^+/ρ .

Аморфные сплавы стойки к радиационным повреждениям, поскольку имеют неупорядоченную атомную структуру и используются в областях, где определенные характеристики, такие,

Таблица 2.72. Механические свойства аморфных сплавов [100, 101]

| Сплав | σ^+ , ГПа | E^+ , ГПа | Коэффициент Пуассона, ν |
|--|------------------|-------------|-----------------------------|
| $\text{Pd}_{77}\text{Cu}_6\text{Si}_{17}$ | 1,6 | 102,9 | 0,411 |
| $(\text{Pd}_8\text{Ni}_2)_{80}\text{P}_{20}$ | 1,6 | 93,5 | 0,410 |
| $(\text{Pd}_2\text{Ni}_8)_{80}\text{P}_{20}$ | 1,8 | 15,8 | 0,410 |
| $(\text{Pt}_8\text{Ni}_2)_{80}\text{P}_{20}$ | 1,9 | 96,1 | 0,421 |
| $\text{Cu}_{57}\text{Zr}_{43}$ | 2,0 | 76,0 | — |
| $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ | 3,1 | 124,0 | — |
| $\text{Fe}_{72}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$ | 3,85 | — | — |
| $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ | 3,7 | 169,0 | — |

например, как проводимость и механические свойства, должны оставаться неизменными под воздействием облучения, например, в корпусах атомных реакторов, где нужна не просто прочность, а сверхпрочность, причем сохраняемая в совершенно особых условиях. Материалы, из которых сделан реактор, подвергаются действию нейтронов, осколков деления ядер, электронов и так далее. Металл как бы разбухает, увеличивается его хрупкость. В металлических стеклах все наоборот. Если нагреть ленту до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, то примерно за год она перейдет в кристаллическое состояние, при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ структура стекла сохраняется 10 лет. Радиация разрушает образующиеся кристаллические участки, возвращая материал в стеклообразное состояние.

Особенно ценны коррозионные свойства аморфных металлов (ущерб от коррозии в США достигает 4,2% стоимости всей промышленной продукции). Химическая однородность, отсутствие межзеренных границ и линейных дефектов типа дислокаций указывают на возможность повышенной коррозионной стойкости, поскольку устраняются локальные разности электрохимического потенциала. У металлических стекол, содержащих Cr, очень низкие по сравнению с обычными нержавеющими сталями скорости коррозии. Особый интерес представляет тот факт, что эти аморфные сплавы стойки к питтинговой коррозии в серноокислых растворах, содержащих ионы хлорида.

Магнитные сплавы на основе переходных металлов (Fe, Co, Ni) легко намагничиваются во внешнем поле и легко меняют свое магнитное состояние при изменении поля. В сочетании с высоким электросопротивлением, которое в 3–4 раза выше, чем у аналогичных кристаллических сплавов, эти качества делают подобные аморфные сплавы отличными магнитомягкими материалами.

Термин «мягкие» означает, что намагниченность материала весьма чувствительна к изменению поля. Повышенная реакция намагниченности желательна при применении, например, в трансформаторах, индукторах. Для того чтобы намагниченность M значительно изменялась при наложении малого магнитного поля, требуется механизм легкого ее изменения. В частности, материал должен обладать малой магнитной анизотропией.

Магнитная анизотропия в металлических стеклах может быть результатом структурной анизотропии или магнитострикции. Исследования доменной картины закаленных образцов обнаружили ее сходство с расположением линий потока во время затвердевания. Ферромагнитные металлические стекла в закаленном состоянии имеют низкую относительную остаточную намагниченность ($-0,5$). Магнитные свойства и в постоянных, и в переменных полях могут быть оптимизированы с помощью соответствующих термообработок. Необходимым условием улучшения магнитных свойств (например, достижения высокой остаточной намагниченности и низкой коэрцитивной силы H_c) стекол на основе Fe, имеющих положительный магнитострикционный эффект, является снятие остаточных напряжений, образовавшихся при закалке.

Отсутствие анизотропии, присущее аморфной структуре приводит к очень высокой магнитной проницаемости и низким энергетическим потерям. Для практического использования нужно, чтобы материал оставался ферромагнитным при нагревании до температур, значительно превышающих комнатную. Обменная энергия, обеспечивающая упорядочение спинов, должна быть достаточно высокой.

Магнитомягкие свойства металлических стекол находятся на уровне пермаллоев лучших марок, причем эти свойства более стойки и стабильны.

Сама возможность ферромагнетизма в отсутствие кристаллической решетки долгое время казалась нереалистичной. Известно много сплавов, содержащих переходные или редкоземельные металлы, которые становятся магнитными ниже некоторой температуры (температуры Кюри). Основные физические характеристики магнетиков — атомный магнитный момент (μ_a) и температура Кюри (θ) — как правило несколько ниже, чем в кристаллических сплавах аналогичного состава. При этом, поскольку при нагревании стекло кристаллизуется, может наблюдаться любопытное явление: образец размагничивается дважды — один раз в аморфном состоянии, затем, став снова магнитным после кристаллизации, в «кристаллической» точке

Кюри. Важны не только величины μ_s и θ , но и характеристики процесса намагничивания образца во внешнем поле.

У ферромагнитных сплавов особая структура — доменная.

Внутри огромных в сравнении с размерами атомов областей — доменов — все атомы выстроены параллельно своими магнитными моментами. Домен — это область, намагниченная до насыщения. Когда на ферромагнетик накладывается внешнее магнитное поле, домены, «смотрящие» в нужном направлении, раздвигают свои границы, смещая те, что ориентированы к полю под другими углами. На это смещение и расширение уходит вполне ощутимая энергия, называемая потерями на перемагничивание.

В металлических стеклах тоже есть домены, мозаичные. Атомы доменов не «впаяны» намертво в решетку. Поэтому смещать, раздвигать свои границы, поворачиваться им легче. И потери на перемагничивание падают в три-четыре раза в сравнении с традиционными магнитными материалами.

Специфика аморфной структуры, по сравнению с кристаллической, в ее однородности: нет правильной решетки, но нет и дефектов, резко нарушающих атомный порядок. Эта однородность является важным обстоятельством, с точки зрения процессов намагничивания, поскольку движение границ магнитных доменов (участков магнетика, намагниченных в одном направлении) в значительной мере определяется их взаимодействием с неоднородностями структуры. Хотя напряжения, флуктуации состава и плотности, упорядоченное расположение атомных пар приводят к существенной неоднородности магнитных свойств и формированию специфической доменной структуры, похожей на лабиринт, тем не менее параметры намагничивания остаются весьма высокими, по крайней мере по сравнению с электротехническими сталями массового производства.

Аморфные металлы — материалы с огромными значениями магнитной проницаемости и способности к намагничиванию. В сплавах типа железо–неодим–бор магнитное поле настолько мощное, что если их использовать в электродвигателях, то отпадает необходимость в обмотке статора.

Удельное электрическое сопротивление аморфных металлических материалов в 2–3 раза выше, чем у аналогичных сплавов с кристаллической структурой. В условиях предельно высокого электросопротивления начинают проявляться эффекты, характерные не столько для металлов, сколько для диэлектриков.

Электросопротивление обычных кристаллических металлов определяется в основном рассеянием электронов проводимости из-за смещения ионов из своих равновесных положений в результате тепловых колебаний. Амплитуда этих смещений монотонно растет с повышением температуры, но даже вблизи точки плавления она не превышает обычно 10% межатомного расстояния. Соответственно удельное электросопротивление растет пропорционально температуре и в интервале от комнатной температуры до температуры плавления увеличивается в несколько раз, достигая значений в несколько десятков микроом на сантиметр. Лишь некоторые высокорезистивные сплавы имеют сопротивление около 100 мкОм·см. Электросопротивление многих аморфных сплавов ведет себя совершенно иначе. При температурах существенно ниже комнатной оно имеет значения 150–200 мкОм·см и более. С ростом температуры оно зачастую не только не растет, но даже довольно заметно падает (рис. 2.63). После кристаллизации аморфного сплава сопротивление возвращается к поведению, характерному для кристаллического состояния.

Сопоставление величины удельного электросопротивления и его температурной зависимости для многочисленных сплавов (аморфных и кристаллических) позволило вывести некоторую закономерность, именуемую соотношением Муджжи: чем выше сопротивление, тем меньше скорость его возрастания с температурой. При этом если сопротивление становится выше 150 мкОм·см, то с повышением температуры оно падает. Соотношение Муджжи означает, что с ростом температуры все металлы стремятся к предельному значению электросопротивления порядка 150–200 мкОм·см. Это соотношение универсально — оно соблюдается для

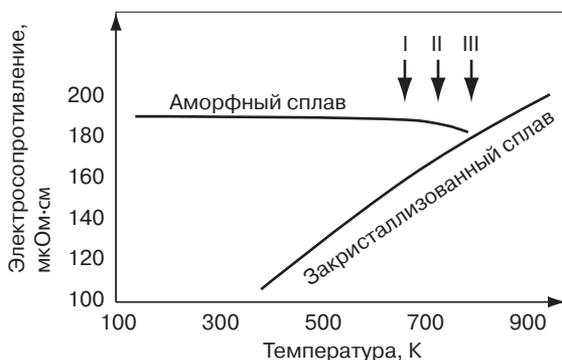


Рис. 2.63. Температурная зависимость электросопротивления аморфного сплава $\text{Fe}_{32}\text{Ni}_{36}\text{Cr}_{14}\text{P}_{12}\text{B}_6$. В аморфном состоянии сопротивление велико и почти постоянно вплоть до начала кристаллизации, которая протекает в три стадии (I, II, III). В закристаллизованном сплаве электросопротивление быстро падает с уменьшением температуры [102]

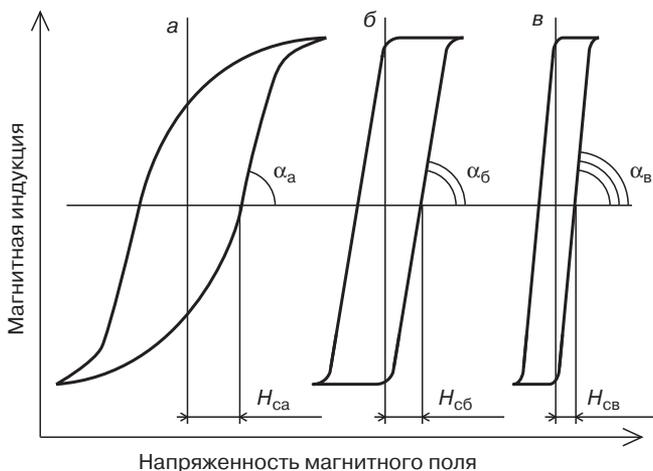


Рис. 2.64. Петля гистерезиса для обычной стали (а), электротехнической стали (б) и аморфного ферромагнитного сплава (в) (площадь внутри петли определяет потери на перемагничивание) [102]

металлов самых различных типов (щелочных, благородных, переходных и др.), поэтому его происхождение не связано с особенностями электронного строения, но обусловлено, вероятно, или атомным беспорядком, или спецификой взаимодействия электронов с колебаниями решетки.

Аморфные магнитомягкие материалы характеризуются прямоугольной петлей гистерезиса (рис. 2.64), высокой магнитной проницаемостью и очень малой коэрцитивной силой. При этом магнитные свойства материала малочувствительны к механическим воздействиям на него. Получены аморфные материалы и с высокой магнитной энергией [100].

Исходная магнитная структура аморфных металлических сплавов формируется при заливке расплава и последующем охлаждении ниже θ . Магнитная структура быстрозакаленных сплавов является неравновесной и анизотропной. Направления легкого намагничивания определяются преимущественной ориентацией доменных стенок (из-за химической неоднородности ближнего порядка) и направлением остаточных растягивающих напряжений

(магнитоупругая анизотропия из-за геометрической неоднородности ближнего порядка). Магнитоупругая анизотропия пропорциональна $\sigma \cdot \lambda_s$ (где σ — напряжение); она пренебрежимо мала у сплавов $\lambda_s \approx 0$. Для получения устойчивого комплекса свойств (табл. 2.73) ленты АМС отжигают ниже t_k с наложением магнитного поля и без него. Отжиг без наложения магнитного поля при нагреве выше θ с регулируемым охлаждением устраняет последствия структурной релаксации: уменьшается H_c повышается μ'_H , устраняется магнитоупругая анизотропия несмотря на увеличение λ_s , так как снимаются остаточные напряжения. Отжиг в продольном магнитном поле создает продольную ориентацию доменов ($B_r/B_s > 0,9$), значительно возрастает μ'_{\max} и уменьшаются потери при повышенных частотах. Отжиг в поперечном магнитном поле обеспечивает поперечную ориентацию доменов ($B_r/B_s < 0,1$) и снижает потери при повышенных частотах; полученная ориентация доменов обеспечивает линейное увеличение μ'_H при возрастании напряженности поля от 0 до 1 кА/м.

Некоторые АМС используют в закаленном состоянии, так как комплекс магнитных свойств у них достаточно высок. Например, кобальтовый сплав 71КНСР имеет $\mu'_H = 10^4$ и $\mu'_{\max} = 15 \cdot 10^4$.

АМС систем «металл–неметалл» после отжига становятся хрупкими, поэтому для них все технологические операции (вырубка, наливка и т. п.) выполняют до отжига.

АМС на основе железа имеют ($B_s = 1,5–1,6$ Тл) и малые потери на перемагничивание при обычных и повышенных частотах (до 10^4 Гц). У этих АМС потери на порядок ниже, чем у кремнистых электротехнических сталей. Железные АМС используют в качестве материала сердечников высокочастотных трансформаторов, дросселей, магнитных усилителей; их применяют в магнитомеханических системах благодаря значительной магнитострикции и высокой чувствительности магнитных свойств к приложенным нагрузкам, а также в механических фильтрах, линиях задержки, датчиках, магнитострикционных вибраторах.

В железоникелевых АМС введение никеля понижает B_s . Так, в сплавах с оптимальным соотношением железа и никеля ($Fe/Ni = 1$) $B_s = 0,7–1$ Тл. Коэрцитивная сила этих сплавов на порядок меньше, чем железных АМС ($H_c < 0,5$ А/м). Магнитострикция железоникелевых АМС примерно в 3 раза меньше, чем железных. Особенностью этих сплавов являются весьма низкие потери на перемагничивание и высокие значения μ'_H или μ'_{\max} , достигаемые специальной обработкой. Железоникелевые АМС применяют в качестве материала сердечников малогабаритных трансформаторов, магнитных фильтров, магнитных экранов. АМС на основе кобальта имеют $B_s = 0,5–0,6$ Тл, близкую к нулю магнитострикцию и малую коэрцитивную

Таблица 2.73. Магнитные свойства аморфных сплавов [100]

| Марка сплава | B_s , Тл | B_r/B_s | H_c , А/м | $\mu'_H \cdot 10^{-3}$ | $\mu'_{\max} \cdot 10^{-3}$ |
|----------------------|------------|------------|-------------|------------------------|-----------------------------|
| Железные: | | | | | |
| 2НСР ¹ | 1,5 | $\leq 0,1$ | 3–5 | — | — |
| 10НСР ¹ | 1,35 | $\leq 0,1$ | 3–5 | — | — |
| 9КСР ² | 1,56 | $\geq 0,9$ | 3–5 | — | — |
| Железоникелевые | | | | | |
| АМАГ225 ³ | 1,2 | — | 0,45 | 2,2 | 500 |
| АМАГ245 ³ | 0,85 | — | 0,18 | 10 | 500 |
| Кобальтовые | | | | | |
| 84КСР ³ | 0,7 | $> 0,4^4$ | 0,5 | 10 | > 1000 |
| 84КХСР ³ | 0,58 | $> 0,4$ | 0,8 | 20 | 500 |

Примечание: ¹После отжига в поперечном магнитном поле. ²После отжига в продольном магнитном поле. ³После отжига без наложения магнитного поля. ⁴ $B_r/B_s = 0,05$ после отжига в поперечном магнитном поле.

силу (не более 0,5 А/м). По поведению в магнитных полях небольшой напряженности эти АМС во многом сходны с пермаллоями ($\mu'_n \approx 10^5$, $\mu'_{\max} > 8 \cdot 10^5$). Свойства сплавов улучшают легированием небольшим (до 5% ат.) количеством Fe, Mn, Cr, V, Nb, Mo. Железо или марганец повышают B_s , но одновременно снижают λ_s ниже 10^{-6} . Прочие элементы, практически не изменяя λ_s , понижают t_k .

Аморфные металлические сплавы эффективны для экранирования магнитных полей. Так, сплав 71КНСР-А (Co; 5,5–6,2% Fe; 12–12,8% Ni; 3,6–4,1% В; 6,4–7% Si; 0,1% Mn) имеет ρ 7,55 г/см³, $\mu'_n - 5000$, $H_c - 1,2 \cdot 10^{-3}$ Эрс, индукция в поле 10 Эрс — $0,5 \cdot 10^3$ Гс.

Коэффициент экранирования сплава (лента) 79НМ (50НМ) зависит от напряженности H внешнего магнитного поля в интервале H 4–20 Э, K_3 30–35; от частоты: при $f = 4, 8, 12, 20$ кГц, K_3 соответственно 125, 140, 135, 120. Свойства оксидных композиций с ленточными наполнителями (60 %масс. сплава 71КНСР-А): начальная магнитная проницаемость μ_n 3800 Гс/Э, максимальная магнитная проницаемость 94 500 Гс/Э, магнитная индукция в поле 0,1 Э (B^{01}) — 3570 Гс, в поле 8Э (B^8) — 5840 Гс (B^{01} и B^8 — показатели, характеризующие узость петли гистерезиса, намагничивания). Коэрцитивность $H_c^{01} - 0,019$ Э, $H_c^8 - 0,021$ Э.

Сочетание высокого электросопротивления и ферромагнитных свойств создает основу для многочисленных применений аморфных сплавов в технике. Они обладают высокой магнитной проницаемостью, высокой индукцией насыщения, значительным удельным электросопротивлением. Это чрезвычайно важно для снижения потерь на гистерезис и вихревые токи, для повышения КПД.

Из-за более низкой, чем у сталей, электропроводности для металлических стекол частично или полностью отпадает необходимость в изоляции пластин в пакетах сердечников (уменьшение габаритов и повышение КПД электрических машин).

В электротехнике из них делают сердечники трансформаторов, генераторов, электромоторов. Аморфные сплавы являются единственными материалами, позволяющими повысить КПД трансформаторов выше 99%.

Сочетание электрических и магнитных свойств допускает высокоэффективное использование металлических стекол в магнитных усилителях, фильтрах и других устройствах. Из аморфной ленты (фольга и ткань) производятся магнитные экраны для защиты элементов электронных приборов, причем ее механические свойства (в отличие от всех других магнитных материалов) позволяют этим экранам одновременно выполнять функции пружин, что уже нашло свое применение при конструировании сердечников магнитных головок магнитофонов, которые кроме превосходных магнитных характеристик обладают также повышенным сроком службы — из-за прочности и стойкости к истиранию.

На основе стеклообразных металлических сплавов созданы прочные и дешевые высокотемпературные припои. При специальной обработке из аморфных магнетиков можно сделать очень эффективные (КПД больше 90%) преобразователи магнитной энергии в механическую и наоборот, устройства на цилиндрических магнитных доменах (из аморфных металлических пленок).

По показателям магнитных свойств аморфные металлические сплавы Fe–Ni–Co близки к магнито-мягким ферритам и могут рассматриваться как компоненты магнитодиэлектриков.

Практическое значение магнитных материалов постоянно возрастает, разрабатываются и находят все большее применение новые виды магнитомягких материалов [102]. Спектр материалов с магнитомягкими свойствами достаточно широк; он включает как массивные, так и перспективные тонкопленочные материалы. В конце 1970-х годов нашли применение пермаллоевые пленки с $B_s = 1,0$ Тл и $\mu \approx 2 \cdot 10^3$ (5 МГц), позднее в магнитных головках стали использоваться сендастовые пленки с $B_s = 1,1$ Тл и $\mu \approx 1,5 \cdot 10^3$ (5 МГц). В 1970-е и начале 80-х гг. активно исследовались аморфные материалы с $B_s > 1,0$ Тл и сравнительно низкой коэрцитивностью ($H_c < 20$ А/м). Аморфный сплав $(\text{FeCo})_{75}(\text{Si}_{0,2}\text{B}_{0,8})_{25}$ для магнитных головок звукозаписи по сравнению с сендастом и пермаллоем позволил повысить не только уровень сигнала воспроизведения, но и решить проблему износостойкости. В середине 1980-х гг. по-

лучены однослойные пленки FeN и многослойные FeSi/NiFe с магнитной индукцией, равной 2,4 и 1,9 Тл, и сравнительно небольшой коэрцитивной силой ($H_c < 80$ А/м).

Магнитомягкие материалы новых типов можно разбить на три группы: кобальтсодержащие аморфные тонкопленочные материалы, железосодержащие нанокристаллические и железосодержащие многослойные пленки. Для получения близкой к нулю магнитострикции в кобальтсодержащие аморфные сплавы добавляют до 10–30% ат. аморфизирующих веществ, таких как Si, B, C, P, Zr, Nb и Ta, в результате чего магнитная индукция насыщения данных аморфных сплавов становится значительно меньше B_s чистого кобальта.

С 1990-х гг. интенсивно исследуются технологические условия получения и свойства нанокристаллических материалов — магнитомягких ферромагнетиков с практически нулевой магнитострикцией и минимальными значениями магнитокристаллической анизотропии. Нанокристаллические ферромагнетики сочетают в себе лучшие свойства аморфных магнитных сплавов на основе железа типа Fe–Si–B, а именно высокую магнитную индукцию насыщения с преимуществами Co-содержащих сплавов типа Co–Fe–Si–B, характеризующихся нулевой магнитострикцией, низкой коэрцитивностью и высокой магнитной проницаемостью, их магнитные характеристики остаются неизменными при более высоких температурах измерения по сравнению с аморфными сплавами.

Под нанокристаллическими материалами (НМ) принято понимать такие материалы, у которых размер отдельных фаз, составляющих их структурную основу, не превышает 100 нм хотя бы в одном измерении. Этот предел достаточно условен и обусловлен характерным размером L для того или иного физического явления (размер петли Франка–Рида для скольжения дислокаций; значение свободного пробега электрона для электрокинетических свойств; размер доменов для магнитных характеристик и т. д.). В наноструктурных системах изменяются механические, сегнетоэлектрические, ферромагнитные, оптические, адсорбционные, химические свойства, процессы передачи энергии (см. раздел 1.4) [156, 158].

В ряду НМ можно выделить класс магнитных материалов со смешанной аморфно-кристаллической структурой, полученных путем контролируемой кристаллизации аморфного сплава в условиях, когда скорость зародышеобразования превалирует над скоростью роста кристаллитов в аморфной матрице и получивших название «нанокристаллические ферромагнетики» (НФ). Наиболее ценный для практического использования и наиболее исследованный магнитомягкий материал, известный под торговым названием «*Finemet*», получен японской фирмой *Hitachi Metals Ltd.* в конце 1980-х гг. путем частичной кристаллизации аморфной ленты сплава FeCuNbSiB. Важнейшей особенностью НФ является нанокристаллический характер структуры с экстремально малыми размерами кристаллитов (10–50 нм), а также уникальные магнитомягкие свойства. К НФ можно отнести в равной степени как сплавы на основе Fe (высокая магнитная индукция), так и сплавы на основе кобальта (нулевая магнитострикция, высокая магнитная проницаемость). В свою очередь НФ на основе Fe можно разделить на две группы:

- 1) сплавы типа *Finemet* — Fe–Si–B–(Cu, Nb);
- 2) сплавы типа *NanoPerm* — Fe–B–M (M=Zr, Hf, Nb) с небольшим (1 %ат.) добавлением меди.

НФ первой группы характеризуются высокой магнитной мягкостью, что выражено в низких значениях коэрцитивной силы H_c и высоких значениях магнитной проницаемости μ благодаря высокому содержанию Fe (85–92 %ат.); НФ второй группы более высокими значениями индукции насыщения по сравнению со сплавами первой группы, что, однако, является их единственным преимуществом (табл. 2.74, рис. 2.65).

Для НМ, как и для аморфных материалов, существует температурный и временной интервал, в котором размер зерна и физические характеристики материала изменяются незначительно. Так, размер зерна НФ типа *Finemet* практически не изменяется при увеличении температуры отжига от 400 до 600 °С; при увеличении продолжительности отжига ($T_1 = 600$ °С) от 5 ч до 1 сут, и лишь отжиг в течение 3 сут вызывает резкий рост зерен (до 90 нм). Еще бо-

Таблица 2.74. Значения магнитных характеристик магнитомягких материалов [100, 102]

| Сплав | Структура | B_s , Тл | μ_r , кГц | H_c , А/м |
|---------------------------------|---------------------|------------|---------------|-------------|
| $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ | Нанокристаллическая | 1,24 | 100 000 | 0,53 |
| $Fe_{87}Cu_1Zr_7B_5$ | Нанокристаллическая | 1,55 | 20 000 | 3,3 |
| Fe-Si-B | Аморфная | 1,41 | 6000 | 6,9 |
| Co-Fe-Si-B | Аморфная | 0,53 | 80 000 | 0,32 |
| Fe-6,5% вес.Si | Кристаллическая | 1,80 | 2400 | 9,6 |

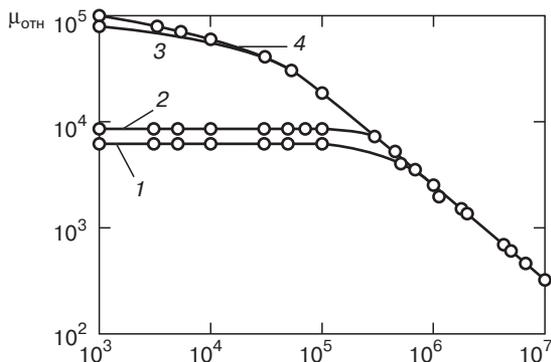


Рис. 2.65. Частотная зависимость проницаемости различных магнитомягких материалов [102]: 1 — аморфный сплав на основе Fe; 2 — NiZn-феррит; 3 — аморфный сплав на основе Co; 4 — *Finemet*

лее термостабильна наноструктура в сплавах NiMoB; только отжиг при 710 °С в течение 5 ч вызывает аналогичный рост размера зерна. Высокая термическая стабильность НФ, а также меньшая их дезаккомодация по сравнению с исходными аморфными сплавами позволяют расширить температурный и временной рабочие интервалы их использования.

Создание эффективного технологического процесса, обеспечивающего получение материалов с нанокристаллической структурой в промышленных масштабах, позволяет в полной мере использовать уникальные магнитные свойства НФ в микроэлектронике, вычислительной технике, в качестве компонентов радиопоглощающих материалов.

Большой ассортимент диэлектрических и магнитных материалов, возможности оптимизации показателей их диэлектрических (ϵ , $\text{tg } \delta_\epsilon$) и магнитных (μ , $\text{tg } \delta_\mu$) свойств позволяет эффективно использовать их в экранирующих и поглощающих ЭМИ материалах, покрытиях и конструкциях.

2.3. Радиоэкранирующие материалы, покрытия и конструкции

Материалы, покрытия и конструкции, экранирующие ЭМИ, обеспечивают экранирование объектов, в основном, за счет отражения ЭМИ, когда ЭМИ лишь частично проходит в материал экрана (*ecran*, фран. — ширма) и проникает в экранируемое пространство. Если от металлических экранов ЭМИ отражается почти полностью, то от экранов из токопроводящих полимерных материалов только около 80% энергии ЭМИ отражается, а 20% — поглощается. В типичных экранирующих материалах и покрытиях при прохождении ЭМИ имеют место не только процессы отражения, но и процессы преломления, дифракции, интерференции, дисперсии и др. обеспечивающие поглощение и преобразование ЭМИ. Использование этих

процессов лежит в основе материалов, покрытий и конструкций поглощающих ЭМИ (радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции, материалы обеспечивающие уменьшение радиолокационной заметности, УРЗ, технология *Stealth*, раздел 2.4).

Защита от ЭМИ актуальна в связи с широким использованием электронных устройств, производящих ЭМЭ высокой частоты, мощность которых постоянно увеличивается (радиотехника, электроника, связь, производство полимерных материалов и изделий из них, сварка, конструкции РЛС, ЭХО камеры, бытовые приборы и т. д.). Специфические свойства электромагнитной энергии высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов длин волн, особенно на участках сантиметровых и дециметровых волн, ставят эти диапазоны в особое положение в отношении их биологической активности. Использование ВЧ и СВЧ неизбежно сопровождается побочными излучениями, оказывающими отрицательное влияние на персонал и выражающиеся в нарушениях функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем, перегреве организма, ухудшении зрения [4, 24].

Чаще всего такие излучения проникают через щели, неплотности, смотровые окна, люки, монтажные проемы, двери и другие разъемные соединения. При этом суммарная эффективность экранировки источника электромагнитной энергии или рабочего места оператора во многом определяется наличием и уровнем побочных излучений [23, 24, 27, 28, 106].

Быстрое развитие и распространение электрических устройств вызывает все возрастающее влияние электромагнитных излучений на окружающую среду. Так, в промышленном городе со 100 тыс. жителей, использующих около 500 тыс. электроприборов, имеет место электромагнитное загрязнение из-за высокочастотного электрического излучения.

Высокочастотные электромагнитные излучения могут мешать качественным радио- и телепередачам, другим устройствам и оборудованию, например, в области измерительной техники, техники автоматического регулирования, обработки данных и т. д. Допустимой нормой микроизлучения для человека является 1 мВт/см^2 , в то время как плотность микроизлучений может достигать до 10 Вт/см^2 .

В ноябре 1979 г. Федеральная комиссия связи США (*Federal Communications Commission, FCC*) опубликованы (документ 20780) технические нормы, рекомендуемые для допустимых излучений различных электронных устройств, работающих при частотах более 10 000 Гц (компьютеры, калькуляторы, системы обработки данных, цифровые часы, электронные игры, кассовые аппараты и др.).

Эти устройства подразделяются на две категории: 1) класс *A* — устройства промышленного использования; 2) класс *B* — устройства бытового использования (требования по защите более жесткие, рис. 2.66).

Нормы *VDE* промышленного стандарта при использовании устройств радиодиапазона (инструкции Почты Германии (*der Deutschen Bundespost*)) зафиксированы Союзом немецких электротехников (рис. 2.66).

Эффективность экранирования (*shielding effectiveness, SE*) определяют измерением напряженностей электрического (E), магнитного (H) поля, интенсивностью излучения (сопротивления поверхности экрана, P) на определенном расстоянии до и после экрана. При частотах около 30 МГц (УКВ и микродиапазон ЭМВ) проводят измерение интенсивности излучения, при частотах ниже 30 МГц — измерение напряженности.

Эффект экранирования характеризуют в децибелах ($\text{дБ} = 0,1 \text{ Б}$, Б — десятичный логарифм отношения двух одноименных физических величин):

$$SE = 20 \log E_b/E_a, \text{ В/м};$$

$$SE = 20 \log H_b/H_a, \text{ А/м};$$

$$SE = 10 \log P_b/P_a, \text{ В/м}^2.$$

Индексы « a » — для измерений характеристик ЭМ — поля до экрана, « b » — за экраном. Оценка эффективности экранирования ЭММ приведена в табл. 2. 75.

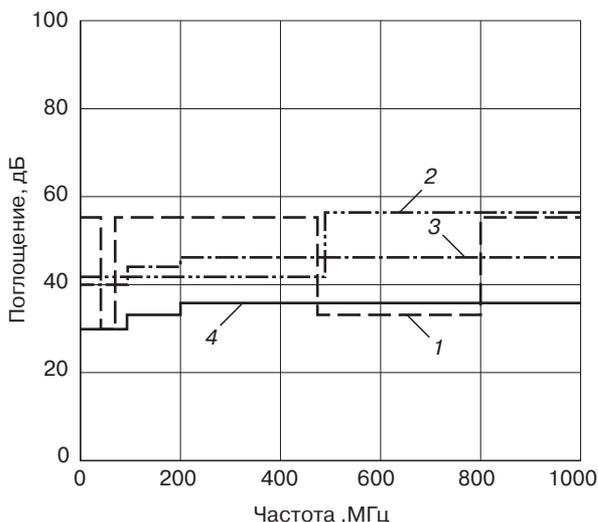


Рис. 2. 66. Сравнительные характеристики величин поглощения электромагнитного излучения по нормам FCC и VDE [27]:

1 — VDE, класс A; 2 — VDE, класс B; 3 — FCC, класс A; 4 — FCC, класс B

Таблица 2.75. Эффективность экранирования ЭМИ [28]

| Уровень экранирования, дБ | Отражение и поглощение ЭМИ, % | Оценка экранирования по характеристикам электрического поля | Эффект экранирования |
|---------------------------|-------------------------------|---|--|
| 10 | 90 | 0,33 | Очень малый |
| 20 | 99 | 0,10 | От малого до среднего |
| 30 | 99,9 | 0,033 | |
| 40 | 99,99 | 0,01 | От среднего до хорошего |
| 50 | 99,999 | 0,0033 | |
| 60 | 99,9999 | 0,001 | |
| 70 | 99,99999 | 0,00033 | Очень хороший |
| 80 | 99,999999 | 0,0001 | |
| 90 | 99,9999999 | 0,000033 | |
| >90 | | | Предельный для специального применения |

Уровни экранирования (10–100 дБ) в соответствии с нормами FCC чаще всего приводятся для ЭМИ с частотами 1–100 ГГц, а верхней границей является частота 3000 ГГц (охватывает дальний ИК-диапазон). Эффективность экранирования зависит от частоты ЭМВ и методов измерения характеристик ЭМИ до и после экрана.

Для определения способности экранов отражать и поглощать ЭМИ используют источник электромагнитных волн и два способа экранирования: 1) измеряют характеристики ЭМ-поля перед и за экраном («закрытое пространство», *abgeschirmter Raum*); 2) измеряют характеристики ЭМ-поля вокруг и внутри определенного экранированного объекта (закрытый объем,

abgeschirmte Box). Антенна (размещается в металлическом корпусе) источника излучает сигнал, фиксируемый приемником (рис. 2.67) при открытом и закрытом экраном из поглощающего материала корпуса. Результаты измерений этим методом недостаточно надежны, так как метод не учитывает интерференцию, резонансные явления, собственный импеданс, качество контакта исследуемого экрана и корпуса закрытого объема.

Более стабильны результаты измерений с использованием методов трансмиссионных линий и коаксиальных трансмиссионных линий (*coaxial transmission line, CTL* [31]), в которых источник ЭМВ подает сигнал особой формы (сигары, торпеды), показатели поглощения более стабильны и существенно ниже тех, которые определены другими методами и практически не зависят от частоты ЭМВ (рис. 2.68).

Для оценки экранирующих ЭМЭ материалов на предмет пригодности их использования в этом качестве используют и показатели их электрических свойств. Так, материалы с поверхностным сопротивлением от $0,15 \text{ Ом/см}^2$ перспективны в качестве экранирующих, так же как и материалы со значениями ρ_v $0,1-10 \text{ Ом-см}$, особенно при ρ_v менее $0,01 \text{ Ом-см}$. Значения ρ_v различных материалов приведены на рис. 2.69.

Для расчета эффективности экранирования ЭМИ L полимерными материалами используют электрофизические параметры экранирующих материалов и геометрические параметры покрытий:

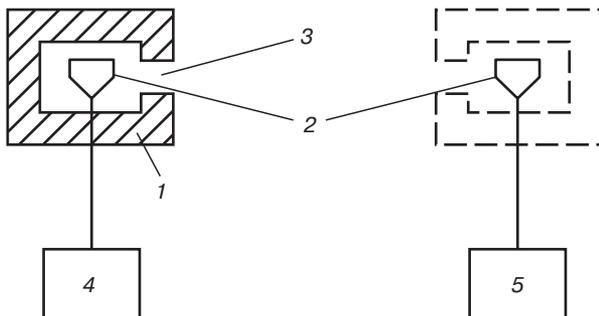


Рис. 2.67. Измерение поглощающей способности экранирующих материалов методом «закрытого объема» [27]: 1 — закрытый объем; 2 — антенна (приемник ЭМВ); 3 — образец исследуемого экранирующего материала; 4 — источник ЭМВ; 5 — приемник ЭМВ

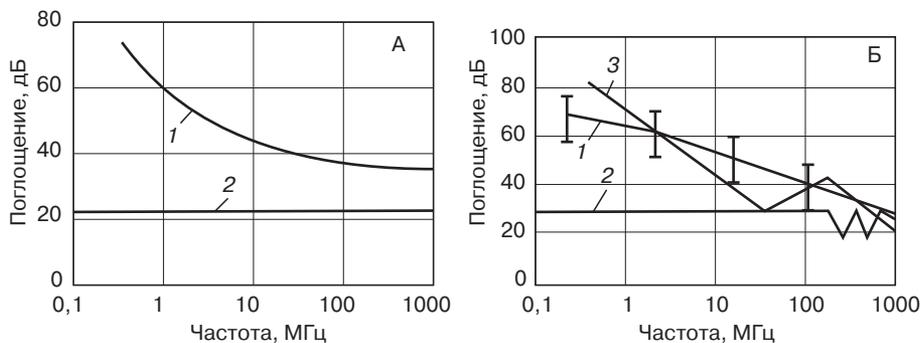


Рис. 2.68. Показатели эффективности экранирования, определенные различными методами [31].

Экраны: А — полимерная пластина с покрытием из золота (толщина 10 нм); Б — полиэфирная композиция с 20 %масс. Al-хлопьев.

Методы определения: 1 — закрытое пространство; 2 — метод CTL; 3 — закрытый объем

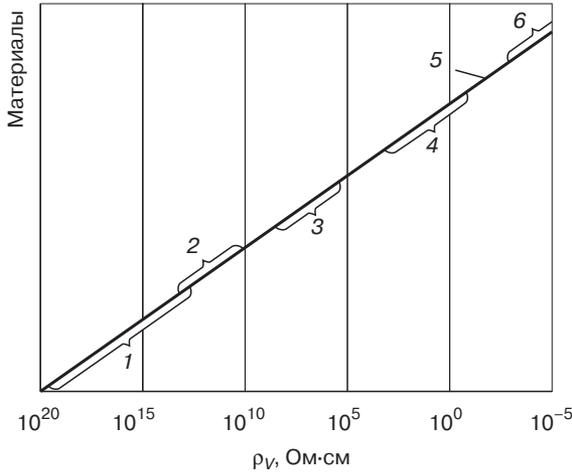


Рис. 2.69. Значения ρ_V различных веществ [27]:
 1 — полимеры (электроизоляционные); 2 — стекла; 3 — антистатические материалы; 4 — металлизированные полимеры; 5 — графит; 6 — металлы

Для электропроводящих полимерных материалов ЭПМ эффективность экранирования

$$L = 17,372 \cdot \pi \cdot f \cdot b \sqrt{\epsilon' \mu_0 \left[-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{(\epsilon')^2 \cdot 4\pi^2 \cdot f^2}} \right]} + 10 \lg \left[1 - \frac{\frac{1}{e^{2ab} + e^{-2ab} - 2 \cos 2\beta c}}{\frac{1}{P_{\text{отп}}} \cdot e^{2ab} + P_{\text{отп}} \cdot e^{-2ab} - 2 \cos 2\beta c} \right], \text{ ДВ}$$

где b — толщина материала; α — коэффициент затухания ЭМИ в материале,

$$P_{\text{отп}}(R) = \left(\frac{z_2 - 377}{z_2 + 377} \right)^2, \quad Z_2 - \text{функция } f, \epsilon, \mu, \gamma, \rho_V \text{ (см. раздел 2.1.4).}$$

Для электропроводящих ЭПМ, за исключением ферромагнетиков (магнитодиэлектриков), магнитная поляризация мала, при расчетах μ и μ' заменяют магнитной проницаемостью вакуума μ_0 .

Для экранирования ЭМИ с использованием процессов отражения и поглощения ЭМЭ используют: 1) полимерные материалы (термо- и реактопласты, эластомеры) с электропроводящими и магнитными компонентами; 2) полимерные электропроводящие покрытия; 3) экранирующие ЭМИ конструкции с использованием отражающих и поглощающих ЭМИ полимерных материалов и покрытий.

Выбор конкретного метода экранирования определяется надежностью, экономическими показателями, формой изделия и конструкции, которым придается способность экранирования ЭМИ, что определяет многообразие типов материалов, покрытий и экранирующих конструкций [23, 106].

Наиболее полно отвечают современным требованиям по экранированию ЭМИ электропроводящие полимерные материалы (пластики, резины), поскольку они обладают высокой эластичностью, стойкостью к многократным деформациям, влаго- и газонепроницаемостью, малым удельным весом, технологическими свойствами, позволяющими изготавливать экраны различной конфигурации.

Традиционные электропроводящие полимерные материалы (ЭПМ) представляют собой композиции на основе различных полимеров (термо- и реактопласты, резины) и электропроводящих наполнителей (сажа, графит, углеродные, металлические, металлизированные волокна, металлическая пудра) и применяются в антистатических изделиях, электромагнитных защитных покрытиях, высокоомных резисторах, электрических неметаллических нагревателях, в токопроводящих лаках и клеях. Основной электрической характеристикой ЭПМ является электропроводность, $\gamma = 1/\rho_v$ [94, 95], так как $L = f(\alpha, R)$, $R = f(Z_2)$, $Z_2 = f(\gamma)$, что является определяющим при разработке конкретных рецептур композиций для изготовления экранов. Электропроводными полимерными материалами считаются такие, у которых проводимость γ превышает $10^{-5} \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.

Так как $\gamma = 1/\rho_v$, возможность использования полимеров и полимерных материалов в качестве ЭПМ зависят и от величины удельного объемного сопротивления ρ_v (см. раздел 1.3.1.1).

ЭПМ с $\rho_v = 10^3 - 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ используют главным образом для изготовления нагревательных элементов к различным приборам, эластичных электродов и датчиков, применяемых в медицине, гибких электрических экранов; точных копий металлических изделий сложного профиля гальванопластическим методом.

ЭПМ с $\rho_v = 10^6 - 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ применяют для изготовления изделий, на которых не должно накапливаться статическое электричество, например, резиновых деталей к медицинским приборам, транспортерных лент и воздухопроводов для угольных шахт, оболочек аэростатов и шин бензовозов, покрытий печатных пластин и валов в полиграфической промышленности, обуви и защитной одежды для работающих в условиях электрических полей высокой напряженности.

ЭПМ с $\rho_v = 1 - 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ применяют для изготовления печатных электрических схем, волноводов; фотопреобразователей солнечной энергии.

Расширение областей применения ЭПМ предъявляет определенные требования к ним: уменьшение ρ_v , расширение температурного интервала эксплуатации и увеличение прочности. Уменьшение ρ_v может быть достигнуто принудительным формированием из частичек наполнителя цепочечных структур. Так, если в расплаве термопласта или в неотвержденном термореактивном связующем диспергировать ферромагнитный наполнитель, то при наложении магнитного поля частички наполнителя будут ориентироваться вдоль силовых линий поля, образуя токопроводящие пути.

Существенное уменьшение сопротивления ρ_v наблюдается при снижении контактного сопротивления между частицами наполнителя, например, при покрытии порошка никеля тонким слоем серебра. Исследование эффекта Холла в эпоксидной композиции, наполненной смесью каолина и графита, показало наличие в такой системе после ее термообработки проводимостей p - и n -типов.

Влияние состава ЭПМ, количественные соотношения отдельных компонентов, технология смешения и отверждения (стеклования, вулканизации) играют большую роль при получении изделий из ЭПМ (антистатические изделия, электромагнитные защитные покрытия, высокоомные резисторы, электрические неметаллические нагреватели и другие). Классификация ЭПМ довольно условна, и существуют классификации ЭПМ по электропроводности, составу, типу электропроводящих и инертных наполнителей, характеру их распределения в объеме получаемых изделий.

К электропроводящим наполнителям относятся металлические порошки, хлопья, волокна, нити, углеродные, графитизированные, стальные волокна, металлизированные стекловолокна и стеклосферы. Для каждого полимера необходимо определять оптимальное содержание токопроводящего наполнителя, который определяет поверхностное сопротивление композиции (так называемая пороговая концентрация, *threshold concentration*, TC). Степень наполнения может составлять от нескольких до 50 % масс. (рис. 2.70).

Основной проблемой является равномерное по объему распределение наполнителей, что обеспечивает стабильность экранирующих свойств. Необходимо учитывать влияние этих компонентов на технические и механические свойства композиций.

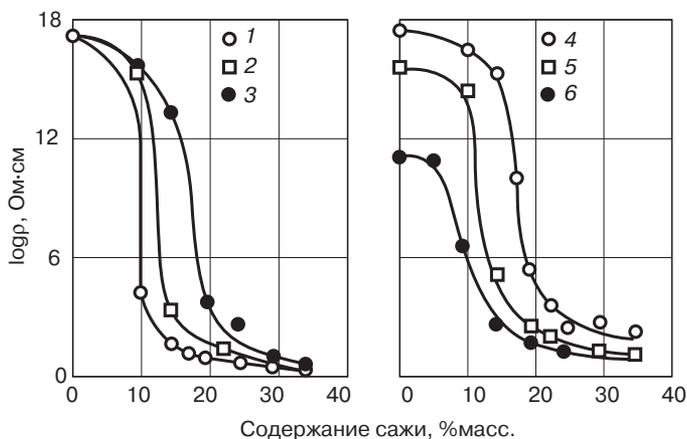


Рис. 2.70. Влияние на $\log \rho$ содержания сажи (*Coraxl*) для различных саженасыщенных термопластов [27]: 1 — полипропилен; 2 — ПЭВД; 3 — ПЭНД; 4 — ПВХ; 5 — ударопрочный полистирол; 6 — полистирол; $\log \rho$ — логарифм сопротивления поверхности экрана (функция $\rho_{\text{с}}$)

Основными типами ЭПМ являются полимерные ЭПМ с дисперсными электропроводящими накопителями с различными характеристиками распределения компонентов, с электропроводящими волокнами и тканями, комбинированные ЭПМ.

В полимерных ЭПМ в качестве наполнителей обычно используются порошки алюминия, меди, цинка, латуни, никеля, серебра. Даже цветные металлы могут подвергаться коррозии при контакте с компонентами полимерных связующих. При образовании оксидов растет поверхностное сопротивление. Наиболее часто используют хлопья из алюминия и меди (длина до 1 мм, диаметр 25–40 мкм), поверхность которых аппретируют кремнийорганическими и титаносодержащими аппретатами.

Хорошие экранирующие свойства достигаются при содержании 20–24 %об. Al-хлопьев (или 35–50 %масс., экранирующие свойства, в большей степени зависят от объемного содержания, тогда как весовое содержание зависит от плотности полимерной матрицы). Дополнительное введение хлопьев серебра снижает $\rho_{\text{с}}$ до 10^{-2} Ом-см, но удорожает материал. Хлопья серебра образуют в композиции агломераты больших размеров.

При получении экранирующих ЭМИ электропроводных полимерных композиций широко используются углеродные материалы, прежде всего — технический углерод, сажи (см. раздел 2.2.3.2). Техуглерод (сажи) АТГ-70 (ацетиленовый), ПМЭ-80В (П-366 Э) и ПМЭ-100В (П-267 Э) по сравнению с другими видами электропроводящих наполнителей более пригодны для получения профилированных изделий, обладающих высокой проводимостью, хорошими физико-механическими и эксплуатационными свойствами (в скобках дана марка печного техуглерода в соответствии с новой классификацией).

При этом природа полимера (полярность, структура, регулярность строения макромолекулы), прочность физико-химических связей в системе макромолекула полимера–наполнитель оказывают существенное влияние только при малом содержании электропроводящего наполнителя (менее 30 масс. ч. на 100 масс. ч. полимера), когда образуется весьма нестойкая (нестабильная) к различным внешним воздействиям цепочечная токопроводящая структура. Такие материалы непригодны для изготовления эффективных СВЧ уплотнений из-за их малой проводимости [24].

Для этих целей могут быть использованы только полимерные композиции с $\gamma > 1,0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, когда в них образуются пространственные токопроводящие структуры (содержание электропроводного техуглерода более 60 масс. ч.). Перечисленные выше факторы практически уже не

влияют на проводимость композиций, однако они могут существенно повлиять на изменение проводимости композиций, вулканизатов при воздействии на них деформаций различного вида, температур, агрессивных сред и т. д.

Для получения электропроводящих резин их наполняют ($\rho_v < 10^2$ Ом·см) ацетиленовой сажей.

Для обеспечения надежного антистатического эффекта достаточно иметь сопротивление $\rho_v < 10^6$ Ом·м, то есть наряду с ацетиленовой сажей могут применяться и другие сажи, которые в свою очередь могут влиять на физико-механические показатели и физико-химические свойства резин (стойкость к набуханию, воздействию тепла, света и т. д.).

Для электрических свойств резин в большей степени, чем для других полимеров, имеет значение природа применяемых матричных каучуков, наполнителей, пластификаторов и вулканизирующих агентов.

Несмотря на обилие ЭПМ на основе синтетических каучуков, лучшими остаются резины на основе натурального каучука и ацетиленовой сажи.

Природа каучука оказывает существенное влияние только до тех пор, пока в вулканизате не образуются токопроводящие цепочки и после этого для получения низкоомных резин большую роль играет технология смешивания компонентов и электропроводность саженасы наполненных вулканизатов практически не зависит от электрических свойств каучука.

Самая низкая электропроводность может быть получена введением ацетиленовой сажи в латекс. При одинаковом содержании сажи величина удельного сопротивления латексных резин на 3–5 порядков меньше, чем у вулканизатов на основе блочных (твердых) каучуков. Значение $\rho_v = 10^3$ – 10^6 Ом·см, может быть получено при введении в латекс 13–17 масс. ч. ацетиленовой сажи.

Технологически электропроводящие резины изготавливают после перемешивания компонентов смеси либо каландрованием (покрытия для полов, столов и т. д.), либо формованием (изделия сложной формы), либо обычным шприцеванием (трубки из антистатической резины). Электропроводящие изделия из латексов могут быть получены многократным маканием, ионным осаждением или желатинированием.

Композиции на основе натурального каучука (30 %масс. ацетиленовой сажи, 20 %масс. ламповой сажи) имеют $\rho_v 10^4$ – 10^3 Ом·см, на основе бутадиен-нитрильного каучука (75 %масс. сажи ацетиленовой, 30 %масс. сажи канальной) $\rho_v 10^2$ Ом·см.

Поскольку электропроводные полимерные материалы или резины, используемые для изготовления ВЧ и СВЧ уплотнений, прокладок и т. д., могут эксплуатироваться при различных частотах, диапозонная характеристика (ослабление электромагнитной энергии в широком диапазоне длин волн) является весьма важным параметром.

С увеличением длины волны до 0,4–0,5 м ослабление электромагнитной энергии уменьшается и при дальнейшем увеличении уже не зависит от длины волны. В области более низких частот, когда длина волны несоизмеримо больше толщины экрана, наблюдается отражение электромагнитной энергии.

В случае дециметрового диапазона длин волн эффективность применения электропроводных полимерных материалов, наполненных теуглеродом, значительно ниже, чем для сантиметрового диапазона. Для повышения необходимо значительно повысить проводимость таких материалов. Дальнейшее введение в композиции электропроводного теуглерода нецелесообразно, поскольку проводимость увеличивается незначительно, а физико-механические и, главное, технологические свойства высоконаполненных полимерных материалов резко ухудшаются.

В связи с этим необходимо вводить такие электропроводные наполнители, которые были бы малоактивными, не усиливающими по отношению к полимеру. Лучше всего в таком случае использовать электропроводные марки графита, которые в количестве 25–30% по отношению к содержанию активного электропроводного теуглерода практически не изменяют вязкость наполненных композиций, физико-механические свойства, увеличивая при этом проводимость материалов в 10–15 раз.

Например, введение такого количества графита в электропроводную композицию из каучуков СКИ-3 + СКД (1:1), содержащую 80 %масс. техуглерода, позволяет значительно ослабить электромагнитную энергию в широком диапазоне длин волн [24]:

| Длина электромагнитной волны, м | Ослабление, ДБ |
|---------------------------------|----------------|
| 0,008 | >120 |
| 0,03 | >120 |
| 0,1 | 100 |
| 0,3 | 52 |
| 0,7 | 50 |
| 1,0 | 88 |

В процессе эксплуатации экраны, прокладки из электропроводных полимерных материалов и резин могут испытывать многократное воздействие различных видов деформаций сжатия, растяжения и т. д., температур (как высоких, так и низких), их экранирующие свойства будут изменяться, поскольку внешние воздействия неизбежно будут влиять на проводимость полимерных композиций.

Тип токопроводящей структуры, образуемой в полимере электропроводящим техуглеродом, оказывает определяющее значение. Если для композиций, содержащих 70,0 масс. ч. и более техуглерода на 100,0 масс. ч. каучука, в широком диапазоне нагрузок как статических, так и динамических, электропроводность вулканизатов практически не меняется, то для композиций с менее развитой, переходной (50,0 масс. ч.) и особенно с цепочечной (30,0 масс. ч.) токопроводящей структурой изменение γ , а следовательно, и экранирующих свойств более значительно.

При циклических деформациях сжатия изменение проводимости происходит только при первых 2–3 циклах, в процессе которых разрушаются наиболее слабые токопроводящие структуры. В дальнейшем же изменения γ не наблюдаются.

Каучук СКД из-за своего химического строения, по сравнению с другими каучуками, способствует ориентации токопроводящих цепочек электропроводящего техуглерода вдоль макромолекул полимера. Вследствие этого улучшается их фиксация, снижается контактное сопротивление между частицами наполнителя R_k и увеличивается стабильность проводимости при воздействии различного рода деформаций. Если при сжатии электропроводных композиций из каучуков наблюдается ухудшение электропроводности, то при деформациях растяжения наблюдается обратный эффект.

Такое различие связано с тем, что при сжатии и растяжении превалируют те или иные процессы, которые могут повышать или понижать электропроводность.

Такими процессами, протекающими одновременно, могут быть: 1) разрушение токопроводящих структур под действием внешних деформаций; 2) разрушение токопроводящих структур за счет быстро релаксирующих напряжений в полимере при снятии деформации; 3) частичная рекомбинация разорванных при деформации токопроводящих структур, образование новых цепочек; 4) ориентация частиц электропроводящего наполнителя вдоль макромолекул полимера.

Немаловажную роль при воздействии деформаций на изменение электропроводности композиций из каучуков играют прочность и тип связей в вулканизате: $-C-S_n-C-$ полисульфидная, $-C-S-C-$ моносουλфидная и $-C-C-$ углеродная. Чем они прочнее (переход от полисульфидных к моносулфидным, $-C-C-$ связям), тем большей стабильностью отличаются их электрофизические и экранирующие свойства [24].

В отличие от электропроводящих резин, использующихся в машиностроении, в основном в качестве антистатических материалов и гибких резисторов, ЭПМ на основе термопластов имеют широкий спектр применения от антистатиков до спецрезисторов.

При воздействии температур от -70°C до 120°C электропроводные композиции из каучуков имеют положительный коэффициент электрического сопротивления (электропроводность падает, что характерно и для металлонаполненных полимеров) [12, 13].

На основе термопластов получены ЭПМ с ρ_v в диапазоне от $3 \cdot 10^{-2}$ Ом-м (полиуретановая латексная пленка) до $3 \cdot 10^9$ Ом-м (поливинилбутираль).

Удельное сопротивление композиции на основе ПЭНП, содержащей 20% ацетиленовой сажи при введении в нее дополнительно 20% эластомера (фторкаучук СКФ-26), уменьшится с до $3 \cdot 10^7$ до 16 Ом-м.

Эффект связан как с изменением структуры полимерной матрицы, так и с изменением распределения наполнителя (сажи) в объеме каждой из полимерных компонент (фаз), а также и в межфазном слое.

Введение ПАВ в композицию ПЭ с ацетиленовой сажой значительно увеличивает ее электропроводность, особенно в области критической концентрации сажи (порог перколяции) до 10–15%. Так, если композиция ПЭНП, включающая полиизобутилен и 13% ацетиленовой сажи, имеет $\rho_v = 10^{13}$ Ом-м, то в присутствии стеарокса-*b*, алкамона ГН и ОС-С и других ПАВ этот показатель снижается до 10^3 Ом-м.

В процессе эксплуатации экранов, в зависимости от рецептуры полимерной композиции, возможны миграция и выцветание на поверхности различных ингредиентов: вулканизирующих агентов и ускорителей, физических противостарителей, пластификаторов и т. д., которые существенным образом могут повлиять на контактное сопротивление. Если пластификаторы и физические противостарители незначительно влияют на R , то тип вулканизирующей системы и, особенно, вид контактирующей металлической поверхности оказывают весьма большое влияние на переходные сопротивления в процессе длительного контактирования.

Волокнистые электропроводящие наполнители во многих отношениях эффективнее порошкообразных. Они обеспечивают надежную непрерывность электропроводящего пути при значительно меньшей концентрации их в композиции. Если введение 30% сажи снижает удельное поверхностное сопротивление до 5 кОм, то введение углеродного волокна при том же содержании — до 3–5 Ом. Одновременно повышается механическая прочность материала. По сравнению с дисперсно-наполненными полимерами волокнистые углепластики имеют меньший коэффициент теплового расширения, большую влагостойкость и теплопроводность.

Эффективным способом снижения электрического сопротивления ЭПМ является введение в них металлических или металлизированных волокон причем, чем больше отношение длины волокна к его диаметру, тем заметнее эффект снижения сопротивления.

Металлопластики обеспечивают надежную защиту от воздействующих на изделия электромагнитных волн в широком диапазоне частот и интенсивностей.

Существенное положительное влияние на изготовление (формование) изделий из проводящих композиций на основе термопластов оказывает повышенная теплопроводность ЭПМ, наполненных металлическими или металлизированными волокнами (углеродными, базальтовыми, стеклянными).

Так, полиамидный углепластик с металлизированными углеродными волокнами (осаждение магнитноактивных металлов в ультрадисперсной форме, 20–34 %масс.), обеспечивает коэффициент ослабления ЭМИ в диапазон частот 0,15–1000 МГц не менее 25 дБ [146].

Электропроводность композиций с токопроводящими наполнителями зависит от контакта отдельных проводящих частиц и возрастает при увеличении их размеров и длины, что стимулирует использование наполнителей в виде волокон и лент с соотношением длины к толщине (диаметру), равным 6–700. Эффективно использование алюминиевых лент шириной 0,01 мм, толщиной 0,001 мм, длиной 3,2–12 мм, которые получают раскатыванием алюминиевой проволоки.

Если поверхностное сопротивление, зависящее от ρ_v матричного полимера составляет 10^4 Ом-см, целесообразно использовать алюминиевые волокна. Достигается эффективное экранирование уже при содержании 3–6 %об. таких волокон, когда аналогичный эффект

достигается только при содержании 40–60 %об. порошка алюминия. При использовании частиц и гранул с формой, близкой к сферической, для токопроводности необходима реализация контакта частиц в 2 точках, тогда как при использовании наполнителей с соотношением длины к ширине, равным 100:1. этот показатель равен 1,6. На проводимость существенно влияет длина волокон, а не только их содержание в композиции, равномерность распределения в объеме материала. Для получения требуемого поверхностного сопротивления объем наполнителя в виде волокон длиной около 1,3 мм в композиции должен быть в 2 раза больше, чем при использовании волокон длиной от 19 мм.

При длине волокон менее 1,3 мм сопротивление быстро возрастает и при длине волокон 0,025 мм при 30 %об. составляет уже 10 Ом·см. Эффективность использования волокон диаметром 2–22 мкм из нержавеющей стали различной длины заключается в том, что уже при их 2 %-ном содержании эффективность экранирования повышается до 40 дБ.

Для изготовления токопроводных экранирующих материалов в качестве наполнителей используют металлизированные стеклянные волокна. Стеклянные волокна металлизуют вакуумным напылением или используют металлические расплавы. Алюминиевые покрытия толщиной 0,25 мкм на волокнах диаметром 10–20 мкм имеют неравномерную толщину и шероховатую поверхность. Для получения гладких поверхностей используют никель.

Металлизированные волокна рекомендуются для наполнения прессовочных композиций с хорошими механическими свойствами, которые при содержании около 15 %масс. волокон обеспечивают экранирование ЭМВ в диапазоне 35–50 дБ.

Для экранирующих материалов используют и металлизированные (часто серебром) стеклянные сплошные и полые микросферы диаметром 5–105 мкм. Композиции с 4–12 %масс. таких сфер обеспечивают экранирование ЭМВ на уровне 50 дБ.

Углеродные наполнители увеличивают электропроводность полимерных композиций, однако сажа и графит менее эффективны по сравнению с металлами в качестве компонентов экранирующих материалов. В случае сажи эффективна обработка их аминами. При содержании 10% углеродных волокон полимерные композиции приобретают хорошие экранирующие и механические свойства.

За рубежом более 50 фирм исследуют и производят экранирующие ЭМИ токопроводящие полимерные материалы, сравнение эффективности которых затруднено из-за различных методов определения экранирующей способности и используемой для этого аппаратуры (рис. 2. 71, табл. 2. 76).

ЭПМ на основе термопластов, применяемые для экранирования, имеют удельное поверхностное электрическое сопротивление 10^2 Ом и наполнены 30–40% углеродного волокна. ЭПМ, рассеивающие электростатические заряды, имеют удельное поверхностное электрическое сопротивление $10–10^6$ Ом и содержат 12–30% электропроводящих добавок.

Теплостойкие термопласты с 40% углеродных волокон обеспечивают затухание электромагнитных ВЧ до 40–60 дБ.

Термопластинные ЭПМ для использования в качестве радиоэкранирующих разработаны на основе поликарбонатов, полиамидов, полипропилена, поливинилхлорида [27].

В качестве наполнителей такие ЭПМ содержат хлопья алюминия, стеклянные, углеродные, в том числе и металлизированные, металлические волокна, сажу.

Композиции на основе поликарбоната с 25 %масс. углеродных волокон обеспечивают экранирование (при 100 МГц) до 30 дБ, с 25 %масс. металлизированных стеклянных волокон (соотношение длины/плотность от 450:1 до 35:1) – 20 дБ, с 30 %масс. хлопьев Al – 30 дБ, с 2 %масс. стальных волокон – 40 дБ; на основе полиамида 66 – составляет 40 дБ, причем использование 15% углеродных волокон с Ni-покрытием дает тот же эффект, что и введение 35% неметаллизированных углеродных волокон; на основе полипропилена, наполнитель – углеродные волокна, ρ_v композиции 1 Ом·см, диски толщиной 3,2 мм) – 35 дБ (наполнитель – 50 %масс. сажи) – 50 дБ (оптимальный состав радиоэкранирующих композиций: 15 %масс.

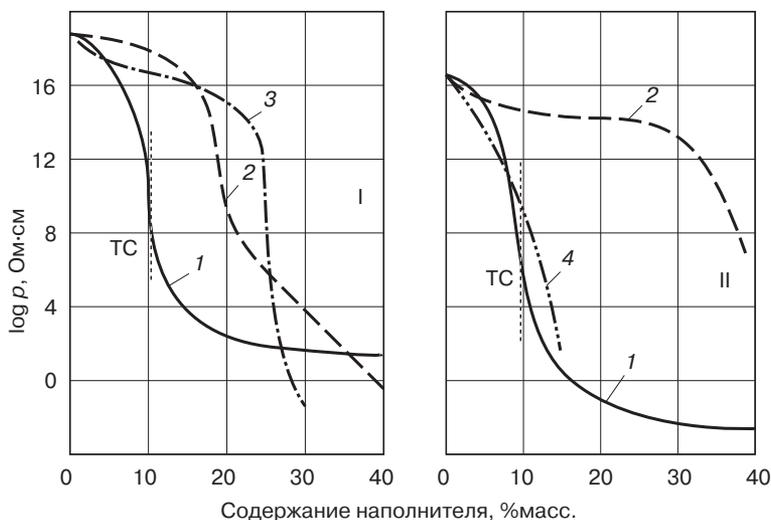


Рис. 2.71. Влияние на $\log \rho$ содержания различных токопроводящих наполнителей в поликарбонате (I) и полиамиде (II) [27]: 1 — углеродные волокна; 2 — металлизированные стеклянные волокна; 3 — Al-хлопья; 4 — сажа; TC — пороговая концентрация

Таблица 2.76. Составы и свойства полимерных материалов, экранирующих ЭМИ высокой частоты [27]

| Тип полимерного связующего | Тип наполнителя | Торговая марка | Фирма-изготовитель | Характеристики, определяющие эффективность экранирования |
|---|--------------------|--------------------|------------------------------|--|
| Полиамид 66 | Хлопья Al | EMI-X320 | LNP Plastics Nederland BV | 30%, 18–25 дБ; 40%, 40–95 дБ (3 мм) |
| | Сажа | — | | 40%, 40–60 дБ (3 мм) |
| | Углеродные волокна | EMI-X911 | | 40%, 5–20 Ом·см |
| Поликарбонат | Стальные волокна | Electrofil R-5147 | Wilson-Fiberfil | 1–2%, 100м·см, 40 дБ |
| | Хлопья Al | EMI-X | LNP Plastics | 30%, 20–25 дБ |
| | Никель Mica | — | Kuraray Co | 55%, 10 Ом·см, 40 дБ |
| Дублированные пленки (поликарбонат–ударопрочный полистирол) | Хлопья Al | Bayblend ME 2540 | Bayer AG | 58 дБ (5 МГц, 3,2 мм) |
| | | Bayblend DP-2-1011 | | 40%; 0,10 м·см; 54–60 дБ |
| | | Bayblend ME 6540 | | 49 дБ (5 МГц, 3,2 мм) |

Окончание табл. 2.76

| Тип полимерного связующего | Тип наполнителя | Торговая марка | Фирма-изготовитель | Характеристики, определяющие эффективность экранирования |
|--|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|--|
| Полипропилен | Углеродные волокна | — | <i>Ensign-Bickford Industries</i> | 1 Ом·см, 3,5 дБ (3,2 мм) |
| | Хлопья Al | 1020 B | <i>Aron Kasei</i> | 0,2 Ом·см |
| | Сажа | <i>Cabelec</i> | <i>Cabot Belgim SA</i> | 20–50%, 0,7–2 Ом·см 28–50 дБ (1000 МГц) |
| | Сажа | <i>ECX-Z-111</i> | <i>Mitsubishi Petrochemical CO</i> | 0,1 Ом·см, 40 дБ (1000 МГц) |
| Ударопрочный полистирол | Хлопья Al | <i>Lucon 6401, 6402</i> | <i>Lucky LTD</i> | 0,1–1 Ом·см |
| | Хлопья Al | 1400 F | <i>Aron Kasei</i> | 0,01–0,10 Ом·см |
| Поливинилхлорид | Хлопья Al | <i>Magnex</i> | <i>Diamond shamzock</i> | 0,040 Ом·см; 40–60 дБ (3,2 мм) |
| Полиоксифенилен, полибутилентерефталат, полистирол | Хлопья Al, сажа. Волокна Al | 4400 F2 | <i>Aron Kasei</i> | 0,4 Ом·см |
| | | 5400 FS | | |
| Прессовочные полиэфирные премиксы, SMC | Металлизированные стеклянные волокна | <i>Premi-Glas</i> | <i>Premix, Inc.</i> | 5–15 Ом·см, 30–60 дБ |
| <i>BMC</i> | Хлопья Al | — | — | 15–50 дБ |
| <i>SMC</i> | Хлопья Al | — | <i>Fiberite Corp.</i> | 0,0006 Ом·см |
| Прессовочные фенольные композиции | Хлопья Al | <i>FM 32175</i> | <i>Fiberite Corp.</i> | 0,01–0,1 Ом·см |

SMC (Sheet Moulding Compound) — полуфабрикаты в виде листов, матов для прессования.

BMC (Bulk Moulding Compound) — премиксы для литья под давлением.

Al-волокон соотношение длина/диаметр = 24:1); на основе поливинилхлорида — 40–60 дБ ($\rho_v = 0,04$ Ом·см, 26–41 %масс. Al-хлопьев, толщина экрана 3,2 мм).

Комплекс свойств термопластичных ЭПМ приведен в табл. 2.77, 2.78 и на рис. 2.72, 2.73.

Заливочные композиции на основе олигоэфирмалинов (*SMC*, *DMC*, *BMC*) явились первыми полимерными материалами, использованными в качестве экранирующих.

В качестве наполнителей в них используют преимущественно металлизированные стеклянные волокна и Al-хлопья.

Длина волокон оказывает решающее влияние на электрические свойства композиций, однако приходится учитывать разрушение волокон при изготовлении изделий литьем. Для композиций типа *SMC* экранирующие свойства определяются условиями отверждения (рис. 2.74).

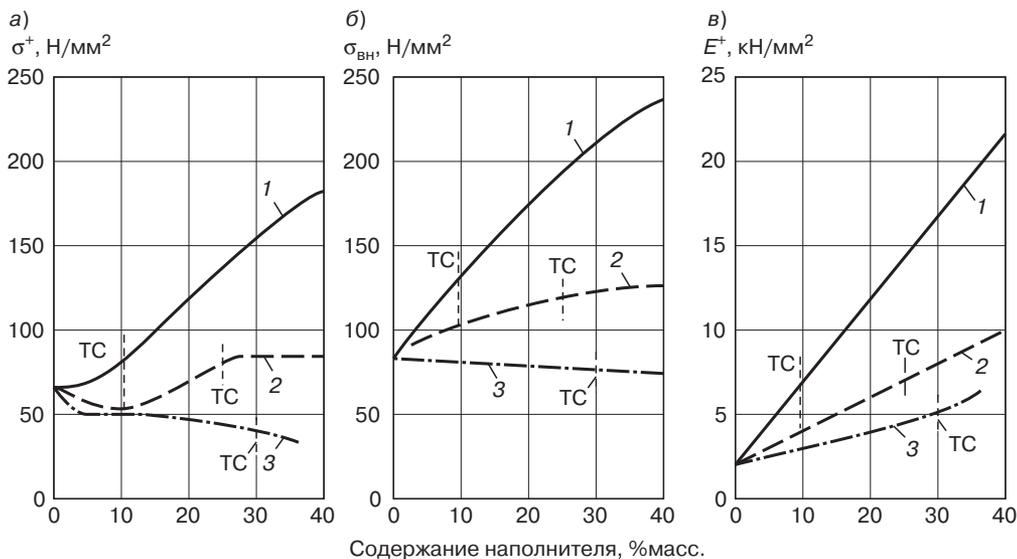


Рис. 2.72. Зависимость σ^+ , $\sigma_{вн}$ и E^+ композиций на основе поликарбоната с различным содержанием наполнителей [27]: 1— углеродные волокна; 2— металлизированные стеклянные волокна; 3— хлопья Al; TC — пороговое (оптимальное) содержание наполнителя

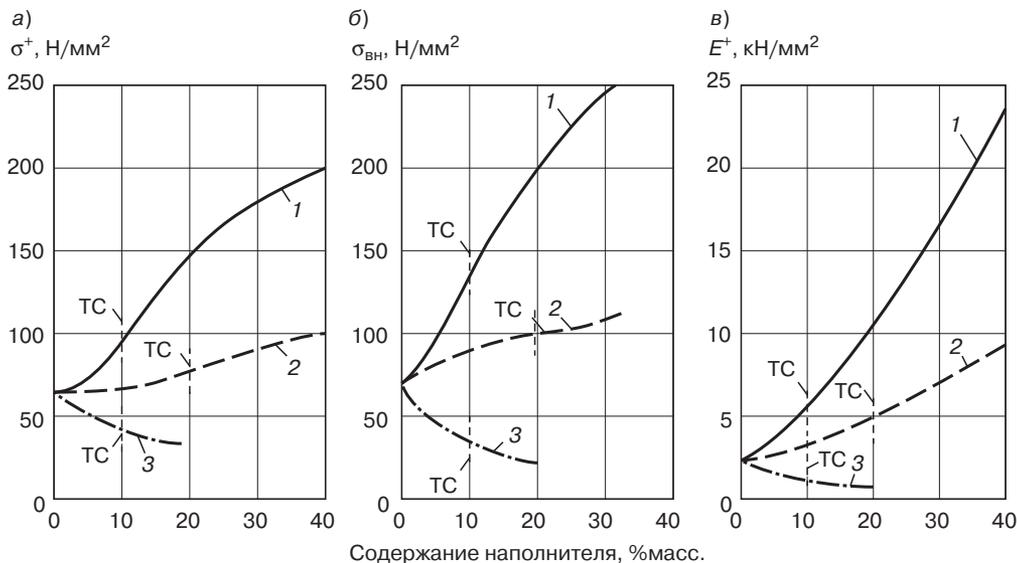


Рис. 2.73. Зависимость σ^+ , $\sigma_{вн}$ и E^+ композиций на основе полиамида-66 с различным содержанием наполнителей [27]: 1— углеродные волокна; 2— металлизированные стеклянные волокна; 3— сажа; TC — оптимальное содержание наполнителя

Таблица 2.77. Термопластичные электропроводящие антистатические композиции [58, 59]

| Полимер (наполнитель углеродные волокна) | Содержание напол- нителя, %масс. | σ^+ , МПа | α_k , по Изоду, Дж/м С надрезом/ без надреза | Огнестойкость (UL94) | ρ_s , Ом | ρ_v , Ом·см | HDT/А, °C |
|---|-------------------------------------|------------------|--|----------------------|---------------|------------------|-----------|
| Акрилонитрилбутадиен- стирол | 15 | 108,5 | 54,4/217,6 | HB | 10^4 | 10^4 | 102 |
| Полиэфиримид | 30 | 238 | 76/734 | V-0 | 10^4 | 10^4 | 216 |
| Полисульфон | 30 | 161 | 65/353 | V-0 | 10^2 | 10^2 | 185 |
| Полиэфирсульфон | 30 | 203 | 81,6/653 | V-0 | 10^2 | 10^2 | 213 |
| Полифенилен | 30 | 189 | 59/480 | V-0 | 10^2 | 10^2 | 263 |
| Полиамид 6,6 | 30 | 245 | 81,6/653 | HB | 10^2 | 10^2 | 257 |
| Полиамид 6 | 30 | 224 | 99/707 | HB | 10^2 | 10^2 | 218 |
| Полибутилентерефталат | 30 | 134 | 65,3/544 | HB | 10^2 | 10^2 | 221 |
| Полиэфирэфиркетон | 30 | 217 | 65,3/625 | V-0 | 10^2 | 10^2 | 321 |
| Поликарбонат | 30 | 175 | 103/707 | V-1 | 10^2 | 10^3 | 149 |

Таблица 2.78. Термопластичные экранирующие ЭПМ [58, 59]

| Типы термопластов, типы наполнителей, %масс. | σ^+ , МПа | α_k Изоду, Дж/м с надрезом/ без надреза | HDT/А, °C | ρ_s , Ом | ρ_v , Ом·см | Эффективность экранирования, дБ |
|---|------------------|---|-----------|---------------|------------------|---------------------------------------|
| Поликарбонат: | | | | | | |
| 40% алюминия | 44,8 | 69,4/320 | 142 | 10 | 10 | 35–40 |
| 40% углеродного волокна | 182 | 97/544 | 149 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| волокно из нержавеющей стали | 63 | 65/146 | 140 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| Полиамид 6,6: | | | | | | |
| 40% алюминиевых хлопьев | 66,5 | 54/244 | 240 | 10^2 | 10^2 | 35–40 |
| 40% углеродного волокна | 217 | 87/70 | 260 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| Полиамид 6: | | | | | | |
| 40% углеродного волокна | 245 | 97/76 | 218 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| Полибутилентерефталат: | | | | | | |
| 40% алюминиевых хлопьев | 52,5 | 54/217 | 193 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| 40% углеродного волокна | 175 | 96/642 | 221 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| Полифениленоксид <i>Noryl</i> : | | | | | | |
| 40% углеродного волокна | 120,4 | 59/244 | 146 | 10^2 | 10^2 | 40 |

Окончание табл. 2.78

| Типы термопластов, типы наполнителей, %масс. | σ^+ , МПа | α_k Изоду, Дж/м с надрезом/ без надреза | HDT/A , °C | ρ_s , Ом | ρ_v , Ом·см | Эффективность экранирования, дБ |
|--|------------------|---|--------------|---------------|------------------|---------------------------------------|
| Полифениленсульфид: | | | | | | |
| 40% углеродного волокна | 120 | | 263 | 10^2 | 10^2 | 40 |
| 40% углеродного волокна с никелевым покрытием | 147 | | 260 | 1 | 10 | 50–60 |
| Полиэфирэфиркетон: | | | | | | |
| 30% углеродного волокна с никелевым покрытием | 161 | 70/544 | 260 | 1 | 10 | 50–60 |
| Полиэфиримид: | | | | | | |
| 40% углеродного волокна с никелевым покрытием | 259 | 70/544 | 216 | 10^2 | 10^2 | 40 |

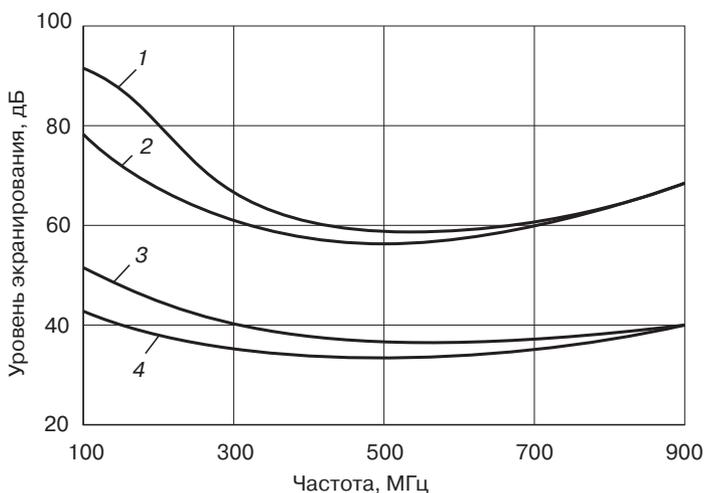


Рис. 2.74. Экранирующая способность литевых композиций на основе ненасыщенных олигоэфиров (*UP-Harr* типа олигоmaleинов) [27]: 1 — композиция SMC с цинковым покрытием толщиной 127 мкм; 2 — композиция SMC (20 %масс. металлизированных стеклянных волокон длиной 25,4 мм; 10 %масс. волокон из E-стекла длиной 25,4 мм); 3 — та же композиция, но 15 %масс. волокон того же типа; 4 — композиция BMC (12% масс. Al-лент *MetafilA* длиной 15 мм, 10 %масс. волокон из E-стекла)

Один из способов экранирования объектов от воздействия ЭМИ — нанесение на их поверхность электропроводящих покрытий. При использовании таких покрытий экранирующая способность возрастает с ростом частоты ЭМИ, но требуется использовать достаточно толстые металлические покрытия. При частотах более 30 МГц основной эффект связан с отражением ЭМИ, при низких частотах — с поглощением ЭМИ электропроводящим покрытием.

Для нанесения электропроводящих покрытий (слоев) на полимерные изделия и конструкции используются металлические пленки (фольга), ленты или проводят их металлизацию

напылением, катодным напылением, гальванизацией (в том числе с использованием растворов, содержащих серебро), пламенным, электродуговым напылением, используя металлические лакокрасочные покрытия. Хемогаальваническая металлизация с использованием нескольких технологических операций применяется для нанесения электропроводящих покрытий на изделия из ударопрочных полистиролов. Для обеспечения экранирования изделий используют специальные ткани, в том числе пропитанные композициями с электропроводящими компонентами, которыми покрывают изделия или приклеивают их на поверхность изделий из полимеров. Поверхностное сопротивление покрытий определяется составом и технологией нанесения (табл. 2.79).

По сравнению с металлическими проводниками ЭПМ имеют высокую коррозионную стойкость, технологичность при изготовлении изделий сложной формы, небольшую плотность, эластичность и т. д.

Наполнение реактопластов металлическими или металлизированными волокнами улучшает равномерность прогрева заготовок и предохраняет от выделяющегося при экзотермических реакциях отверждения избытка тепла, которое быстро отводится через сеть проводящих волокон и уменьшает остаточные напряжения и коробление изделий.

Разработаны ЭПМ с углеродными и кремнеземными тканями, с пироуглеродным покрытием, комбинированные ЭПМ, в которых непроводящие стеклянные или органические волокна ткнутся вместе с проводящими нитями.

Углеродные ткани отличаются очень низким сопротивлением (0,3–10 Ом) «квадрата» (квадратного миллиметра сечения). Этим определяется их применение для низкоомных электронагревателей, которые отличает высокая надежность, долговечность, стабильность свойств, однородность температурного поля (см. раздел 2.2.3.3.).

Таблица 2.79. Составы и максимальное поверхностное сопротивление экранирующих ЭМИ покрытий [27]

| Процессы нанесения покрытий | Материалы токопроводящих слоев и покрытий | Максимальное поверхностное сопротивление, Ом |
|-----------------------------|---|--|
| Металлическая фольга, ленты | Медь | 0,001 |
| | Алюминий | 0,005 |
| Напыление металлов | Алюминий | 1,0 |
| | Серебро | 1,0 |
| | Медь | 2,0 |
| Пламенное напыление | Цинк | 1,0 |
| Катодное напыление | Алюминий | 1,0 |
| | Серебро | 1,0 |
| | Медь | 2,0 |
| Гальванизация | Серебро | 0,5 |
| Металлические покрытия | Серебро | 1,0 |
| | Медь | 2,0 |
| | Никель | 5,0 |
| | Графит | 20,0 |
| Электропроводные компоненты | Металлические порошки, волокна, пластины, металлизированные волокна | 20–5000 |

Ткани с пиролитическим покрытием имеют сопротивление «квадрата» от 10 до 100 Ом. В отличие от углеродных тканей они менее надежны, особенно при повышенных температурах.

Комбинированные ЭПМ находят меньшее применение, чем ЭПМ с токопроводящими тканями, но их применение целесообразно в качестве антистатической защиты и защиты от электромагнитных волн.

Электропроводящие композиции на основе реактопластов используют для изготовления резисторов электронагревателей (резисторы с большой поверхностью и повышенной температурой). Электронагреватели получили название «нагреватели электрические стеклопластиковые тонкослойные» (НЭСТ).

В качестве электронагревательного элемента (ЭНЭ) в НЭСТ применяются стеклоткани, пропитанные эпоксиодно-фенолформальдегидными или фенолформальдегидными связующими, которые наполнены техническим углеродом (10–60% от веса полимерного связующего).

Время эксплуатации для большинства НЭСТ составляет 45 000 ч. Для некоторых видов НЭСТ долговечность составляет 70 000 ч при сохраняемости свойств в течение 17 лет.

Из ЭПМ изготавливают нагревательные саморегулирующие устройства, которые позволяют поддерживать температуру в диапазоне от 0 до 150 °С. Эти устройства в виде панелей и лент применяются для подогрева трубопроводов транспорта нефти, дизельного топлива грузовых автомобилей, позволяя предотвращать обледенение и, если это необходимо, создавать нужные температурные условия для эксплуатации различного технологического оборудования.

ЭПМ используются в ограничителях для защиты от повышенных токов и токов короткого замыкания электродвигателей и измерительных приборов, радиоаппаратуры и трансформаторов.

Применение высоконаполненных ЭПМ с углеродными волокнами, тканями для изготовления коллекторов и контактных колец электрических машин малой мощности уменьшает расход меди.

Перспективно использование ЭПМ с металлическими наполнителями для изготовления электрических контактов. В качестве полимеров используются полиэтилены, полипропилены, полиамиды и др. В результате протекания электрического тока при нагреве происходит термическое разложение полимера с выделением водорода или других газов (в зависимости от типа полимера). Газы взрываются и прерывают электрическую дугу, возникающую при размыкании электродов. В отличие от металлов металлонаполненные полимеры не свариваются и не паяются, поэтому при изготовлении контактов необходим металлический носитель (стержень), на который напрессовываются электропроводящие компоненты.

Использование ЭПМ для изготовления контактов оправдано лишь при кратковременном прохождении больших токов. Для таких контактов должны разрабатываться специальные конструкции. Особенно эффективно их применение в случае нагрузочных цепей с высокой индуктивностью. Управляющие механизмы для таких контактов просты и дешевы. Контакты применяются для изготовления различных электрических выключателей.

Электроизоляционные полимерные материалы в условиях эксплуатации способны накапливать на своей поверхности и в объеме электростатические заряды, которые вызывают, например, повреждение электронных устройств. Для устранения этого явления в полимерные материалы вводят электропроводящие компоненты.

Для получения защитных токопроводящих пленок и покрытий в электронной технике широко используются фторопласты: защита при травлении с использованием антистатических свойств (30ПС, 50Г, 2МД, 4МД), антистатические наполненные пленки (Ф-2МД, -4МД, -30ПС с алюминиевой пудрой (до 50%), серебром, никелем (60%), газовой сажой (>10%), волокна «Грален» (с Ф-30ПС), стеклоуглеродные волокна «Конкор»); магнетронные пленки (покрытие толщиной 100 мкм, выдерживает магнитное поле до 0,16 Эрстед) в защитных экранах радиоприемника с радиопоглощающей плазмой $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и для дисков объемных резонаторов, в линиях задержки и в полосковых резонаторах. Электропроводящие фторопластовые пленки используются в установках теххимических комплексов Лада-1 А, Кубок, Кова-60; в оборудовании для нагрева

ультрачистой деионизированной воды (наполнитель SnO_2) 02ГЖ-400-002, УН-СДА-400-000; для термообработки фоторезисторов в процессах фотолитографии при изготовлении интегральных схем в установках Лада-125, Знак, Камелия [107].

Фирма *Vayer* выпускает электропроводящие поликарбонатные пленки толщиной от 30 до 150 мкм. Электрическая проводимость пленок обеспечивается введением сажи. Удельное объемное электрическое сопротивление при этом составляет 1 Ом·см, удельное поверхностное электрическое сопротивление 270 и 60 Ом при толщине пленки соответственно 30 и 150 мкм. Этот материал используют в нагревательных панелях, для изготовления электродов большой площади, как антистатическое покрытие электронных схем. Пленка наносится на печатные платы для обеспечения надежного покрытия, экранирующего электромагнитные и высокочастотные колебания.

ЭПМ применяются для экранирования взрывобезопасного шахтного и промышленного оборудования, при этом их удельное поверхностное сопротивление составляет 10^8 – 10^9 Ом [59].

Электропроводные теплостойкие термoplastы (ПФО, полибутилентерефталата, полисульфон и др. (наполнители — графитизированные волокна, 5–15 %об., длина 6,35 мкм, пучки из 12 000 филаментов с Ni-покрытием) используют в производстве экранированных от электромагнитных радиопомех корпусов осциллографов, компьютеров (без окраски и лакирования) [104].

Эффективна замена металла на ЭПМ при изготовлении распределительных щитов, коробок, различных экранов и других заградительных устройств и конструкций. Они надежно предохраняют электрическое оборудование и компьютеры от электромагнитных помех, не намагничиваются, в отличие от металлов, имеют небольшую массу, просты в изготовлении, отличаются хорошим внешним видом. Кроме того, изготовление корпусов электрических приборов из ЭПМ дешевле по сравнению с обычным экранированием путем нанесения электропроводящих металлических слоев.

Применение ЭПМ на основе каучуков и пластиков позволяет создать электрогерметизирующий (радиогерметизирующий) эффект и одновременно обеспечить защиту от вредных (побочных) электромагнитных излучений с хорошей герметизацией (экранированием) аппаратуры. За счет изменения состава композиций можно в широких пределах от 40 до 120 дБ изменять эффективность экранирования ЭПИ. Определенные типы ЭПМ используются в качестве радиопоглощающих [26, 94, 95, 105].

2.4. Радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции

Разработка полимерных композиций, использующих в качестве наполнителей токопроводящие и магнитные компоненты, расширила эксплуатационные возможности полимерных материалов, ПКМ, ВПКМ. Электрофизические параметры таких функциональных ПМ, ПКМ, ВПКМ позволяют использовать их не только в качестве радиоэкранирующих материалов (в составе покрытий и конструкций, когда, например, магнитное экранирование, защиту от магнитной составляющей электромагнитного излучения обеспечивают ферромагнитные компоненты в составе ПКМ, ВПКМ) за счет процессов отражения и поглощения ЭМИ, но и радиопоглощающих материалов, обеспечивающих минимальное отражение и максимальное поглощение ЭМИ радиодиапазона.

На основе токопроводящих и магнитодиэлектрических ПМ, ПКМ, ВПКМ разработан большой ассортимент радиопоглощающих материалов, используемых в экранирующих радиопоглощающих покрытиях и конструкциях, радиопоглощающих покрытиях (элементах) волноводов и коаксиальных линий, радиопоглощающих и экранирующих конструкций покрытий безэховых камер, радиопоглощающих покрытий и конструкций, уменьшающих радиолокационную заметность УРЗ объектов (технология *Stealth*).

2.4.1. Радиоэкранирующие радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции

Основными материалами таких покрытий являются магнетодиэлектрики. Экраны из полимерных (и керамических) диэлектриков с ферромагнитными компонентами, обладающие низкими значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы, высокой магнитной проницаемостью, эффективно поглощают внешний магнитный поток.

Экранирующие полимерные магнетодиэлектрики широко применяются в современной технике (авиакосмическая техника, судостроение и т. д.). Их использование направлено на устранение нежелательных отражений сигналов, которые имеют место при работе РЛС систем посадки самолетов, для защиты операторов РЛС от излучения интенсивностью 3–4,6 Вт/см², систем опознавания «свой-чужой», экранирования АО, конструкций корабельных навигационных РЛС, экранирования от помех, вызываемых микродвигателями и электронными агрегатами. С этой целью используется узко- и широкодиапазонные токопроводящие и магнетодиэлектрические экранирующие материалы и покрытия.

При использовании узкодиапазонных экранирующих материалов величина электрических потерь такова, что амплитуда волны, проходящей через материал экрана, и волны, отраженной от экрана, равны, при этом обе волны смещены друг относительно друга $\lambda/2$, то есть находятся в противофазных фазах и гасятся благодаря интерференции.

Эластичные покрытия толщиной 3,7 мм на основе хлоркаучука на алюминиевой фольге (толщина 0,05 мм) с 20 % масс. графита (2,25 г/см³) поглощает ЭМИ с частотой $3 \cdot 10^9$ Гц, с 12 % об. графита и с 22,7 % об. печной сажи (толщина 1,5 мм) — $7,5 \cdot 10^9$ Гц [21].

Покрытие (толщина до 0,1 мм) на основе полиизобутилена (ϵ 2,3 при 1 МГц) с 25 % масс. чешуек алюминия (толщина 0,3 мкм) и на основе бутилакаучука (80% чешуек алюминия) на фольге поглощают ЭМИ в диапазоне 10^6 – 10^{11} Гц.

Основная трудность при изготовлении таких материалов заключается в контроле толщины слоя материала. Разработан метод контроля толщины слоя поглощающего материала, отличающийся высокой точностью. Согласно этому методу тонкая пленка материала (состоящего из связующего с чешуйчатым наполнителем) толщиной несколько меньшей, чем номинальная толщина материала (четверть длины волны), наносится на плоскую гладкую поверхность. Затем пленка снимается и стандартным методом замеряется ее толщина; на обратную сторону пленки наносится слой клея — диэлектрика точно регулируемой толщины. Толщина клеевой пленки подбирается так, что вместе с толщиной поглощающего материала она составляет четверть длины волны. Затем поглощающее покрытие наносится на объект.

Исследовательский центр *Allen Clark Research Center* фирмы *Plessey* разработал материалы, позволяющие устранить нежелательные отражения сигналов РЛС, которые имеют место при работе радиолокационных систем посадки самолетов. Основой материалов являются резина, пластик или керамика, а наполнителями — магнитные и диэлектрические вещества. Фирма разработала два типа материалов:

- 1) широкодиапазонный материал, поглощающий различные длины волн (максимальная длина поглощаемой волны определяется толщиной материала);
- 2) резонансный поглощающий материал, используемый для одного или двух диапазонов.

Эти материалы поглощают до 99,99% падающего излучения. Необходимость в таких материалах вызвана тем, что отражения радиолокационных сигналов РЛС, дающей точные координаты для вывода самолетов в район аэропорта, от системы входных пограничных огней и приборов освещения взлетно-посадочной полосы становятся неразличимыми (на окончательной, критической фазе посадки) от сигналов, отражаемых от самолета. Экраны из поглощающих материалов фирмы *Plessey*, установленные на приборах освещения и входных пограничных огнях, исключили этот тип помех. В качестве наполнителя фирма рекомендует применять алюминиевые хлопья, сажу, ферриты, углеродистую, а также легированную никелем

сталь в порошкообразной форме. Эти материалы могут применяться и в морских условиях для устранения помех при работе навигационных радиолокационных установок [26].

Фирма *Bendix* (США) применила экранирующие поглощающие материалы в системе *Microvision* для слепой посадки самолетов. Эта система позволяет производить посадку самолета по изображению на экране дисплея сигналов радиомаяков, размещенных по обе стороны взлетно-посадочной полосы.

Система *Microvision* работает на волне длиной 3 см. Поглощающие материалы применены для изготовления поглотителей антенного устройства наземного радиомаяка системы (поглотители используются для подавления боковых лепестков). Радиопоглощающие прокладки из этого же материала применяются в бортовой антенной системе (входящей в систему *Microvision*). Эти прокладки окружают рупорные антенны, размещенные попарно в обеих плоскостях симметрично относительно продольной оси самолета. Прокладка поглощает отражения радиолокационных сигналов от деталей самолета.

Материалы фирмы *B.F. Goodrich Sponge Production* позволяют снижать нежелательные искажения на экранах РЛС, возникающие при отражениях от близкорасположенных предметов — мачт, антенных вышек и других металлических конструкций. Материал типа *RS* представляет собой тонкие эластичные листы (можно обрабатывать механически и гнуть), которыми покрывают металлические детали любой формы. Материал отличается высокой износоустойчивостью и может работать как при высоких (до 205 °С), так и при низких температурах, а также в условиях солнечного излучения, ветровых нагрузок и дождя. Материал типа *US* предназначен для работы в 3-см диапазоне. Один квадратный метр листа материала толщиной 1,78 мм весит 4,9 кг. Материал толщиной 1,78 мм ослабляет отражение на 35 дБ при длине волны 3,2 см, на волнах 3,1 и 3,3 см соответственно на 28,5 и 26 дБ, на волнах 3,0 и 3,4 см — соответственно на 27,5 и 21 дБ [26].

Для применения на военных и пассажирских самолетах фирма *McMillan* создала экранирующий материал типа *T*, предназначенный для поглощения радиолокационного излучения частот в диапазоне 2,5–35 ГГц. Материал типа *T* широко применяется в самолетах *DC-3*, *DC-6*, *DC-7*, *Constellation*, *Viscount*, *Convair*. Он предназначен для защиты самолетных РЛС от помех, вызываемых нежелательным отражением сигналов. Материал типа *T* защищает экипаж самолета от вредного воздействия излучения самолетной РЛС. Материал при толщине 2,4 мм (1 м² — 0,76 кг) поглощает ЭМИ частотой 35 ГГц, при толщине 1,6 мм (1 м² — 0,83 кг) — 24 ГГц, при толщинах 4, 7 и 14 мм (1 м² соответственно 1,4; 1,7; 3 кг) поглощает 9375, 5400 и 2800 МГц. Коэффициент отражения материалов *T* 0,3–2% в зависимости от угла падения излучения.

Материалы на основе кремнийорганического каучука фирмы *Emerson* для антенных обтекателей (АО) самолетных РЛС, мачт и т. д. работают при 1–24 ГГц с ослаблением до 20 дБ (толщина для 5,5 ГГц — 2,3 мм), для диапазонов 3 см и 0,83–2,75 см (К) — менее 2 мм, приклеиваются клеем *Bond SF-C* на грунт *Primer 33* [26].

Для устранения нежелательных отражений электромагнитных волн фирмой *Boeing* (США) разработан экранирующий материал для антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов. Появление таких отражений объясняется тем, что при прохождении через плотные слои атмосферы или при полете в атмосфере с высокой скоростью у поверхности летательного аппарата образуется плазменная оболочка, плотный слой которой отражает электромагнитные волны. Отражение от такого слоя плазмы части электромагнитных сигналов, генерируемых передатчиком, который установлен на летательном аппарате, мешает нормальной работе данного передатчика. Для поглощения отраженных сигналов фирма разработала метод поворота вектора электрического поля отраженных сигналов с их последующим поглощением [103].

Антенный обтекатель изготавливается из керамического ферритового материала 1 (рис. 2.75, а) и листов диэлектрика 2. Ферритовый материал вызывает угловой поворот вектора электрического поля падающего электромагнитного излучения на 45° при одностороннем прохождении электромагнитных волн. Поскольку отраженные от плотного слоя плазмы сигналы вновь проходят через стенку антенного обтекателя, то общий угол поворота вектора

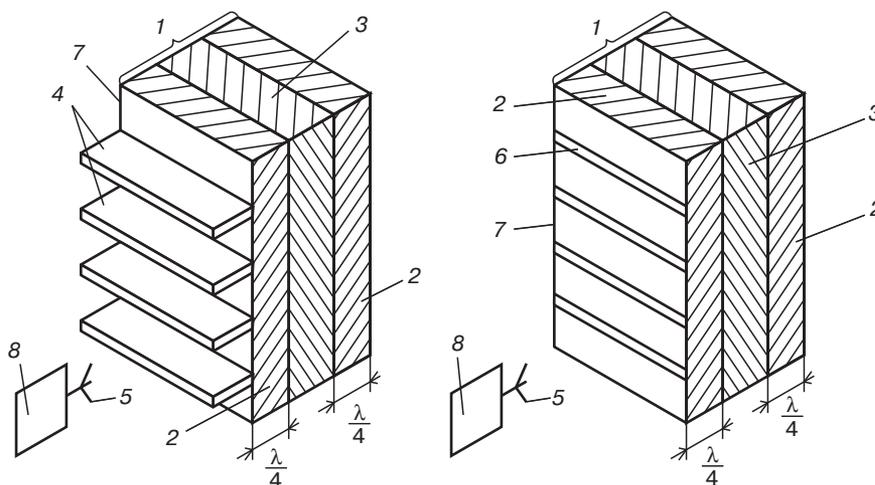


Рис. 2.75. Конструкция стенки антенного обтекателя с экранирующим радиопоглощающим покрытием [103]: 1 — стенка антенного обтекателя; 2 — лист диэлектрика; 3 — керамический ферритовый материал; 4 — лист радиопоглощающего материала; 5 — излучатель ЭМЭ; 6 — дипольный поглотитель, образованный параллельными металлическими проволоками; 7 — поверхность раздела; 8 — передатчик

электрического поля составляет 90° . Для поглощения отраженных сигналов на стенке антенного обтекателя со стороны передатчика размещены несколько листов поглощающего материала 3. Плоскости листов материала параллельны между собой и расположены перпендикулярно стенке обтекателя. Излучаемые передатчиком сигналы, вектор электрического поля которых расположен нормально по отношению к этим листам, не будут поглощаться данными листами, а отраженные сигналы (вектор электрического поля их повернут на 90°) будут поглощены данными листами.

В общем случае стенка антенного обтекателя должна поворачивать вектор электрического поля на угол $45^\circ + k \cdot (90^\circ)$ при одностороннем направлении излучения, тогда вектор электрического поля будет нормален к листам радиопоглощающего материала. В качестве поглощающего материала могут быть использованы также другие структуры, например диполи, образованные несколькими параллельными металлическими проволоками на стенке обтекателя.

На рис. 2.75 показана композиционная стенка 1 обтекателя, состоящая из магнитного ферритового слоя 3 (феррит этого слоя обеспечивает поворот вектора электрического поля на 45° при одностороннем прохождении излучения). Лист 3 имеет определенную электрическую толщину и помещен между двумя листами (с которыми он скреплен) диэлектрика 2, электрическая толщина каждого из которых равна четверти длины волны (пригодна толщина $\lambda/4 + k \cdot \lambda/2$). Диэлектрическая постоянная ферритового листа 3 равна квадрату диэлектрической постоянной листов диэлектриков 2. В конструкции обтекателя показаны излучатель электромагнитной энергии 5 и параллельные поглощающие элементы 4, прикрепленные перпендикулярно плоскости диэлектрического листа 2. Поглощающие элементы 4 могут быть выполнены, например, в виде тонких листов резистивного материала с диэлектрическим покрытием. При работе проходящее слева направо электромагнитное излучение не поглощается элементами 4, так как вектор электрического поля нормален к ним. При прохождении через стенку обтекателя и через плотный слой плазмы, лежащий вплотную к обтекателю, поглощение минимально. Любое отражение излучения от слоя, лежащего вне сферы влияния магнитного поля стенки обтекателя, пройдет опять через стенку обтекателя справа налево, а вектор электрического поля будет лежать в одной плоскости с плоскостью поверхности поглощающих элементов 4.

Таким образом, излучаемая электромагнитная энергия, вектор электрического поля которой нормален плоскости поглощающих элементов 4, не пройдет справа налево от поверхности раздела 7 к передатчику 5, так как вектор электрического поля отраженного излучения будет повернут на 90° и встретится с поглощающими элементами.

На рис. 2.75, б показаны поглощающие элементы 6, выполненные в виде параллельных металлических проволок, прикрепленных к поверхности диэлектрического листа 2. Отражения поглощаются элементами 6 на поверхности раздела 7.

Для экранирования антенн от паразитного излучения и отраженных сигналов разработан поглощающий слоистый материал, состоящий из слоев абсоленты с покрытием, чередующихся с пластиком или пенопластом, наполненным углеродом.

Поглощение излучения интенсивностью около 2,6 Вт/см² приводит к повышению температуры поглощающего материала. Воздушное охлаждение снижает рабочую температуру приблизительно до 165°C , однако при непредвиденной остановке воздушного потока радиопоглощающий материал также может подвергнуться деструкции. Поскольку размеры пор поглощающих пеноматериалов различны, параметры материала тоже переменны по его объему.

Этих недостатков лишен экранирующий поглощающий материал градиентного типа, разработанный фирмой *Raytheon*. Основные преимущества его таковы: 1) максимальное увеличение числа отражений радиолокационного излучения внутри материала и, как следствие этого, уменьшение обратного рассеяния падающего излучения; 2) эффективная толщина материала, характеризующая процесс поглощения, может в несколько раз превышать геометрические размеры материала; 3) отражение излучения сведено к минимуму путем уменьшения разности между диэлектрической проницаемостью поглотителя и диэлектрической проницаемостью воздуха; 4) путем подбора диэлектрических свойств и толщины слоев поглотителя можно получить ослабление радиолокационного излучения 40 дБ в диапазоне 10 см радиопоглощающим материалом толщиной 50 мм; 5) поглотитель может работать без необратимого ухудшения электрических или физических свойств при высоких температурах, возникающих в случае остановки охлаждающего воздушного потока; 6) поскольку поглотитель является пористым по всей толщине, в нем отсутствуют локальные зоны перегрева, возникающие без прямого воздушного охлаждения; 7) из материала можно получить поглотители любой формы.

Передняя поверхность материала (рис. 2.76, а) обозначена как 1, обратная сторона — 2 и боковые грани — 3. С обратной стороны материала имеется множество конических отверстий 4. Материал включает слои 5, 6, 7 и 8, а каждый из слоев — пористые полые керамические микросферы, соединенные клеем-цементом. Слой 5 состоит из микросфер 9, слои 6, 7 и 8 — из микросфер 10, 11 и 12 соответственно. Диаметр микросфер имеет одну и ту же величину в каждом отдельном слое, но изменяется от слоя к слою. Как показано на рис. 2.76, а, диаметр микросфер 12 слоя 8 больше диаметра микросфер 11 слоя 7. Наибольший диаметр — у микросфер слоя 8, наименьший — у микросфер слоя 5.

На рис. 2.76, б показан вид поглощающего материала. Отверстия 5 с обратной стороны 2 материала имеют конические стенки 3 с углом X° при вершине конуса. Пунктирные линии 14 показывают траекторию непоглощаемого радиолокационного сигнала. Из рис. 2.76, б видно, что радиолокационный сигнал проходит через поглощающий материал только в точках 15 и 16. Пунктирная линия 17 показывает траекторию поглощаемого радиолокационного сигнала, энергия которого уменьшается в результате многочисленных отражений в поглотителе. Отражение сигнала 17 в поглотителе обеспечивается не только стенками 13 отверстий, но и полыми микросферами 9–12 в каждом из слоев 5–8. При необходимости исключить прохождение сигнала в точках 15 и 16 (рис. 2.76, б) на обратную сторону и стенки отверстий поглотителя наносится отражающий слой 18 путем пламенного напыления алюминиевого покрытия или напрессовки алюминиевой фольги (рис. 2.76, в). Если покрывать отражающим слоем стенки отверстий нежелательно, то на обратную сторону поглотителя накладывают металлический лист (рис. 2.76, г).

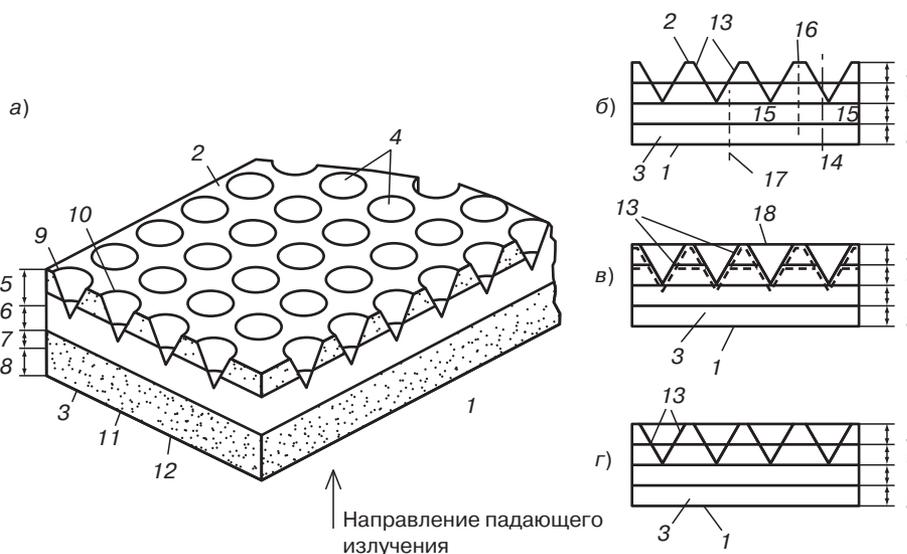


Рис. 2.76. Экранирующий материал фирмы Raytheon [104]: а — общий вид материала; б — экранирующий материал, вид сбоку; в — экранирующий материал с отражающим слоем; г — экранирующий материал с металлическим поглощающим слоем

Поскольку материал является весьма пористым, его можно эффективно охлаждать воздухом. Кроме того, поры материала имеют один и тот же размер, поэтому параметры материала постоянны по его объему. Поглотитель может быть подвергнут воздействию температур порядка 1315°C , в связи с чем данный поглощающий материал способен поглощать радиолокационное излучение интенсивностью $3\text{--}4,5 \text{ Вт/см}^2$ без ухудшения физических или электрических свойств. В качестве клея-цемента могут быть использованы фосфат алюминия, титанат бария и окись титана; микросферы выполнены из окиси алюминия. В состав каждого слоя могут быть добавлены такие поглощающие компоненты, как графит, титанат бария, сажа и окись никеля. Количество этих компонентов определяется требуемыми характеристиками материала.

Радиопоглощающий материал, полученный из данных компонентов, представляет собой блок размером $30,5 \times 46 \times 5,1$ см, состоящий из четырех слоев (толщина каждого слоя составляет 1,27 см). Путем построения блока такого материала из слоев четвертьволновой толщины с микросферами уменьшающегося (по слоям) диаметра можно получить поглотитель, диэлектрическая проницаемость верхнего слоя которого близка к диэлектрической проницаемости воздуха, что создает минимальное отражение падающего излучения от поверхности материала, а четвертьволновой принцип построения материала обеспечивает уменьшение отражения от границы слоев за счет гашения при интерференции отраженного излучения. Отражение излучения от слоев с большими диаметрами микросфер сведено к минимуму путем постепенного уменьшения диэлектрической проницаемости в направлении от слоев с большими диаметрами микросфер к слоям с меньшими диаметрами.

Характерным примером использования экранирующего радиопоглощающего материала для ослабления нежелательного отраженного излучения являются экранирующие обкладки, установленные ВМФ Англии на надстройках кораблей, в частности на мачтах. Экранирующие обкладки выполнены из поглощающего материала на основе пенополистирола с наполнителем из порошка углерода. Необходимость в экранировании конструкций надстройки кораблей обусловлена тем, что такие конструкции дают нежелательные отражения радиолокационных сигналов корабельных РЛС, в частности навигационных РЛС.

Фирма *Radiation Inc.* применила экранирующий поглощающий материал в разработанной ею антенной системе, устанавливаемой на авианосце для связи в системе корабль–спутник. Экранирующие материалы использованы для подавления боковых лепестков. Они обеспечивают ослабление нежелательного излучения 20 дБ, что приблизительно в 100 раз лучше ослабления излучения, достигаемого обычными методами экранирования.

Для экранирования электронной аппаратуры, антенных обтекателей и других устройств фирма *Emerson and Cuming, Inc.* (США) разработала экранирующий поглощающий материал *Eccosorb FBC* (масса 1 м^2 500 г), выпускаемый в виде ткани. Ткань имеет резистивную поверхность и отличается пирамидальной структурой. Предназначена она для работы в СВЧ-диапазоне на частотах свыше 2,4 ГГц. Фирма *Phillips* применяет поглощающий экранирующий материал для подавления нежелательного отраженного излучения в разработанном ею устройстве, предназначенном для управления величиной отражения радиолокационных сигналов (такое устройство может применяться на самолетах и кораблях). Диэлектрическая проницаемость материала выбирается равной его магнитной проницаемости [104].

Материалы фирмы *Plessey* (США), являющейся известным производителем экранирующих материалов для военных и пассажирских самолетов, имеют точные допуски на толщину и крепятся к металлической подложке. Подложка может быть гибкой или жесткой; в некоторых случаях материалы крепятся к металлическим конструкциям. Материалы предназначены для экранирования антенных обтекателей, аэродромных посадочных огней и других конструкций. Экраны из материалов фирмы *Plessey* (табл. 2.80) применяются авиакомпаниями для испытания импульсных повторителей систем опознавания «свой-чужой» и метеорадиолокаторов, а также систем, основанных на эффекте Доплера. Эти материалы могут поглощать энергию до 5 Вт/дюйм^2 (при креплении к теплоизлучающим поверхностям) [105].

Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения для узкодиапазонного материала фирмы *Plessey* для диапазона X (8–12,5 ГГц) при нормальном угле падения излучения приведена на рис. 2.77.

Широкодиапазонные экранирующие материалы *Eccosorb UPF* (толщина 38 мм, $58,6 \text{ кг/м}^2$; коэффициент отражения 1–3% при 100 МГц–12 ГГц), *FGM-40*, *FGM-125*, *RMP*, *SF* разработаны фирмой *Emerson and Cuming*.

Материалы *Eccosorb FGM-40* и *FGM-125* — тонкие гибкие широкополосные поглотители на основе наполненного кремнийорганического каучука (табл. 2.81) для экранирования антенных обтекателей. Материалы являются теплостойкими, могут использоваться также для уменьшения эффективной отражающей поверхности объектов.

Материал *Eccosorb RMP* является гибким поглотителем штифтового типа. Высота пирамидальных штифов около 25 мм, размер основания 25×25 мм. Материал изготавливают из кремнийорганического (*Eccosorb RMP-S-75*) или бутадиенового (*Eccosorb RMP-V-75*) каучука. Кремнийорганический текстолит *Eccosorb RMP-S-75* предназначен для применения на самолете-

Таблица 2.80. Узкодиапазонные экранирующие материалы фирмы *Plessey*

| Диапазон рабочих частот | Ширина диапазона при коэффициентах отражения, МГц | | Расчетный диапазон частот, ГГц | Отражение энергии в расчетном диапазоне частот, % | Размеры панелей, мм |
|-------------------------|---|-----|--------------------------------|---|---------------------|
| | 2% | 1% | | | |
| X | 1200 | 800 | 8,4–12 | 0,5 | 610×610 |
| C | 900 | 600 | 4–6 | 0,5 | 610×610 |
| C | 600 | 400 | 1,8–3,7 | 0,5 | 610×610 |
| C | 90 | 60 | 1,1–1,7 | 0,5 | 457×457 |

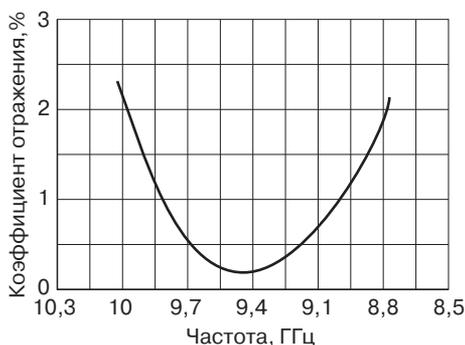


Рис. 2.77. Зависимость коэффициента отражения от частоты для узкодиапазонного материала фирмы Plessey [105]

Таблица 2.81. Свойства материалов FGM-40 и FGM-125 [105]

| Свойства | FGM-40 | FGM-125 |
|--------------------------|---------|------------|
| Рабочий диапазон, ГГц | 4–0 | 2–12 |
| Среднее затухание, дБ | 10 | 21 |
| Толщина, мм | 1 | 3,2 |
| Масса, кг/м ² | 4,88 | 21,2 |
| Размер листа, м | 0,3×0,9 | 0,3×0,9 |
| Рабочая температура, °С | До 260 | До 260 |
| Цвет | Серый | Коричневый |

тах при высоких температурах и большой мощности падающего излучения. Материал *Eccosorb RMP-V-75* может использоваться на открытом воздухе для экранирования корабельных мачт и палуб. Оба материала обеспечивают затухание 17–20 дБ в рабочем диапазоне; они не поддерживают горения. Материал *Eccosorb RMP-S-75* может длительно работать при температурах до 220 °С, кратковременно — до 260 °С. При 20 °С материал поглощает излучение мощностью 0,775 Вт/см², а с воздушным охлаждением — 1,55 Вт/см². Рабочая температура материала *Eccosorb RMP-W-75* составляет 150 °С. Поглощение излучения этими материалами не зависит от поляризации излучения и почти не изменяется при углах падения излучения до 60°. Характеристики материалов *Eccosorb RMP-S-75* и *RMP-V-75* приведены в табл. 2.82.

Для экранирования антенных обтекателей, корабельных мачт и антенн РЛС созданы материалы *Eccosorb SF*. Это тонкие поглотители резонансного типа из кремнийорганического каучука, интервал их рабочих температур от –54 до +260 °С. Материал поставляется в листах размером 305×305 мм. Обозначение материала указывает на его резонансную частоту. Так, например, для материала *Eccosorb SF-5,5* резонансная частота составляет 5,5 ГГц. Чтобы обеспечить надлежащее функционирование, материал устанавливают на металлическую подложку.

Для частотного диапазона 1–5 ГГц вместо материала *SF* выпускается материал *SF-T*. Толщина и вес материала *SF-T* в два раза меньше, чем материала *SF*. Материал *SF* выпускается для работы на частотах до 16 ГГц.

Свойства экранирующих материалов фирмы *McMillan* приведены в табл. 2.83.

Характерным примером использования экранирующих материалов является применение поглотителя *AN-75* для экранирования антенн в экспериментах Стэнфордского института (по взаимодействию плазмы, образующейся в условиях гиперзвукового полета, с антеннами).

Таблица 2.82. Свойства материалов *Eccosorb RMP-S-75* и *Eccosorb RMP-V-75*

| Свойства | <i>Eccosorb RMP-S-75</i> | <i>Eccosorb RMP-V-75</i> |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Рабочая длина волны, см | 12,5 и короче | 12,5 и короче |
| Рабочий диапазон частот, ГГц | 2,4 и выше | 2,4 и выше |
| Тип полимера | Кремнийорганический каучук | Бутадиеновый каучук |
| Цвет | Черный | Черный |
| Размер листа, мм | 305×305 | 305×305 |
| Высота пирамидальных шипов, мм | 25,4 | 25,4 |
| Размер основания шипа, мм | 25,4×25,4 | 25,4×25,4 |
| Масса, кг/м ² | Около 4,88 | Около 4,88 |
| Рабочая температура, °С | 220 | 150 |
| Затухание, дБ на частоте: | | |
| 3 ГГц | 17 | 17 |
| 5 ГГц | 18 | 50 |
| 10 ГГц | 20 | 24 |

Таблица 2.83. Экранирующие материалы фирмы *McMilan* [105]

| Тип материала | Обозначение материала | Диапазон частот | Толщина, мм | Размеры, мм | Форма материала | Примечание |
|-------------------|-----------------------|-----------------|---|---------------|---|---|
| <i>Neo-Type-T</i> | <i>Nco-Type-2H</i> | 1–60 ГГц | Для диапазона <i>K</i> – 0,8 мм, <i>K_U</i> – 1,6 мм, <i>X</i> – 4 мм, <i>S</i> – 14,3 мм | 457×914 | Гибкий пенопласт | Весьма легкий высокотемпературный поглотитель для применения в самолетах. Тонкий, легкий, гибкий, работает до 132 °С |
| <i>SE-T</i> | <i>SE-T-2</i> | По требованию | 3,2±0,4 | 406×914 | Жесткая трехслойная конструкция из пластика | В условиях космоса выделяет пренебрежимо малое количество газов в вакууме 10 мм рт.ст. |
| <i>RS-T</i> | <i>RS-T-2</i> | По требованию | 6,4±0,8 | Нестандартные | Сотовая трехслойная конструкция из пластика | Конструкционное применение. Легкий, несущий нагрузки материал для работы при высоких температурах |

Эти эксперименты являлись частью исследовательской программы по вводу в ионизированную оболочку различных веществ для обеспечения связи с летательными аппаратами, проходящими через плотные слои атмосферы (программа *Radio Attenuation Measurement, RAM*).

Для получения крупногабаритных экранов используют поглощающие материалы с наполнителями в виде керамических частиц и полимерных матриц в виде пен. Способность поглощать электромагнитное излучение зависит от объема наполнителя и поэтому в ряде случаев приходится вводить в полимерную матрицу значительный объем керамического наполнителя, что ухудшает процесс пенообразования и переработки.

Металлополимеры доменной структуры решают эту проблему более успешно. Фирма *Grünzweig & Hartmann* (Германия) разработала поглощающий материал (рис. 2.78, а, б, в и г) для экранов с макросферами с улучшенной способностью поглощать электромагнитное излучение. Диаметр макросфер равен $0,1-5 \lambda$, где λ — длина волны падающего излучения. Каждая макросфера состоит из непроводящего немагнитного сердечника, на который нанесен один или более слоев покрытия из материала, обладающего электропроводностью и (или) магнитной проницаемостью («активные» слои). Диаметр сердечника макросферы составляет 1–10 мм. Наилучшее поглощение было получено для электромагнитного излучения, длина волны которого равна диаметру сердечника. Толщина покрытия на сердечнике может быть не более 0,1 его диаметра, т. е. от 0,01 до 0,05 мм в случае сердечников диаметром 1–5 мм. Если используется несколько таких слоев, то их разделяют защитным («инертным») слоем из материала, не обладающего ни электропроводностью, ни магнитной проницаемостью. Такой защитный слой может быть использован также в качестве внешнего покрытия макросферы независимо от числа активных слоев на сердечнике.

Электропроводность «активного» слоя получают за счет введения углеродных частиц (сажа и/или графит) в диэлектрическое связующее. Магнитную проницаемость слоя получают за счет включения в связующее ферромагнитных частиц с низкой остаточной намагниченностью, например, частиц карбонильного железа или ферритов. Часто целесообразно вместо одного нанести отдельно два слоя, один из которых обладал бы электропроводностью, а другой — магнитной проницаемостью, хотя оба типа частиц могут быть совмещены в одном слое. В качестве тела поглотителя могут использоваться более или менее жесткие конструкции, например сотовые. В этом случае ячейки сот образуют несколько рядов, разделенных их перегородками, соосными с направлением распространения падающего излучения. В ячейках сот размещают макросферы в матрице из пенопласта.

Более гибкая конструкция поглотителя представляет собой полимерный лист (или блок) с диспергированными в нем макросферами. Для того чтобы значение входного импеданса на граничной поверхности между поглощающим материалом и пространством приближалось к

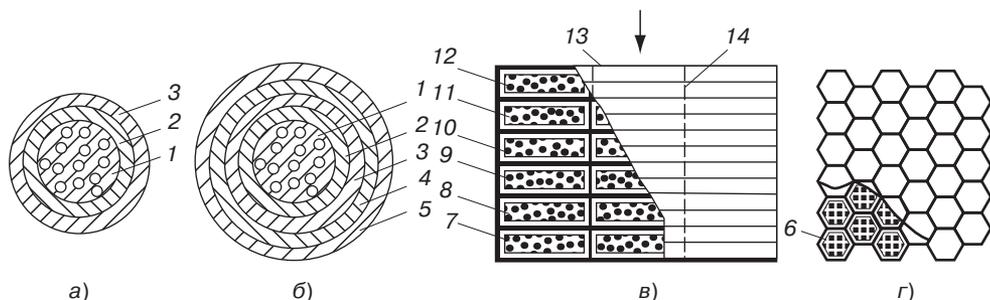


Рис. 2.78. Радиопоглощающий материал для крупногабаритных экранов фирмы *Grünzweig & Hartmann* [105]: 1 — сердечник; 2 — проводящий слой; 3, 5 — слои из диэлектрика; 4 — активный слой; 6 — шестигранная ячейка сотовая ячейка; 7–12 — ряды шестигранных ячеек сот; 13 — корпус; 14 — перегородки

значению граничного импеданса свободного пространства, концентрация проводящих частиц в активных слоях на макросферах в различных их рядах постепенно уменьшается в направлении распространения падающего излучения. Это позволяет свести к минимуму отражение в точке падения излучения. При использовании проводящих частиц из графита их концентрация может варьироваться от 1 до 200 кг на 1 м³ макросфер. Более высокие концентрации неэффективны. В одном ряду макросфер могут использоваться макросферы различных диаметров от 0,1 до 5λ.

На рис. 2.78, *a* показана макросфера с сердечником 1 из пенополистирола с покрытием из проводящего внутреннего слоя 2 и внешнего слоя из диэлектрика 3. Слой 2 состоит из связующего, обладающего адгезией к введенным в него частицам графита или сажи; слой 3 состоит из обычного лака или эмали. На рис. 2.78, *b* изображена макросфера более сложной структуры, в которую входят те же слои, что и на рис. 2.78, *a*, слои 1, 2 и 3, а также активный слой 4 и слой из диэлектрика 5. Слой 4 отличается от слоя 2 тем, что включает частицы феррита или карбонильного железа. Слои 3 и 5 идентичны.

На рис. 2.78, *в* и *г* показана сотовая конструкция с ребрами, образующими шестигранные ячейки 6, расположенные в несколько рядов (7–12). Сотовая конструкция заключена в корпус 13, разделенный перегородками 14. Каждая ячейка 6 заполнена пенопластом того же состава, что и сердечники макросфер на рис. 2.78, *a*. Проводимость слоев 1 этих макросфер уменьшается по направлению от 7 ряда к 12 ряду. Концентрация графитовых частиц составляет в 7 ряду — 100 кг/м³; в 8 ряду — 80 кг/м³; в 9 ряду — 40 кг/м³; в ряду 10 — 20 кг/м³; в ряду 11 — 10 кг/м³; в ряду 12 — 5 кг/м³. Сотовая конструкция 6 изготовлена из пропитанной фенольным связующим бумаги или из полистирола. Примером проводящего слоя 2 является покрытие следующего состава (в кг): 19,149 графита; 2,128 сажи марки А-31 плотностью 1,8 г/см³ с размером частиц 25–50 мкм; 63,830 шеллака, растворенного в этиловом спирте в весовом соотношении 1:2; 2,128 бентонита (*Bentone* 34), растворенного в ксилоле в весовом соотношении 1:5; 12,765 этиленгликоля. Такое покрытие предназначено для сердечников из полистирола.

Для применения на сердечниках из фенольных, полиэфирных и эпоксидных связующих, синтетических каучуков, поливинилхлорида или полиуретана предназначено проводящее покрытие следующего состава (в кг): 23,196 графита; 2,588 сажи; 12,371 полиэфира *Desmophen* 1100; 5,498 полиэфира *Desmophen* 800, растворенного в 98% бутилацетате в весовом соотношении 2:1; 12,028 бутилацетата (концентрации 98%); 0,344 бентонита, растворенного в ксилоле в весовом соотношении 1:5; 12,028 этилацетата; 3,436 хлорированного дифенила марки *Clophen* А60, растворенного в ксилоле в весовом соотношении 4:1; 17,182 толуола; 3,430 метиленгликоляцетата; 3,093 нитрата целлюлозы, растворенного в 45%-ном изопропиловом спирте; 4,811 ксилолпропиленовый пластификатор. Эту смесь смешивают с изоцианатом марки *Desmodur* L75, функциональные группы которого реагируют с гидроксильными группами полиэфирных фракций (*Desmophen* 800, 1100). На 165 частей (по весу) компонента *Desmodur* L75 приходится 100 частей компонента *Desmophen* 800 и 125 частей компонента *Desmophen* 1100 [105].

В широкодиапазонных магнитоэлектрических экранирующих материалах используют ферриты различного состава.

Ряд ферритовых экранирующих материалов разработан фирмой *TDK Electronics* (Япония). В них используется эффект магнитного резонанса или магнитной релаксации на высоких частотах. Один из таких поглотителей представляет собой смесь ферритового порошка с кремнийорганической резиной, нанесенную на металлическую подложку.

Ферритовые поглотители фирмы *TDK Electronics* применяются для экранирования от помех, вызываемых микродвигателями и электронными агрегатами.

Для поглощения низкочастотного излучения с большими длинами волн обычные поглотители, выполненные только из диэлектрического материала, должны быть довольно толстыми. Для поглощения излучения с частотой 150 МГц необходим поглотитель толщиной 150 см. Используя поглотители из ферритов, их толщину можно довести до 8 мм почти для всех рабочих длин волн, однако иногда и эта толщина является слишком большой.

Одной из насущных проблем японские исследователи считают борьбу с искажениями телевизионных изображений, являющимися результатом интерференции волн, отраженных от резервуаров, башен и высоких зданий. Эта проблема может быть решена путем нанесения покрытия из экранирующего радиопоглощающего материала на внешние стороны зданий, однако для этого необходим поглотитель, толщина которого меньше 8 мм и который имеет несколько различных резонансных частот.

Если порошком феррита $Mg-Cu-Xn$ наполнить резину в пропорции $X:1$ (где X – число частей феррита), то частота поглощаемого излучения определяется числом X . Величина магнитной проницаемости феррита $Mg-Cu-Zn$ около 200; он поглощает излучение частотой 500 МГц. В эластичном магнитодиэлектрике ($X = 3; 1,5$ или 10) частота поглощаемого излучения составляет соответственно 4000, 2200 или 1500 МГц. Если изготовить композицию из феррита $Mg-Zn$ с магнитной проницаемостью 5000 и резины (число $X = 10$), то частота поглощаемого излучения составит 500 МГц. В качестве диэлектрического компонента могут быть использованы другие полимеры. К тыльной стороне поглотителя, устанавливаемого без зазора на объекте, крепится металлическая пластина.

Поглотитель из смеси двух (или более) типов ферритов, резонансные частоты которых различны, работает в широком диапазоне частот.

Толщина материала, необходимая для поглощения излучения требуемой частоты, определяется относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r ; при использовании диэлектрического материала с $\epsilon_r > 5$ толщина поглотителя может быть значительно снижена (рис. 2.79). Применение диэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью позволяют иметь столь малую толщину поглотителя, что он может наноситься по лакокрасочной технологии. Поглотитель может быть также изготовлен из смеси различных ферритов, например, трех ферритов, условно обозначенных как A, B и C .

Зависимость мнимой части (μ'') комплексной магнитной проницаемости от частоты приведена на рис. 2.80. Там же показана результирующая характеристика поглотителя из феррита A, B и C . Из рисунка следует, что такой поглотитель эффективен в широком диапазоне частот. Поглотитель полусферической формы обладает хорошим поглощением при различных углах падения излучения (рис. 2.81) [105]. Определенные составы и конструкции экранирующих и поглощающих ЭМИ материалов использованы и при разработке покрытий, уменьшающих радиолокационную заметность объектов (УРЗ, технология *Stealth*).

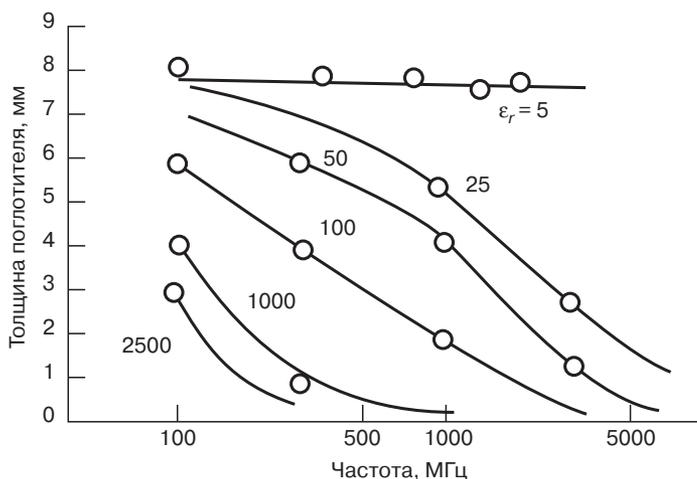


Рис. 2.79. Толщина материала, необходимая для поглощения излучения требуемой частоты [105]

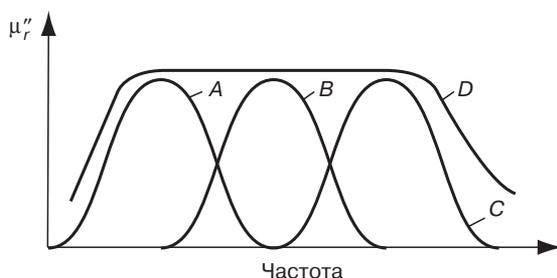


Рис. 2.80. Зависимость мнимой части магнитной проницаемости от частоты для трех различных ферритов [105]

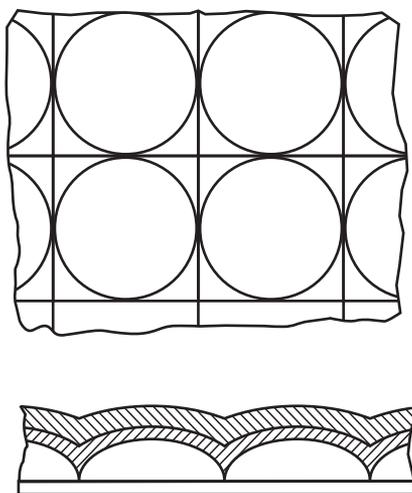


Рис. 2.81. Поглотитель в виде полусфер (Токийский технологический институт) [105]

2.4.2. Материалы для создания радиопоглощающих элементов в волноводах и коаксиальных линиях [26, 105]

Магнитоэлектрические поглощающие ЭМИ элементы ВЧ аппаратуры (оконечные нагрузки, аттенуаторы, эквиваленты антенн) подавляют поверхностные токи в цепях и линиях высокочастотной спецсвязи и уменьшают отражение от объектов. Используется большой ассортимент материалов с полимерными и керамическими диэлектрическими связующими и магнитными (металлы, углеродные материалы, ферриты) наполнителями.

Кремнийорганические магнитоэлектрики *Custom Load 4201* в виде прутков и листов в качестве поглощающих большие мощности в элементах волноводов в сантиметровом диапазоне, обеспечивают при 10 ГГц затухание 8–80 дБ/см при $-50...+265$ °С. Материалы для изготовления поглощающих элементов высокочастотной аппаратуры фирмы *Emerson and Cuming Eccosorb MF, HF, WG* и *BR* (керамическая пена с ρ 1,28 и 0,32 г/м³, $T_{\text{раб}}$ 540 и 430 °С), *LS* (эластичная пена), *CR* (заливочный компаунд), *PM* (вспенивающиеся гранулы) обеспечивают высокий уровень затухания (табл. 2.84–2.86).

Таблица 2.84. Свойства материалов *Eccosorb MF* [26]

| Марка Тип <i>Eccosorb</i> | Диэлектрическая постоянная ϵ | Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ | μ | Коэффициент рассеяния | Затухание ЭМИ, дБ/см |
|------------------------------|--|--|-------|--------------------------|-------------------------|
| При $3 \cdot 10^6$ Гц: | | | | | |
| <i>MF124</i> | 26 | 0,114 | 4,0 | 0,48 | 17 |
| <i>MF117</i> | 21,8 | 0,068 | 3,4 | 0,25 | 7 |
| <i>MF116</i> | 16,7 | 0,060 | 3,0 | 0,12 | 5,8 |
| <i>MF114</i> | 10 | 0,055 | 1,9 | 0,10 | 1,9 |
| <i>MF112</i> | 5,2 | 0,048 | 1,3 | 0,07 | 0,7 |
| <i>MF10</i> | 3,6 | 0,040 | 1,1 | 0,01 | 0,3 |
| При 10^{10} Гц: | | | | | |
| <i>MF124</i> | 25, | 0,118 | 2,1 | 1,2 | 69 |
| <i>MF117</i> | 21,2 | 0,074 | 1,6 | 0,75 | 34 |
| <i>MF116</i> | 16,6 | 0,052 | 1,2 | 0,50 | 24 |
| <i>MF114</i> | 9,7 | 0,058 | 1,0 | 0,36 | 12 |
| <i>MF112</i> | 5,1 | 0,051 | 0,9 | 0,25 | 5 |
| <i>MF100</i> | 3,3 | 0,047 | 0,9 | 0,18 | 2,5 |

Примечание. Другие типы *M500F*, *MF500*, 116, 114, 113, 110 (длительная работа при 260°C в коаксиальных и волноводных аттенуаторах и нагрузках).

Таблица 2.85. Свойства материалов *Eccosorb BR* [26]

| Тип | Диэлектрическая постоянная, ϵ | Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ | Затухание ЭМИ, дБ |
|--------------|---|---|-------------------|
| <i>BR240</i> | 10 | 0,8 | 40 |
| <i>BR250</i> | 6 | 0,4 | 20 |
| <i>BR260</i> | 3 | 0,2 | 10 |

Значения даны для частот 800–10 000 МГц. Затухание для ЭМИ листа толщиной 6,3 мм в сантиметровом диапазоне волн.

Таблица 2.86. Свойства материалов *Eccosorb LS* [26]

| Тип <i>Eccosorb</i> | Диэлектрическая постоянная, ϵ | Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ | Затухание ЭМИ, дБ | Коэффициент ослабления при отражении энергии, дБ |
|------------------------|---|--|----------------------|--|
| <i>LS-22</i> | 1,8 | 0,5 | 5 | 15 |
| <i>LS-24</i> | 4 | 0,8 | 10 | 10 |
| <i>LS-26</i> | 10 | 1,2 | 15 | 5 |

Сотовые материалы с открытыми ячейками *HC* предназначены для поглощения электромагнитного излучения или применения в качестве поглощающих и оконечных нагрузок в линиях передачи сантиметровых волн: *HC-12* толщиной 19 мм с вносимыми потерями 12 дБ на частоте 3 ГГц при нормальном угле падения излучения и материал *HC-20* толщиной 19 мм с вносимыми потерями 20 дБ на частоте 3 ГГц при нормальном угле падения излучения.

Этой же фирмой выпущен ряд материалов марок *Eccosorb LS-D*, *TE*, *CR-S*, *ZN*, *MP*, *MF500F*, *MF-S*.

Хорошими абляционными характеристиками в условиях теплового потока высокой мощности обладает радиопоглощающий материал *Eccosorb LS-D* на основе кремнийорганического каучука с наполнителем из углерода. Он поставляется в виде листов размером 305×305×6,3 мм и в виде заливочного компаунда. *Eccosorb LS-D80* представляет собой пенопласт с закрытыми ячейками и имеет отличные высокотемпературные характеристики и низкую плотность. Может применяться в качестве оконечных нагрузок или в аттенуаторах линий передачи, подавляет поверхностные токи и таким образом уменьшает отражение от объектов.

Волноводные нагруженные элементы *Eccosorb TE* представляют собой клинья из радиопоглощающего диэлектрика. Отношение длины клина к ширине основания равно 10:1, что обеспечивает весьма низкий КСВН элементов (табл. 2.87).

Из кремнийорганических эластичных магнетодиэлектриков *Eccosorb CD-S-117*, *CR-S-124* изготавливают конусы, пирамиды, клиновидные поглотители для оконечных нагрузок, для использования в антеннах и линиях передач (табл. 2.88).

Керамический ферритовый поглотитель *Eccosorb ZN* в виде плиток 25×25×3,2 мм для аттенуаторов и оконечных нагрузок имеет высокие потери в диапазоне частот от 30 МГц до 50 ГГц. Поглотитель *Eccosorb ZN* может применяться также для подавления поверхностных токов на антенных волноводах и отражающих щелях. В последнем случае плитки из материала *Eccosorb ZN*, установленные на поверхности сложной металлической цели, значительно уменьшают эффективную отражающую поверхность. Материал *Eccosorb ZN* обладает как диэлектрическими, так и магнитными потерями (табл. 2.89). При температурах выше 315 °С преобладают диэлектрические потери, а при температурах ниже 315 °С — магнитные.

Таблица 2.87. Характеристики волноводных элементов ТЕ [105]

| Свойства | <i>TE-S1</i> | <i>TE-C1</i> | <i>TE-A1</i> | <i>TE-X1</i> | <i>TE-Ku1</i> |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Диапазон | <i>S</i> | <i>C</i> | <i>A</i> | <i>X</i> | <i>Ku</i> |
| Рабочий интервал частот, ГГц | 2,6–3,96 | 3,95–5,85 | 5,85–8,20 | 8,20–12,40 | 12,40–18,00 |
| Длина элемента, мм | 311 | 222 | 168 | 108 | 70 |
| Максимальный КВСН | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 |
| Средняя мощность, Вт | 40 | 20 | 10 | 6 | 4 |

Таблица 2.88. Характеристики материалов *Eccosorb CR-S* (>4000 В/мм, $\rho_V > 10^{10}$ Ом·см) [105]

| Свойства | <i>CR-S-117</i> (4,16 г/см ³) | <i>CR-S-124</i> (4,55 г/см ³) |
|--------------------------------|---|---|
| Затухание, дБ/см, на частотах: | | |
| 1,5 ГГц | 2,9 | 5,6 |
| 3 ГГц | 7 | 20 |
| 8,6 ГГц | 23 | 63 |
| 100 ГГц | 34 | 69 |

Таблица 2.89. Характеристики материала *Eccosorb ZN* [105]

| Характеристики | Частота | | |
|-------------------------------------|---------|-------|--------|
| | 200 МГц | 1 ГГц | 10 ГГц |
| Диэлектрическая проницаемость | 26 | 19 | 16 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь | 1,9 | 0,43 | 0,13 |
| Магнитная проницаемость | 14 | 1,2 | 0,1 |
| Тангенс угла магнитных потерь | 3,2 | 10 | 3,0 |
| Затухание, дБ/см | 17 | 23 | 26 |

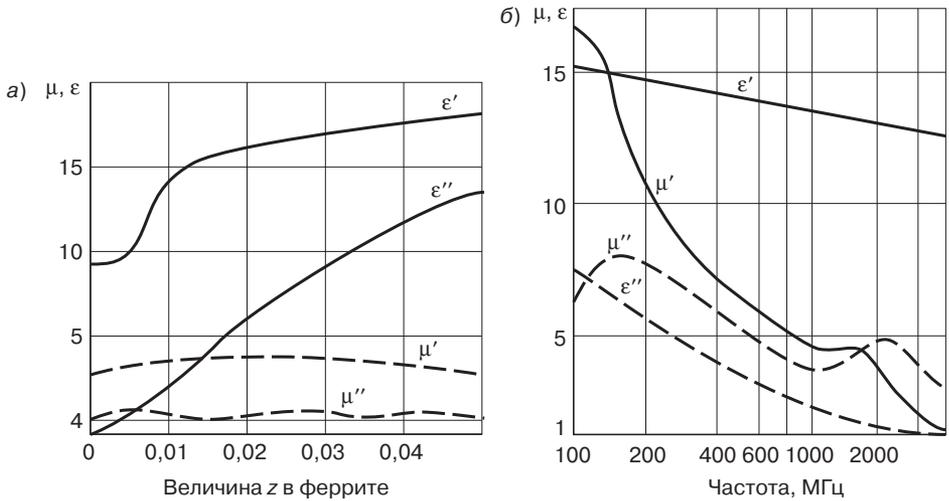


Рис. 2.82. Зависимость комплексных магнитной проницаемости и диэлектрической постоянной материала фирмы Thomson CS-F от: а — параметра z ; б — частоты [105]

Ферромагнитные поглотители фирмы Thomson (Франция) $\text{Ni}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Zn}_y\text{Si}_z\text{Fe}_2\text{O}_4$, где $0 \leq z \leq 0,05$; $0,1 \leq x \leq 0,2$; $0,2 \leq y \leq 0,3$ предназначены для получения поглощающих слоев на металлической поверхности. Величина затухания в коаксиальной линии для поглощающего слоя толщиной 2 мм на частоте 2,8 ГГц составляет 12 дБ.

На рис. 2.82, а показана зависимость комплексной магнитной проницаемости (μ' и μ'') и комплексной диэлектрической постоянной от параметра z для материалов, у которых параметры x и y соответственно равны 0,15 и 0,25, причем частота электромагнитных волн постоянна и равна 2,8 ГГц. На рис. 2.82, б изображены зависимости тех же величин от частоты для аналогичного материала, но при $z = 0$; частота при этом изменяется от 100 до 4000 МГц [105].

2.4.3. Радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции безэховых камер

Безэховые камеры дают возможность измерений отражающих и поглощающих ЭМЭ параметров в условиях, близких к «свободному» пространству. Современные безэховые камеры обеспечивают допустимый уровень отраженного сигнала в месте приема в диапазоне частот от 30 МГц до 100 ГГц. Уровень мощности, отраженной от внутренней поверхности камеры или «чистота» (*quietness*) камеры представляет собой ее характеристику, выражаемую в децибелах. Смысл этой величины многозначен и в конкретных случаях зависит от характера работы. Для случая измерений антенных характеристик эта величина определяется как отношение плотности потока отраженной волны к плотности потока падающей волны в заданной области камеры, измеряемое фиксированными типами передающей и приемной антенн.

Получили распространение следующие типы безэховых камер: с поперечными гофрами, с продольными гофрами и апертурного типа. В камерах с продольными гофрами направление гофр соответствует направлению от излучателя к испытываемому объекту.

Камеры апертурного типа используются в тех случаях, когда по тем или иным причинам имеется одностороннее распространение энергии от передатчика к приемнику. Основное назначение апертурной конструкции состоит в том, чтобы отверстие (апертура) препятствовало непосредственному освещению боковых стен, пола и потолка в центральной части камеры между апертурой и безэховой зоной. Для того чтобы свести к минимуму нежелательную

дифракцию на апертуре, раскрывную часть со стороны передатчика покрывают высококачественным поглощающим материалом. Этот же материал наносится на вогнутую внутрь противоположную стенку камеры.

Вопросы изменения характеристик материалов и характеристик антенных устройств обусловили необходимость совершенствования имеющихся и разработки новых безэховых камер, в которых стены, пол и потолок выполнены из поглощающих материалов. В безэховых камерах частотная интерференция практически отсутствует, что обеспечивает требуемую точность измерений. Теоретически уровень отраженной мощности в безэховой камере составляет 0,1% или -40 дБ, но практически уровень отраженной мощности значительно ниже из-за дифракции на ребрах гофр.

Максимальный уровень отраженного сигнала в безэховых камерах определяется, помимо характеристик поглощающего материала, такими факторами, как частотой сигнала, направленность приемной и передающей антенн, поляризацией поля, плоскостью, в которой производится измерение этого уровня, характеристиками опоры антенны, расположением антенн в камере и, в частности, расстоянием от внутренних поверхностей в камере, числом полученных интерферограмм и разумной интерпретацией их, а также характеристиками применяемой измерительной аппаратуры. Разработки поглотителей для камер ведутся в области материалов, созданных на основе полимеров и ПМ, неорганических (керамических и ферритовых) материалов и комбинированных магнитодиэлектриков.

Безэховые камеры СВЧ широко используются как для измерения характеристик антенных систем и обтекателей, так и для определения эффективных поверхностей рассеяния (ЭПР) различных материалов и целей. В безэховых камерах проводятся главным образом следующие измерения: 1) диаграмм направленности антенн, 2) эффективных площадей рассеяния активных и пассивных целей, 3) импеданса антенн, связи антенн или электрической совместности антенн.

Современные безэховые камеры представляют собой сложные и дорогостоящие сооружения. Затраты фирмы *Lockheed Missiles and Space* на строительство безэховой камеры с пенополиуретановыми поглотителями (пирамиды высотой 3,8 м и основанием $0,6 \times 0,6$ м), предназначенной для испытаний антенн и бортового оборудования космических аппаратов составили в 1969 г. 1,5 млн долларов. Исследования, проводимые в области поглощающих материалов для безэховых камер, направлены на получение лучшего коэффициента отражения, большего диапазона работы и снижение габаритов поглотителей. В большинстве работ, опубликованных изготовителями поглощающих материалов для безэховых камер, рекламируются поглотители, обеспечивающие ослабление сигнала до 20–60 дБ. Для поглощения электромагнитного излучения частотой порядка 500 МГц требуются сравнительно высокие пирамидальные поглотители (высотой не менее 1 м).

Размеры безэховых помещений должны быть достаточно большими, чтобы цель могла быть установлена как можно дальше от задней стены, которую вместе с тем необходимо покрывать поглощающими материалами. Построены безэховые камеры, имеющие длину 40–50 м.

Если размеры модели настолько велики, что расстояние до нее должно превышать 30–40 м, используют и специальные открытые полигоны. На таких полигонах можно проводить исследования ЭПР целей как находящихся в свободном пространстве, так и на границе раздела. В последнем случае приемно-передающую антенну и цель располагают у поверхности земли на такой высоте, что при взаимодействии прямого и отраженного от земли лучей в интерференционной картине получается максимум.

За рубежом в 1975 г. работало свыше 400 безэховых камер [105]. Максимальная длина камер 53 м, максимальные размеры поперечного сечения 15×15 м. Такие камеры позволяют производить измерения на частотах от 30 МГц до 100 ГГц.

В безэховых камерах используются широкодиапазонные материалы. Для приближения характеристик материалов к характеристикам свободного пространства используются следующие способы: 1) передней поверхности поглощающего материала придается определенная форма

(ячеистая, пирамидальная или шиповидная), что увеличивает число отражений; 2) постепенно по толщине материала увеличивают содержание наполнителей, вызывающих магнитодиэлектрические потери; 3) совместно используют первые два способа; 4) передней поверхности материала придают плоскую форму, а увеличение магнитных и диэлектрических потерь осуществляют с помощью специальных конических вставок; 5) поглотитель изготавливают из нескольких различных слоев материала, вызывающего потери, причем величина потерь возрастает по мере увеличения толщины поглотителя.

В поглощающем материале фирмы *Raytheon* (рис. 2.83) использованы огнестойкие компоненты, что сводит к минимуму эффект термического воздействия при преобразовании электромагнитной энергии в тепловую. Этот материал предназначен для безэховых камер, в которых испытываются радиолокационные передатчики высокой мощности, энергия излучения которых больше 15 Вт/дюйм². При испытании таких передатчиков температура поглотителя повышается настолько, что органические материалы воспламеняются.

Отражение электромагнитного излучения от этого материала, независимо от угла падения излучения, сведено к минимуму. Материал состоит из листа волокнистого материала 1. Коническая часть 2 выполняется обычными методами. Волокнистый материал представляет собой войлок из керамических волокон на основе окиси алюминия и окиси кремния. На одной из сторон слоя размещен материал 3, поглощающий электромагнитное излучение и состоящий из частиц графита. Как указывают пунктирные линии (обозначающие слой 3), средняя плотность материала изменяется обратно пропорционально расстоянию от поверхности слоя. Удельное сопротивление пропитанной графитом части слоя изменяется также обратно пропорционально расстоянию от поверхности слоя. Внутренняя поверхность материала защищена алюминиевой краской 4. Материал листа выбирается таким, чтобы его показатель преломления был приблизительно равен показателю преломления воздуха. За счет этого коэффициент отражения данного материала весьма мал независимо от угла падения излучения.

Большой ассортимент поглощающих материалов из пенопластов в виде блоков и пирамид разработан фирмой *Emerson and Cuming* (США, табл. 2.90).

Стенка камеры, у которой находится излучатель, и стенка, у которой находится исследуемый объект, имеют вертикальный клинообразный гофр, покрытый поглощающим материалом *Eccosorb CV-6*.

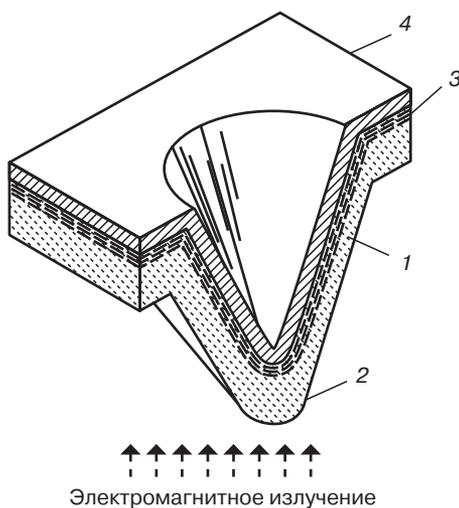


Рис. 2.83. Негорючий радиопоглощающий материал фирмы *Raytheon* [104]

Таблица 2.90. Радиопоглощающие материалы фирмы *Emerson and Cuming* для безэховых камер [26]

| Тип материала | Диапазон волн, см | Отраженная мощность, % | Размер блоков, м | Толщина, мм |
|--|-------------------|------------------------|------------------|-------------|
| <i>CV-6</i> Пеноматериал, диэлектрик, не горит, 1 м ² весит 4 кг (<i>CV-6</i>) и 9 кг (<i>CV-9</i>). | <4 | 0,01 | 0,6×0,6 | 152 |
| <i>CV-9</i> | <12 | | | 228 |
| <i>CV-12</i> Пеноматериал, диэлектрик, не горит, жесткий 1 м ² весит 8 кг (<i>CV-12</i>) и 12 кг (<i>CV-18</i>). | <32 | | | 305 |
| <i>CV-18</i> | <66 | | | 457 |
| <i>FR-330</i> Твердый пеноматериал, водонепроницаем, не горит, окрашен в белый цвет (материал <i>FR-H</i>) имеет те же параметры, выдерживает температуры до 180 °С, 1 м ² весит 2, 4, 5 и 10 кг соответственно). | <13 | 1 | 0,9×0,3 | 50 |
| <i>FR-340</i> | <32 | | | 100 |
| <i>FR-350</i> | <66 | | | 200 |
| <i>FRL-330</i> Материал для покрытия полов (модификация материала типа <i>FR</i>), 1 м ² весит 3,5; 6 и 10 кг соответственно. | <13 | 2 | 1×0,3 | 50 |
| <i>FRL-340</i> | <32 | | | 100 |
| <i>FRL-350</i> | <66 | | | 200 |
| <i>CHW-560</i> Пеноматериал, твердый, с пленкой из стеклопластика, выдерживает нагрузку до 20 МПа. Материалы 580 и 590 – пеноблоки, 560 и 570 – пирамиды. Модификация <i>CHW-H</i> выдерживает до 180 °С. 1 м ² весит 9,5; 6,8; 3,6 и 2,7 кг соответственно. | <600 | 1 | 0,6×0,6 | 1830 |
| <i>CHW-570</i> | <300 | | | 900 |
| <i>CHW-580</i> | <150 | | | 450 |
| <i>CHW-590</i> | <100 | | | 300 |

Фирма *Boeing Aircraft Co.* применяет для покрытия внутренних поверхностей камеры поглощающий материал *Eccosorb FR-300*. Стенка камеры противоположная той, у которой помещается исследуемый объект, обивается поглощающим материалом *Eccosorb CV-6*. Фирма *Republic* применяет для камеры с продольными гофрами материал *Eccosorb CHW-580*. Для особо точных измерений на вертикальный гофр призматической формы камеры поверх этого материала накладывается материал *Eccosorb CV-6*. Фирма *ITT* применяет для таких камер материал *Eccosorb FR-342* в сочетании с *Eccosorb CV-9* (на гофрах противоположной стенки). Стены, пол и потолок камер с продольными гофрами фирма *Emerson and Cuming* покрывает поглощающим материалом *Eccosorb FR-340*.

Пеноблоки *Eccosorb FR* работают в широкой полосе частот, имеют коэффициент отражения -20 дБ в полосе частот от 50 до $2,5$ ГГц при толщине материала (тип *FR-330*) 5 см и до 450 МГц при толщине материала (тип *FR-350*) $20,3$ см.

Гофры из саженаполненного бисерного пенополистирола (объем зерна $0,5$ м³) обеспечивает (фирма *Plessey Co.*, США, *AF-20*) коэффициент отражения материала в диапазоне $4900-7050$ МГц равный $0,01\%$ при нормальном падении излучения, и $0,75\%$ — при угле падения 70° .

Двухслойный *AF-10* (саженаполненная пена из НК) с гофрированной поверхностью имеет $K_{\text{отп}} \leq 0,1\%$ в диапазоне $1550-5200$ МГц и $0,2\%$ в диапазоне $5200-11000$ МГц. Для диапазона $4900-7050$ МГц и выше эффективен *AF-11* (с микропорами).

Блоки (длина $1,8$ м, площадь основания $0,2$ м², наибольшие размеры, используемые в безэховых камерах) используют для камер определения характеристик антенн ИСЗ. $K_{\text{отп}}$ плоских и пирамидальных поверхностей этих материалов зависит от длины волны (рис. 2.84).

Материал *Eccosorb HPU* фирмы *Emerson* имеет шиповидную форму (блоки $0,6 \times 0,6$ м) и изготовлен из пенополиуретана. Он черного цвета и является хорошим поглотителем ИК излучения и самозатухающим материалом. Погодостойкая модификация этого материала — *HPU-W* (табл. 2.91).

Материалы *Eccosorb OCF* — пенопласты с открытыми ячейками (4 ячейки/см) различных цветов (белого, розового, коричневого, зеленого, голубого и черного). Материалы *Eccosorb OSF* при работе с воздушным охлаждением могут поглощать энергию до $1,55$ Вт/см² и являются самозатухающими (табл. 2.92).

Для безэховых камер предназначен самозатухающий шиповидный материал (блоки $0,6 \times 0,6$ м) *Eccosorb SPY* на основе пенополиуретана с открытыми ячейками (4 ячейки/см), способный поглощать излучение мощностью $1,55$ Вт/см² (табл. 2.93).

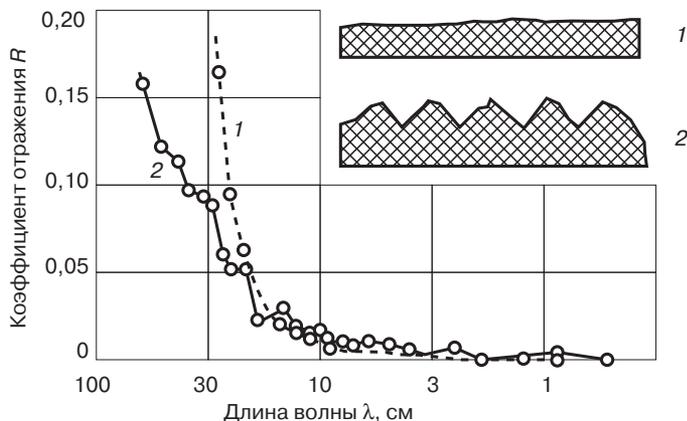


Рис. 2.84. Зависимость коэффициента отражения от длины волны поглощаемого излучения для плоского материала (1) и материала, передняя поверхность которого имеет пирамидальные выступы (2) [26]

Таблица 2.91. Характеристика материала *Eccosorb HPY* [105]

| Тип <i>Eccosorb</i> | Минимальные частоты рабочего диапазона, на кото- рых материал имеет наибольшее затухание, дБ | | | | Толщина, мм | Масса одного блока, кг |
|------------------------|---|---------|---------|-------|----------------|---------------------------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | | |
| <i>HPY-6</i> | 1 ГГц | 1,5 ГГц | 3 ГГц | 9 ГГц | 229 | 2,45 |
| <i>HPY-12</i> | 500 МГц | 1 ГГц | 3 ГГц | 9 ГГц | 305 | 1,8 |
| <i>HPY-18</i> | 400 МГц | 500 МГц | 1 ГГц | 9 ГГц | 457 | 2,2 |
| <i>HPY-24</i> | 300 МГц | 500 МГц | 1 ГГц | 9 ГГц | 610 | 2,36 |
| <i>HPY-30</i> | 200 МГц | 400 МГц | 800 МГц | 3 ГГц | 762 | 4,5 |
| <i>HPY-54</i> | 125 МГц | 200 МГц | 800 МГц | 3 ГГц | 1372 | 5,9 |
| <i>HPY-72</i> | 75 МГц | 175 МГц | 500 МГц | 3 ГГц | 1829 | 6,8 |

Таблица 2.92. Характеристика материалов *Eccosorb OCF* [105]

| Тип <i>Eccosorb</i> | Минимальные частоты (ГГц) рабочего диапазона, на которых материал имеет затухание, дБ | | | | Толщи- на, мм | Масса, кг/м ² |
|------------------------|--|-----|----|----|------------------|--------------------------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | | |
| <i>OCF-4</i> | 2,5 | 5 | 8 | 25 | 102 | 5,37 |
| <i>OCF-6</i> | 1,5 | 3 | 6 | 25 | 152 | 5,86 |
| <i>OCF-9</i> | 1 | 1,5 | 3 | 25 | 229 | 12,2 |
| <i>OCF-12</i> | 0,5 | 1 | 3 | 25 | 305 | 19,01 |

Таблица 2.93. Характеристика материалов *Eccosorb SPY* [105]

| Тип <i>Eccosorb</i> | Минимальные частоты (ГГц) рабочего диапазона, на которых материал имеет затухание, дБ | | | | Толщина, мм | Масса, кг/м ² |
|------------------------|--|-----|----|----|----------------|--------------------------|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | | |
| <i>SPY-9</i> | 1 | 1,5 | 3 | 9 | 229 | 2,5 |
| <i>SPY-12</i> | 0,5 | 1 | 3 | 9 | 305 | 2,17 |
| <i>SPY-18</i> | 0,4 | 0,5 | 1 | 9 | 457 | 2,62 |
| <i>SPY-24</i> | 0,3 | 0,5 | 1 | 9 | 610 | 2,8 |

Материалы *Eccosorb AN-P* фирмы *Emerson & Cuming, Inc.* (США) — легкие, тонкие погодо- и топливостойкие гибкие пеноматериалы с закрытыми ячейками (табл. 2.94). Такая конструкция пенопласта исключает необходимость в покрытии или ткани для защиты его от влаги, неблагоприятных погодных условий и загрязнения. Передняя поверхность сделана белой для лучшего отражения света. Материал *Eccosorb AN-P* наносят на стены камер, опоры антенн и другие объекты в безэховых камерах. Он может использоваться в авиационной и космической технике (антенные обтекатели и перегородки); его можно применять для экранирования корабельных мачт, зданий и других конструкций. Соединение материала с подложкой производится при помощи клея *Eccobond 90H*.

Для работы в диапазоне частот 50 МГц–50 ГГц фирма разработала легкие пеноматериалы *Eccosorb CV-B*. В качестве активных элементов использованы конусы, обладающие диэлектрическими потерями. Вершины их жестко заделаны в облицовочный лист из пеноматериала. Для того чтобы передняя поверхность была блестящего черного цвета, как это часто требуется в целях поглощения ИК-излучения, и для устранения нежелательных отражений от плоского

Таблица 2.94. Характеристики материалов *Eccosorb AN-P* [105]

| Тип AN | Рабочие λ , см | Рабочие частоты, ГГц | Рабочие диапазоны* | Максимальное отражение (по мощности), % | Размер листа, м | Толщина материала, мм | Масса, кг/м ² |
|--------|------------------------|----------------------|---------------------|---|-----------------|-----------------------|--------------------------|
| AN-P73 | 4,0 | 7,5 | X, G, K | 2 | 0,6×0,6 | 9,5 | 0,733 |
| AN-P74 | 8,6 | 3,5 | C, A, B, X, G, K | 2 | 0,6×0,6 | 19 | 1,466 |
| AN-P75 | 12,5 | 2,4 | S, C, A, B, X, G, K | 2 | 0,6×0,6 | 28,6 | 2,441 |

* Диапазоны: L 19,3–76,9 см; S 5,77–19,3 см (2–4 ГГц); C 4,84–7,15 см; X (СВЧ) 2,75–5,77 см (8–12,5 ГГц); D 1,25–1,35 ГГц; J 8–10 ГГц; E УКВ, дециметровые волны

ИК-поглощающего покрытия на высоких частотах, на передней поверхности материала сделаны углубления вафельного типа. Материалы *Eccosorb CV-B* и *CV-CB* используются в качестве покрытия для полов беззеховых камер.

Их способность поглощать излучение изменяется не более чем на 3 дБ при углах падения излучения до 60° (табл. 2.95, 2.96).

Отделом *Plessey Environmental Systems* фирмы *Plessey Co.* (США) разработаны широкодиапазонные радиопоглощающие материалы для беззеховых камер, работающих на частотах ниже 100 МГц (табл. 2.97), и создания «тихих зон» в лабораториях. Материалы марок *AF30*, *AF40* и *AF50* рекомендуются для использования в лабораториях, а марок *AF40*, *AF50* и с *AFP18* по *AFP72* — для беззеховых камер. При углах падения излучения до 55° все широкодиапазонные

Таблица 2.95. Характеристики материалов *Eccosorb CV-B* [105]

| Тип CV | Минимальные частоты рабочего диапазона, на которых материал имеет затухание, дБ | | | | Размер листа, мм | Толщина листа, мм | Масса панели, кг/м ² |
|--------|---|---------|---------|--------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| | 20 | 30 | 35 | 40 | | | |
| CV-B6 | 1,5 ГГц | 3 ГГц | 7 ГГц | 10 ГГц | 0,6×0,6 | 152 | 24,4 |
| CV-B9 | 1 ГГц | 3 ГГц | 5 ГГц | 10 ГГц | 0,6×0,6 | 229 | 26,8 |
| CV-B12 | 500 МГц | 2,5 ГГц | 5 ГГц | 10 ГГц | 0,3×0,9 | 305 | 22,5 |
| CV-B18 | 400 МГц | 1,5 ГГц | 5 ГГц | 7 ГГц | 0,3×0,9 | 457 | 26,8 |
| CV-B24 | 300 МГц | 1 ГГц | 2 ГГц | 4 ГГц | 0,6×0,6 | 610 | 45 |
| CV-B30 | 250 МГц | 800 МГц | 1,5 ГГц | 2 ГГц | 0,6×0,6 | 762 | 53 |
| CV-B54 | 150 МГц | 350 МГц | 600 МГц | 1 ГГц | 0,6×0,6 | 1372 | 139 |

Таблица 2.96. Характеристики материалов *Eccosorb CV-CB* [105]

| Марка материала | Минимальные частоты рабочего диапазона, на которых материал имеет затухание, дБ | | | Толщина материала, мм | Масса, кг/м ² |
|-----------------|---|---------|--------|-----------------------|--------------------------|
| | 20 | 30 | 40 | | |
| CV-CB-9 | 1 ГГц | 3 ГГц | 10 ГГц | 228 | 6,85 |
| CV-CB-12 | 500 МГц | 2,5 ГГц | 10 ГГц | 305 | 9,8 |
| CV-CB-18 | 400 МГц | 1,5 ГГц | 7 ГГц | 457 | 14,65 |
| CV-CB-24 | 300 МГц | 1,0 ГГц | 4 ГГц | 610 | 19 |
| CV-CB-36 | 250 МГц | 800 МГц | 2 ГГц | 914 | 28,4 |
| CV-CB-54 | 150 МГц | 350 МГц | 1 ГГц | 1372 | 42,5 |

Таблица 2.97. Характеристики широкодиапазонных радиопоглощающих материалов фирмы *Plessey Co.* для безэховых камер [105]

| Тип AF | Диапазон рабочих частот, ГГц | Толщина или высота материала, мм | Масса материала, кг/см ² | Размер стандартных панелей (длина стороны квадрата), мм |
|--------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| AF30 | 3–75 | 39 | 0,125 | 609 |
| AF40 | 2,5–75 | 117 | 4,9 | 609 |
| AF50 | 0,5–75 | 305 | 9,8 | 609 |
| AFP18 | 0,4–75 | 457 | 14,7 | 609 |
| AFP24 | 0,3–75 | 610 | 19,6 | 609 |
| AFP36 | 0,18–75 | 915 | 29,4 | 609 |
| AFP54 | 0,1–55 | 1372 | 44,1 | 609 |
| AFP72 | 0,05–55 | 1830 | 58,8 | 609 |

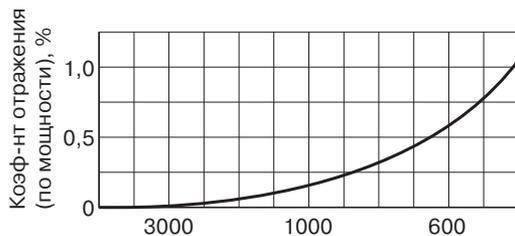


Рис. 2.85. Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения для материала AF50 при нормальном угле падения излучения [105]

материалы имеют низкий коэффициент отражения и могут поглощать энергию до 3 Вт/дюйм². Зависимость коэффициента отражения (по мощности) от частоты падающего излучения для материала AF50 при нормальном угле падения излучения приведена на рис. 2.85.

Целую гамму материалов (табл. 2.98) для безэховых камер выпускает фирма *McMillan* (США).

Одной из проблем, возникающих при использовании радиопоглощающих материалов в безэховых камерах, является недостаточное поглощение у боковых стенок. Это объясняется следующим. Для возможно более точного воспроизведения условий свободного пространства камеры делают большей частью весьма длинными и узкими. Вследствие этого поглотители, размещенные у боковых стенок, практически не обеспечивают полного затухания электромагнитных волн, поскольку волны перпендикулярны к оси поглотителя и отражаются (как известно, шиповидные материалы эффективно поглощают падающее излучение только в том случае, если угол отклонения падающего излучения от оси шиповидного элемента не превышает 60°). Это отражение может при определенных условиях привести к большим ошибкам измерения. Описанный эффект пытались исключить с помощью экранов, покрытых поглотителями и установленных вблизи задней стенки безэховой камеры. Однако экраны занимают много места и, кроме того, на краях их происходит рассеяние излучения, которое может дать почти такие же ошибки, как и устраняемое отражение.

Для решения этой проблемы фирма *Grünzweig & Hartmann* (ФРГ) разработала пирамидальный поглотитель из пористого материала; ось пирамиды поглотителя составляет угол 30–70° с ее основанием. Поглотители устанавливаются, и таким образом происходит эффективное

Таблица 2.98. Характеристики радиопоглощающих материалов для безэховых камер фирмы *McMillan* [105]

| Тип материала | Обозначение материала | Диапазон частот МГц, ГГц | Применение | Толщина, мм | Размеры, мм | Форма материала | Дополнительные данные |
|---------------|-----------------------|--------------------------|--|-------------|-------------|--|--|
| <i>AP</i> | <i>AP-96</i> | 50 | Стенки и потолки камер | 2440 | 1220×1220 | Пирамиды из пенопласта | На высоких частотах имеет лучшие характеристики |
| | <i>AP-48</i> | 100–50 | | 1220 | 1220×1220 | | |
| | <i>AP-36</i> | 130–50 | | 914 | 915×915 | | |
| | <i>AP-24</i> | 200–50 | | 610 | 610×610 | | |
| <i>CP</i> | <i>CP-20</i> | 250–50 | То же | 508 | 305×1220 | Пирамиды из пенопласта с углеродным наполнителем | Вытянутый поглотитель |
| <i>BL</i> | <i>BL-12</i> | 400–50 | То же | 305 | 305×1220 | Плоские блоки. С тыльной стороны имеют охлаждающие отверстия | Стандартный материал высокого качества, применяемый в промышленности |
| | <i>BL-8</i> | 600–50 | | 203 | | | |
| | <i>BL-5</i> | 900–50 | | 127 | | | |
| | <i>BL-4</i> | 1200–50 | | 102 | | | |
| | <i>BL-2(S)</i> | 2400–50 | | 51 | | | |
| | <i>BL-2(X)</i> | 3520–50 | | 51 | | | |
| <i>HBL</i> | <i>BH-2</i> | 2400–50 | Пол камер; конструкции для полевых условий | 51 | 305×460 | Жесткие блоки с плоской передней поверхностью | Рассеиваемая мощность 30 Вт/дюйм ² , $T_{\text{раб}} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| <i>BH</i> | <i>HP-8</i> | 1500–50 | Торцевые стенки камер и «точки критического отражения» | 203 | 305×610 | Блок из жесткого пенопласта | Жесткий пенопласт выдерживает нагрузки, создаваемые шагающим человеком |
| <i>HP</i> | <i>HP-5</i> | 2400–50 | | 127 | 305×1220 | Плоская конструкция низкой плотности | Обеспечивает затухание до 40 дБ |
| <i>H</i> | <i>H-1</i> | 5000–50 | Стенки камер | 25,4 | 610×610 | Маты из прорезиненного животного волоса | Легко устанавливается на месте применения |
| | <i>H-2</i> | 2400–50 | | 51 | | | |
| | <i>H-4</i> | 120–50 | | 102 | | | |
| | <i>H-8</i> | 600–50 | | 203 | | | |

поглощение излучения. На рис. 2.86, *а* показана безэховая камера 1 с такими поглотителями, а также поглотители 3, установленные в области длинной боковой стенки 2. Поглотитель, ось пирамиды которого составляет с основанием боковой стенки угол 60° , представлен на рис. 2.86, *б*. Рис. 2.87 иллюстрирует изменение коэффициента отражения в зависимости от угла падения излучения для обычных и наклонных пирамид.

Поглощающий материал простой структуры с хорошими характеристиками для безэховых камер разработала фирма *Eltro* (ФРГ). Материал получают по следующей технологии. Формованную из полиэфирного пенопласта квадратную плиту (стороны квадрата равны 1 м) с шиповидной поверхностью пропитывают смесью лака, которая содержит 16% графита, 8% поливинилацетатного клея, 75,9% воды и 0,1% антивспенивающего агента (кремнийорганического соединения *Antifoam B*) и сушат.

Поглотитель покрывают краской. На рис. 2.88, *а* показан разрез поглотителя и приведена кривая поглощения при падении излучения под углом 90° в диапазоне частот 1–10 ГГц. Кроме полиэфирных могут также применяться и другие пенопласты.

Для расширения рабочего диапазона частот фирма *Grünzweig & Hartmann* разработала пористый материал, на боковых поверхностях шиповидной структуры которого предусмотрены меньшие элементы шиповидной формы. При этом высота основных шиповидных элементов структуры определяется нижней границей диапазона частот, а высота меньших шиповидных элементов — верхней границей [105].

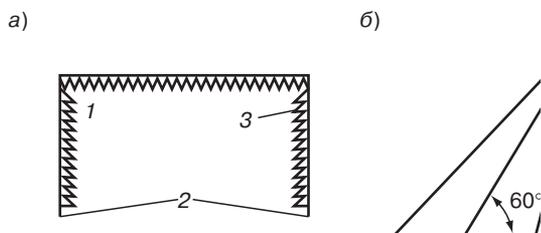


Рис. 2.86. Пирамидальный поглотитель для безэховых камер, разработанный фирмой *Grünzweig & Hartmann* [105]: 1 — безэховая камера; 2 — боковые стенки; 3 — поглотитель

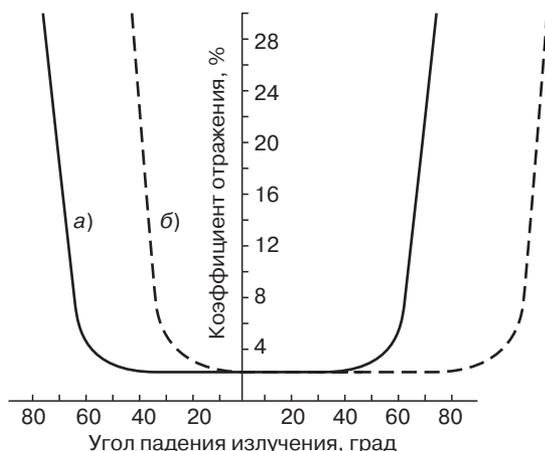


Рис. 2.87. Изменение коэффициента отражения в зависимости от угла падения излучения [105]: *а* — для обычных пирамидальных поглотителей; *б* — для наклонных пирамидальных поглотителей

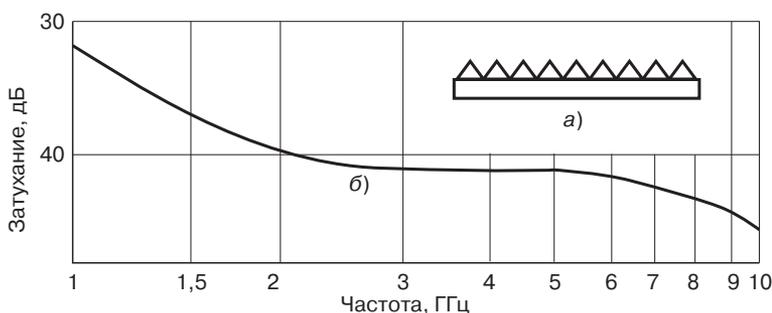


Рис. 2.88. Поглотитель фирмы *Eltro* для безэховых камер [105]: а—структура поглотителя; б—зависимость затухания от частоты

Типичными неорганическими поглотителями для безэховых камер являются материалы *Eccosorb HT-98* и *Eccosorb HT-99*. Материал *Eccosorb HT-98* может работать и интервале температур от -60 до 350 °С. Изготовлен он из пенокерамики и поэтому его можно применять при значительно более высокой мощности излучения, чем в случае поглотителей из пластиков. Коэффициент отражения (по мощности) для блоков материала *HT-98* с габаритами $305 \times 457 \times 51$ мм составляет 2% в диапазоне от *S* до *K*. Материал *Eccosorb HT-99* поставляется в блоках с габаритами $305 \times 457 \times 76$ мм, коэффициент отражения (по мощности) этого материала составляет также 2% в диапазоне от *L* до *K*. Блоки этого материала изготовлены таким образом, что при максимальной мощности излучения принудительное воздушное охлаждение рассеивает образующееся тепло. Так, при мощности $1,24$ Вт/см² температура поглотителя не превышает 93 °С, при $2,32$ Вт/см² она будет не более 150 °С, а при $3,1$ Вт/см² не более 200 °С [105].

Ферритовый материал для безэховых камер фирмы *TDK Electronics Co., Ltd.* (Япония) имеет комплексную магнитную проницаемость:

$$\mu_r = 1 + \frac{K_{\text{ФЕЛ}}}{1 + (j \cdot f \cdot \tau)^\beta},$$

где f — частота; τ — время релаксации; $K_{\text{ФЕЛ}} = \mu_i - 1$; μ_i — начальная магнитная проницаемость, имеющая наибольшее значение при $f = 0$; β — константа, показывающая распределение времени релаксации.

Этот материал (рис. 2.89) предназначен для камер, работающих на низких частотах диапазона метровых волн. Толщина обычных поглотителей для работы в этих условиях превышает 1 м. Кроме того, если требуется улучшение характеристик обычных поглотителей в этом диапазоне, то их толщину надо увеличить. Ферритовая стенка позволяет устранить указанные недостатки.

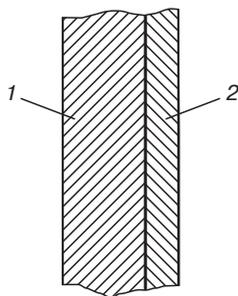


Рис. 2.89. Ферритовый материал для безэховых камер фирмы *TDK Electronics*: 1 — ферритовый слой; 2 — металлическая подложка

Примером ферритового поглотителя, предложенного фирмой *TDK Electronics*, является феррит Ni–Cu–Zn состава (в %мол.): 48,3 Fe₂O₃; 16,16 NiO; 3,518 CuO; 30,74 ZnO; 1,277 MnCO₃. Поглощающая стенка из этого материала толщиной 5,3 мм имеет коэффициент отражения менее 0,1% в диапазоне частот 130–540 МГц. Стенка из другого феррита (Mn–Cu–Zn) состава 54,53 Fe₂O₃; 17,39 ZnO; 26,01 MnCO₃; 2,06 CuO имеет при толщине 12,1 мм коэффициент отражения менее 0,1% в диапазоне частот 74–185 МГц. Поглощающая стенка толщиной 4,3 мм из феррита Ni–Zn–Cu состава 48,54 Fe₂O₃; 28,28 NiO; 5,019 CuO; 16,01 ZnO; 1,502 PbO; 0,4 CoO; 2,0 талька имеет коэффициент отражения менее 0,1% в диапазоне частот 1000–1800 МГц [105].

Одной из проблем, возникающей при испытаниях антенн космической связи и систем цветного телевидения, является потребность в радиопоглощающих материалах для камер, работающих на частотах выше 100 МГц. Однако имеющиеся материалы для работы на этих частотах обладают следующими существенными недостатками: большая толщина (обычные материалы имеют толщину 1,5 м), невысокие характеристики (магнитные материалы обладают низкими характеристиками на частотах выше 1000 МГц), нетехнологичность (материал, состоящий из диэлектрика и феррита и выполненный в виде зигзагообразной стенки).

Для преодоления этих недостатков в Японии разработан тонкий многослойный материал, состоящий из слоев диэлектрика, магнитного материала и металлической подложки. На рис. 2.90, а показан общий вид блока материала. Он имеет клиновидную часть из диэлектрика с потерями, слои 2–5 из диэлектрика, слой 6 из магнитного материала с потерями и слой 7 – металлическую подложку. Общая толщина блока материала равна 53 см. Распределение постоянных затухания (коэффициентов затухания на единицу длины, КСВ) слоев 1–5 показано на рис. 2.90, б.

Чтобы КСВ для передней поверхности поглотителя был менее 1,2 для каждой частоты в нижней области рабочего диапазона частот, значение импеданса нагрузки слоя диэлектрика должно находиться в определенном интервале. Для реализации импеданса нагрузки к тыльной поверхности слоев 1–5 прикреплён магнитный материал 6 с металлической платой 7. При совмещении магнитного материала и металлической подложки со слоями 1–5 диэлектрика получают поглотитель, имеющий КСВ менее 1,2 на частотах выше 100 МГц. Частотные характеристики такого поглотителя приведены на рис. 2.90, в. Путем соответствующего подбора материалов диэлектрического и магнитного слоев могут быть получены поглотители для других диапазонов частот.

Значительное уменьшение толщины материала достигнуто в экстремально тонкой поглощающей стенке. Такая стенка предназначена, в частности, для исследования в безэховой камере антенн, применяемых в системе космической связи. Толщина ее значительно меньше, чем при использовании одного материала, например, феррита (рис. 2.91, а). Получена она за счет применения частотных характеристик ферромагнитных и сегнетоэлектрических материалов. В другом варианте такой стенки предусмотрен зазор между сегнетоэлектриком и ферритом, который может быть заполнен диэлектриком (рис. 2.91, б).

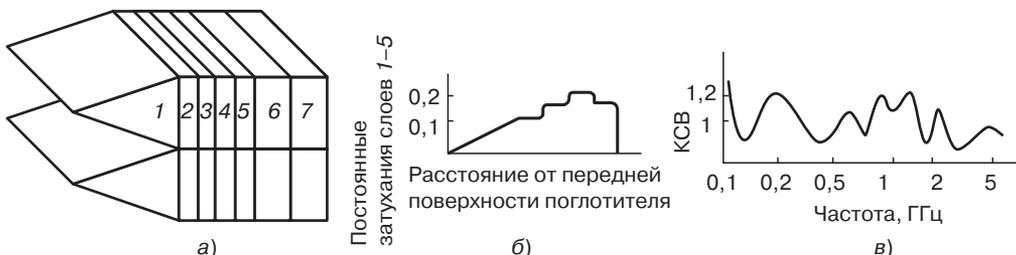


Рис. 2.90. Комбинированный клиновидный радиопоглощающий материал для безэховых камер [105]: а – общий вид материала; б – зависимость постоянных затухания от расстояния до передней поверхности поглотителя; в – зависимость КСВ от частоты для клиновидного поглотителя

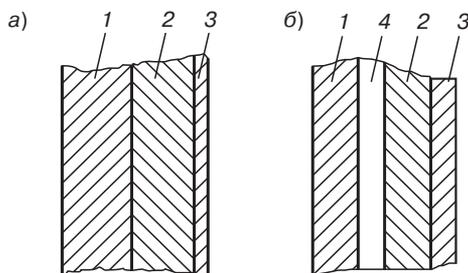


Рис. 2.91. Тонкие комбинированные поглотители [105]: 1 — сегнетоэлектрик; 2 — феррит; 3 — металлическая подложка; 4 — зазор

Характеристики безэховых камер в зависимости от их назначения носят различный характер. Для измерений, не требующих особо высокой точности, используются камеры, в которых поглощающими материалами являются магнитодиэлектрики и диэлектрики на основе пенополиуретанов или пенополистиролов.

Для более тонких измерений в эхокамерах для поглощения ЭМИ в них используются более сложные составы и структуры материалов, покрытий и конструкций. Эффективность разработанных составов и структур материалов для безэховых камер (ячеистые, сотовые, полые пирамидальные, конусовидные, комбинированные, поляризационно-независимые, с диэлектрическими вставками, градиентные) стимулировала разработку поглощающих материалов для уменьшения радиолокационной заметности, технологии *Stealth*.

Особо высокие требования предъявляются к безэховым камерам, в которых измеряются характеристики экспериментальных объектов. Зависимость коэффициента отражения от геометрии поверхности потребовала значительных усложнений структуры поглощающих покрытий. Так, поглотители «шахтного» или сотового типа работают на частотах от 100 МГц и состоят из дискретно расположенных горизонтальных и вертикальных пластин, поглощающих горизонтально и вертикально поляризованные волны. Для повышения механической прочности поглотитель изготавливают из прямоугольных полых опор (полистирол). Между опорами прокладываются демпфирующие пластины толщиной 0,2 мм из гетинакса, покрытые лаком с высоким удельным сопротивлением. Около 50 таких опор скрепляются под углом 45° и вертикально, и горизонтально, что препятствует возможному повреждению лежащих по краям пластин.

Ширина сот первой ступени меньше ширины сот второй ступени в два раза; поверхностное сопротивление R третьей ступени меньше поверхностного сопротивления второй ступени в три раза. При этом достигается повышение демпфирования от первой ко второй и третьей ступени в 3 и 6 раз. На обратной стороне поглотителя помещается металлическая отражательная пластина. На рис. 2.92 показан коэффициент отражения данного поглотителя в зависимости от частоты.

Для возможности использования такого сотового поглотителя и при более высоких частотах можно сузить стволы сот. Чтобы подавить отражения волн в последнюю ступень перед короткозамыкающей пластиной встраивается поглотитель, который на частоте выше 2–3 ГГц имеет коэффициент отражения ниже 10%. Характеристика встроенного поглотителя приведена на рис. 2.93.

На рис. 2.94 показан коэффициент отражения поглотителя комбинированной конструкции (состоящего из сотового поглотителя и встроенного полого конического поглотителя) в зависимости от частоты. Рабочий диапазон частот этого поглотителя значительно расширен. Бруски обклеиваются в шахматном порядке.

Покрытие другого типа состоит из ряда слоев с определенным сопротивлением, которые расположены под углом друг к другу, образуя своеобразный клин. Это дает согласование со свободным пространством и обеспечивает независимость от поляризации электромагнитной волны.

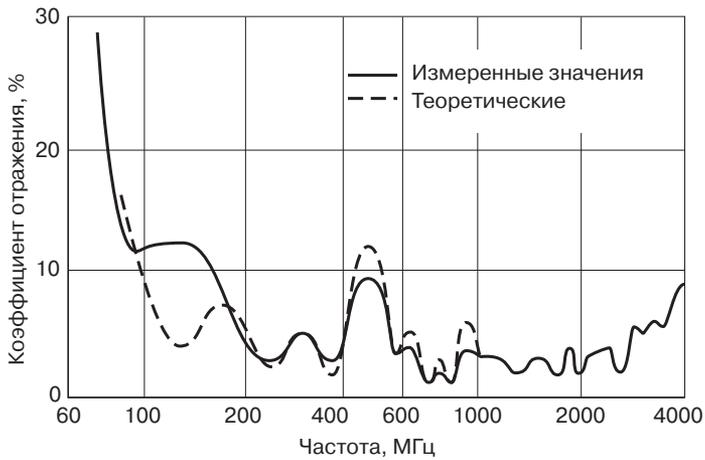


Рис. 2.92. Коэффициент отражения электромагнитного излучения для поглотителя сотового типа [103]

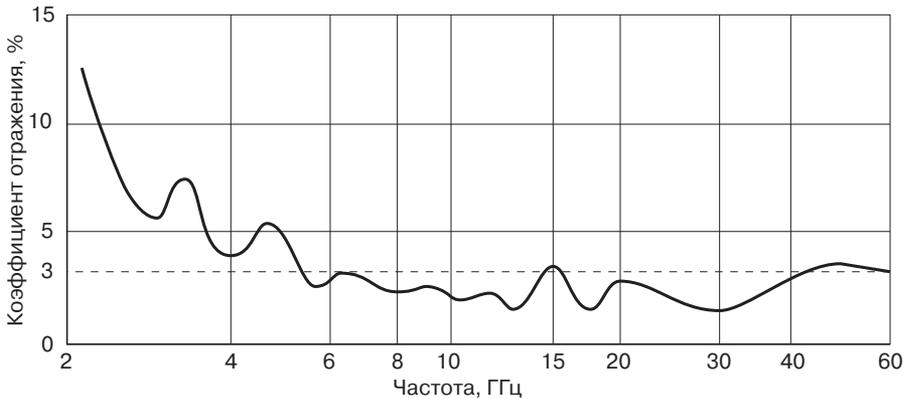


Рис. 2.93. Коэффициент отражения встроенного полого конического поглотителя [103]

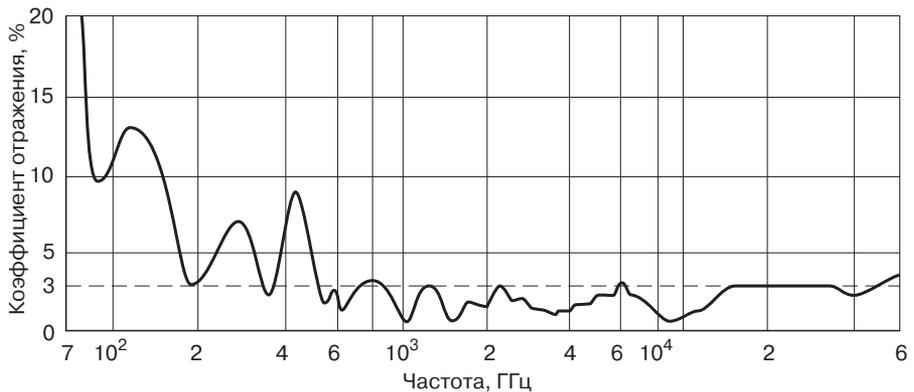


Рис. 2.94. Коэффициент отражения сотового поглотителя со встроенным коническим поглотителем [103]

В широкополосном поглотителе радиоволн сантиметрового диапазона на основе наклеены диэлектрические сотовые ячейки с покрытием, включающим материал с высокими потерями. Размеры и взаимное расположение ячеек выбираются так, чтобы ослабление спадало к краю по экспоненте, а входное волновое сопротивление поглотителя примерно равнялось волновому сопротивлению свободного пространства. Для повышения эффективности применяются скошенные сотовые ячейки. Если для пропитывания ячеек используют растворы с постоянной концентрацией примесей, то размеры ячеек выбираются различными. При использовании ячеек постоянных размеров концентрация примесей изменяется от максимальной в нижнем слое до минимальной в наружном слое.

Одна из конструкций поглотителя состоит из ряда слоев с согласованным импедансом, выполненных из пенорезины с показателем преломления электромагнитного излучения 1,1. На каждом таком слое имеются печатные диски из материала, поглощающего электромагнитное излучение. Края каждой группы дисков расположены так, что вместе с кромками других групп образуют конусообразные формы, поглощающие и рассеивающие электромагнитную энергию. Диски напечатаны клеевой краской, состоящей из 50 весовых частей порошка железа и 50 весовых частей полимера. Общая толщина поглотителя составляет 11,5 см. При длине волны падающего излучения 3,18 см и углах падения излучения 45, 60 и 70° затухание равнялось соответственно 42, 39 и 34 дБ для параллельно и перпендикулярно поляризованного излучения [103].

Поглощающие поверхности выполняются в виде ячеистой структуры. Ячейки имеют форму прямоугольных коробок.

Ячеистая структура выполнена из диэлектрического материала трехслойной конструкции, состоящего из листа пенополистирола, заключенного между двумя слоями крафт-бумаги; толщина его составляет 3,2–6,3 мм. Стенки ячеек покрыты слоем поглощающего материала, так что затухание возрастает с увеличением глубины проникновения энергии внутрь ячейки. В качестве слоя поглощающего материала используется покрытие из углерода толщиной 0,13–0,18 мм, наносимое напылением либо окраской с применением эмульсии. Переменное затухание создается благодаря тому, что поглощающий материал наносится на стенки ячеек в виде: 1) поперечных полос одинаковой ширины; расстояния между соседними полосами уменьшается с глубиной; 2) поперечных полос, расположенных на одинаковых расстояниях; ширина полос увеличивается с глубиной; 3) равнобедренного треугольника, вершина которого направлена в сторону входа в ячейку. На дне ячейки помещается пирамида или конус из радиопоглощающего материала. Высота пирамиды составляет половину или треть высоты ячейки. Коэффициент поглощения такого материала остается постоянным в широком диапазоне отношений d/λ , где d — толщина материала, а λ — рабочая длина волны [103].

Поглотитель может представлять собой пластинку из нескольких отличающихся по толщине слоев различных диэлектриков. Каждый слой состоит из наклонных полос диэлектриков, причем направление полос от слоя к слою меняется на 90°.

Поглотитель градиентного типа из пенополистирола с графитовым покрытием состоит из пирамид (рис. 2.95, б), каждая из которых может крепиться отдельно к стенкам безэховой камеры. Высота H отдельного элемента составляет приблизительно 1 м, ширина B — 22 см, толщина D — 1 см. Углеродные волокна наносятся на внутренние стенки элемента.

Поглотители изготавливают и в виде сот, состоящих из брусков квадратного сечения. Бруски изготавливаются из диэлектрика или пенопласта. Боковые плоскости брусков, параллельные направлению электромагнитных волн, покрываются слоем поглощающего материала с большим удельным сопротивлением. В каждом бруске этот слой наносится на любые две прилежащие стороны. При компоновке поглотителя соседние бруски располагаются так, что их стенки с поглотителем оказываются под углом 90° друг к другу. При наблюдении с торца поглотителя покрытия имеют фигуру типа меандра. Покрывают стены безэховой камеры несколькими слоями поглотителя, отличающимися размерами сечения брусков: чем ближе слой к стенке, тем меньше сечение бруска. Это обеспечивает уменьшение высоты поглотителя и высокий коэффициент поглощения.

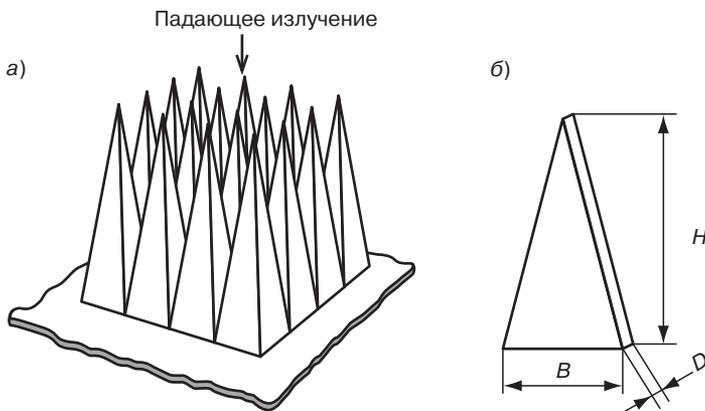


Рис. 2.95. Радиопоглощающий материал высокой жесткости для безроговых камер [104]: а— общий вид материала высокой жесткости; б— плита из радиопоглощающего материала

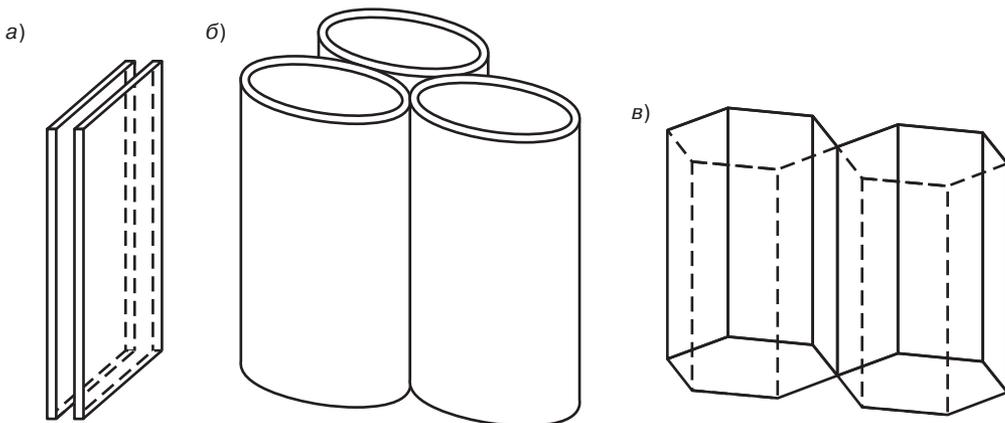


Рис. 2.96. Радиопоглощающий материал с улучшенной прочностью на растяжение, сжатие и изгиб [104]: а— плоская; б— трубчатая, в— сотовая конструкция материала

Поглощающие ЭМЭ поглотители с повышенными упруго-прочностными свойствами состоят из ряда плоских, трубчатых или сотовых элементов (рис. 2.96), ориентированных параллельно направлению распространения электромагнитного излучения и состоящих из полиэфирного, эпоксидного или другого стеклопластика. На внешнюю поверхность этих элементов наносится проводящее покрытие, в результате чего поверхностное сопротивление будет уменьшаться в направлении распространения электромагнитного излучения. Элементы разнесены на расстояние, меньшее $1/5$ максимальной длины волны поглощаемого излучения. Пространство между элементами заполнено пенополиуретаном. Нанесение проводящего слоя осуществляется либо из паровой фазы, либо другим методом; для этого используются смеси графита или углерода либо полупроводника типа карбида кремния. Такой поглотитель обеспечивает ослабление сигнала 30 дБ и более в широком диапазоне длин волн. При изготовлении такого поглотителя из трубчатых элементов последние могут быть получены методом намотки или прессования в пресс-форме. Для защиты поглотителя от воздействия окружающей среды (для воды $\epsilon = 8,0$, $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,03$) используется слоистое покрытие, толщина слоев которого не превышает $1/8$ минимальной длины волны поглощаемого излучения.

Чтобы получить согласование со свободным пространством, покрытие выполняется из слоев, диэлектрическая проницаемость которых ступенчато (минимальное число ступеней равно 5) повышается от наружной поверхности покрытия к поверхности поглотителя, так что диэлектрическая проницаемость наружного слоя равна 1,5, а диэлектрическая проницаемость слоя, примыкающего к поглотителю, на 10% ниже диэлектрической проницаемости поглотителя («диэлектрическое болото»). Такой поглощающий материал предназначен для изготовления стен безэховых камер.

Ряд разработок в области материалов для безэховых камер направлен на снижение коэффициента отражения поглотителей. Поглощающий материал для безэховых камер, имеющий коэффициент отражения менее 3% на частотах свыше 3 ГГц (рис. 2.97), представляет собой систему полых конусов или пирамидообразных типов (рис. 2.98) с высотой $H = 15$ см и углом при вершине $\delta = 24^\circ$. Шипы выполнены из поливинилхлорида, наружная поверхность которых покрывается электропроводящей пленкой наполненного лака. Наполнитель состоит из микросфер диаметром 3 мм, изготовленных из вспененного полистирола [104].

Разновидность этого материала, выполняемого по упрощенной технологии, и зависимость коэффициента отражения от частоты приведены на рис. 2.99 и 2.100. Высота шипа, материала составляет 5 см при диаметре основания до 2 см. Значительно уменьшенный коэффициент отражения при сравнительно малой высоте поглотителя обеспечивают материалы (рис. 2.101), представляющие собой блоки 1 с передней стенкой 3. Конические углубления 2 заполнены диэлектрическими вставками аналогичной формы. Угол при вершине конусов меньше 15° .

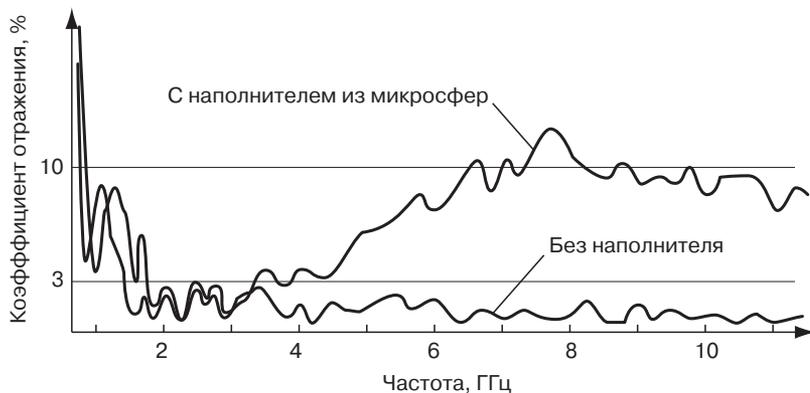


Рис. 2.97. Зависимость коэффициента отражения от частоты для радиопоглощающего материала с наполнителем из микросфер и без наполнителя (полые микросферы из Al_2O_3 при 0,1–10 ГГц имеют $\epsilon = 2,4$, $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,0003$) [104]

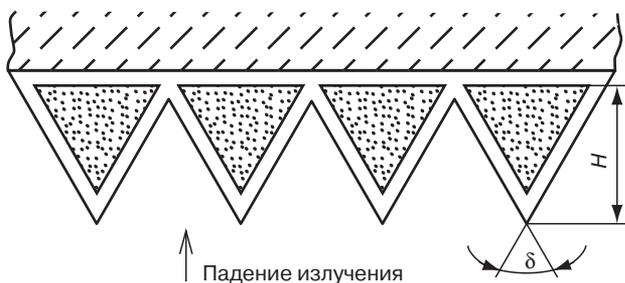


Рис. 2.98. Конструкция радиопоглощающего материала с наполнителем из микросфер [104]

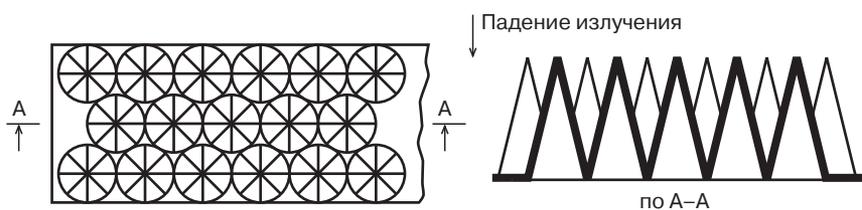


Рис. 2.99. Разновидность радиопоглощающего материала с наполнителем из микросфер [104]

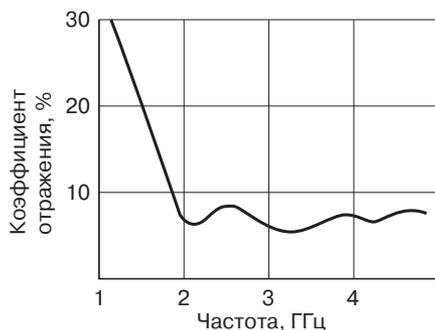


Рис. 2.100. Зависимость коэффициентов отражения от частоты для разновидности материала с наполнителем из микросфер [104]

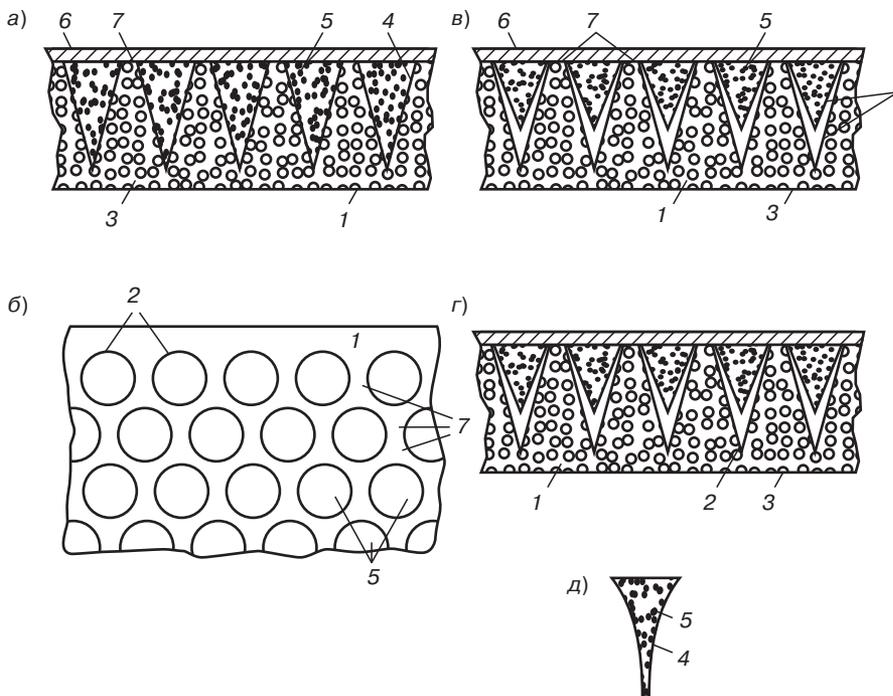


Рис. 2.101. Различные виды радиопоглощающих материалов с углублениями, заполненными диэлектрическими вставками аналогичной формы [104]: а — материал со сплошными диэлектрическими вставками; б — вид несущего блока со сплошными вставками с обратной стороны без алюминиевого экрана; в — несущий блок с коническими вставками и зазорами в конических углублениях; г — несущий блок с двумя коническими вставками; д — коническая вставка с образующей, изменяющейся по экспоненте

Несущий блок 1 выполнен из фенольного связующего. Боковые поверхности углублений 2 покрывают проводящим материалом, например лаком 4 с наполнителем из графита. В углубления вводят наполнитель 5, который состоит из полистирола, ПТФЭ или термопласта с наполнителем из окиси титана, диэлектрическая проницаемость которого больше, чем у материала несущего блока. На основании блока предусмотрен металлический экран 6. Контакт алюминиевого экрана с проводящим покрытием 4 осуществляется через свободные поверхности 7.

На рис. 2.102 показана зависимость коэффициента отражения от частоты для такого материала толщиной 4,6 см. Диэлектрическая проницаемость материала несущего блока $\epsilon' = 1,1$, а магнитная проницаемость $\mu' = 1$. Кривые *a–д* показывают улучшение поглощающей способности материала за счет увеличения диэлектрической и магнитной проницаемостей наполнителя по сравнению с материалом несущего блока. Кривая *a* представляет зависимость коэффициента отражения от частоты для наполнителя с $\epsilon' = 1$ и $\mu' = 1$. Кривые *б–д* получены при следующих значениях ϵ' и μ' : для кривой *б* $\epsilon' = 4,1$; для кривой *в* $\epsilon' = 5,2$; $\mu' = 1,4$; для кривой *г* $\epsilon' \approx 6$; $\mu' = 1,9$; для кривой *д* $\epsilon' = 8,4$; $\mu' = 2,4$. Для расширения диапазона работы поглощающих материалов разработан широкополосный поглотитель слоистой конструкции с клиновидными выступами (рис. 2.103), наклонные поверхности которых изменяются по экспоненциальному закону. Клиновидные выступы 1 имеют в разрезе треугольную форму в одной плоскости и прямоугольную в другой. Выступы заполнены зубчатыми слоями поглощающего материала 2, а сверху покрыты слоем материала с малой диэлектрической проницаемостью для согласования с окружающей средой. Широкая полоса частот поглощаемого излучения обеспечивается тем, что клиновидные выступы поглощают радиолокационное излучение с большими длинами волн, а зубчатые внутренние слои — излучение с малыми длинами волн.

Поглощающий широкополосный материал для работы в диапазоне 1–15 см состоит из листа или блока пенопласта, в котором выполнены конические углубления 1 (рис. 2.104). Контуры конических углублений на передней поверхности 2 (3 — задняя поверхность) пересекаются друг с другом на небольших участках оснований этих углублений 4. На стенки конических углублений нанесен слой 5 поглощающего материала толщиной 0,25–0,35 мм. В диапазоне

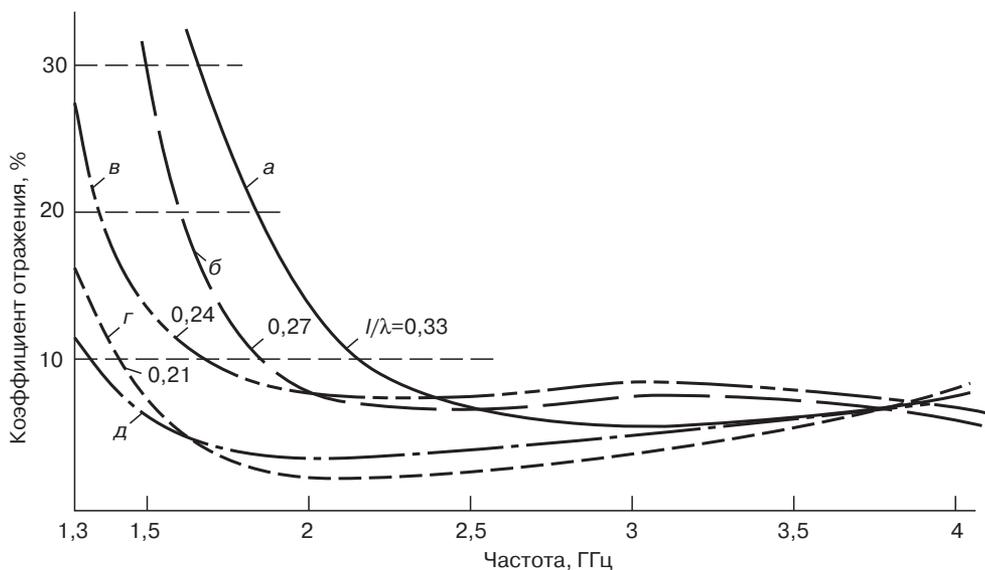


Рис. 2.102. Зависимость коэффициента отражения от частоты для радиопоглощающего материала с конусообразными углублениями, заполненными диэлектрическими вставками аналогичной формы [104]: *l* — высота поглотителя; λ — длина волны

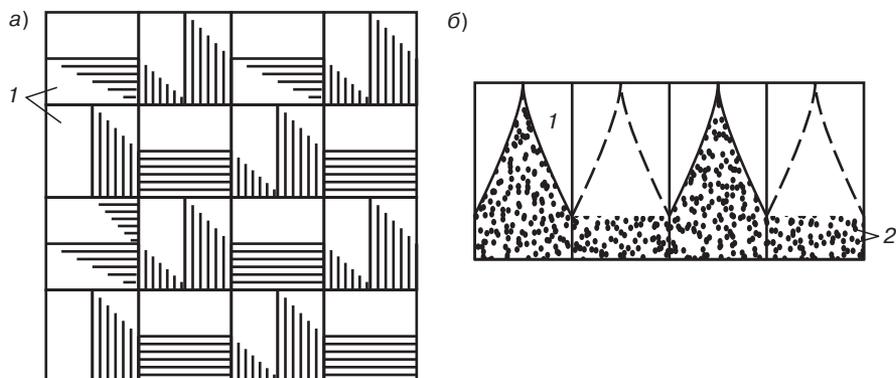


Рис. 2.103. Широкополосный радиопоглощающий материал для безэховых камер слоистой конструкции с клиновидными выступами [104]: а — вид сверху; б — вид сбоку

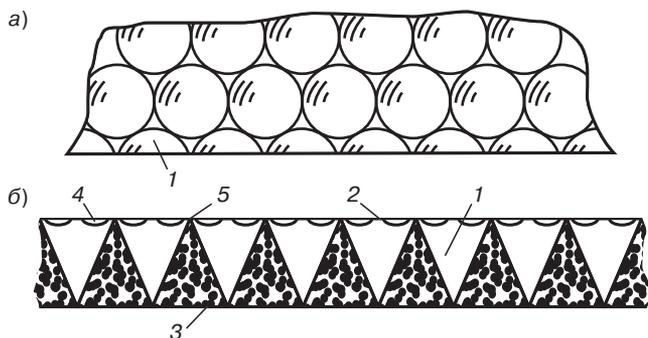


Рис. 2.104. Широкополосный радиопоглощающий материал фирмы *McMillan* [104]: а — вид сверху; б — вид сбоку

1–15 см такой поглотитель обеспечивает ослабление сигнала 20, 18 и 16 дБ при углах падения излучения 45, 60 и 70° соответственно.

Большое число разработок связано с ферритовыми радиопоглощающими материалами. Большая часть покрытий из ферритов имеет толщину порядка 6 мм в диапазоне длин волн около 300 МГц. Тонкую ферритовую поглощающую стенку для безэховых камер, работающих в диапазоне УВЧ, можно получить при условии, что действительная часть комплексной магнитной проницаемости феррита близка к единице, а мнимая намного больше, чем действительная, и обратно пропорциональна частоте. Если обычно толщина стенки безэховой камеры составляет от 0,5 до $1,5 \lambda_0$ (где λ_0 — длина волны в свободном пространстве), то при использовании ферритов необходимая толщина ферритовой поглощающей стенки будет от $1/60$ до $1/100 \lambda_0$ [104].

Поглощающий материал для безэховых камер состоит из полигональных (шестиугольных) ферритовых плиток, к задней стороне которых примыкает проводящая плита. При компоновке стенки из таких плиток ступенчатые кромки соседних плиток плотно смыкаются, исключая возможность образования зазоров между плитками.

Из других видов материалов для безэховых камер представляет интерес радиопоглощающая стенка, состоящая из отдельных магнитных стержней, расположенных вертикально и горизонтально. Такая стенка предназначена для работы на частотах ниже 1 ГГц [104].

Поляризационно-независимую структуру поглощающего материала (рис. 2.105) получают нанесением на тонкие листы пенополистирола (или другого пенопласта) резистивных слоев (рис. 2.105, *а*). Затем такие листы вклеивают вместе, поворачивают на 90° и разрезают на тонкие листы (рис. 2.105, *б*). На эти же листы снова наносят резистивные слои (рис. 2.105, *в*). Полученные листы с резистивными слоями снова склеивают вместе. Выполненная таким образом структура не чувствительна к поляризации падающего излучения [104].

Поглощающий материал из ферритовой стенки в сочетании с поглощающей диэлектрической стенкой, размещенной на лицевой стороне ферритовой стенки, является широкодиапазонным. Ферритовый слой поглощает электромагнитное излучение в диапазоне частот 100–1000 МГц, а электромагнитное излучение с частотой свыше 1000 МГц поглощается диэлектрической стенкой (рис. 2.106).

Широкополосный многослойный поглощающий материал состоит из нескольких тонких слоев. Материал включает слой диэлектрика и слой магнитного поглощающего материала, а также металлическую подложку. Слоев диэлектрика может быть несколько; на передней поверхности слоя диэлектрика могут размещаться клиновидные детали из поглощающего диэлектрического материала. Характеристики широкополосного поглощающего материала, состоящего из ферритовой пластины 1, перед которой размещен поглотитель 2 зигзагообразным слоем, приведены на рис. 2.107. Оптимальная толщина поглотителя составляет 31 см.

Максимальный уровень отраженного сигнала в современных безэховых камерах примерно на 70 дБ ниже уровня падающего сигнала в определенном диапазоне частот, причем некоторые камеры обеспечивают экранирование, уменьшающее уровень сигнала на 140 дБ (рис. 2.108).

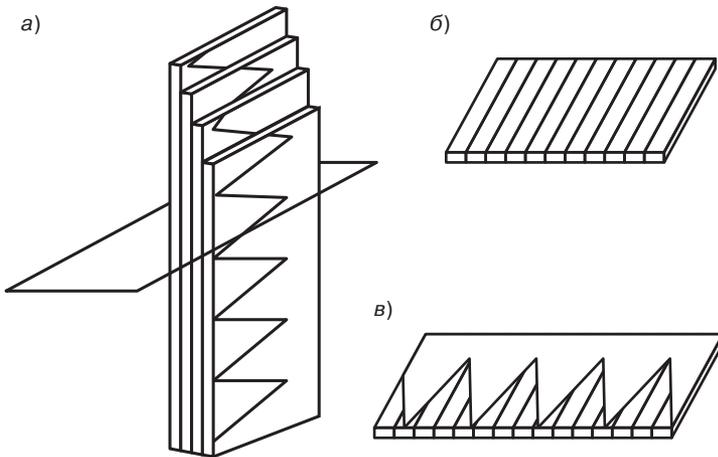


Рис. 2.105. Поляризационно-независимая структура радиопоглощающего материала [104]

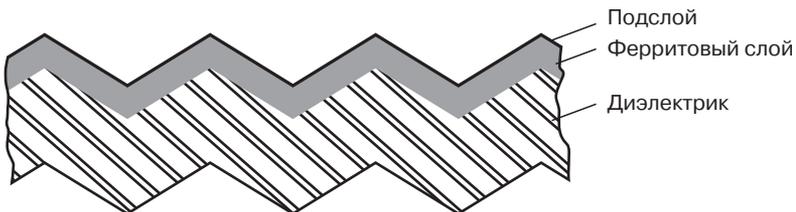


Рис. 2.106. Поглощающий материал для применения в широком диапазоне частот [104]

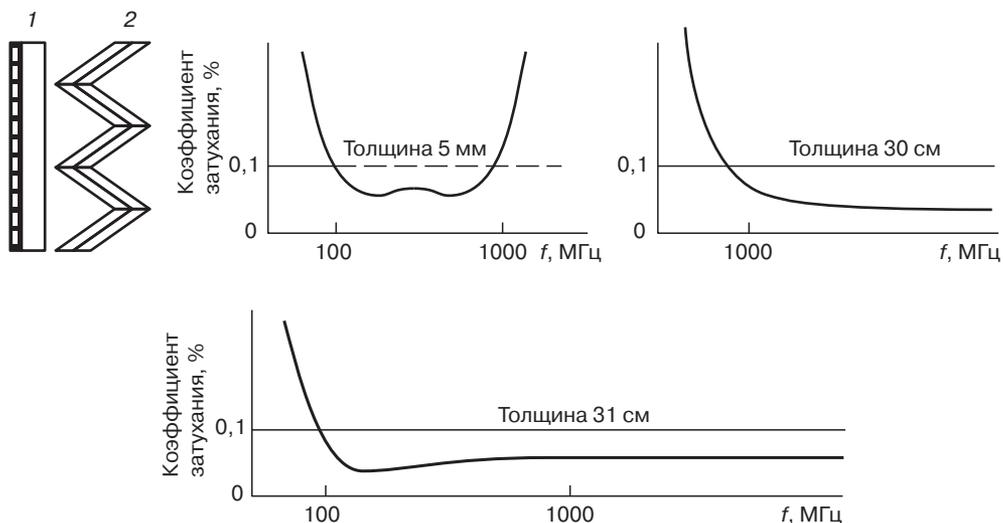


Рис. 2.107. Характеристики радиопоглощающего материала для работы в широком диапазоне частот [104]

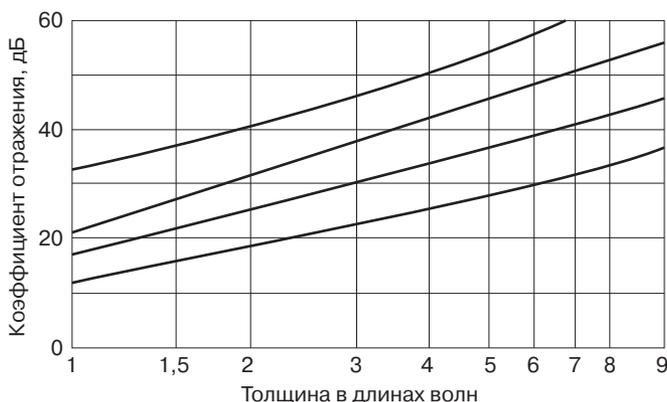


Рис. 2.108. Коэффициенты отражения для различных углов падения излучения поглощающих материалов для безэховых камер [104]

2.4.4. Принципы и способы уменьшения радиолокационной заметности (УРЗ) объектов. Технология *Stealth*

Методы и материалы, обеспечивающие экранирование, поглощение ЭМЭ радиодиапазона и определенный уровень радиолокационной заметности используют теоретические и прикладные принципы, являющиеся одинаковыми для различных объектов современной техники, использующих магнетодиэлектрики (безэховые камеры, антенны, волноводы, строительные конструкции, оборудование, транспорт, военная техника).

Выделение проблемы уменьшения радиолокационной заметности объектов (РЛЗ) достаточно условно с точки зрения теории процессов экранирования и поглощения ЭМЭ

и во многом связано с практическими вопросами УРЗ военных объектов (объекты ракетной техники, морские объекты, их излучающие антенные устройства). Применительно к объектам военного самолетостроения проблема УРЗ сформулирована в виде технологии *Stealth* (англ. скрытность, уловка, невидимка), в полной мере использующей комплексный подход к УРЗ (архитектура объекта, использование радиопоглощающих материалов РПМ и радиопоглощающих покрытий РПП) с определенной спецификой (минимизация массы, объемов РПМ и РПП, частоты 1–20 ГГц). Многие практические решения (градиентные, шахтного типа, сотовые радиопоглощающие конструкции РПК, разработанные, например, для безэховых камер, нашли применение в РПП самолетов *Stealth*. Термин «технология *Stealth*» используется и для обеспечения УРЗ надводных и подводных кораблей, изделий ракетной техники, антенных устройств этих объектов и РЛС.

Снижение радиолокационной заметности РЛЗ объектов военной техники позволяет повысить их выживаемость за счет уменьшения вероятности обнаружения и распознавания этих объектов.

Разработанные методы снижения РЛЗ находятся на стадии практического использования. Наибольший эффект по снижению РЛЗ объектов можно получить только в том случае, когда средства снижения РЛЗ разрабатываются на стадии проектирования этих объектов и внедряются в процессе их производства. Определенные успехи, достигнутые в разработке конкретных средств снижения РЛЗ, связаны с работами отечественных ученых и специалистов, например, теория П. Уфимцева управляемого РЛ отражения [29, 36].

В США, странах Западной Европы и Японии проводятся исследования по использованию комплексного подхода при создании малозаметных объектов. В США такие работы проводятся в рамках программы «*Stealth*». Комплексный подход предусматривает формирование рациональной архитектуры малозаметного объекта и оптимальную топологию нанесения РПМ с заданными характеристиками. Практическим результатом явилось определение принципов формирования рациональной архитектуры объектов и создание большой гаммы поглотителей электромагнитных волн с низкими показателями РЛЗ.

В современных разработках РПМ и РПП для поглощения энергии электромагнитных волн в основном используются традиционные электропроводящие дисперсные (сажи, графит, металлические частицы), волокнистые (углеродные, металлические и полимерные металлизированные) и магнитные (спеченные ферритовые пластины, порошки ферритов, оксида железа и карбонильного железа) наполнители, применяемые как по отдельности, так и совместно друг с другом. Выбор полимерного или керамического диэлектрического связующего зависит не только от радиотехнических, но и от эксплуатационных требований (последние, как правило, являются определяющими).

При современном уровне развития РЛС достаточно 5% отраженной энергии для обнаружения объекта на расстоянии в тысячи км. На больших расстояниях величина отраженного сигнала чрезвычайно мала и составляет 10^{-12} и 10^{-14} Вт (энергия света карманного фонарика, включенного в 10–12 км от наблюдателя), но современные РЛС «видят» бабочку на расстоянии 4 км.

2.4.4.1. Характеристики радиолокационных систем

Радиолокация — область науки и техники, предмет которой — наблюдение различных объектов (целей) радиотехническими средствами: их обнаружение, распознавание, определение их местонахождения, скорости и др. Процесс радиолокационного наблюдения осуществляется радиолокационными станциями (РЛС) и системами. В радиолокации с зондирующим излучением для наблюдения используются радиосигналы, отраженные от объекта, облученного НКС (эхо-сигналы), в радиолокации с активным ответом — сигналы РЛС, переизлученные активным ретранслятором, находящимся на объекте, в пассивной радиолокации — собственное радиоизлучение объекта (его радиоустройств или тепловое) [37–40].

Возможности обнаружения объектов по отраженной радиоволне определены при измерении высоты ионосферы (слоя Кеннели–Хевисаида) путем наблюдения интерференции радиоволн, распространяющихся вдоль поверхности Земли и волн, отраженных от ионосферы. Отражение декаметровых волн используется в ионосферной радиосвязи (дальность до 4000 км, загоризонтные РЛС).

Расширяют возможности радиолокации радиотеплокация (верхняя граница радиочастотного диапазона λ от нескольких мм до 3–5 см; обнаружение малых объектов, айсбергов, плохо отражающих радиоволны, кильватерных струй за кораблями, подводными лодками, воздушных вихрей при полете самолетов, отраженных от Земли радиоволн; аэрозоли, дым не мешают обнаружению) и ИК-локация (λ 0,76 мкм, за порогом красных световых лучей, до 0,75 мм, обнаружение объектов по тепловому излучению, использование ИК-прозрачных материалов для камер ИК-приемников объемных и в виде покрытий на основе ZnS, пропускание λ 8–12 мкм, MgO, пропускание 0,8–0,94, спеченный Al_2O_3 , пропускание 0,94 до 800 К, спеченный SiO_2 , в том числе с короткими волокнами SiC и Si_3N_4 , ZrO_2 , оксид иттрия; MgF_2 , изостатическое прессование, пропускание 0,92; но ИК излучение задерживается дымом, облаками, дождем, туманом).

Радиолокация — это обширная область техники, которая впитывает в себя достижения радиофизики и электроники.

Диапазон электромагнитных волн (рис. 2.109), в котором работают РЛС, чрезвычайно широк — от десятков метров до миллиметров (современные РЛС чаще всего в интервале 1–20 ГГц). Выделяют следующие диапазоны:

| | | |
|-----------|-------------------------|-------------|
| <i>L</i> | 1–2 ГГц | 30–15 см |
| <i>S</i> | 2–4 ГГц | 15–7,5 см |
| <i>C</i> | 4–8 ГГц | 7,5–3,75 см |
| <i>X</i> | 8–12 ГГц | 3,75–2,5 см |
| <i>Ku</i> | 12–18 ГГц | 2,5–16,5 мм |
| <i>K</i> | 18–27 ГГц | 16,5–11 мм |
| <i>Ka</i> | 27–40 ГГц | 11–7,5 мм |
| <i>J</i> | 8–10 ГГц | 3,75–3 см |
| <i>E</i> | УКВ, дециметровые волны | |

Возможности обнаружения напрямую зависят от рабочей длины волны РЛС (рис. 2.110).

Антенны РЛС — сложные сооружения, насчитывающие до нескольких тысяч элементарных излучателей, позволяют определить точное положение и характеристики обнаруживаемых объектов. Зондирование производится радиосигналами со сложной внутренней структурой. Отраженные сигналы усиливаются, записываются в цифровой форме (в том числе на самолетах с использованием метода синтезированной апертуры) и анализируются средствами ЭВМ.

Передающее устройство РЛС не «накладывает» на излучаемые радиоволны (излучаемый сигнал) никакой информации. Только после падения волны на цель переизлученное ею вторичное электромагнитное поле становится носителем информации о цели. Цель как бы играет роль модулятора, изменяя амплитуду, частоту, фазу и поляризацию рассеянной волны. Все эти изменения обусловлены как отражающими свойствами самой цели, так и ее перемещением относительно РЛС. Кроме того, параметры отраженного сигнала сильно зависят от характеристик сопутствующего фона.

Независимо от измерений на основе имитационных моделей на ЭВМ проводятся расчеты ожидаемых радиолокационных характеристик. Полученные результаты сравниваются

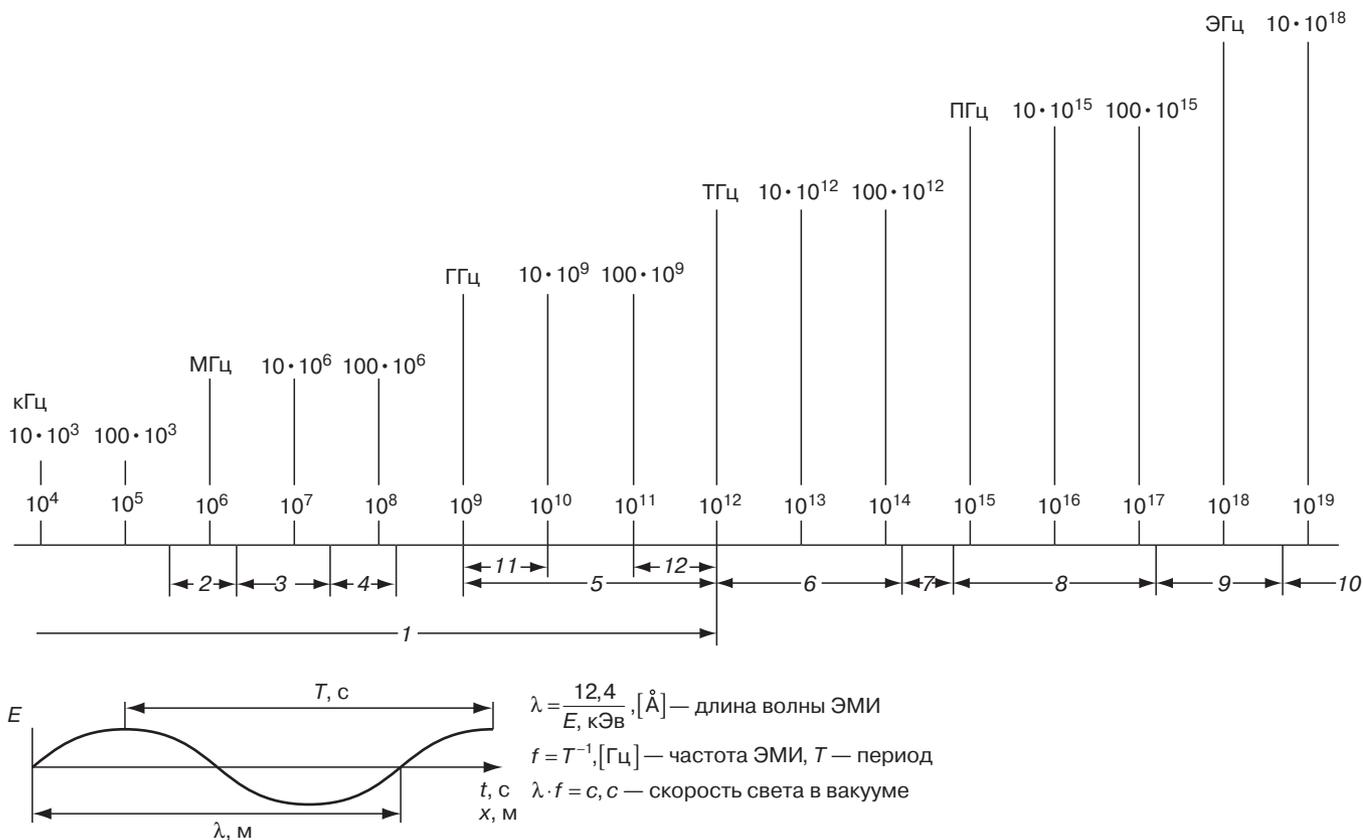


Рис. 2.109. Частотные диапазоны электромагнитного излучения [37]: 1 — радиодиапазон; 2 — широковещательный диапазон; 3 — коротковолновый; 4 — диапазон видеочастот; 5 — диапазон работы РЛС (К — кило, М — мега, Г — гига, Т — тера, П — пэта, Э — экса); бытовые приборы 50 Гц, радиотелефоны $450 \cdot 10^6$ Гц– $1,8 \cdot 10^9$ Гц; 6 — ИК; 7 — оптический (видимый); 8 — УФ; 9 — рентген; 10 — γ -излучение; 11 — микроволновый; 12 — терагерцовая спектроскопия (бесконтактные неразрушающие методы контроля структуры материалов)

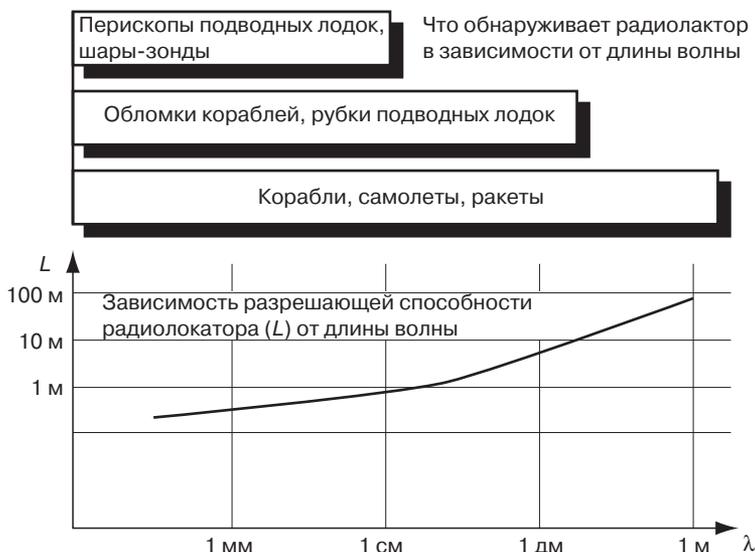


Рис. 2.110. Зависимость разрешающей способности РЛС от λ [38, 41]

с данными измерений и полученная информация выдается в виде цветной фотографии, на которой выделяются зоны повышенного отражения, а также зоны, имеющие уровень отражения ниже заданного порога. В результате выявляются элементы, внешние очертания которых требуют доработки и одновременно выявляются поверхности, требующие нанесения РПМ.

Современная радиолокация и радиоастрономия предъявляют возрастающие требования к антеннам, которые могли бы осуществлять быстрое сканирование остронаправленным лучом, излучая при этом высокий уровень электромагнитной энергии. Такими возможностями обладают мощные фазированные антенные решетки (ФАР), которые к настоящему времени достигли высокого уровня совершенства. Фазированные антенные решетки позволяют быстро управлять направлением луча — передвигать точку фокусировки. Элементы решетки питаются от общего генератора, обеспечивает нужные фазы излучения отдельных элементов решетки. Например, РЛС системы «Pave Paws» имеет твердотельную ФАР дециметрового диапазона волн. Каждое из двух полотен решетки содержит 2677 антенных элементов, из которых 1792 активных и 885 пассивных. Антенные элементы заполняют апертуру диаметром примерно 24 м. Каждое полотно излучает в импульсе 585 кВт, средняя мощность излучения равна 145 кВт [39].

Для защиты фазированных антенных решеток от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды используются радиопрозрачные укрытия (РПУ), представляющие собой диэлектрические оболочки (на ЛА — антенные обтекатели).

Радиопрозрачные укрытия обеспечивают необходимые температурные режимы в антенне и препятствуют изменению размеров и деформации антенных элементов при резких перепадах температур внешней среды и ветровых нагрузок. Они защищают антенну от обледенения, забивания снегом, размораживания систем водяного охлаждения, накопления влаги в полостях излучателей и фидерных трактов.

При все более возрастающих уровнях мощности, излучаемой антеннами, возникает проблема выбора конструкции и материалов для радиопрозрачных укрытий. Радиопрозрачное укрытие, расположенное в раскрыве мощной фазированной антенной решетки, подвергается воздействию электромагнитного поля со сложным пространственно-временным изменением напряженности. В зонах максимальной концентрации напряженности при некоторых условиях могут возникать разрушающие конструкцию тепловой или электрической пробой.

Неправильно сконструированное укрытие может быть причиной выхода из строя антенных элементов, которые оно должно защищать от воздействия внешних факторов.

Для летательных аппаратов разработаны конформные РЛС, которые позволяют отказаться от выступающих в поток крупногабаритных вращающихся и неподвижных антенных обтекателей, снизить массу и уменьшить лобовое сопротивление.

Ключевой особенностью конформной РЛС является ее антенна в виде фазированной решетки с широкой апертурой. Фазированная антенная решетка (ФАР) содержит множество отдельных элементов, каждый из которых излучает широкий луч. Отдельные элементы ФАР запитываются индивидуально сфазированными сигналами. При совпадении фаз излучения элементов передаваемый сигнал усиливается в направлении, перпендикулярном решетке, создавая мощный узкий луч, направленный в переднюю полусферу. Последовательный сдвиг по фазе решетки создает эффект поворота луча. Программируя фазовые изменения сигналов, удается осуществлять электронное управление лучом ФАР для обзора широкого сектора пространства в одной или нескольких плоскостях, не прибегая к физическому перемещению элементов ФАР. При этом скорость сканирования может быть намного большей, чем при механическом перемещении обычной антенны, что обеспечивает более высокую частоту получения данных. Для дальнейшего сужения луча необходимо увеличивать количество элементов ФАР. Расстояние между элементами зависит от длины волны.

Конформная антенна с ФАР может размещаться на крыле или оперении обычного профиля даже на ЛА средних размеров. При этом можно обеспечить всеракурсный обзор пространства. В связи с развитием техники *Stealth*, дающей возможность создавать ЛА с уменьшенной радиолокационной заметностью, возрастает значение абсолютной дальности обнаружения целей, величина которой определяется шириной апертуры при узконаправленном луче. Оказывается возможным обеспечить работу РЛС в диапазоне более длинных волн (УКВ диапазоне дециметровых волн в диапазоне частот E), которые приближаются к линейным размерам некоторых частей планера ЛА. В этом случае меры по снижению эффективной площади рассеивания становятся менее ощутимыми из-за влияния на цель естественного электромагнитного резонанса.

Используя электронное управление, можно формировать антенный луч конформной РЛС, изменяя конфигурацию его основного и бокового лепестков диаграммы направленности излучения таким образом, чтобы свести к нулю влияние сигналов организованных помех со стороны противника. В пассивном режиме антенна может использоваться для РТР (разведки).

Одна из основных трудностей в создании конформной РЛС заключается в необходимости иметь достаточно большие поверхности объекта, например самолета, ориентированные в нужном направлении. ФАР на крыле и хвостовом оперении могут быть использованы для обзора передней и задней полусфер, а ФАР на боковых поверхностях фюзеляжа — для бокового обзора. Узкий луч образуется ФАР, имеющей форму лесенки с излучательным, отражательным и директорными элементами — по типу телевизионной антенны. Благодаря интерференции между отдельными элементами ФАР, расположенными друг от друга на расстоянии менее одной длины волны, удается расширить диаграмму направленности излучения отдельных элементов до сектора с углом 90° и обеспечить широкий угол обзора ФАР.

Основную угрозу представляют низколетящие малоразмерные и малозаметные цели. Это учитывается при разработке перспективных РЛС, которые будут характеризоваться низкой рабочей частотой (диапазоном частот В/С), повышенной мощностью излучения и антенной с широкой апертурой, что вместе взятое обеспечит достижение максимально большой дальности обнаружения.

В РЛС *APS-138* используется двойная линейная антенная решетка типа *Yagi*, создающая узкий луч с подавлением боковых лепестков. Дальность обнаружения небольших целей составляет 270 км. Система пассивного обнаружения сигнализирует экипажу о появлении излучающих РЛС на еще больших дальностях.

Импульсно-доплеровская РЛС *Skymaster* с качанием частоты работает в частотном диапазоне J (8–10 ГГц) с круговым обзором и автоматическим секторным сканированием. Она

обеспечивает ДРЛО над сушей и над морем, а также может использоваться для морской разведки. В этой РЛС применяется передатчик с другим антенным отражателем для изменения формы луча. Допплеровский режим используется для обнаружения низколетящих целей, а импульсный режим — для обнаружения высоколетящих и надводных целей. При работе РЛС в доплеровском режиме интервалы между импульсами изменяются, а специальная обработка сигналов обеспечивает получение однозначных данных о дальности. После обнаружения и опознавания цели оператор может осуществлять целеуказание и включать автосопровождение. Из общего количества целей, составляющих 100, можно выбрать 32 цели с автоматическим следением за ними «на проходе» по данным, имеющимся в файлах бортовой системы.

Ширина полосы обзора современных РЛС бокового обзора достигает 100–125 км.

Созданы РЛС с шириной полосы обзора до 250 км и с разрешением в несколько метров. Перспективным направлением в развитии разведывательных РЛС считается создание широкодиапазонных и многоканальных РЛС, работающих при различных комбинациях поляризации излучаемых и принимаемых сигналов. В настоящее время для целей разведки используются РЛС преимущественно дециметрового диапазона волн.

Особенностью конструкции некоторых РЛС космического базирования является их способность работать в различных режимах: скатерометра (некогерентные РЛС) и СВЧ радиометра (пассивные РЛС). Для космической разведки применяются разнесенные (бистатические) РЛС, в которых аппаратура облучения местности и приема переизлученных сигналов устанавливается на различных объектах (например, передатчик на одном космическом аппарате, а приемник на другом или на самолете). Подобный принцип построения разведывательной системы снижает ее уязвимость и повышает помехоустойчивость.

Американской фирмой *Grumman* разработана многоцелевая РЛС космического базирования в интересах создания универсальной радиолокационной системы для обнаружения из космоса боевых самолетов, кораблей, крылатых и баллистических ракет.

Она предусматривает применение складывающейся антенны из легкого тонкого материала или на использовании антенной решетки модульного типа, где каждый элемент антенны соединен с собственным миниатюрным приемопередатчиком. Такие РЛС в состоянии обнаруживать с орбиты (высота 2–10 тыс. км) малоразмерные цели (танки и корабли малого водоизмещения), а также проводить детальную инженерную разведку местности [42].

Крупные (с потенциалом более 3 млн — мощность излучения, Вт×площадь антенны, м²) РЛС с фазированной решеткой обнаруживают и сопровождают баллистические ракеты на траекториях полета и используются в системе ПРО раннего обнаружения (например, РЛС США в Туле, Гренландия; РЛС в Файлингдейлз-Мур, Великобритания; РЛС на Аляске, Клир, плавучая РЛС *SBX, Sea Based X-band* с фазированной решеткой, длина 120 м, высота — 86 м, стоимость 815 млн долл США, перебазируемая с Гавайев на о. Адак, запад Алеутских островов в январе 2007 г.). Гигантская РЛС с фазированной решеткой системы «Кобра Дейн» на острове Шемия (поселок Кипр, 400 миль восточнее Камчатки, западная оконечность Алеутских островов) способна одновременно следить за местонахождением, передвижением и типом свыше 250 объектов и может обнаружить в космосе теннисный мяч на расстоянии 2000 миль [44].

Обработанные данные о целях передаются через спутник в центр космической обороны НОРАД (США, Колорадо, гора Шайенн), в отдел техники и технологии на базу ВВС в Райт-Паттерсон (Огайо) и в штаб-квартиру агентства национальной безопасности в Форт-Миде (Мэриленд).

На судне США «*Observation Island*» в кормовой части размещена многофункциональная РЛС *AN/SPQ-11* «Кобра Джуди» (диапазон *S* 2–4 ГГц, большое количество воздушно-космических целей на дальностях до 4000 км), на центральной палубной надстройке — параболическая антенна диаметром более 9 м (диапазон *X*, 8–12,5 ГГц, лучшая угловая разрешающая способность, надежное выделение боеголовки БРДД среди сложных целей, точность расчета траектории БРДД) [40].

В самолетах дальнего РЛ обнаружения (ДРЛО, *AEW, Airborne early warning*) используются РЛС:

1) *Nimrod AEW-3 (British Aerospace)*, импульсно-доплеровская РЛС диапазона *E/F*, 2–4 ГГц фирмы *GEC Avionics*, фазированная решетка; аппаратура радиоэлектронной разведки *ESM* фирм *Litton* и *Loral* (США);

2) *C-130 AEW* (РЛС *APY-920/922*);

3) *E-2C Hawkeye* (РЛС *APS-138*, антенна в виде двойной линейной решетки из элементов типа «волновой канал», формирующей узкий луч с подавленными боковыми лепестками);

4) вертолеты *SeaKing*, противолодочный самолет *Nimrod MR-2* (РЛС *Searchwater*), *AE Defender* (РЛС *Skymaster*).

РЛС *Skymaster* является импульсно-доплеровской станцией с перестройкой несущей частоты. Она обеспечивает возможность поиска по азимуту в пределах 360° и автоматическое сканирование в пределах определенного сектора. В ней используется тот же передатчик, что и в РЛС *Searchwater*, а антенное зеркало модифицировано для изменения формы луча. Для работы по целям на больших высотах и обнаружения надводных кораблей используется импульсный режим работы, для обнаружения низколетящих целей — доплеровский режим. В доплеровском режиме для решения неоднозначности по дальности изменяются межимпульсные интервалы и используется обработка сигналов. После обнаружения и опознавания цели оператор может с помощью курсора осуществить целеуказание с переводом на автоматическое сопровождение и занесением данных в память, из которой в случае необходимости они могут быть вызваны по номеру файла [126].

РЛС с высоты 3 км (аэростат) обнаруживает низколетящие (высота до 50 м) объекты на расстоянии до 360 км.

Как крупные РЛС систем ПВО, ПРО типа «Пейв-пос», «Дарьял» на Габалинской РЛС (фиксация 10 000 космических объектов, их скорости, траектории, координат точек запуска и пунктов цели с радиусом действия 7000 км), РЛС «Воронеж-ДМ» (Лехтуси, Россия, повышенные характеристики обнаружения и классификации целей, малые габариты, стоимость 2 млрд р, Дарьял — 1 млрд долл США, рис. 2.111), так и РЛС ЗРК (типа Тор, Куб, С-300), РЛС современных самолетов (конформные) с фазированными решетками способны обнаружить цели с ЭПР менее $0,1 \text{ м}^2$.

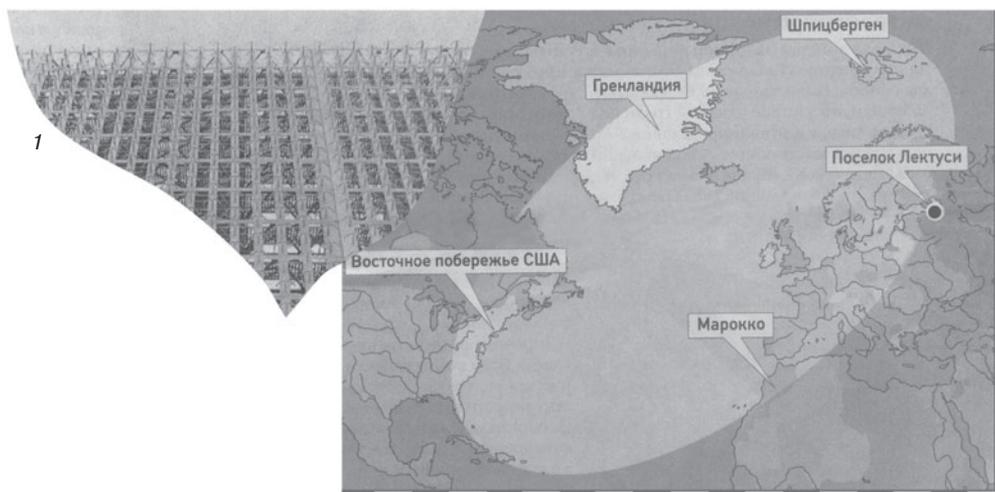


Рис. 2.111. Радиус действия модульной (1) РЛС «Воронеж-ДМ» [147]

Совершенствование РЛС (отказ от надфюзеляжных «грибов» — антенных обтекателей диаметром до 10 м в самолетах систем дальнего радиолокационного обнаружения «*Awacs*», А-50 на базе ИЛ-76 с высококогерентной импульсно-доплеровской РЛС, позволяющей обнаружить за 300 км до 60 целей, наводить на них более 15 истребителей, сопровождать 200 целей; встраивание антенных фазированных решеток в несущие поверхности и обшивку фюзеляжа, конформные РЛС; использование горизонтальной, вертикальной, круговой, эллиптической поляризации излучения; разработка РЛС, способных, несмотря на активные помехи, обнаруживать и сопровождать скоростные и низколетящие цели и поглощающих материалов, покрытий и конструкций проходит параллельно.

2.4.4.2. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР, $\sigma_{\text{ц}}$)

Важнейшей характеристикой, определяющей возможность обнаружения объекта с помощью РЛС, является величина эффективной площади рассеивания ($S_{\text{эфф}}$, ЭПР) цели, которая измеряется в м^2 и зависит не только от геометрических размеров объекта, но и от особенностей материалов, из которых он изготовлен, формы, структуры его поверхности, положения относительно радиолуча локатора, а также от длины и поляризации волны. Варьируя эти свойства, можно добиться того, что ЭПР объекта будет значительно больше его геометрической площади или меньше ее.

Одним из неперенных (хотя еще и недостаточных) условий обеспечения эффективной противолокационной маскировки защищаемых объектов является наличие наиболее полных сведений о количественных и качественных характеристиках отражения электромагнитной энергии от различных целей.

При падении электромагнитной энергии на какой-либо предмет (цель) на его поверхности возникают электрические токи, если цель проводник, или электрические заряды, если цель диэлектрик. В этом случае цель сама становится источником излучения электромагнитных колебаний. Часть отражений от цели энергии, поступающей на вход приемника радиолокатора, образует на индикаторе станции отметку от цели. Величина отраженного от цели сигнала зависит от параметров радиолокатора, условий распространения электромагнитной энергии и от характера цели: размеров, конфигурации, угла облучения, магнитоэлектрических свойств материала цели.

Для количественной оценки отражающих свойств любой радиолокационной цели пользуются условной величиной $\sigma_{\text{ц}}$ — эффективной поверхностью рассеяния ($S_{\text{эфф}}$, ЭПР) цели.

ЭПР цели влияет на дальность обнаружения D объектов радиолокационными станциями [26],

$$D = K\sqrt[4]{S_{\text{эфф}}} = K\sqrt[4]{\sigma_{\text{ц}}},$$

где K — коэффициент, учитывающий технические характеристики радиолокационной станции и окружающие условия (атмосферное поглощение ЭМЭ, отражения от земли или моря, другие ограничивающие факторы). Уменьшение $\sigma_{\text{ц}}$ в 100 раз сокращает дальность обнаружения более чем в 3 раза.

Мощность вторичного излучения P_2 (энергия, рассеиваемая целью при падении на нее электромагнитной волны) прямо пропорциональна плотности потока энергии Π_1 , облучающей цель, то есть

$$P_2 = \sigma_{\text{ц}} \cdot \Pi_1,$$

Большинство радиолокационных целей имеет свойство направленного вторичного излучения. С учетом коэффициента направленного действия отражающего объекта D , характеризующего степень концентрации рассеиваемой мощности в направлении на радиолокатор, выражение для $\sigma_{\text{ц}}$ можно написать в следующем виде [45]:

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{P_2}{\Pi_1} D,$$

ЭПР ($\sigma_{\text{ц}}$) может выражаться в единицах площади (м^2) или в децибелах (дБ), причем

$$\sigma_{\text{ц}}[\text{дБ}] = 10 \lg \sigma_{\text{ц}}[\text{м}^2],$$

то есть уровню в нуль децибел соответствует величина $\sigma_{\text{ц}}$, равная 1 м^2 (рис. 2.112).

Для определения ЭПР цели необходимо знать плотности потоков энергии в точках расположения цели и антенны радиолокатора. Получение теоретических данных о поле отраженной волны, а следовательно, и об ЭПР цели практически сводится к решению уравнений Максвелла с соответствующими граничными условиями. Существующие в настоящее время методы решения таких уравнений позволяют определить расчетным путем ЭПР для тел простой геометрической формы (табл. 2.99) и постоянно совершенствуются.

В реальных условиях радиолокационного обнаружения объекты простой геометрической формы встречаются довольно редко. Как правило, они имеют сложную конфигурацию и состоят из большого числа различных элементарных отражателей. Примерами одиночных целей сложной конфигурации могут служить корабли, самолеты, ракеты, различные наземные сооружения и т. д.

Совокупность множества отражающих элементов, относительно близко расположенных друг к другу и занимающих сравнительно большую область пространства, образует так называемую объемно-распределенную цель. К таким целям можно отнести гидрометеоры, облако дипольных отражателей и т. д.

Если отдельные отражающие элементы сливаются в один сравнительно тонкий слой, то они образуют поверхностно-распределенную цель. С такими целями можно встретиться при радиолокационном обзоре земной или морской поверхности.

Расчет ЭПР реальных целей сложной конфигурации представляет большие теоретические трудности, поэтому ЭПР отражающих объектов сложной формы исследуют, в основном, экспериментальными методами с помощью специальной аппаратуры и устройств.

Сложную цель можно рассматривать как совокупность большого числа элементов, рассеивающих электромагнитную энергию в различных направлениях. Такими элементами могут

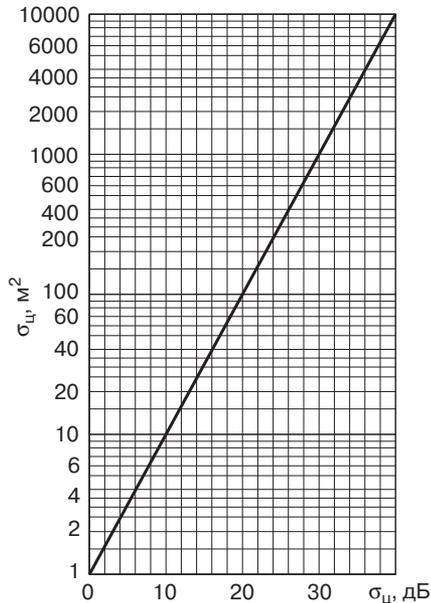


Рис. 2.112. График для пересчета единиц измерения ЭПР [25]

быть: выпуклые участки цели, являющиеся характерными «блестящими» точками; плоские части, создающие зеркальное или диффузное отражение. Отдельные элементы конструкции цели, размеры которых соизмеримы с длиной волны, будут создавать интенсивное вторичное излучение вследствие резонансных явлений. Суммарная амплитуда отраженного сигнала будет определяться относительными фазами и амплитудами сигналов, отраженных от элементарных вторичных излучателей. Амплитуды отдельных сигналов, имеющих разные фазы в точке приема, либо складываются между собой, обеспечивая большой суммарный отраженный сигнал, либо имеют такие соотношения, которые приводят к частичному или полному подавлению сигнала. Как правило, расстояние между отдельными отражающими элементами значительно превышает длину волны радиолокатора. В этом случае фазы сигналов в точке приема будут меняться с изменением положения цели относительно направления на радиолокатор, что, в свою очередь, вызовет дополнительные флуктуации отраженного сигнала и ЭПР цели. На характер флуктуации результирующего отраженного сигнала оказывают большое влияние взаимное перемещение цели и радиолокатора, а также движение отдельных элементов самой цели (например, в результате собственных вибраций самолета или корабля). Незначительные изменения курсового угла самолета могут изменить мгновенное значение $\sigma_{ц}$ на большую величину (рис. 2.113).

При облучении цели имеет место флуктуация амплитуд отраженных сигналов и ЭПР целей, флуктуации фазового фронта отраженного сигнала, деполаризация отраженного сигнала.

При практической оценке дальности действия радиолокационной станции обычно пользуются средним значением ЭПР $\bar{\sigma}_{ц}$. Эту величину можно получить усреднением значений $\sigma_{ц}$ для различных направлений падающей волны.

В табл. 2.100 приводятся средние значения ЭПР различных реальных целей, полученные в результате статистического обобщения большого числа измерений на волнах сантиметрового диапазона.

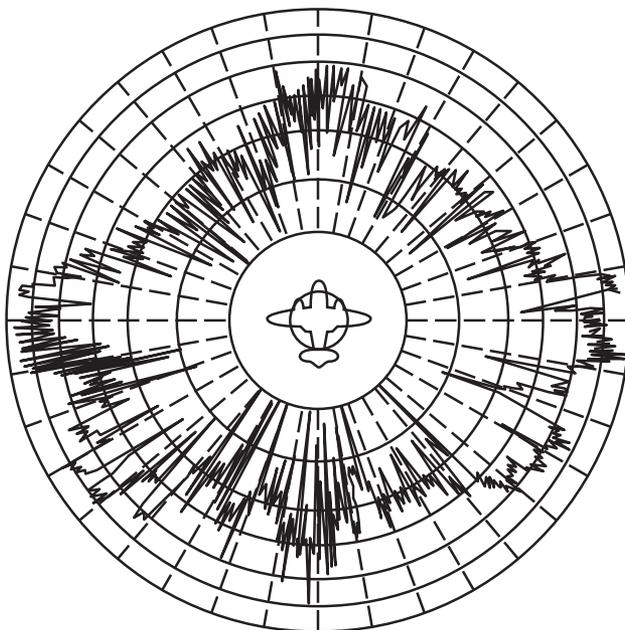
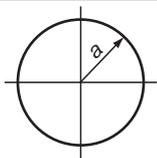


Рис. 2.113. Диаграмма обратного рассеяния (ДОР). Зависимость ЭПР двухмоторного бомбардировщика В-26 от азимута. Измерения проводились при длине волны $\lambda = 10$ см [25, 29]

Как правило, измерялась максимальная дальность обнаружения таких целей $R_{\text{макс}}$, а затем из основного уравнения радиолокации определялась $\sigma_{\text{ц}}$.

Некоторые типы измерительных систем для исследования ЭПР на моделях приведены в приложении.

Таблица 2.99. Расчетные формулы для определения эффективной поверхности рассеяния геометрических тел [25]



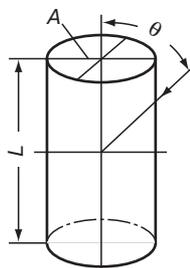
Шар

При длине волны $\lambda \ll a$:

$$\sigma_{\text{ц}} = \pi \cdot a^2$$

При длине волны $\lambda \gg a$:

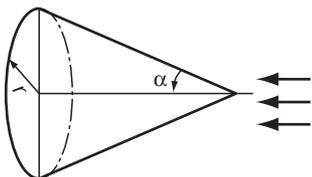
$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{144\pi^2 \cdot a^2}{\lambda^4}$$



Круглый цилиндр

$$\sigma_{\text{ц}} = kAL^2 \sin \theta \left[\frac{\sin(kL \cos \theta)}{kL \cos \theta} \right]^2;$$

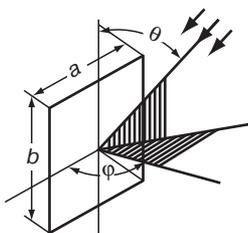
$\sigma_{\text{ц}} = kAL^2$ при $\theta = \pi/2$; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число



Конус

$$\sigma_{\text{ц}} = \pi r^2 \text{tg}^2 \alpha$$

Направление облучения совпадает с осью конуса

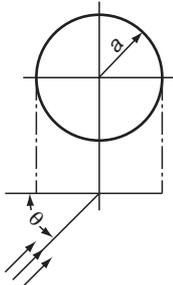


Прямоугольная пластина

$$\sigma_{\text{ц}} = \left[\frac{kab}{\sqrt{\pi}} \sin \theta \frac{\sin(ka \sin \theta \cos \varphi)}{ka \sin \theta \cos \varphi} \right] \cdot \left[\frac{\sin(kb \cos \theta)}{kb \cos \theta} \right]$$

При нормальном падении к плоскости пластины:

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi \frac{a^2 b^2}{\lambda^2}$$



Плоский диск

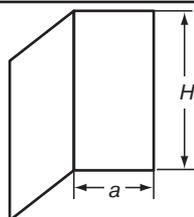
$$\sigma_{\text{ц}} = \pi k^2 a^4 \sin^2 \theta \left[\frac{J_1(2ka \cos \theta)}{2ka \cos \theta} \right],$$

где J_1 — функция Бесселя 1-го порядка.

При нормальном падении к плоскости диска:

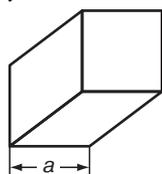
$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2}$$

Окончание табл. 2.99

**Двугранный уголкоый отражатель**

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{8\pi(aH)^2}{\lambda^2}$$

в максимуме диаграммы рассеяния

**Трехгранный уголкоый отражатель**

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$$

в максимуме диаграммы рассеяния

Таблица 2.100. Средние значения ЭПР различных радиолокационных целей [25]

| Радиолокационная цель | ЭПР, м ² |
|---|---------------------|
| Головная часть баллистической ракеты | 0,2 |
| Истребитель | 3–5 |
| Средний бомбардировщик | 7–10 |
| Дальний бомбардировщик | 15–20 |
| Транспортный самолет | До 50 |
| Крейсер | 14 000 |
| Транспорт малого тоннажа | 150 |
| Транспорт среднего тоннажа | 7500 |
| Транспорт большого тоннажа | 15 000 |
| Траулер | 750 |
| Малая подводная лодка в надводном положении | 140 |
| Катер | 100 |
| Рубка подводной лодки | 1 |
| Человек | 0,8 |

Существует зависимость между ЭПР цели и соотношением ее размеров с длиной волны облучающих электромагнитных колебаний. Если длина объекта равна или кратна половине длины волны, то эхо-сигнал окажется гораздо сильнее отраженного, определяемого лишь геометрической площадью объекта. Это явление называется резонансным отражением. К примеру, полуволновый диполь (бесконечно тонкий проводник, длина которого равна половине длины волны) имеет ЭПР в направлении нормали к оси диполя $0,86\lambda^2$. Практически это значит, что при волне в 10 см проволока диаметром 0,1 мм и длиной 50 мм будет иметь ЭПР, равную 86 см^2 , в то время как геометрическая площадь этого диполя составит всего $0,05 \text{ см}^2$, что в 1720 раз меньше ЭПР. Если тот же диполь расположить торцом к волне, то ЭПР окажется ничтожно малой.

Весьма большую ЭПР, определяемую четвертой степенью линейных размеров, имеют «угловые отражатели» — три металлические поверхности, пересекающиеся под прямым углом.

Самолет, обладающий весьма сложной геометрической формой, отражает сигнал, в создании которого большую роль играют интерференция, дифракция радиоволн и резонансные явления. Геометрические формы летательного аппарата могут образовывать множество так называемых «блестящих точек» — участков, создающих более мощный эффект отражения, нежели соседние. В других случаях появление «блестящей точки» может возникнуть от «углового отражателя», образованного пересекающимися поверхностями или при интерференции радиоволн. В результате изменение мощности отраженного сигнала достигает 20 дБ на градус изменения ракурса, а полные изменения ее могут составить несколько десятков дБ.

В радиолокации принято оценивать ЭПР объектов сложной формы в величинах, усредненных по ракурсу, диапазону радиоволн и многим измерениям. Подобная ЭПР бомбардировщика *B-52* достигает 50 м² и даже больше. Именно этот показатель и определяет максимальную дальность (с учетом некоторой вероятности) обнаружения самолета локатором.

В конструкции самолета есть немало узлов, замаскировать которые практически невозможно. Это антенны бортовых радиостанций и локаторов, воздухозаборники, выхлопные дюзы двигателей, вырывающиеся из них раскаленные струи газов.

Весьма затруднительно создать планер, совсем не отражающий радиоволны. Компьютерные расчеты контуров подобного самолета показали, что летные характеристики машины оказались бы совершенно неудовлетворительными.

Минимальная ЭПР, полученная в одном диапазоне частот, в другом может оказаться максимальной. Кроме того, эффективные системы маскировки воздушных целей могут оказаться совершенно бессмысленными при использовании различных методов наблюдения. Самолет, укравшийся от РЛС в облаке диполей, иной раз не трудно обнаружить в обычный бинокль. Значительное сокращение ЭПР вовсе не ведет к столь же резкому уменьшению дальности обнаружения объекта, поскольку последняя определяется корнем четвертой степени из ЭПР. Поэтому если ЭПР «невидимки» *B-1* в десять раз меньше, чем у *B-52*, то дистанция, на которой его обнаружит локатор сократится всего в 1,7 раза.

Самолет не может стать полностью невидимым, а радиолокационные станции и другие средства ПВО смогут обнаруживать «невидимый» бомбардировщик, хотя точное определение его координат и скорости будет осложнено.

В свое время радиолокация создавалась исключительно как оборонительное оружие. В частности, советская экспериментальная РЛС «Порфир», развернутая в июле 1941 г. под Можайском, помогла своевременно обнаружить вражеские самолеты при первом налете «люфтваффе» на Москву.

Усложняют обнаружение пассивные помехи-диполи (фольга, металлизированные волокна). Из-за них на экранах РЛС появляются засветки, на которых было невозможно обнаружить импульс, отраженный от цели. Расход диполей был велик — каждый четвертый, а то и третий англо-американский бомбардировщик, участвующий в налетах на немецкие объекты, вынужден был нести вместо бомб фольгу.

Диполи легко выделяются локаторами, оснащенными аппаратурой селекции (выделения) движущихся целей, действующей на основе принципа различия доплеровских частот в эхосигналах, отраженных от объектов, перемещающихся с различными скоростями.

Более эффективны активные помехи, «заглушающие» РЛС более мощным сигналом передатчика, установленного на частоту локатора. Но при активных помехах РЛС могут менять рабочие частоты [29, 36].

Совместными средствами ЭПР может быть уменьшена до нескольких десятых долей квадратного метра, причем для более высоких частот эта задача решается проще.

Поскольку в зависимости от угла облучения ЭПР самолета может многократно измениться, считается, что признаком принадлежности самолета к аппаратам, выполненным

с использованием технологии «*Stealth*», является величина его ЭПР, не превышающая 1 м^2 , независимо от ракурса облучения.

2.4.4.3. Концепции технологии *Stealth*. Методы снижения радиолокационной заметности (РЛЗ)

Программа «*Stealth*» объединяет в своих рамках ряд исследовательских, конструкторских и технологических работ, направленных на снижение радиолокационной и тепловой заметности конкретных защищаемых объектов посредством совершенствования форм их наружной поверхности, устранения «блестящих точек», применения специальных радиопоглощающих покрытий и конструктивных материалов, использование бортовых средств радиопротиводействия [29, 36, 110–112].

Другие признаки ЛА — тепловые (инфракрасные), визуальные, акустические и электронные — также принимаются во внимание при уменьшении заметности.

Применение технологии «*Stealth*» дает большое тактическое преимущество. ЛА, который не обнаружен, не может быть ни атакован, ни подвержен воздействию помех. Даже если ЛА типа *Stealth* будет обнаружен, то это произойдет на меньшей дальности и приведет к сокращению времени на оповещение средств ПВО и ухудшению эффективности последних. С другой стороны, ЛА типа *Stealth*, использующие пассивные средства электронного наблюдения, может обнаружить и точно определить местонахождение авиационных или наземных средств обнаружения задолго до того, как они сами обнаружат ЛА.

Особенно большое внимание уделяется УРЗ военных объектов и прежде всего в авиационной, ракетной, судостроении.

Применительно к самолетам 1960–70 гг. определенное снижение РЛЗ достигалось при улучшении их аэродинамических характеристик.

Истребители США типа *F-14*, *F-15*, *F-16* имеют медианные значения ЭПР, лежащие в пределах от $11 \text{ до } 2 \text{ м}^2$ на длине волны $\lambda = 10 \text{ м}$, а бомбардировщик типа *B1-B* — соответственно 10 м^2 на той же длине волны (рис. 2.114).

В рамках программы «*Stealth*» была поставлена задача снизить ЭПР самолетов до $0,001\text{--}0,01 \text{ м}^2$ [29, 36].

На программу «*Stealth*» в США к 30.11.1999 г. затрачено более 50 млрд долл. Кроме самолетов *Stealth Lockheed F-117 Nighthawk* с 1981 г., *B-2 Spirit* работа направлена на создание самолетов, сочетающих скорость, маневренность (что отсутствует у *B-2*), компьютерное обеспечение взаимодействия между многочисленными электронными устройствами, упрощающими управление самолетом (одномоторный *F-35 Joint Strike Fighter* с оптимальными углами стреловидности крыла и оперения, с радиопоглощающими покрытиями плоскостей и фюзеляжа, и *F/A-22 Raptor* (по замыслу конструкторов) самый передовой на начало XXI века самолет в мире).

Летательные аппараты, надводные и наземные объекты являются сложными радиолокационными целями в том смысле, что их диаграмму обратного рассеяния (ДОР) формируется за счет сложения радиоволн, отраженных от совокупности так называемых элементарных отражателей [11, 12]. Форма, размеры и взаимное расположение элементарных отражателей определяют архитектуру наружной поверхности объекта и, как следствие этого, его ДОР. Изменение ориентации объекта относительно РЛС приводит к изменению его отражающих свойств и, следовательно, к изменению вторичного излучения. Результаты многочисленных исследований радиолокационных характеристик различных объектов, показывают, что ДОР всех без исключения объектов носит узколучевой характер. Это объясняется интерференцией отраженных сигналов из-за многоэлементности архитектуры их наружной поверхности и разнообразия электрических размеров (размеров в длинах волн зондирующего сигнала) отдельных отражателей. Если линейные размеры тела сложной формы на порядок и более превышают длину волны, то ширина лучей сужается до долей градуса, а глубина перепадов амплитуд составляет несколько порядков. Пример типичной ДОР объекта сложной формы приведен на

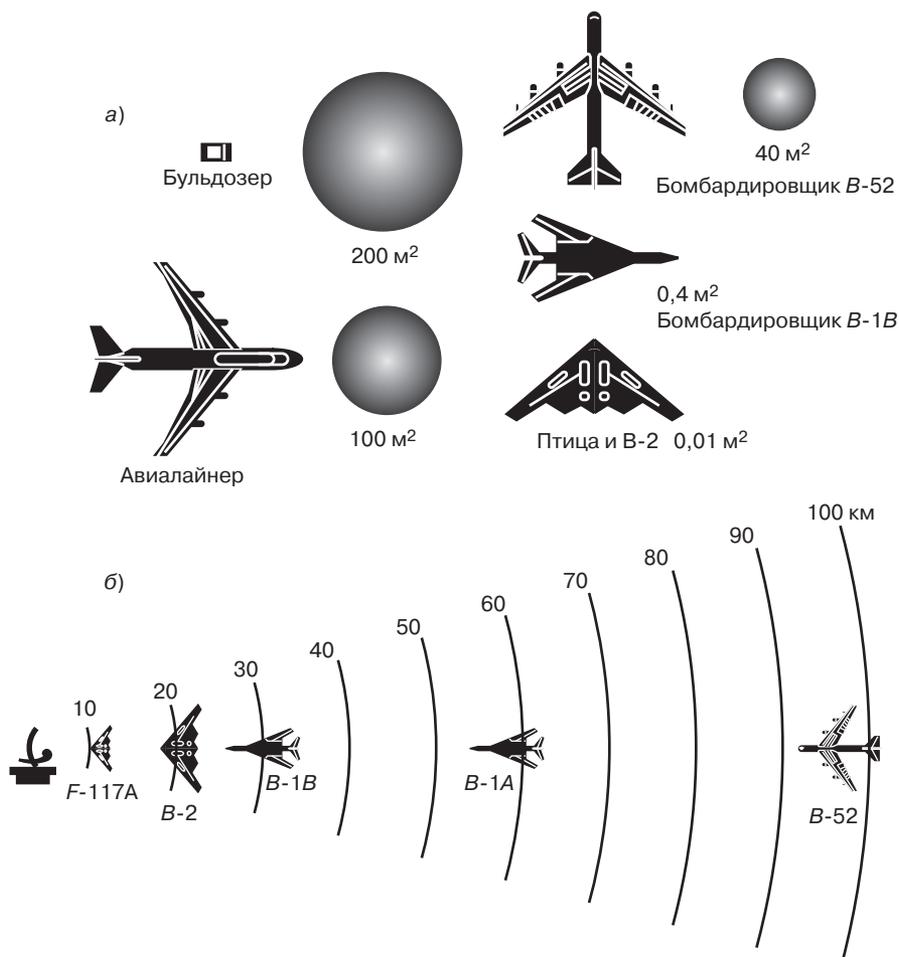


Рис. 2.114. Эффективная площадь рассеивания (ЭПР, σ_c) (а), и дальность обнаружения (б) различных объектов [29, 36, 115]

рис. 2.113. Уровень вторичного поля объекта зависит от его ориентации и угла усреднения, а это означает, что какие бы средства снижения РЛЗ не применялись, практически невозможно по всем направлениям получить величину отраженных сигналов ниже некоторого (заданного) уровня, определяемого порогом необнаружения объекта. В этом случае снижение РЛЗ может быть достигнуто за счет синтеза рациональной ДОР.

Для уверенного обнаружения цели необходимо, чтобы положение лепестков ее ДОР, в пределах которых величина ЭПР превышает некоторый пороговый уровень, и промежутки между ними были вполне определенными. Если интервал времени, в течение которого сигнал превышает пороговый уровень, равен двум-трем последовательным периодам обзора [13], то обеспечивается заданная вероятность обнаружения. При этом вероятность ложной тревоги составляет $7 \cdot 10^{-4}$ – $8 \cdot 10^{-2}$, а требуемое отношение сигнал/помеха должно быть не менее 8–10 дБ. Иными словами, для уверенного обнаружения необходимо, чтобы сигнал превышал порог в течение трех следующих друг за другом серий импульсов. В противном случае обнаружение оказывается невозможным.

Обеспечение одинакового уровня РЛЗ со всех направлений со сложной совокупностью элементарных отражателей маловероятно. Для снижения ЭПР и РЛЗ объектов используется комплекс мер, включающих геометрические, радиотехнические и материаловедческие подходы.

2.4.4.3.1. Применение малоотражающих форм

Анализ диаграмм обратного рассеяния (ДОР, рис. 2.113) как меры отражательной способности объекта позволяет на его основе формировать рациональную архитектуру объекта для ее приближения к минимально отражающей. Максимальный маскировочный эффект можно получить лишь при рациональном сочетании способов уменьшения ЭПР, приданием объекту малоотражающей формы, применением поглощающих материалов и других средств снижения ЭПР.

Общим принципом применения малоотражающих форм является придание объекту такой формы, под влиянием которой максимум отраженной электромагнитной энергии отклоняется в сторону от направления на приемник радиолокатора. Это явление можно также дополнить беспорядочным рассеиванием в разные стороны. Наиболее характерной малоотражающей формой, отклоняющей максимум отраженной энергии в сторону от приемника, является наклонная плоскость или пирамида. Для конуса характерно отклонение максимума диаграммы вторичного излучения от направления на радиолокатор и рассеивание отраженной энергии в разные стороны. На рис. 2.115 приведены сравнительные величины ЭПР простых отражателей, у которых геометрические площади S облучаемых поверхностей равны 1 м^2 . Наибольшую величину $\sigma_{\text{ц}}$ при равновеликих геометрических размерах имеют объекты, в конструкции которых преобладают плоскостные или цилиндрические поверхности, нормальные к направлению облучения, а также уголковые отражатели. Эти объекты будут хорошо наблюдаться радиолокационными станциями на больших дистанциях. Следовательно, основным условием применения малоотражающих форм является первоочередная замена конструкций, имеющих такие поверхности, коническими, пирамидальными или плоскими с определенным углом наклона к горизонту.

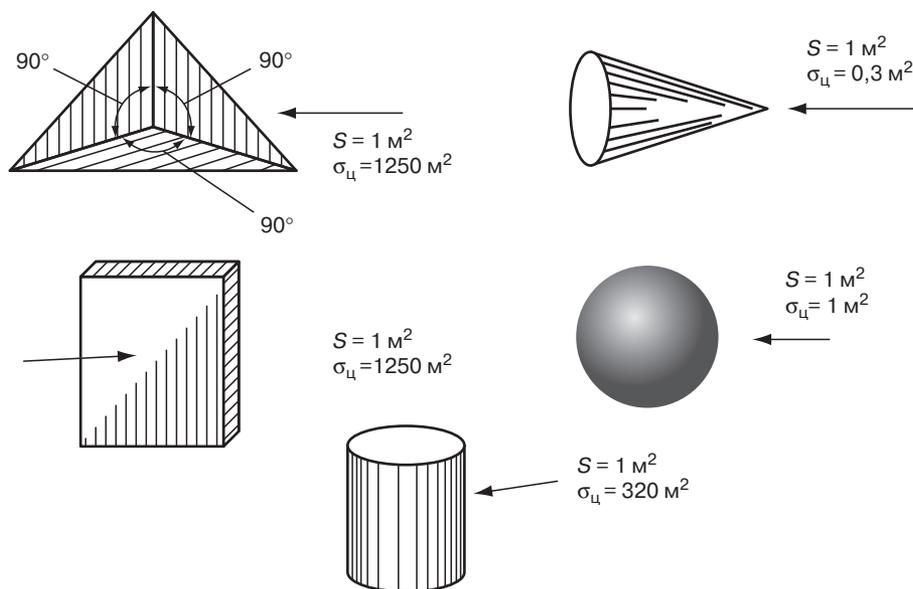


Рис. 2.115. Сравнительные величины ЭПР отражателей различной геометрической формы [25]

Прежде всего необходимо устранить из конструкции защищаемого объекта уголкового отражатели, которые имеют большие значения $\sigma_{\text{ц}}$ при малых размерах граней, причем сигналы от таких отражателей на экране индикатора радиолокационной станции получаются устойчивыми. Двугранные и трехгранные уголкового отражатели могут образовываться в сочетании борта корабля и гладкой морской поверхности, а также в сочетании поверхностей надстроек и палубы. Поверхности зданий в сочетании с гладкими тротуарами и мостовыми образуют мощные уголкового отражатели с большими размерами граней.

Если по конструктивным требованиям невозможно применить на объекте малоотражающие формы, используют противорадиолокационные экраны. Экран представляет собой токопроводящий лист, который устанавливается наклонно к вертикальной стенке маскируемого объекта (здания, дока, стенки причала и т. д.).

Наиболее узкую ширину ДОР имеют плоские поверхности, если их электрические размеры достаточно велики. Плоские поверхности обладают наибольшей ЭПР при углах облучения, близких к нормальным, и незначительной — по всем другим направлениям. Сказанное применимо и к цилиндрическим поверхностям, если их облучение происходит по нормали к образующей.

Малоотражающими элементами являются клин и конус при их облучении со стороны вершины, а также шар и эллипсоид при облучении последнего по направлению большей оси. Однако ширина ДОР этих тел достаточно велика.

При равных размерах проекции наибольшее значение ЭПР в широком диапазоне углов облучения имеют двух- и трехгранные образования с углом при вершине 90° . Широкие ДОР имеют также тела любой формы, линейные размеры которых соизмеримы с длиной волны.

Сравнение величины ЭПР элементарных отражателей при равенстве площадей их проекций на плоскость, нормальную направлению наблюдения, показывает, что ЭПР отражателей отличается на 30–40 дБ, а ширина главного лепестка ДОР изменяется в большом диапазоне значений.

ЭПР объектов существенно зависит от архитектуры их наружной поверхности, состоящей из некоторой совокупности элементарных отражателей, а ее зависимость от габаритных размеров выражена значительно слабее. Большое влияние на ЭПР оказывает угловое расположение элементарных отражателей и направление облучения. Так, при облучении диска под углом 10° от нормали его ЭПР на 28 дБ меньше ЭПР трехгранного отражателя, а при нормальном падении волны на диск его ЭПР на 3 дБ больше ЭПР этого же уголкового отражателя.

Отражение радиоволн отдельными элементами наружной поверхности объекта определяет структуру его ДОР. Поэтому ДОР отдельных элементов существенным образом влияет на формирование результирующей ДОР.

Например, если в образовании суммарного сигнала участвуют элементы с широкими ДОР, то результирующая ДОР будет иметь большее число и большую ширину лепестков, чем в том случае, когда ДОР элементов узкие. Объясняется это тем, что при изменении взаимного расположения элементов относительно радиолокационной системы изменяется не только фаза сигналов. При формировании архитектуры из элементов с узкими ДОР резче изменяется их амплитуда. Кроме того, в последнем случае суммарная интерференционная картина вторичного поля формируется в более узком угловом секторе. Таким образом, исключение широконаправленных отражателей из архитектуры объекта приведет к увеличению скорости флуктуации отраженного сигнала, то есть к увеличению дисперсии величины ЭПР, что в свою очередь уменьшит вероятность правильного обнаружения. Если же число элементов с узкими ДОР окажется настолько большим, что их диаграммы будут совмещаться, то при любом угловом положении объекта всегда найдутся такие элементы, сигналы которых будут интерферировать. За счет интерференции суммарная ЭПР двух отражателей с одинаковой ЭПР будет колебаться от нуля до 4σ , а ее среднее значение равно 2σ . Поэтому элементы с прерывающимися ДОР увеличивают уровень РЛЗ.

Имеется ряд принципов, которые могут быть положены в основу оптимизации архитектуры наружной поверхности объектов и позволяют удовлетворить требованиям, задаваемым на уровень РЛЗ:

- 1) оптимальная архитектура объекта должна основываться на использовании элементов с минимальной шириной главного лепестка ДОР;
- 2) при формировании архитектуры объекта целесообразно стремиться к минимизации числа элементарных отражателей с учетом необходимости ликвидации образующихся ребер;
- 3) взаимное расположение элементов должно минимизировать число направлений, с которыми должны совмещаться главные лепестки ДОР отдельных элементов, и уменьшать суммарную ЭПР в этих направлениях.

Для максимального снижения радиолокационной заметности при конструировании объектов следует учитывать что:

- 1) плоские поверхности обладают большой ЭПР только при углах облучения, близким к нормальным;
- 2) самыми малоотражающими элементами являются клин и конус при их облучении со стороны вершины;
- 3) наибольшее значение ЭПР в широком диапазоне углов имеют двух- и трехгранные образования с углом при вершине 90° ;
- 4) исключение широконаправленных отражателей приведет к усилению дисперсии величины ЭПР, уменьшению вероятности обнаружения.

Такой подход к архитектуре объектов с малыми значениями ЭПР и малой радиолокационной заметностью накладывает определенные ограничения на использование конструкционных радиопрозрачных ПКМ (стекло- и органопластиков), которые не экранируют внутренние объемы конструкций с высокой концентрацией уголковых отражателей, что ведет к резкому увеличению ЭПР объекта и повышению радиолокационной заметности. В этих случаях требуются специальные методы экранирования внутренних объемов.

2.4.4.3.2. Применение радиотехнических средств и радиолокационных отражателей (ложные цели)

Один из методов защиты от средств радиолокационного обнаружения предусматривает размещение в свободном пространстве множества диполей, настроенных на несущую частоту и нагруженных согласованными сопротивлениями. В отличие от обычных ненагруженных диполей, диффузно отражающих падающее излучение, облако, настроенных диполей поглощает радиолокационные сигналы. Каждый такой диполь представляет собой металлизированную бумажную ленту, согнутую углом для жесткости по всей длине. В середине диполя находится согласованное сопротивление — поверхностный слой графита.

Имеется возможность получения радиопоглощающей системы, состоящей из ориентированных диполей, расположенных на расстоянии от защищаемого металла, равном четверти длины волны. Свойства такой системы определяются размерами диполей и параметрами их распределения. Такая система позволяет расширить полосу частот, в которой работают узкодиапазонные материалы. Для уменьшения общей толщины такой системы расстояние до защищаемого материала, равное $\lambda/4$, может быть уменьшено до $(\lambda/4)\sqrt{\epsilon}$. Для каждой длины диполей, используемых в системе, существует такая постоянная решетки (имеется ввиду решетка, образованная диполями), при которой коэффициент отражения имеет минимальную величину. Основной областью применения таких поглотителей является маскировка объектов от обнаружения радиолокаторами, когда известны частоты, на которых работает передатчик.

Исследовано поглощение электромагнитного излучения конструкцией, содержащей решетку из магнитных диполей, расположенных на плоскости металлического листа. Магнитный диполь представлял собой отрезок коаксиального волновода, в котором центральный проводник выводился из волновода на длину не более четверти длины волны падающего излучения, и изогнут так, что образовывал на открытом конце волновода индуктивную петлю, свободный конец которой припаивался к наружному проводнику коаксиального волновода. Длина отрезка волновода больше $\lambda/4$, но меньше $\lambda/2$ (λ — длина волны падающего излучения), поэтому он обладает емкостным сопротивлением, которое с индуктивностью петли образует резонансный контур.

Для предотвращения поглощения влаги порошком отрезок волновода заполнен порошком серого чугуна (феррита типа СЧ) и заливочным компаундом из воска. Если частота падающего излучения совпадает с частотой эквивалентного контура, образованного петлей и волноводом, то в контуре возникают колебания резонансного вида, которые гасятся вследствие поглощения энергии железным порошком.

Диполи устанавливаются на плоский лист из дюралюминия таким образом, чтобы они образовывали двухмерную решетку. В качестве поглощающих материалов в коаксиальном волноводе используют порошки серого чугуна, ферросилиция и других материалов. При равном с другими материалами весе порошок серого чугуна обеспечивает максимальное поглощение на рабочей частоте 94 ГГц, 3,8 мг чистого чугуна достаточно для поглощения энергии падающего излучения. Минимальный размер листа составлял 63×70 см.

Ослабление отраженных радиолокационных сигналов положено в основу другого метода защиты ракет от обнаружения их радиолокатором. Метод базируется на предположении, что такое ослабление можно получить при помощи установки на поверхности ракеты малогабаритных антенн, которые будут излучать энергию, нейтрализующую отраженный сигнал. Отраженный сигнал при этом полностью подавляется либо его мощность снизится до пренебрежимо малой величины.

Один из методов основан на использовании явления затухания электромагнитной волны в волноводе с сосредоточенными параметрами. Конструкция предусматривает создание комплексной электрической нагрузки (коаксиальная нагрузка с диэлектрическим покрытием) в корпусе летательного аппарата, на которой рассеивается энергия зондирующих сигналов. При использовании этого метода значительно уменьшается радиолокационное сечение цели, однако недостатком его является узкий рабочий диапазон частот, в пределах которого он эффективен.

При работе радиолокационной установки в низкочастотной части микроволнового диапазона метод комплексной нагрузки эффективен в полосе частот, составляющей 5–10% от всего диапазона [26, 46].

Материал оригинальной структуры, попеременно отражающий и не отражающий радиолокационное излучение через заданные промежутки времени, применяется в дезориентирующем противорадиолокационном отражателе для создания пассивных помех. Дезориентирующие противорадиолокационные отражатели представляют собой обычно сравнительно короткие электропроводящие волокна. Каждый такой отражатель является по существу диполем, отраженный помеховый сигнал от которого отображается на экране РЛС. Когда диполи становятся непроводящими, они не отражают радиолокационные сигналы. Чередуясь отражение радиолокационного излучения создает на экране РЛС имитацию движущейся цели или потерю обнаруженной цели. Чередуется отражения диполями радиолокационного излучения осуществляется за счет последовательного окисления и восстановления слоев диполя [47].

Диполь имеет (рис. 2.116) сердечник 1 из любого диэлектрика: стеклопластика, термопластичного или терморезистивного материала (майлара, нейлона, дакрона, орлона, искусственного шелка, хлопка, бумаги или шерсти). На сердечник 1 нанесен слой 2, представляющий покрытие из восстанавливаемого соединения серебра, такого как нитрат, нитрит, хлорид, бромид, фторид, иодид серебра. Покрытие наносится кистью, напылением или окунанием. Слой 2 является непроводящим, но после обработки реагентом соль серебра восстанавливается до металлического серебра и он становится проводящим. На слой 2 наносится слой 3 из проникаемого микропористого материала (желатина, коллоидальной двуокиси кремния, силиката натрия). Через слой 3 к соли серебра слоя 2 проникает восстанавливающий реагент. Длительность промежутка времени между переходом слоя 2 от непроводящего состояния к проводящему зависит от выбора типа смолы и толщины слоя 3. На слой 3 наносится проводящий металлический слой 4, обеспечивающий начальную электропроводность дезориентирующего отражателя. Он может быть выполнен из алюминия, магния, меди, серебра или цинка. Скорость перехода слоя 4 из проводящего состояния в непроводящее или длительность промежутков времени между

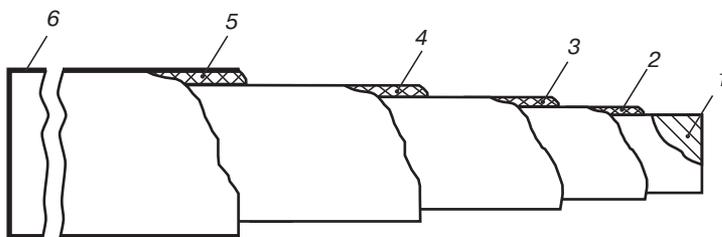


Рис. 2.116. Дезориентирующий противорадиолокационный отражатель, попеременно отражающий радиолокационное излучение [47]:

1 — сердечник; 2 — покрытие из соединений серебра; 3 — слой из микропористого проницаемого материала; 4 — проводящий металлический слой; 5 — слой полупроницаемого материала; 6 — окислительно-восстановительный реагент

изменениями состояния отражателя контролируется толщиной слоя 4, на который наносится слой 5 из полупроницаемого материала, обеспечивающий требуемый интервал времени между действием реагента 6.

Окислительно-восстановительный реагент 6 наносится на поверхность дезориентирующего отражателя. Реагент 6 за определенный промежуток времени проходит через полупроницаемый слой 5 и окисляет металлический слой 4, в результате чего последний становится непроводящим, то есть не отражающим сигналов РЛС. Затем реагент 6 проходит через проницаемый слой 3 и восстанавливает слой 2 до серебра, в результате чего слой 2 становится проводящим и, следовательно, отражающим сигналы РЛС. Реагент 6 может быть изготовлен на основе смеси едкого калия или едкого натрия с гипосульфидом натрия. Дезориентирующие отражатели можно обрабатывать данной смесью перед сбрасыванием их с самолета [47].

Искусственные радиолокационные отражатели находят самое широкое применение для противорадиолокационной маскировки различных объектов: искажения береговой черты или контуров водных поверхностей; придания водным поверхностям, взлетно-посадочным полосам, автострадам отражающих свойств, подобных свойствам окружающей местности и т. п. При этом на экранах индикаторов радиолокаторов противника может быть создана настолько искаженная картина участка поверхности, на котором расположена защищаемая цель, что разведка его в условиях плохой видимости будет сильно затруднена или же вовсе исключена.

Под искусственным радиолокационным отражателем понимают специальное устройство, характеризующееся тем, что отраженный от него радиолокационный сигнал имеет заданные заранее параметры (мощность, направленность, поляризацию и т. д.).

Не менее важную роль играют искусственные отражатели при использовании их в качестве ложных радиолокационных целей. Назначением таких целей является дезинформация противника, перегрузка его радиолокационных средств целеуказания и управления оружием и, в конечном счете, резкое снижение эффективности его огневых средств.

Радиолокационные цели-ловушки, разнесенные на определенные расстояния от истинной цели, будут привлекать на себя ракету с устройством самонаведения. Используются дипольные и угольные отражатели, линзы Лунеберга и их разновидности (например, линзы с дискретным изменением коэффициента преломления, состоящие из полусферических оболочек из пенополистирола, показатель преломления которого зависит от его плотности), пассивные антенные решетки (отражатели Ван-Атта с переизлучателями в виде диэлектрических стержней из полистирола), управляемые ложные цели-ловушки (пассивные и с активным ответом) [25].

Эффект поглощения радиолокационного излучения и значительного уменьшения эффективной поверхности рассеяния имеет место при радиолокации металлической сферы, покрытой слоем плазмы. Слой плазмы может быть весьма тонким по сравнению с длиной волны излучения радиолокатора. Поглощение ЭМИ происходит за счет эффекта дифракции,

обусловленного наличием градиента плотности электронов в плазменном экране (плазма — электропроводящая среда) [26].

Для ослабления радиолокационных сигналов, отражающихся от реактивной струи и, особенно, от электронной плазмы, создаваемой при абляции ТЗМ ГЧ (головных частей), целесообразны методы нейтрализации электронов плазмы с помощью химических компонентов, вводимых в плазму. Экранирующий слой из ионизированных частиц, полностью или частично поглощающих радиолокационное излучение, служит для защиты от радиолокационного обнаружения. Вычисления показывают, что получение затухания в 100 дБ для самолета с размахом крыльев 50 м, летящего со скоростью 300 м/с, требует в среднем величины мощности 1 МВт источника ионизированных частиц.

Экран из плазмы маскирует летательные аппараты и от ИК-систем наведения, поскольку поглощает и ИК-излучение [50].

Такой экран поглощает звуковые волны (обеспечивает защиту от систем звуковой локации) и предотвращает накопление зарядов статического электричества (вызванных электризацией трением) на поверхности летательного аппарата [50].

Плазменный экран является широкодиапазонной радиопоглощающей средой, так как он представляет собой диэлектрик с переменными от сечения к сечению параметрами [51].

Характеристики поглощения и затухания электромагнитных волн в плазме зависят от толщины слоя плазмы и плазменной частоты. Основным параметром, определяющим характеристики поглощения плазмы и общее уменьшение ЭПР, является произведение числа свободных электронов (на единицу длины) и длина пробега электромагнитной волны в плазме.

Определенный интерес для РПМ и РПП представляют собой химические вещества, аналогичные применяемым в фотографических материалах, преобразующие ЭМЭ в химическую, для их использования в противорадиационных красках (*Anti-Radar Paint*) [26].

2.4.4.3.3. Интеллектуальные радиопоглощающие полимерные композиционные материалы в технологии *Stealth*

В решении проблемы уменьшения радиолокационной заметности наряду с методами, основанными на формировании оптимальной архитектуры конструкций и на управлении рассеянием ЭМВ, первостепенные функции выполняют РПМ и РПП. Их основными компонентами являются полимерные материалы (реже керамические), которые обеспечивают необходимые диэлектрические свойства экранирующим и поглощающим ЭМЭ материалам, магнитодиэлектрические полимерные композиции на основе полимерных связующих, токопроводящих и магнитных компонентов (наполнителей, обеспечивают необходимые магнитные свойства). Магнитодиэлектрические полимерные материалы, наряду с формированием рациональной архитектуры защищаемых конструкций, позволяют решать проблему уменьшения радиолокационной заметности объектов.

Радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции, уменьшающие радиолокационную заметность УРЗ объектов техники оборудования, транспортных средств, морских объектов, объектов авиаракетной техники с использованием технологии «*Stealth*» (см. раздел 2.4.4.4) в связи с развитием радиолокационной техники обнаружения, систем РЛС, постоянно совершенствуются. Важнейшим направлением в развитии технологии «*Stealth*» является разработка радиопоглощающих интеллектуальных полимерных композиционных материалов (РИПКМ).

Эффективность использования интеллектуальных полимерных композиционных материалов (ИПКМ, глава 1) в изделиях с высокими показателями надежности и долговечности стимулировало разработку РИПКМ.

Комплексное решение проблемы обеспечения прогнозируемого ресурса работоспособности конструкций с уменьшенной радиолокационной заметностью стало возможным при использовании интеллектуальных материалов, в которых, наряду с конформными системами датчиков, актюаторов, микропроцессоров, систем связи и управления, анализирующими и корректирующими конструкционные свойства, используются системы, обеспечивающие УРЗ,

основанные на достижениях радиоэлектроники. Использование РИПКМ стало необходимым условием при разработке, прежде всего, истребителей 5-го поколения (см. раздел 2.4.4.4.4).

Проблема УРЗ таких самолетов решается комплексно и включает:

1) создание конструкций с малоотражающей архитектурой (конформное вооружение, воздухозаборники с центральным полуконическим телом, с искривленными каналами «утопленных» воздухозаборников и др.);

2) применение радиопоглощающих материалов и покрытий (сотовые конструкции передних кромок крыльев *B-1* с использованием магнитодиэлектриков, ферритов, токопроводящих материалов, углеродных порошков, волокон, аморфных и нанокристаллических металлов, в виде порошков, волокон, фольги из них);

3) применение радиотехнических, радиоэлектронных средств (конформных фазированных антенных решеток, ФАР; например, в РЛС «противник–ГЕ», «небо–СВУ», Н. Новгород, НИИР использованы цифровые фазированные антенные решетки; начало их производства на основе арсенида галлия с 1980-х гг. на ОАО «Завод «Компонент»).

Достижения микроэлектроники, микромеханики, волоконной оптики, используемые при создании интеллектуальных материалов, определяют прогресс в области совершенствования материалов специального назначения, в том числе радиопоглощающих и радиоэкранирующих.

До половины поверхности современного летательного аппарата может быть использовано не только для поглощения и рассеивания излучения РЛС, но и для размещения собственных антенн и датчиков, способных работать начиная с самых низких частот (несколько МГц) и кончая волнами оптического диапазона. Такие оболочки предназначены для применения как на космических аппаратах (в том числе на воздушно-космическом *NASP*), так и на разведывательных самолетах, в частности *HALE* (беспилотном, с большой продолжительностью полета).

Применительно к технологии *Stealth* системы датчиков (сенсоры), исполнительные механизмы (актюаторы) и системы управления (микропроцессорная техника) обеспечивают диагностику внешнего электромагнитного излучения и адаптирование радиопоглощающих и радиоэкранирующих материалов, покрытий и конструкций, оптимизируют радиотехнические характеристики и параметры радиолокационной заметности (авионика для истребителей 5-го поколения, корпорация «Технокомплекс», Россия). Бортовое радиоэлектронное оборудование включает системы навигации, управления полетом, оборудование для реализации специальных задач (например, на *F/A-18 E Super Hornet* используется многорежимная цифровая импульсно-доплеровская РЛС с режимом картографирования земной поверхности, обеспечивающая обход наземных препятствий, поиск и сопровождение целей). Бортовые датчики перехватывают и расшифровывают любые шумы, равные по интенсивности шуму мотора.

В радиопрозрачные антенные обтекатели ЛА, обеспечивающие работу антенно-фидерных устройств, защищающих их от воздействия скоростного потока и сохраняющих аэродинамику ЛА, вводятся металлические элементы:

1) для создания интегральной конструкции системы обтекатель–антенна; повышения механических свойств АО;

2) маскировки от следящих за ЛА РЛС;

3) уменьшения изменений фазовых сдвигов при прохождении радиоволн через диэлектрические стенки обтекателя; в ряде случаев обтекатели переднего обзора защищаются от ударных волн штангами приемника воздушного давления (штанга — направленный вторичный излучатель, излучаемые ею радиоволны интерферируют с излучением антенны, что ухудшает радиотехнические свойства).

Для оптимизации радиотехнических характеристик в конструкцию стенки обтекателя вводят элементы передающих линий, пластины с отверстиями, системы проволочных сеток (решеток). Многофункциональные РЛС самолетов, осуществляющие связь, навигацию, защиту от помех, управление самолетом и оружием, опознавание, радиоэлектронную борьбу (РЭБ) со средствами радиоэлектронной разведки, повышают ЭПР, $\sigma_{\text{ц}}$ антенных устройств и всего ЛА.

Типовой комплекс РЭБ (на примере *F-15*) состоит из системы предупреждения об облучении, бортовой системы создания радиопомех, устройства предупреждения о применении средств РЭБ с компьютерным управлением. Автоматизированный комплекс РЭБ истребителей 5-го поколения включает станцию радиотехнической разведки, РЛС защиты задней полусферы, миллиметровый и лазерный приемники предупреждения об излучении, инфракрасный пеленгатор и др. с применением современной элементной базы, широким использованием микропроцессорной техники. РЛС модифицируются за счет использования твердотельных СВЧ-схем и микроминиатюризации (полупроводниковые модули на арсенид-галлиевых СВЧ интегральных схемах, например, РЛС «*Cobra*» с активной ФАР с 750 заменяемыми блоками) [148, 149].

Для уменьшения ЭПР используют методы, основанные на формировании рациональной архитектуры конструкции объекта; применяют радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции (передние кромки крыльев *B-2* — сотовые радиопоглощающие конструкции), методы, обеспечивающие управление рассеиванием радиоволн.

Сложность заключается в том, что средства снижения радиолокационной заметности (УРЗ) должны обеспечить комплексное снижение заметности от различных технических средств обнаружения: оптико-визуальных, оптико-электронных, радиолокационных, акустических, тепловых.

Использованием малоотражающей архитектуры ЛА, радиопоглощающих материалов, покрытий и конструкций, управления рассеиванием радиоволн достигается оптимальная диаграмма обратного рассеяния (ДОР).

ЭПР антенн снижают:

1) применением частотно-селективных структур на зеркалах антенн в виде решеток вибраторов с различными нагрузками; поляризационно-селективных структур с управляемыми свойствами;

2) применением «ступенчатых» обтекателей;

3) использованием РЛС, работающих в непрерывном режиме с частотной модуляцией (сложно обнаружить средствами РЭБ);

4) уменьшением размеров антенн использованием устройств с синтезированной апертурой (при анализе ЭМИ обеспечивают высокую разрешающую способность);

5) встраиванием антенных решеток в несущие поверхности и обшивку фюзеляжа (отказ от надфюзеляжных конструкций, используемых в ДЛРО);

6) использованием фазированных антенных решеток.

Работы по созданию конформных антенных решеток начаты в начале 1980-х гг. (США, фирма *Grumman*, 1984 г.). Конформная антенна обеспечивает получение большого раскрытия при умеренных размерах, что формирует более направленное излучение; дает возможность изменять форму луча электронным способом (формирование провалов в диаграмме направленности для борьбы с источниками помеховых сигналов). Для перекрытия воздушного пространства впереди самолета используются решетки на крыльях и хвостовом оперении, по обе стороны от самолета — решетки на боковых поверхностях фюзеляжа. В антенных решетках в качестве элементов используют антенны типа «волновой канал» с активным вибратором, отражателем и несколькими директорами, формирующими узкие лучи. Чтобы узкий луч отдельного антенного элемента не ограничивал общий сектор сканирования решетки, элементы размещают друг от друга на расстоянии, меньшем длины волны, что приводит к интерференции и ширина луча отдельного антенного элемента расширяется до 90° (решетка с большим углом сканирования) [150].

Крупные наземные РЛС с фазированными решетками типа «Пейв-Пос» (Туле, Гренландия), «Файлингдейлз» (Мур, Великобритания) обладают потенциалом (произведение средней излучаемой мощности в ваттах на площадь антенны в m^2) свыше 3 000 000 Вт/ m^2 .

Фазированные антенные решетки (ФАР) отличаются от обычных антенн составом элементов, конструкций и принципом действия с немеханическим принципом сканирования (основной принцип для вращающихся сферических и плоских антенн РЛС).

В РЛС с фазированными антенными решетками (ФАР) управление диаграммой направленности обеспечивается практически мгновенным изменением положения луча в вертикальной и горизонтальной плоскостях (электронное, а не механическое или электромеханическое управление). Одна РЛС с ФАР может одновременно выполнять несколько функций: обзор пространства, обнаружение целей, их распознавание, сопровождение, наведение. ФАР позволяют повысить мощность излучения, дальность действия РЛС, точность определения координат целей. Высокая надежность ФАР обусловлена одновременной работой большого числа идентичных каналов (излучающих элементов).

В самолетах *B-1*, *B-2*, *F-117*, *F-22 Raptor*, *F-35 ISF*, *Eurofighter*, *Rafale*, *Gripen* используют многофункциональные РЛС с активными фазированными решетками с электронным сканированием диаграммы направленности по двум направлениям (АЭРС). АЭРС с несколькими конформными антеннами позволяют проектировать комплекс бортового оборудования, заменяя РЛС, РЭБ, систему навигации и связи на АЭРС и использовать вычислительный комплекс, содержащий несколько процессоров, способных ко взаимозаменяемости.

В ФАР формируемые лучи за счет изменения фазы сканируют в секторе 90° по азимуту и за счет изменения частоты по углу места при интервале сканирования 8° . ФАР — антенная решетка с управляемыми фазами или разностями фаз (фаза колебаний — состояние колебательного процесса в определенный момент времени), фазовыми сдвигами волн, излучаемых (или принятых) ее элементами. Фазирование позволяет формировать необходимую диаграмму направленности (диаграмма направленности антенны — графическое изображение зависимости мощности, излучаемой передающей антенной или ЭДС токов, наводимых в приемной антенне, от направления), управлять ее положением и формой.

Электромеханические компоненты (реле, переключатели, фильтры, конденсаторы переменной емкости и др.), требующие перемещений, вращений, колебаний, и электронные компоненты (индуктивности, транзисторы, резисторы), не требующие механических подвижных элементов, при одновременном применении технологий производства микроэлектромеханических (МЭМЕ) и полупроводниковых приборов, размещаются на одной подложке. МЭМЕ позволяет создавать активные емкости, индуктивности, резисторы, использовать микропереключатели и микрореле (МЭМТроник-устройства).

Радиочастотные микропереключатели (превосходят транзисторы, имеют большую полосу частот и малые вносимые потери) применяются в активных ФАР при производстве фазовращателей приемно-передающих устройств [151].

В «интеллектуальных» оболочках конструкций самолетов 5-го поколения с УРЗ, кроме системы сенсоров, актюаторов, оптических волокон, обеспечивающих самодиагностирование и адаптивное конструирование ИПКМ, размещена конформно система сенсоров, актюаторов, средств передачи информации, микропроцессоров, многофункциональная информационная система с фазированными антенными решетками.

Сенсорами в «интеллектуальных» радиопоглощающих ВПКМ являются:

- 1) активные СВЧ-датчики, формирующие электрические поля и регистрирующие изменения электрического поля (величины, частоты, амплитуды поглощенного и отраженного сигналов);
- 2) емкостные системы датчиков, фиксирующие изменение магнитных и электрических свойств;
- 3) активные индуктивные системы датчиков, зондирующих электромагнитное поле, настраиваемых на определенный радиочастотный, электро-, акустомагнитный параметр;
- 4) датчики слабых магнитных полей (магнито-оптические компоненты).

Датчики, измеряющие давление и нагрузки, позволяют после анализа показателей создать условия для изменения формы конструкций (в самолетных конструкциях форму оперения, воздухозаборников, сопел двигателей) для придания им малоотражающей архитектуры.

Электромагнитные и электростатические актюаторы изменяют или удерживают требуемое расположение шарнирно встроенных элементов. Покрывтия из полимерных капсулированных

гелей на основе электроактивных полимеров позволяют регулировать рельеф поверхности, обеспечивая диффузное отражение ЭМИ.

Радиопоглощающие ИПКМ с конформными датчиками, актюаторами, активными фазированными решетками, системами анализа, передачи информации, управления способны диагностировать параметры ЭМИ РЛС, адаптироваться к ним и при оптимальной архитектуре конструкции обеспечить затухание (поглощение) и диффузное рассеяние (отражение) ЭМИ РЛС, уменьшение ЭПР, снижение РЛЗ.

Интеллектуальные оболочки с конформными многофункциональными информационными системами с фазированными антенными решетками обеспечивают программируемое изменение характеристик отраженных радиолокационных сигналов и снижение $\sigma_{\text{ц}}$ до $0,04 \text{ м}^2$ и более.

Система радиопоглощения в истребителях 5-го поколения — это структура, состоящая из антенной системы (три–четыре конформные активные фазированные решетки) и вычислительного комплекса, состоящего из нескольких конформных микропроцессоров, способных заменять друг друга.

Аналогичные системы за счет использования широкополосных и сверхширокополосных излучаемых сигналов и широкоугольных синтезированных апертур позволят выстраивать высококачественные радиолокационные изображения с размерами элементов разрешения по наклонной дальности и азимуту с предельно достижимыми размерами (0,5 и 0,25 длины волны, радиоэлектронная разведка, возможность получения трехмерного изображения объектов, неподвижных и движущихся) [149].

2.4.4.4. Материалы, покрытия и конструкции, уменьшающие радиолокационную заметность (УРЗ) объектов

Решение проблем УРЗ связано с разработкой методов и средств, позволяющих существенно снизить или полностью исключить возможность радиолокационного обнаружения и распознавания объектов, а также возможность наведения на них средств поражения. Все это требует придания радиолокационным целям различного назначением свойств малой заметности.

УРЗ объектов сводится к уменьшению эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) и искажению их радиолокационных характеристик (РЛХ). Методы уменьшения ЭПР объектов условно можно разделить на три группы:

1) методы УРЗ, основанные на управлении рассеянием электромагнитных волн (ЭМВ), синтез оптимальной диаграммы обратного рассеяния, решение вопросов прикладной радиофизики с позиций специальных разделов теоретической радиофизики;

2) методы, основанные на формировании рациональной архитектуры конструкции объектов. Антенные системы вносят значительный вклад в радиолокационную заметность вооружения и военной техники. Обеспечить существенное снижение их радиолокационной заметности нельзя без адекватного решения и проблемы УРЗ-антенн. Синтез диаграмм обратного рассеяния (ДОР), применение малоотражающих поверхностей;

3) методы, в основу которых положено применение радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП). Разработка и применение РПМ и РПП с требуемыми свойствами является первоочередной проблемой в области УРЗ.

Решение проблемы УРЗ предполагает комплексный подход с участием конструкторов, радиофизиков, материаловедов и технологов.

Методы уменьшения ЭПР, основанные на управлении рассеянием ЭМВ, электродинамический анализ и принципы построения управляемых покрытий и структур имеют существенные различия в плане создания РПП, диапазонные радиопоглощающие свойства которых достигаются за счет совместного проявления эффектов рассеяния и поглощения энергии ЭМВ [36].

Современные летательные аппараты, надводные корабли и наземные объекты характеризуются большим числом демаскирующих признаков. К основным из них можно отнести

достаточно большие габаритные размеры, характерные очертания силуэта, различия в спектральных характеристиках покрытий и подстилающих поверхностей, высокие уровни теплового излучения и отражения радиолокационных сигналов. В связи с этим ставится задача, чтобы создаваемые средства обеспечивали комплексное снижение заметности объектов от различных технических средств разведки, в том числе от оптико-визуальных, оптико-электронных, радиолокационных и акустических.

Головной организацией по снижению заметности в армии США является Командование средств обеспечения мобильности *MERADKOM*, расположенное в форте Бельвуар (штат Вирджиния, США).

Достигнуты значительные успехи в разработке теории снижения заметности, создания и оценке эффективности методов и средств снижения заметности объектов техники.

Согласно принятой в армии США терминологии, снижение заметности — это преднамеренное изменение сигнатуры цели, направленное на уменьшение объема поступающей к наблюдателю информации, необходимой для обнаружения цели. В этом определении фигурирует широко распространенный в зарубежной литературе термин «сигнатура» (англ. *signature* — подпись, роспись). Под сигнатурой понимают определенную совокупность важнейших характеристик цели, которые могут играть роль демаскирующих факторов. Сигнатуры могут быть визуальными, звуковыми и обонятельными, причем понятие «визуальная сигнатура» носит обобщенный характер. В соответствии с этой терминологией визуальная сигнатура представляет собой совокупность сигнатур цели в видимом, инфракрасном, тепловом и радиолокационных участках спектра.

Радиолокационные системы позволяют вести наблюдение в условиях естественных и организованных помех при очень высоком уровне вероятности обнаружения. Этим объясняются проводимые за рубежом широкомасштабные исследования по снижению радиолокационной заметности (РЛЗ) вооружения и военной техники. Снижение РЛЗ позволяет уменьшить вероятность обнаружения, а следовательно, повысить выживаемость объектов. Наилучших результатов по снижению РЛЗ объекта можно добиться только в том случае, когда средства снижения РЛЗ разрабатываются на стадии проектирования этого объекта и внедряются в процессе его производства [36].

Основой создания объектов с низкой РЛЗ является снижение уровня отраженного радиолокационного сигнала или, иначе говоря, величины эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), являющейся характеристикой отражательной способности тела.

Зависимость вторичного электромагнитного поля объекта от его ориентации характеризуется диаграммой обратного рассеяния (ДОР). Отсюда понятен интерес к определению требований к ДОР объекта с низким уровнем РЛЗ.

Существенным ресурсом мероприятий по снижению РЛЗ является выбор малоотражающих форм наружной поверхности объекта и применение радиопоглощающих материалов (РПМ). Теоретические и экспериментальные исследования используют комплексный подход при создании объектов с низким уровнем РЛЗ (работы по программе «*Stealth*»). Комплексный подход по снижению РЛЗ предусматривает два взаимосвязанных этапа: 1) создание минимально отражающих форм элементов наружной поверхности объекта, обеспечивающих максимальную эффективность РПМ при нанесении их на эти элементы; 2) выработку требований к характеристикам РПМ и нанесение РПМ с необходимыми характеристиками на малоотражающие элементы, позволяющие обеспечить заданный уровень вторичного электромагнитного поля.

Требования, предъявляемые к архитектуре наружной поверхности различных объектов, складываются из требований по обеспечению различных служебных характеристик этих объектов и конструкторско-технологических требований.

Придание отдельным элементам архитектуры наружной поверхности малоотражающих форм может оказывать полярно противоположное влияние на различные служебные характеристики объекта. Сказанное справедливо и в отношении применения РПМ. Так, в частности, совершенствование аэродинамических форм летательных аппаратов в целом способствует

улучшению их динамических характеристик, а применение РПМ приводит к ухудшению массогабаритных параметров. Поэтому при проведении мероприятий по снижению РЛЗ объектов безусловным требованием остается сохранение их основных служебных характеристик.

2.4.4.4.1. Материалы, покрытия и конструкции уменьшающие РЗ объектов техники, оборудования, транспорта

Для противорадиолокационной защиты стационарного и подвижного наземного оборудования, техники, транспорта разработан большой ассортимент поглощающих узко- и широкодиапазонных материалов в виде сеток, накидок, пленок, покрытий, пенопластов и пенорезин, листовых материалов, в том числе многослойных.

Фирма *North American Aviation* разработала маскировочное покрытие в виде гибкой накидки, отражающая способность которой сравнима с отражающей способностью окружающей среды. Это покрытие представляет собой интерференционный поглотитель, в котором полупроводящие слои разделены диэлектрическими полимерными слоями. Требуемое расстояние между полупроводящими слоями обеспечивается глубоким рельефом, выдавленным на полимерном слое. Проводимость каждого из полупроводящих слоев обеспечивает плавное изменение проводимости всей конструкции покрытия накидки. Ширина рабочего диапазона покрытия составляет 2–20 ГГц (15–1,5 см) (рис. 2.117).

Накидка, установленная на плоской алюминиевой плите, обеспечивает затухание в диапазоне 2–10 ГГц и уменьшает отражение радиолокационных сигналов на частоте 3 ГГц и выше на 20 дБ. Общая толщина накидки составляет 22,2 мм, плотность — 0,065 г/см³ [103].

Для защиты живой силы от радиолокационного обнаружения разработана куртка (рис. 2.118) и каска [103].

Фирма *National Research Corp.* разработала радиопоглощающий материал в виде накидки для защиты танков, грузовых автомобилей и другой техники от радиолокационного обнаружения. Материал состоит (рис. 2.119) из зеленой маскирующей хлопчатобумажной ткани 1, белой хлопчатобумажной ткани 2, нескольких слоев 3 пластика, металлизированного в вакууме (металлические покрытия 4). Используется 6 слоев полиэфирной пленки, алюминизированной в вакууме. Слой металла пропускает не более 2%, ИК излучения (в диапазоне 1–15 мкм) и обладает сопротивлением 20 Ом/см².

Фирма *General Aniline and Film Corp* разработала радиопоглощающий материал для противорадиолокационной маскировки боевой техники — танков, орудий и т. п. Материал выпускается в виде отдельных пластин, выполненных из ткани или резины и покрытых или пропитанных составом, содержащим порошок карбонильного железа. Зернистость порошка —

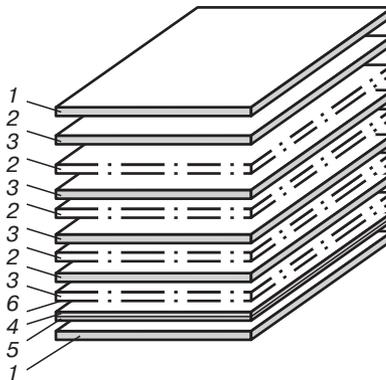


Рис. 2.117. Поперечное сечение секции маскировочной накидки [103]: 1 — оболочка пакета; 2 — лист поглотителя; 3 — прокладка; 4 — гибкий проводящий лист; 5 — лист полимера; 6 — слой металла

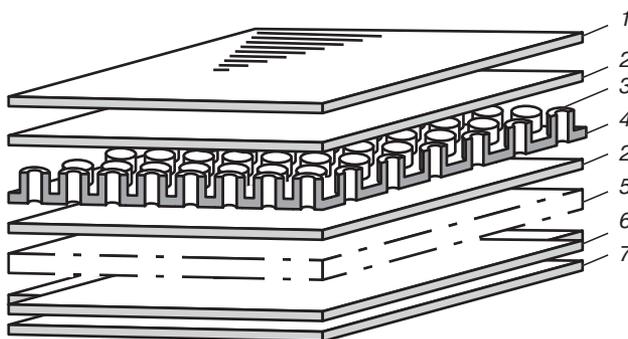


Рис. 2.118. Поперечное сечение материала куртки для защиты персонала от радиолокационного обнаружения [103]: 1 — водонепроницаемая ткань; 2 — лист поглотителя (различный состав); 3 — выдавленные цилиндрические стаканчики; 4 — прокладка с выдавленным рельефом; 5 — прокладка; 6 — проводящий лист; 7 — хлопчатобумажная ткань

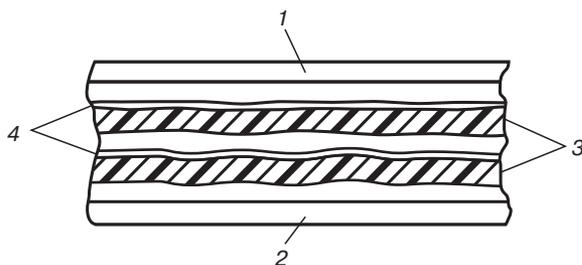


Рис. 2.119. Конструкция накидки из радиопоглощающего материала для противорадиолокационной защиты танков, грузовых автомобилей и другой техники [103]: 1 — зеленая ткань; 2 — белая ткань; 3 — лавсановая пленка; 4 — металлические покрытия на пленке

5 мкм. Каждый лист выполнен складчатым для увеличения средней величины сопротивления до 150 Ом/квадрат. Накидка, состоящая из зеленой и белой хлопчатобумажной ткани и шести слоев металлизированной прокладки, простегивается по кромкам, либо ее слои соединяются с помощью клея. Для двух слоев металлизированной пленки с сопротивлением 150 Ом/квадрат затухание составляет 18–20 дБ. Затухание радиолокационного излучения в таком материале обусловлено внутренним отражением в слоях материала (рис. 2.120).

В боевой машине пехоты 2Т используется технология «Stealth». БМП-2Т стала практически невидимой для средств радиоэлектронного обнаружения (2002 г.).

Танк 4-го поколения Т-80У («Черный орел», Трансмаш, Омск; «Барс») имеет систему активной защиты (разработка Коломенского КБ) «Френа» оптико-электронного подавления летящих в него противотанковых управляемых ракет, лазерный дальномер РЛС [152].

Для противорадиолокационной маскировки артиллерийских позиций в диапазоне волн 1–20 см в ФРГ разработаны покрытия, наносимые тонким слоем на маскировочную сетку. Такая сетка почти не ухудшает визуального наблюдения, ведущегося либо непосредственно персоналом на маскируемой артиллерийской позиции, либо посредством оптических приборов. Поглощающее покрытие резонансного типа, наносимое на сетку, имеет большое значение $\mu_{\text{отн}}$ (рис. 2.121–2.124).

Для противорадиолокационной маскировки стартовых и посадочных площадок самолетов и ракет, имеющих металлизированные основания (например, металлическая палуба авианосца или взлетно-посадочная полоса из железобетона, который может быть армирован

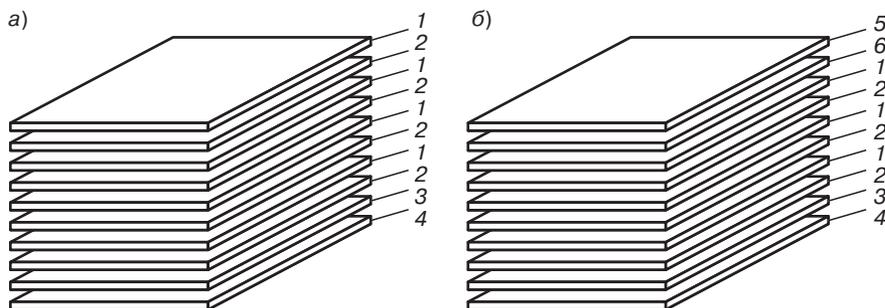


Рис. 2.120. Конструкция гибкой накладки для противорадиолокационной маскировки военного наземного оборудования [103]: 1 — поглотитель; 2 — прокладка; 3 — проводящий лист (металлическая фольга); 4 — ткань; 5 — лист поливинилхлорида; 6 — маскировочный лист с камуфляжной окраской

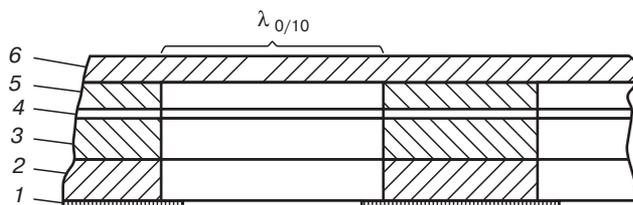


Рис. 2.121. Вертикальный разрез покрытия, наносимого на маскировочную сетку для противорадиолокационной маскировки артиллерийских позиций [103]: 1 — отражающее основание из металлической фольги; 2 — слой полиизобутилена; 3 — слой вулканизированной резины с наполнителем из порошка высокочастотного железа; 4 — пленка полиизобутилена, содержащая 2% сажи; 5 — пленка пластика с наполнителем из порошка магнетита; 6 — покровный слой

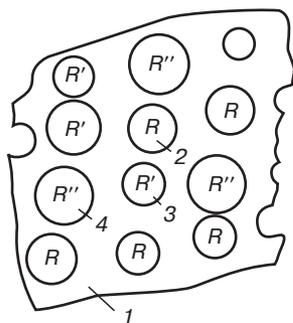


Рис. 2.122. Сетка с круглыми отверстиями для противорадиолокационной маскировки артиллерийских позиций (вид сверху) [103]: 1 — сетка; 2, 3, 4 — круглые отверстия

железом для повышения прочности или же иметь присадку в виде металлического порошка) фирма *Eltro* (ФРГ) разработала радиопоглощающий материал интерференционного типа, состоящий из ряда слоев, которые наносятся методом напыления, окраски или наклеивания. В состав материала входит фазосдвигающий нижний слой и наложенные на него поглощающий и рассеивающий слои.

Данный материал обладает хорошими механическими свойствами, в том числе стойкостью к ударным нагрузкам; он износостоек, обладает высокой трещино-, масло- и погодостойкостью;

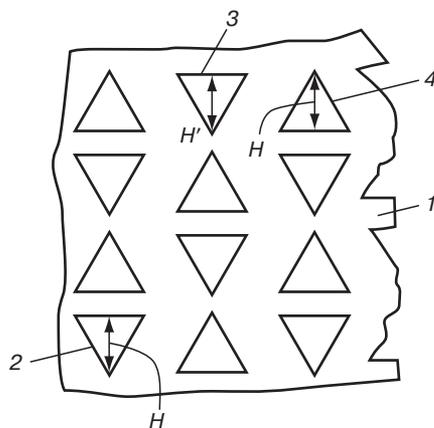


Рис. 2.123. Сетка с треугольными отверстиями для противорадиолокационной маскировки артиллерийских позиций (вид сверху) [103]: 1 — сетка; 2, 3, 4 — отверстия имеющие форму равно-сторонних треугольников

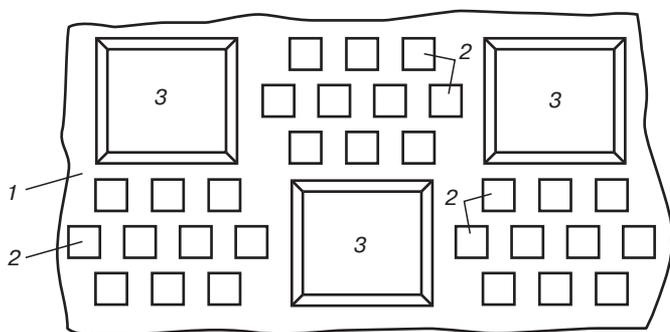


Рис. 2.124. Сетка с группами квадратных отверстий, разделенными усеченными пирамидами, для противорадиолокационной маскировки артиллерийских позиций (вид сверху) [103]: 1 — сетка; 2 — квадратные отверстия; 3 — усеченные пирамиды

устойчив также к воздействию продуктов сгорания и к коррозии в морской воде. Для ракетных стартовых площадок особенно важно то, что покрытия из данного материала могут выдерживать кратковременное воздействие высоких температур. Рабочий диапазон длин волн данного материала составляет 3–7 см [103].

Для защиты от радиолокационного обнаружения таких металлических объектов, хранящихся на открытых складах, как емкости, контейнеры и т. п., фирма *Eltro* разработала радиопоглощающий материал резонансного типа. Открытые склады с емкостями, ящиками и контейнерами, упакованными и картон или фанеру, легко обнаруживаются радиолокационной разведкой, особенно если диапазон радиолокационных сигналов составляет 0,8–8 см. Большие открытые склады таких объектов могут быть обнаружены сигналами с длиной волн свыше 10 см.

Для противорадиолокационной маскировки указанных объектов коэффициент поглощения материала должен быть согласован с отражающей способностью окружающей среды. Величина затухания такого материала составляет 10–30 дБ.

Радиопоглощающий материал, разработанный фирмой *Eltro*, размещают на обратной (по отношению к падающему излучению) стороне, обычного упаковочного материала. Величина

импеданса упаковочного материала находится между величиной импеданса свободного пространства и величиной импеданса наружного граничного слоя радиопоглощающего материала. На поверхность упаковочного материала может быть нанесено покрытие для защиты от влаги и пыли, а также маскировочное покрытие от визуального и ИК-обнаружения. Диэлектрическая проницаемость дерева, картона имеет малую величину по сравнению с высокой диэлектрической проницаемостью радиопоглощающего материала, с которым они комбинируются, ею можно пренебречь. Относительная диэлектрическая проницаемость целлюлозы или древесины в диапазоне длин волн 0,8–8 см составляет 2–6, в то время как для радиопоглощающих материалов произведение относительной диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости составляет 25–100, а зачастую и 400, то есть на 1–2 порядка выше величины диэлектрической проницаемости упаковочного материала.

На рис. 2.125 показано поперечное сечение слоистого упаковочного радиопоглощающего материала. Поглощающее покрытие состоит из слоев от 6 до 3, приклеенных к внутренней поверхности листа 2 упаковочного материала. Внутренняя поверхность слоистого материала, обращенная к маскируемым предметам, должна быть металлизирована так, чтобы падающие волны, проникающие в поглотитель, отражались в последний.

Фирма *Eltro* (ФРГ) разработала радиопоглощающий материал, в конструкции которого предусмотрена защита от обледенения (рис. 2.126). Защита обеспечивается нагревательными проволоками, расположенными в слоях поглощающего материала. Путем установки проволок в радиопоглощающий материал можно расширить до некоторых пределов рабочий диапазон частот материала. Нагревательные проволоки изготовлены из хромоникелевого сплава, железа и других материалов, обладающих сопротивлением. Предпочтительный диаметр проволоки составляет 0,05 мм. Проволоки могут быть установлены параллельно друг другу и на расстоянии (одна от другой), равном длине полуволны падающего излучения. Дифракция и интерференция излучения на проволоках приводят к расширению частотного диапазона [103].

Для расширения рабочего диапазона радиопоглощающих материалов четвертьволнового типа созданы методы регулирования геометрических и электрических параметров поглотителя. Фирма *North American Aviation* разработала радиопоглощающий материал четвертьволнового типа, толщину которого можно регулировать для расширения рабочего диапазона частот и обеспечения поглощения на желаемой частоте. Изменение толщины осуществляется путем добавления или удаления жидкости из поглотителя. В жидкости диспергируют твердые частицы с высокой диэлектрической постоянной, что позволяет регулировать электрические характеристики материала (рис. 2.127).

Фирма *Eltro* разработала широкодиапазонный радиопоглощающий материал, поверхность которого разделена на отдельные участки с различными резонансными частотами. Величина ослабления отраженной энергии для такого материала составляет от 5 до 40 дБ в широком диапазоне частот. Предпочтительный размер участков составляет от полуволны до 5λ, где за длину волны принимается средняя длина волн в рабочем диапазоне. Связь между различными участками поверхности осуществляется посредством электромагнитных волн различной

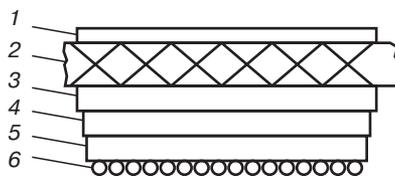


Рис. 2.125. Поперечное сечение радиопоглощающего материала, предназначенного для маскировки металлических объектов, хранящихся на открытых складах [103]: 1 — покрывной слой; 2 — упаковочный материал; 3, 4 и 5 — интерференционный поглотитель, состоящий из поглощающих и фазосдвигающих слоев; 6 — отражающий слой (металлическая сетка)

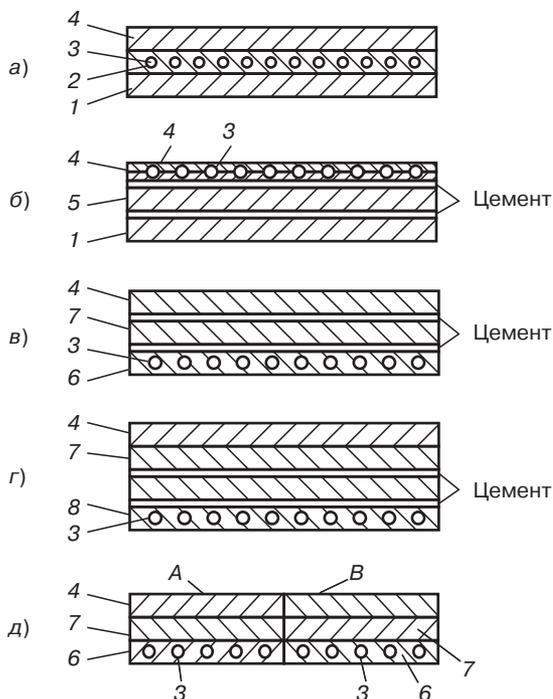


Рис. 2.126. Различные конструкции радиопоглощающих материалов с защитой от обледенения [103]: 1 — металлический лист; 2 — фазосдвигающий слой; 3 — нагревательные проволоки; 4 — слой поглотителя; 5 — слой полимера; 6 — проводящий слой; 7 — лист поливинилхлорида; 8 — отражающий слой; A и B — два участка поглотителя, работающие в различных диапазонах длин волн

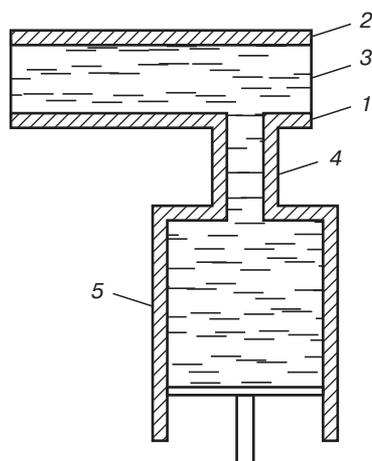


Рис. 2.127. Радиопоглощающий материал с регулируемой толщиной [103]: 1 — электропроводящее основание; 2 — слой с хорошим электросопротивлением; 3 — жидкий диэлектрик; 4 — тракт для подвода жидкого диэлектрика; 5 — резервуар

длины. В отличие от электромагнитных волн других частот, к волнам сантиметрового диапазона не применимы законы оптического отражения (угол падения равен углу отражения). При сантиметровых волнах так называемые поверхностные волны распространяются во всех направлениях от точки встречи волны с поверхностью. Они и обеспечивают связь отдельных участков, которые являются резонансными контурами.

В ФРГ разработан радиопоглощающий материал, конструкция которого состоит из множества дифракционных элементов, находящихся в противофазе. Дифракционными элементами в РПМ являются, например, ребра проволочной трехмерной сетки (рис. 2.128), длина ребер меньше длины падающего излучения. Ребра образуют тетраэдры или полигональные пирамиды, которые соединены друг с другом у оснований, образуя трехмерную (пространственную) сетку; толщина последней равна высоте тетраэдров или пирамид и составляет четверть волны.

Вершины тетраэдров образуют множество точек дифракции в другой плоскости, расположены на равных расстояниях друг от друга. При падении волны перпендикулярно этой плоскости отражение гасится за счет интерференции, имеющей место при образовании дифракционных волн, находящихся в противофазе (однако в других направлениях из-за интерференции отраженных волн могут образоваться четко выраженные максимумы). Элементы сетки состоят из металлических полос или проволоки, а также из металлизированного полимера, который может быть поглотителем. Другая конструкция радиопоглощающего материала такого типа представлена на рис. 2.129.

Для противорадиолокационной маскировки наземного оборудования в диапазоне сантиметровых волн и ИК-диапазоне фирма *Eltro* разработала радиопоглощающую сетку. Общий вид сетки показан на рис. 2.130. Материал сетки 1 — синтетическое волокно, предпочтительно

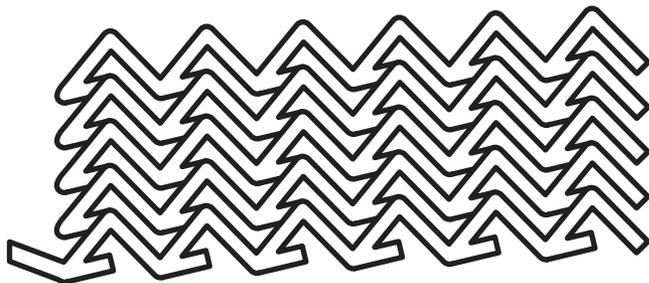


Рис. 2.128. Радиопоглощающий материал, состоящий из множества дифракционных элементов, находящихся в противофазе [103]

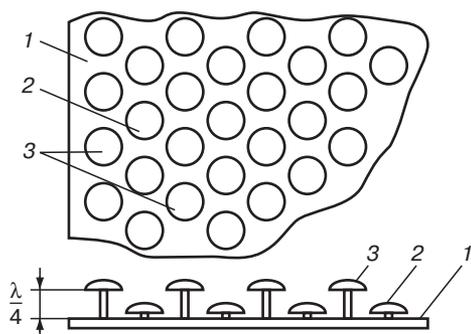


Рис. 2.129. Радиопоглощающий материал, состоящий из множества дифракционных элементов, находящихся в противофазе [103]: 1 — отражающее основание; 2 — утопленные штифты с полусферической головкой; 3 — выступающие штифты с полусферической головкой

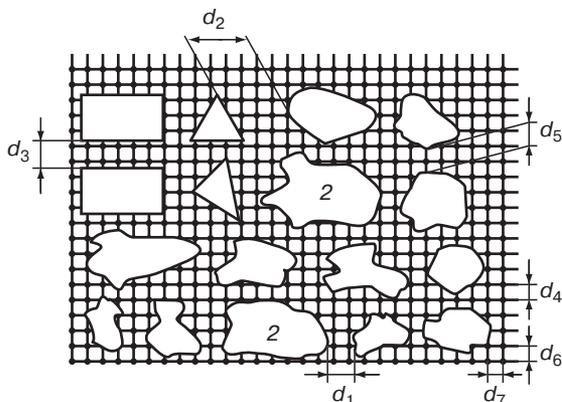


Рис. 2.130. Общий вид сетки для противорадиолокационной маскировки наземного оборудования в диапазоне сантиметровых волн и ИК-диапазоне [104]

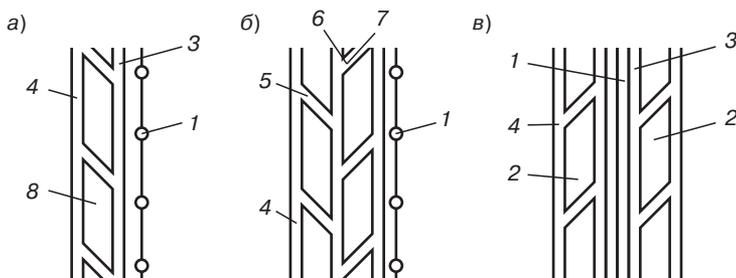


Рис. 2.131. Различные конструкции радиопоглощающих сеток [104]: а — сетка, состоящая из отражающего радиопоглощающего и ИК поглощающего слоев; б — сетка с двумя радиопоглощающими слоями; в — вдвоенная радиопоглощающая сетка

ПА-6; может быть также использована металлическая проволока с диаметром менее $0,1\lambda_0$, где λ_0 — длина наибольшей длины волны падающего излучения.

На сетке размещены поглотители 2, прикрепленные зажимами. Размер поглотителей от $0,1$ до $10\lambda_0$ в любом направлении. Расстояния d_1-d_6 между поглотителями также лежат в пределах от $0,1$ до $10\lambda_0$; d_6-d_7 — габариты ячеек сетки.

На рис. 2.131 показаны варианты маскировочной сетки. На рис. 2.131, а изображена структура, состоящая из поддерживающей сетки 1, отражающего слоя 3 (металлическая фольга), радиопоглощающего слоя 2 и ИК поглощающего покрытия 4. На рис. 2.131, б сетка состоит из двух радиопоглощающих слоев 5 и 7, отражающего слоя 6, придерживающей сетки и ИК-поглощающего покрытия. На рис. 2.131, в показана маскировочная сетка, состоящая из двух сеток типа, показанного на рис. 2.131, а, которые смонтированы на противоположных сторонах поддерживающей сетки. При этом ИК поглощающее покрытие нанесено на лицевую сторону сетки (обращенную к падающему излучению). Эффективность маскировки можно повысить, если маскируемый объект защищать двумя сетками (рис. 2.132). Для обеспечения требуемого расстояния d между сетками используются прокладки. При этом минимальное ослабление сигнала составляет не менее 10 дБ в широком диапазоне частот. Каждый поглотитель, закрепленный на сетке, эффективен в узкой полосе частот. При использовании на сетке множества таких поглотителей ослабление сигнала проходит в диапазоне 3–6 см [104].

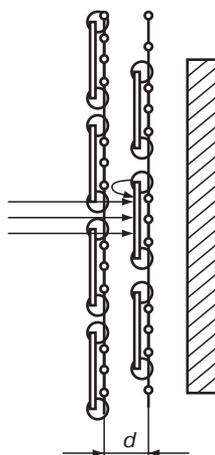


Рис. 2.132. Схема противорадиолокационной маскировки объекта двумя сетками [104]

Плоские элементы, поглощающие энергию электромагнитных волн, предназначены, в частности, для нанесения на поверхности сооружений в аэропортах устранения помех при радиолокационном обнаружении самолетов. В этих элементах на основание из тонкой алюминиевой сетки наклеены листы стеклоткани и равномерно распределенные вдоль сетки узкие ленты алюминиевой фольги или углеродные ткани, имеющие поверхностную плотность 170–180 г/см² [113].

Покрытие фирмы *Verwaltungs GmbH* состоит из сетки, проволока которой обладает резистивным сопротивлением и образует замкнутые проводящие петли. Сетка размещается на изолирующем диэлектрическом слое, наносимом на защищаемую поверхность. В петлях сетки размещен по меньшей мере один конденсатор с емкостью, величина которой определяется резонансной частотой поглощения [113].

Фирма *Plessy Materials* разработала камуфляжные сетки марки *RAM-NET*, применяемые одновременно для защиты от радарного обнаружения таких объектов, как мосты, наземный транспорт, посты управления, а также для индивидуальной защиты.

На стадии проектирования конструкционных элементов наземного транспорта предусматривается введение радиопоглощающей сетки в тканый КМ конструкции.

Сетки *RAM-NET* используют для изготовления легкого, прочного РПМ для вертолетов, разработанных по программе *Stealth*, а также для дистанционно управляемых ЛА.

Специалистами фирмы «Токе Дэнки Кагаку Коге К.К.» (Япония) разработана стенка для поглощения электромагнитных волн, получаемая при наложении на защищаемую проводящую поверхность диэлектрического слоя толщиной не более четверти длины волны в нем и нанесении на этот слой посредством аппликации или приклеивания в один или несколько слоев тонкой пленки, содержащей ферромагнитный порошок титаната бария в отношении 1:3. Тонкая пленка изготавливается также из краски, содержащей углеродный (или графитовый) и ферромагнитный порошки в отношении к связующему как 1:1:10. Данное покрытие на частоте 6 ГГц имеет коэффициент отражения –20 дБ [113].

Для уменьшения излучения, отраженного от долговременных сооружений (например, зданий), может применяться поглотитель электромагнитных волн, разработанный в Японии, в котором предлагается использовать неорганические пористые материалы с плотностью менее 0,5 г/см³. В качестве пористого материала рекомендуется применять формованный из силиката кальция автоклавный легкий бетон или пенобетон, в котором диспергирован порошок с высокими электрическими и/или магнитными потерями типа угля, ферритов, карбонильного

железа. Данный материал отличается высокой термостойкостью и долговечностью и не выделяет вредных газов при горении [113].

Японские компании *TDK* и *Nippon Electric* разработали радиопоглощающие краски и плитки. Они используются в высотном строительстве для предотвращения отражения радиоволн, приводящего к срывам телевизионной картинки, в строительстве мостов для предотвращения ложных сигналов от судов, лагирующих среди тумана или среди покрытых обломками гаваней, для нанесения покрытия на микроволновые печи [113, 115, 118].

Фирма *Barracudawerken AB* (Швеция) запатентовала многослойный гибкий РПМ из листов, фольги или сеток для противорадиолокационной маскировки наземных объектов. При использовании таких материалов необходимо придать покрытиям оптически трехмерную форму. Это имеет значение в тех случаях, когда маскировочное покрытие является блестящим. Оптические свойства двухмерных покрытий, имеющих два слоя, например, ткани с покрытием, изменяются с углом падения светового или другого излучения. Если разведка ведется с самолетов, броневых автомобилей, кораблей или искусственных спутников и при этом используются стереоскопические камеры и телескопы, то двумерные покрытия в большинстве случаев не смогут обеспечить маскировку. Размеры и глубина трехмерных вариаций данной маскировочной поверхности являются кратными длине волны падающего светового излучения, и их можно использовать для улучшения противорадиолокационной маскировки. Так, например, если этот размер и/или глубина сравнима с 0,1 длины волны радиолокационного излучения, то может быть получен полезный эффект. Внутреннее отражение и значительно различающиеся между собой углы падающего и отраженного излучения обуславливают повторяющееся поглощение. Эффективная толщина маскировочного покрытия на несколько порядков выше толщины самого маскировочного листа и может быть связана с диапазоном радиолокационного излучения или сантиметровым диапазоном, если в листе имеется несколько вырезов, максимальный размер которых равен половине или четверти длины волны падающего излучения. Такую комбинацию оптической и противорадиолокационной маскировки получают за счет вырезов и растяжения гибкого маскировочного материала, что в результате дает так называемый «увеличенный в объеме листовой материал» или «трехмерный» лист.

Если слой материала, создающий противорадиолокационную маскировку, является только проводящим, то есть состоит из металлической пленки или сетки, либо содержит диспергированные частицы углерода или графита, то эффект такого слоя может быть значительно модифицирован или изменен вырезами. Это позволяет ввести за счет прорезей резистивные, емкостные и индуктивные компоненты импеданса, что дает как более широкий рабочий диапазон материала, так и повышенное поглощение радиолокационного излучения. Такой эффект достигается и в том случае, если слой материала, обеспечивающий противорадиолокационную маскировку, включает проводящую сетку или металлические волокна. Эти сетки или волокна изготавливают таким образом, что одна их часть является резонансной на данной частоте, вторая — на другой частоте и т. д. В результате каждый слой будет отражающим и менее пригодным в качестве поглотителя. С другой стороны, часть волокон или сеток должна быть резонансной, в то время как значительная оставшаяся часть будет обеспечивать наличие компонентов реактивного сопротивления. Эту желательную характеристику можно получить или улучшить за счет вырезов в листе материала. При использовании металлических чешуек, дискретных металлизированных участков, волокон или металлизированных полимерных волокон (полиэфирных, полиамидных) можно получить аналогичный эффект.

Проводящие сетки или аналогичные конструкции могут быть получены печатным методом или другой любой техникой нанесения дискретных участков тонких металлических слоев.

Если в маскировочном листе нельзя сделать вырезы и если параметры металлических сеток, чешуек, металлизированных участков или волокон таковы, что наблюдается резонанс (например, если размеры волокон или участков соизмеримы с четвертью длины волны радиолокационного излучения, но не слишком превышают сумму некоторого числа длин волн, скажем 20 длин волн — в зависимости от сопротивления), то должны использоваться волокна

различных длин или проводящие участки различных размеров. В случае применения сеток ячейки должны быть неправильной формы. При использовании тонкой проволоки, фольги или металлизированных полос их можно располагать различным способом, например, выкладывать фигуры типа «змейки» так, чтобы получить различные сочетания характеристик отражения и поглощения. Другими словами, поглощающий и/или отражающий слой может состоять или из так называемого «аперiodического» или «нерезонансного» материала, имеющего почти одинаковые характеристики взаимодействия с радиолокационным излучением (если не учитывать влияния толщины слоя на эти характеристики), или из «периодического» материала, не совсем правильно иногда называемого «резонансным».

При сравнении линейных размеров компонентов или участков листов материала с длинами волн в свободном пространстве необходимо отметить, что различие между линейной и «электрической» длиной определяется главным образом диэлектрической проницаемостью окружающего полимера или другого материала и отношением длины к диаметру волокон или к ширине полос, образующих сетку. Линейная длина компонента или участка листа материала всегда несколько меньше соответствующей ей электрической длины. Оптимальный диаметр волокон равен 8 мкм. При «периодическом» материале с «высокорезонансными» элементами (сеткой или волокнами), который имеет высокую добротность, необходимо обратить внимание на то, что в этом случае всегда имеются слегка ненастроенные резонансные элементы, число которых обычно намного больше числа точно настроенных резонансных элементов. Характеристики поглощения такого материала различны для непрерывного и импульсного излучения, а также для излучений со слегка различающимися частотами. Это различие является результатом переходных процессов, имеющих место в каждом резонансном контуре и возрастающих с увеличением добротности контура. Поэтому нужно иметь сравнительно невысокую добротность контура (менее 10) для работы в широкой полосе частот, но желательно все же наличие и некоторого резонанса для получения требуемых характеристик листа.

Материалом волокон могут служить сталь, алюминий или даже медь. При использовании чешуек, печатных полос, сеток или металлической фольги выбор материала этих компонентов и их толщины существенно зависит от условий производства радиопоглощающего материала и числа его слоев. Толщина металлического слоя печатной или металлизированной поверхности 1–20 мкм. Предпочтительная толщина металлических чешуек, проволоки или фольги составляет 10–100 мкм. Можно изготовить листы с одним тонким маскировочным слоем, обладающие удовлетворительными характеристиками противорадиолокационной маскировки. Если используются «резонансные» волокна, чешуйки или сетки, причем они изготовлены или обработаны таким образом, что имеют различные резонансные свойства, то в самом слое будет происходить взаимодействие излучения, если толщина слоя пренебрежимо мала по сравнению с четвертью длины волны и составляет, например, 1 мм или менее. Таким образом, можно получить поглощающий и отражающий слой, имеющий требуемую характеристику во всем практически используемом диапазоне длин волн 1,5–15 см, то есть от 20 до 2 ГГц, в частности, когда маскировочный лист является трехмерным, так что взаимодействие имеет место не только в самом слое, но и между параллельными и непараллельными частями листа и в то же время достигается хорошая оптическая маскировка. Такое взаимодействие имеет место при создании помех с помощью дезориентирующих отражателей, но в данном случае отражающие элементы размещены в значительно более ограниченном объеме, обладают большими потерями и введены в материал с большим поглощением. В отличие от явлений при создании помех с помощью дезориентирующих отражателей или в данном случае требуется высокое поглощение и сравнительно малое отражение.

Характеристика гибкого слоя, включающего неориентированные волокна (или сетку с ячейками неправильной различной формы, или металлические чешуйки неодинаковых размеров и формы), в частности если данный слой является трехмерным, подобна характеристике поверхности, удельное поверхностное сопротивление ρ_s которой относится к волновому сопротивлению z_0 свободного пространства (377 Ом) так, как это требуется для

противорадиолокационной маскировки. Материал для противорадиолокационной маскировки может отражать ~10% падающего излучения. Если отражается 30% падающего излучения, то отношение ρ_s/z_0 должно быть равно 1,5.

При использовании весьма тонких пленок нельзя полностью пренебрегать поверхностным эффектом. На частоте 3 ГГц толщина поверхностного слоя составляет около 12 мкм. Если принять, что отношение ρ_s/z_0 равно 1,5, то металлическая (медная, алюминиевая, стальная) непрерывная нерезонансная пленка должна иметь толщину менее диаметра одного атома (диаметр атома равен 0,1–0,5 нм). Это теоретическое ограничение можно обойти, применив металлическую пленку со множеством пор и отверстий различных размеров. На рис. 2.133 показан многослойный лист описанного материала, включающий средний поглощающий слой и два внешних слоя. На рис. 2.134, а, б и в представлены три различные структуры среднего слоя, показанного на рис. 2.133, а на рис. 2.134, г, д и е — модифицированные согласно описываемой разработке прежние радиопоглощающие материалы. На рис. 2.134, г показан вид в плане радиопоглощающего листа с неориентированными U-образными вырезами, на рис. 2.134, д — радиопоглощающий материал с ориентированными U-образными вырезами и на рис. 2.134, е — этот же материал, растянутый до получения трехмерного листа.

Гибкий маскировочный лист (рис. 2.133) состоит из двух внешних слоев 1 и 3 для маскировки в видимой части спектра излучения и радиопоглощающего слоя 2. При необходимости внешние слои могут быть изготовлены из радиопоглощающего материала за счет придания им некоторой проводимости, например, путем использования пластика с наполнителем из сажи или металлического порошка. Может быть добавлен также отдельный маскирующий ИК слой. Промежуточный слой, показанный на рис. 2.134, а, включает металлические волокна 4 или металлизированные синтетические волокна, неориентированно размещенные в

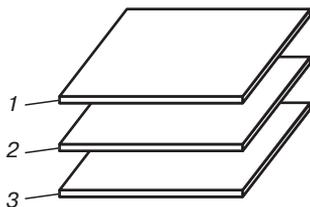


Рис. 2.133. Многослойный радиопоглощающий материал фирмы *Barracudawrken AB* [105]: 1, 3 — внешние слои; 2 — поглощающий слой

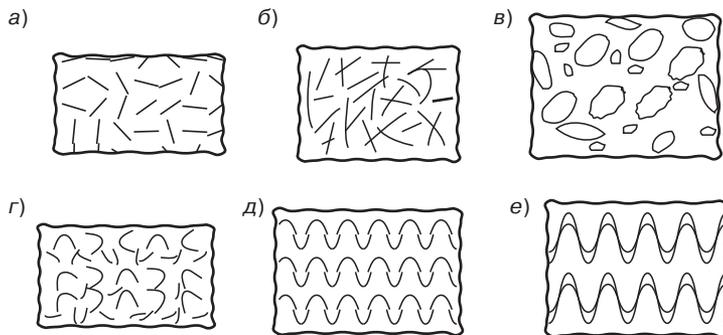


Рис. 2.134. Различные структуры поглощающего слоя [105]: а, б— поглощающий слой с неориентированными волокнами; в— поглощающий слой с «ухудшенной» металлизацией субстрата; г— поглощающий слой с неориентированными вырезами; д— поглощающий слой с ориентированными вырезами; е— трехмерный поглощающий материал

твердом слое или в войлоке из волокон. Предпочтительным материалом является волокно из нержавеющей стали, но могут использоваться также железо, обычная сталь, алюминий и медь. Диаметр металлических волокон ~8 мкм, длина — порядка длины поволны поглощаемого излучения. Например, для интервала длин волн 1,5–30 см электрическая длина волокон составляет 7–16 см. В описываемом примере общая длина волокон равнялась 300–500 м на 1 м² листа при среднем расстоянии между волокнами 5 мм. Сопротивление волокон составляло 40–80 кОм/м (волокна из стали).

На рис. 2.134, б показан другой пример промежуточного слоя, состоящего из твердого синтетического материала или из ткани (в том числе и нетканой) и из весьма тонких металлических проволок, металлизированных синтетических волокон или печатных металлических полос. Проволоки или полосы образуют вертикальную и горизонтальную сетку с ячейками неправильной формы (проволоки или полосы — вертикальная сетка, проволоки или полосы — горизонтальная сетка). Вследствие неправильной формы и различных размеров ячеек резонанс сеток имеет место на различных частотах во всем диапазоне радиолокационного излучения, например 2–20 ГГц. На рис. 2.134, в показан слой, металлическая часть которого получена путем «ухудшенной» металлизации субстрата, например, поливинилхлорида, так что на слое после металлизации остались поры и отверстия различных размеров. Толщина металлического слоя может составлять несколько микрон или даже доли микрона в зависимости от сопротивления металла, типа субстрата, пористости и т. п. Если размеры, форма и распределение отверстий или пор таковы, что поверхностное сопротивление слоя равно 220–640 Ом (что согласуется с характеристическим сопротивлением свободного пространства 377 Ом), то достигается эффект маскировки от радиолокационного излучения.

Лист, изображенный на рис. 2.133, со средним слоем, показанным на рис. 2.134, а с надрезами и подвергнутый растяжению (рис. 2.134, е), является весьма эффективным (средний слой радиопоглощающего материала — лист с волокнами из нержавеющей стали диаметром 8 мкм, волокна введены в нетканый войлок из полиамидных волокон). В качестве двух внешних слоев, показанных на рис. 2.133, используют тонкие листы поливинилхлорида, окрашенные для визуальной маскировки. Толщина среднего слоя составляет 0,4 мм.

Качество противорадиолокационной маскировки данным материалом мало изменяется в интервале длин волн 1,5–15 см (20–2 ГГц). Измеренная средняя величина поглощения энергии излучения составляет 6,8–7,5 дБ, а величина отраженной энергии — 21,3 и 17,8% [113].

Для противорадиолокационной маскировки танков, орудий, грузовиков и других наземных объектов в ФРГ разработан негорючий легкий радиопоглощающий материал. Он состоит из пасты, нанесенной на любой (жесткий или гибкий) носитель толщиной от 0,01 до 3 мм. Паста изготовлена из порошка поливинилхлорида, в которую введен ферритовый порошок с высоким коэффициентом потерь; средняя величина зерна 0,01 мм и максимальная 0,5 мм. Диапазон рабочих длин волн 2,5–7 см. Многослойные широкодиапазонные материалы (для 3,15–8,75 см) представлены на рис. 2.135.

Для маскировки наземного оборудования фирмой *Emerson & Cuming* разработан материал *Eccosorb FBC-75*. Он представляет собой весьма легкую ткань, которой придана шиповидная

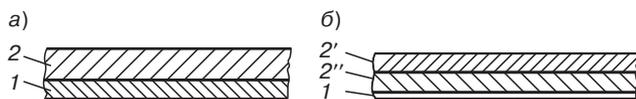


Рис. 2.135. Широкодиапазонный трехслойный (а) и четырехслойный (б) радиопоглощающий материал [105]:

а) 1 — отражающий слой; 2 — слой с высокой магнитной проницаемостью; 3 — слой без потерь;
 б) 1 — полиэтилен (2,7 мм, 85% железа с размером частиц 2–10 мкм); 2' — эпоксидный стеклопластик (4 мм); 2'' — кремнийорганический каучук (8 мм); 3 — слой, замещающий металл (СКБ + 20 %масс. сажи + 30 %масс. графита)

форма. Хотя она выпускается в виде листов размером 305×305 мм, из нее могут быть шиты крупногабаритные накидки для защиты объектов в безэховых камерах или для маскировки наземного оборудования. Материал предназначен для работы на частотах около 2,4 ГГц, его масса составляет 0,49 кг/м². Размеры шипов (пирамид): высота 25,4 мм, габариты основания 25,4×25,4 мм. При работе на частотах порядка 6 ГГц затухание равняется 17 дБ. Работа на частоте 3 ГГц дает затухание такой же величины. Ткани *Eccosorb FBC-75* может быть придана жесткость путем пропитки эпоксидным связующим с последующим отверждением. В этом случае материал *FBC-75* используется в качестве наполнителя в трехслойных конструкциях [105].

Разработан широкополосный поглотитель электромагнитных и акустических волн, состоящий из синтетической шерсти и проводящих частиц, размещенных в связующем материале органической или неорганической природы (РПП в виде блоков, в состав которых в качестве наполнителя входит минеральная вата, а в качестве поглотителя электромагнитных волн используется сажа или графит, помещенные в керамическую или бумажную оболочку).

Примером использования нетканых материалов, содержащих проводящие наполнители, являются РПП на основе нитей из нержавеющей стали и полиэфира (типа лавсан). Поглотитель состоит из 9–11 слоев при общей толщине 23 мм, имеет массу 1,3 кг/м³ и обеспечивает коэффициент отражения электромагнитных волн менее 20 дБ в диапазоне частот от 3 до 18 ГГц и менее 15 дБ в диапазоне частот от 18 до 40 ГГц для обеих поляризаций падающей на РПП волны. Частотная зависимость коэффициента отражения имеет достаточно гладкий вид и характеризуется отсутствием резонансных пиков.

Основой другого поглотителя является нетканый материал, содержащий смесь волокон из диэлектрического материала и тонких никелевых проволочек. Поглотитель представляет собой многослойную структуру с различным содержанием (от 0,5 до 10%) диэлектрических волокон для отдельных слоев, при этом уровень коэффициента отражения зависит от числа слоев и их состава, а также частоты, поляризации и угла падения электромагнитной волны. Достижимый уровень коэффициента отражения от –30 дБ в диапазоне частот от 10 до 15 ГГц.

Листовой РПМ, выполненный из нетканого материала, содержащего смесь проводящих и диэлектрических волокон, является также основой широкополосного поглотителя электромагнитных волн, разработанного фирмой *NEC* (Япония). При этом проводящие волокна могут быть либо металлическими, либо полимерными, но покрытыми проводящим материалом.

Мелконарезанные углеродные волокна с покрытием из материалов с более высокой электропроводностью (медь, серебро, алюминий) являются перспективными наполнителями РПП, эффективными для радиолокационной маскировки в диапазоне частот от 10 до 100 ГГц [113].

Фирма *Emerson and Cuming* в соответствии с требованиями федеральной комиссии по связи выпускает электропроводящее покрытие марки *Eccocoat CC-3W*, предназначенное для экранирования высокочувствительной аппаратуры военного и авиакосмического назначения от электромагнитных помех.

Покрытие представляет собой однокомпонентную водорастворимую систему полиакрилат – никель.

Фирма производит также электропроводящий пенопласт марки *Eccoshield SV-F*, применяемый в качестве радиочастотного фильтра, шумоглушителя и амортизатора вибраций [120].

Фирма *Yokohama Romy K.K.* разработала трехслойное РПП, внешний слой которого состоит из пропитанных полимером органических или неорганических волокон. Под ним располагается внутренний слой из тех же волокон, пропитанных связующим с наполнителем, обеспечивающим диэлектрические потери (электропроводимость 10^{-6} – 10^3 Ом⁻¹·см⁻¹), в количестве до 50 % масс. Нижний слой РПП состоит из ПКМ с углеродным или металлическим волокном, металлической сеткой или пластинами из металлического порошка. Радиотехнические характеристики РПП могут быть легко изменены посредством изменения диэлектрической проницаемости внутреннего слоя за счет варьирования содержания наполнителя.

В разработанном фирмой *Mitsubishi Sekil K.K.* РПМ, поглощающем ЭМИ, в качестве покровного слоя диэлектрической пластины использованы углеродные волокна.

Специалистами фирмы *Shinwa International Co., Ltd.* (Япония) разработан РПМ, выполненный в виде смеси пористой керамики с углеродом. Его изготавливают нагреванием одного или нескольких типов керамики с поро- или структурообразующим материалом, который выжигается при нагреве, после чего полученная структура нагревается в атмосфере углеводорода при пониженном давлении, что обеспечивает нанесение углерода на внешние и внутренние поверхности РПМ.

Другой поглотитель представляет собой краску, в которую введены волокна из электропроводящего материала длиной от 0,0001 до 3 см и диаметром от 10^{-6} до $3 \cdot 10^{-3}$ см при содержании (по массе) от 0,1 до 5,0%, играющие роль электрических диполей.

Падающее излучение не только поглощается краской, но и рассеивается при относительно малой концентрации наполнителя, что устраняет недостатки известных ранее РПП (значительные объем и масса РПП, демаскировка объекта за счет появления «черной дыры» при полном поглощении электромагнитной энергии).

Наряду с электропроводящими наполнителями при создании РПМ и РПП используются и магнитные наполнители (порошки ферритов различного химического состава, карбонильное железо и т. д.), преимуществом которых является возможность создания на их основе широкополосных РПП с меньшей чем у диэлектрических материалов толщиной.

Разработаны РПП для сантиметровых и дециметровых длин волн СВЧ диапазона. В первом случае в качестве РПМ использована керамика состава $Pb(Zr_{0,13}Ti_{0,47})O_2$, а во втором ферриты на основе $Cu-Fe$ или же комбинация этих ферритов с указанной керамикой.

В Германии разработан РПМ, содержащий 99,1% теплостойкого полимера с температурой теплостойкости более 150 °С (например, полисульфон, полиэфирсульфон, ароматический полиэфир) и 1,9% порошка феррита формулы либо $MeOFe_2O_3$ (где Me – это Ni , Zn , Co , Cd , Cu , Mg , Ba или Sr), либо $MeTiO_3$, или же цирконата формулы $MeZrO_3/Me-Ba(Ti_xZr_y)O_3$, где $x + y = 1$, с размером частиц 10–500 нм, содержащихся в неагломерированном виде. Для изготовления нано-РПМ в состав из металлоорганических соединений (в стехиометрических отношениях) вводят термопласт, перемешивают, добавляют воду в количестве, необходимом для гидролиза, и нагревают смесь до 250 °С (300–400), при этом смешивание и гидролиз проводится в высококипящем полярном органическом растворителе.

В ряде конструкций РПП применяются пластины из спеченных магнитных материалов как в сочетании со слоями из магнитной резины, так и самостоятельно, например, в виде рядов, отстоящих друг от друга (по плоскости) ферромагнитных пластин, которые либо крепятся к электропроводящей опоре, либо заделываются в строительный раствор.

Конструкция многослойного РПП состоит из чередующихся тонких слоев магнитных частиц, разделенных диэлектрическими слоями. Это покрытие изготавливается следующим образом: на подложку с односторонним полимерным покрытием, нагретым до температуры плавления, наносится слой магнитных частиц, затем разделительный слой, на который вновь наносится слой магнитных частиц, и так до тех пор, пока не будет получен РПМ с требуемыми свойствами, после чего наносится защитный слой из термопластичного материала.

В поглотителе электромагнитных волн поверхность покрытия, изготовленного путем нанесения на металлическую подложку оксидного магнитного порошка или смеси резистивного порошка с диэлектрическим связующим, имеет волнообразную конфигурацию с высотой волны от 20 до 50 мм и углом между плоскостью наклона волны и горизонтальной плоскостью основания, лежащим в пределах от 15 до 45°.

Легкий и технологичный четвертьволновый резонансный РПП состоит из четвертьволнового диэлектрического слоя из вспененного полиэтилена и наружного слоя из резистивной ткани.

Примером градиентной структуры является разработанное фирмой *Hoybond Limited* (Великобритания) покрытие для защиты объектов от обнаружения радиолокационными станциями

и ИК-детекторами. Оно представляет собой композиционный материал, характеристическое волновое сопротивление которого уменьшается от внешней поверхности в глубину слоя. Такое покрытие может быть нанесено в виде одного или нескольких слоев по обычной технологии, после чего, пока слой не затвердел, создают возможность миграции (например, методом седиментации) компонентов внутри слоя, получая требуемое распределение волнового сопротивления по толщине покрытия [113].

Материал интерференционного типа фирмы *Eltro* для противорадиолокационной маскировки наземного оборудования, обеспечивает эффективное поглощение электромагнитного излучения в сантиметровом и дециметровом диапазонах. При этом отраженное излучение составляет 10–20%. Поглощающий слой выполнен из синтетического каучука или пластика, у которого $\text{tg } \delta_\epsilon + \text{tg } \delta_\mu = 0,1$. В качестве наполнителя используется окись железа или цинка. Диэлектрическая и магнитная проницаемость поглотителя изменяются с изменением волны так, что толщина слоя остается практически постоянной во всей полосе частот. Так, один из таких поглотителей при длине волны $\lambda_0 = 3,2$ см имеет $\epsilon' = 10,0$ и $\mu' = 1,25$, а при $\lambda_0 = 10$ см $\epsilon' = 11$ и $\mu' = 1,4$. Другой поглотитель при $\lambda_0 = 3,2$ см имеет $\epsilon' = 10,5$ и $\mu' = 1$; при $\lambda_0 = 10$ см $\epsilon' = 10,5$ и $\mu' = 1,2$. Третий поглотитель при $\lambda_0 = 3,2$ см имеет $\epsilon' = 5,2$; $\mu' = 1,38$; при $\lambda_0 = 10$ см $\epsilon' = 5,22$ и $\mu' = 1,33$. Этот материал может быть использован и для противорадиолокационной маскировки самолетов, ракет, кораблей. В верхний слой его могут быть введены диполи, что улучшает рабочие характеристики поглотителя при длинах волн более 20 см [104].

2.4.4.4.2. Материалы, покрытия и конструкции уменьшающие РЗ морских объектов

Для уменьшения РЗ надводных и подводных кораблей особо важное значение имеют широкополосные поглощающие материалы малой толщины, обладающие высокими механическими свойствами, в частности, снарядоустойчивостью (стойкостью к сосредоточенным ударными нагрузками). При разработке составов и структур материалов учитывают различие в значениях импедансов z сред (воздух, морская вода) [104, 123].

Применительно к надводным кораблям основная концепция программы *Stealth* сводится к снижению их РЛЗ до уровня, при котором становится эффективным применение искусственных помех, создаваемых средствами РЭП. В отличие от самолетов и ракет сделать корабли «невидимыми» на фоне естественных помех невозможно [29, 36].

Впервые РПМ были использованы немецкими подводниками в целях скрытия их перископов от РЛ обнаружения [115]. Современные подводные лодки широко используют широкодиапазонные радиопоглощающие покрытия (резины с токопроводящими и магнитными наполнителями [113, 118, 121]), что делает субмарины малозаметными для сонаров противника, самонаводящихся торпед противолодочных кораблей и ракет противолодочной авиации. Естественно, для УРЗ подводных лодок осуществляется экранирование антенн их многочисленных РЛС (в американских атомных ракетных подводных лодках типа «*Ohio*», «*Traydent*» — гидроакустический комплекс *AN/BQQ-6* со сферическим стационарным обтекателем антенны диаметром 4,6 м из стеклопластика; буксируемая антенна, диаметр 82,5 мм на кабеле, длиной 700 м, для шумопеленгаторной РЛС *AN/BQR-15*; РЛС *AN/BPS-15* для обнаружения надводных целей, диапазон сверхдлинных волн, КВ, УКВ, очень низкие частоты до глубин 90 м) и надстроек (высота ходового мостика 6,5 м).

Фирма *Eltro* (ФРГ) разработала конструкционный радиопоглощающий снарядоустойчивый материал, предназначенный для противорадиолокационной маскировки боевых рубок подводных лодок. Он может применяться также на бронированных боевых машинах, самолетах и кораблях. Материал состоит из слоев пластика с металлическими волокнами или металлической сеткой и слоями радиопоглощающего материала.

Один из простейших видов данного материала приведен на рис. 2.136, а. Основанием его служит полиэфирный стеклопластик 1 толщиной 20 мм; 2 — алюминий толщиной 3 мм; верхний слой — четвертьволновый радиопоглощающий материал, состоящий из слоев 3 и 4. В качестве клея для соединения слоев используются производные адипиновой кислоты в сочетании с триизоцианатом. Склеивание слоев осуществляют путем прессования; полученный

слоистый материал имеет те же механические свойства, что и сталь толщиной 7 мм. Слой 3 из поливинилхлорида является фазосдвигающим и обладает сравнительно низкой, диэлектрической проницаемостью, равной 2,5. Толщина его составляет 1,5 мм. Слой 4 толщиной 0,8 мм является поглотителем с наружной поверхностью 5. Состав его (в весовых частях) таков: 10 сополимер бутадиена и акрилонитрила (СКН); 76 магнетита; 0,9 триизоцианата; 0,5 окиси цинка; 0,6 стеариновой кислоты; 0,4 парафина; 0,4 серы; 2 инденкумароновой смолы; 0,2 дифенилгуанидина.

Радиопоглощающий материал, показанный на рис. 2.136, б, состоит из слоя 6, выполненного из 60-слойного полиэфирного стеклопластика толщиной 20 мм; слоя 7 толщиной 3 мм, выполненного из алюминия; поглощающего слоя 8 толщиной 2 мм, состав которого аналогичен составу поглотителя слоя 4 на рис. 2.136, а и слоя 9 толщиной 6 мм, выполненного из 60-слойного полиэфирного стеклопластика. Этот материал эффективен в диапазоне 3–5 см, а материал, показанный на рис. 2.136, в, — в диапазоне 3–5,5 см. Он состоит из 60-слойного полиэфирного стеклопластика 10 толщиной 20 мм, алюминиевого слоя 11 толщиной 3 мм и поглощающих слоев 15, 19, 20. Поглощающие слои одинаковы. Каждый из них формируется из трех слоев: 12 и 23, 13 и 22, 14 и 21. Слои 12 и 23 аналогичны слою 25, заменяющему металл и показанному на рис. 2.134, з; слои 13 и 22 толщиной 1,5 мм выполнены из поливинилхлорида; поглощающие слои 14 и 21 толщиной 0,8 мм имеют в весовых частях следующий состав: 19 СКН; 76 магнетита; 0,9 триизоцианата; 0,5 окиси цинка; 0,6 стеариновой кислоты; 0,4 парафина; 0,4 серы; 2 инденкумароновой смолы; 0,2 дифенилгуанидина. Слой 19 также состоит из трех слоев: слоя 16, заменяющего металл; слоя 17 из поливинилхлорида толщиной 2 мм и слоя поглотителя 18 толщиной 1,3 мм, состав которого аналогичен составу слоя 14 и 21.

На рис. 2.136, г показана модификация радиопоглощающего материала. Слой 24 выполнен из эпоксидного 60-слойного стеклопластика толщиной 20 мм; слой 25 заменяет металлический слой; его состав (аналогичный составу слоев 12, 16, 23 на рис. 2.136, в) (в весовых частях): 28,24 СКН; 30 графита; 28,5 сажи; 0,9 триизоцианата; 6 дибутилфталата; 0,9 стеариновой кислоты; 0,6 парафина; 2 инденкумароновой смолы; 0,75 окисицинка; 0,6 серы; 1,05 дибензотиацилдисульфида; 0,45 дифенилгуанидина. Толщина слоев 25, 12, 16 и 23 составляет 2 мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 100$. Слой 28 состоит из двух слоев: слоя 26 из поливинилхлорида толщиной 2 мм и слоя поглотителя 27 толщиной 1,2 мм такого же состава, что и слои 14 и 21 (рис. 2.136, в).

На рис. 2.136, д показан радиопоглощающий материал с подложкой из пластика на основе меламинового связующего 29, упрочненный сеткой 30 из латунной проволоки (диаметр проволоки 0,1 мм, размер ячейки сетки 1 мм); слои 31 толщиной 2 мм выполнен из поливинилхлорида, слой 32 из смеси *Desmodur/Desmophen* с 50–60 вес. частями $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$; слой 33 толщиной 1 мм имеет такой же состав, что и слой 32; слой 34 представляет собой трехслойный поглотитель.

На рис. 2.136, е показан радиопоглощающий снарядоустойчивый материал со сложной структурой. Материал состоит из слоя пластика *f*, заменяющего металл и обладающего радиопоглощающими свойствами, толщиной 2 мм ($\text{tg } \delta_\epsilon = 0,8$; $\epsilon = 100$). Над этим слоем расположен слой *g* толщиной 20 мм, обладающий радиопоглощающими свойствами и состоящий из ряда прямоугольных брусков пластика, склеенных торцами, как показано на рис. 2.136, ж (для этого слоя $\epsilon = 4$ и $\text{tg } \delta_\epsilon = 0,01$). Выше расположен тонкий промежуточный слой *k* из стеклопластика, затем следует слой пластика *i* толщиной 10 мм, имеющий структуру, показанную на рис. 2.136, ж, и такие же радиопоглощающие свойства, что слой *g*, при этом бруски слоя *i* расположены в поперечном направлении по отношению к брускам слоя *g*, как показано на рис. 2.136, з. Последним является слой поглотителя *k*, состоящий из трех слоев k_1 , k_2 и k_3 . Слой k_1 аналогичен слою 23, толщина его составляет 0,8 мм. Слой k_2 выполнен из поливинилхлорида толщиной 2 мм и слой k_3 — из поглотителя, аналогичного слою 24 (толщина 1,2 мм). Вес такого снарядоустойчивого поглотителя значительно меньше веса соответствующей стальной брони. Поглотитель эффективен в диапазоне 3–50 см [104].

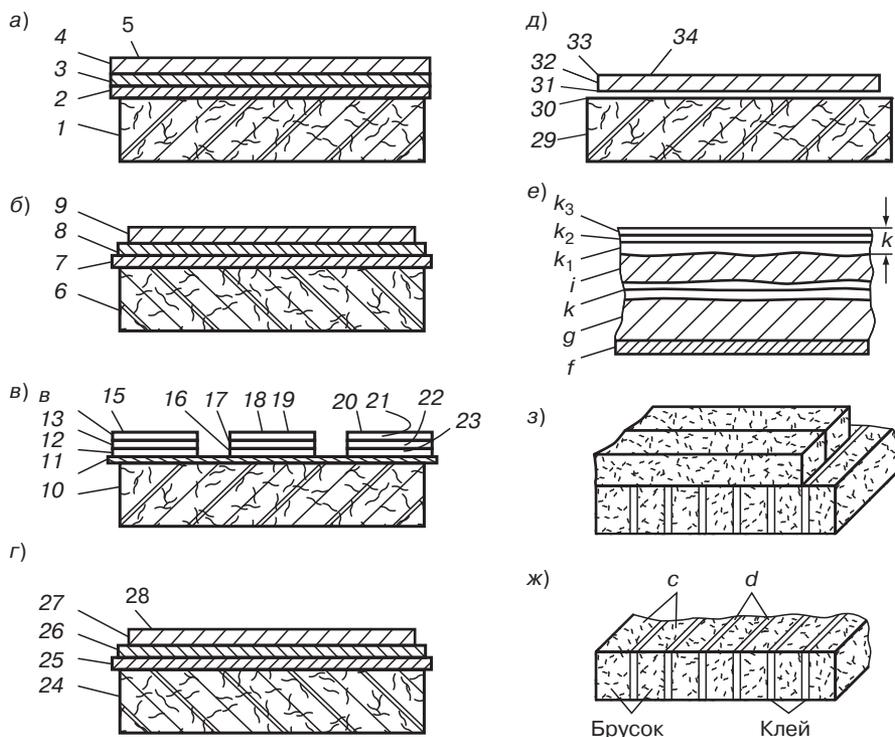


Рис. 2.136. Радиопоглощающие материалы для противорадиолокационной маскировки боевых рубок подводных лодок [104]: а — материал системы стеклопластик–алюминий — четвертьволновой поглотитель; б — материал с защитным слоем; в) материал с трехслойными поглотителями; г — материал с неметаллическим слоем, заменяющим алюминиевый слой; д — материал, упрочненный металлической сеткой; е — снарядоустойчивый материал сложной структуры; ж — конструкция упрочняющего слоя из пластика; з) взаимная ориентация упрочняющих слоев пластика

Разработки РПМ и РПП по программе *Stealth* используют и для решения проблемы УРЗ подводных лодок.

При создании РПМ и РПП используют порошки ферритов с частицами чешуйчатой формы с ориентацией плоскостей частиц параллельно друг другу и параллельно плоскости слоя, при этом толщина частиц оказывается значительно меньше толщины скин-слоя, а их длина значительно меньше длины волны.

Совместное использование ферритовых порошков и электропроводящих наполнителей (в частности, коротких металлических волокон) обеспечивает коррекцию частотной зависимости диэлектрической проницаемости, что в свою очередь позволяет улучшить радиотехнические характеристики РПП (например, приводит к расширению рабочего диапазона частот). Объединение диэлектрических и магнитных потерь позволяет разработать эффективное, достаточно широкополосное (4–6 ГГц) однослойное РПП [113, 118, 121].

Эффективны и двухслойные структуры, в которых один из слоев изготовлен на основе резины, содержащей ферритовый порошок, а второй, прилегающий к металлу, слой дополнительно содержит короткие металлические волокна, причем их длина выбрана равной примерно 3 мм, а содержание волокна в смеси составляет 1,5 % масс. В этой конструкции первый слой выполняет функцию трансформатора импедансов, а второй, содержащий волокна, — низкоимпедансного

резонатора. Примером реализации такой структуры является РПП, которое в диапазоне частот от 8 до 13 ГГц и при углах падения до 45° имеет коэффициент отражения электромагнитной волны, не превышающий -20 дБ. Для создания РПП этой конструкции для других диапазонов частот необходимо соответствующим образом изменить длину и содержание волокна, содержание ферритового порошка во входном слое и толщины слоев. Такие двухслойные поглотители электромагнитных волн (абсорберы) созданы для частотных диапазонов 2–3,5; 3,5–6,5; 5–8; 8–13 и 13–18 ГГц (РПП группы *Neboa* (типы I–V) фирмы *NEC* (Япония)). Они могут применяться для предотвращения паразитной интерференции электромагнитных волн, например, для устранения «ложного» эха корабельных РЛС и в параболических антеннах спутниковых систем связи [121].

Фирмой *Nippon Denki K.K.* (Япония) разработан РПМ с радиопоглощающими характеристиками, стабильными в широком интервале температур, который эффективен при его использовании в качестве материала для изготовления судовых антенн, что обеспечивает их радиолокационную маскировку. РПМ может быть использован в качестве РПП в высокочастотном диапазоне или экрана для поглощения электромагнитной энергии. Материал получают добавлением в полимер коротких тонких волокон из аморфного сплава, содержащего переходные металлы (железо, кобальт, никель). Для повышения эффективности поглощения магнитной и электрической составляющих электромагнитного поля в полимер вводят один или несколько видов аморфного сплава (гранулы, фольга) [113].

РПП на основе суспензии смеси порошков ферритов с высокой намагнитченностью насыщения в зависимости от состава смеси имеет при толщине $2,3 \pm 0,3$ мм ширину полосы частот в 3 см диапазоне до 30% при уровне коэффициента отражения (в среднем) около -20 дБ. При нанесении на это РПП защитного слоя из полиуретановой краски оно становится устойчивым к морской воде и резким перепадам температуры

На лондонской конференции экспертов по технологии «*Stealth*» разработана концепция защиты надводных кораблей [122].

Создать надводные корабли, невидимые для РЛС на фоне естественных помех, практически невозможно. Целесообразный и реально достижимый уровень РЛЗ надводных кораблей связан с техническими возможностями активных и пассивных средств радиоэлектронного противодействия (РЭП). Поэтому все мероприятия по снижению РЛЗ кораблей направлены на обеспечение более надежной их защиты от оружия с радиолокационными системами самонаведения

При проектировании современных кораблей на основе технологии «*Stealth*» используются низкосидящие корпуса выпуклой формы. Надстройки простых архитектурных образований (усеченные пирамиды с наклоном стенок $8-10^\circ$, конусы и т. п.), встроенное вооружение, многофункциональные боевые информативные системы, оснащенные фазированными антенными решетками, разрушение угловых образований, переход от плоских к криволинейным поверхностям, фокусирующим вторичное излучение в узких секторах и в заданных направлениях [123]. Широко применяются как стандартные, так и съемные радиопоглощающие материалы и покрытия.

Примером корабля, на котором снижена РЛЗ в соответствии с технологией «*Stealth*», является миноносец *Arleigh Burke (DDG-51)*, США. Этот корабль водоизмещением 84 500 т (длина 142 м, ширина 18 м, осадка 9 м) имеет ЭПР порядка 1000 м^2 , что на порядок меньше, чем у аналогичных надводных кораблей старой постройки. Для снижения РЛЗ в нем предусмотрены: развал бортов более чем на 8° на значительной части низкосидящего корпуса; V-образная носовая часть с острым резко приподнятым клиперским носом; надстройки с заваленными стенками простой архитектурной формы и малой высоты; расположенное под палубой ракетное вооружение; многофункциональная информационная система *AEGIS* с фазированной антенной решеткой. На палубе отсутствуют шлюпки и другие элементы, вносящие существенный вклад в суммарную ЭПР архитектурно незащищенных кораблей. Там, где невозможно использование малоотражающих архитектурных форм (двери, трапы и пр.), применены РПМ.

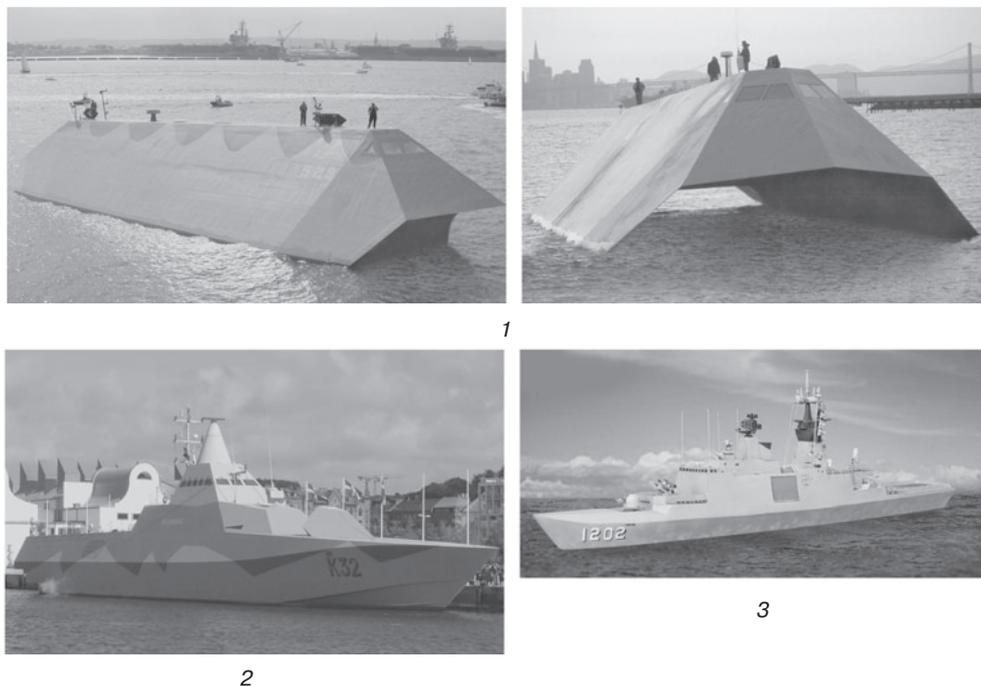


Рис. 2.137. Надводные корабли, использующие технологию «Stealth» [29, 122, 123, 153]:
 1 — катамаран «Sea Shadow» (США); 2 — эсминец «Lafayette» (Франция); 3 — эсминец «Visby» (Швеция)

Дальнейшее совершенствование кораблей с точки зрения РЛЗ предполагается в рамках проекта «Ударный крейсер-2000» (США). Особенности корабля являются отсутствие каких-либо надстроек на палубе (только ходовая рубка с малой ЭПР) и использование интеллектуальных ВПКМ с фазированными решетками в конструкциях фальшборта и корпуса.

С использованием технологии «Stealth» спроектированы: фрегат *Type 23* (Норфолк, Великобритания); фрегат *Meko 360* (Германия); эсминец *Cossard «Lafayette»* (Франция, рис. 2.137); ракетно-артиллерийский катер *Saettia* (Италия); фрегат *NFP-90* (НАТО); фрегат *DE229* (Япония); катер на воздушной подушке «*Smuge*» (ВМФ Швеции); фрегат «*Visby*» (Швеция, длина 70 м, углепластики в конструкции, рис. 2.137); катамаран «*Sea Shadow*» (платформа для запуска баллистических ракет, длина 50 м, ширина 20 м, 560 т, 13 узлов, уменьшенная кильватерная струя, первый выход в море 11.04.1992, США, рис. 2.137); эсминцы проекта 1154,6 для Индии; ракетный катер «Тарантул» (Балтийский завод, Россия).

ЭПР этих кораблей составляет 0,1 до 0,3 D_n , что позволяет сделать заключение об их низкой РЛЗ на фоне современных ложных целей, имеющих ЭПР от 0,3 до 0,8 D_n , где D_n — нормальное водоизмещение корабля [29].

2.4.4.4.3. Материалы, покрытия и конструкции, уменьшающие РЗ объектов ракетной техники

Использование средств, уменьшающих мощность отраженных от ГЧ БРДД радиолокационных сигналов, позволяет резко снизить дальность и вероятность их обнаружения РЛС (при снижении ЭПР ГЧ в 16 раз, дальность обнаружения падает в два раза), что облегчает прорыв ГЧ БРДД через системы ПВО, ПРО и ПКО. Задача перехвата ГЧ заключается в предотвращении взрыва ее боевого блока в районе охраняемого объекта. В комплекте мер, обеспечивающих преодоление

ПРО противника (использование многофункциональных многослойных защитных конструкций: теплозащитных, оптически защищающих, экранирующих от волновых и корпускулярных ионизирующих факторов ядерного взрыва, ударопрочных для противодействия ударному импульсу ядерного взрыва, устойчивых к лазерному оружию, радиопрозрачных, обеспечивающих связь и управление) использование радиопоглощающих материалов создает основные проблемы для обнаружения и своевременного перехвата ГЧ РБДД.

При сокращении предельной дальности обнаружения БРДД в два раза (уменьшение ЭПР в 16 раз) успешный перехват может быть произведен только в том случае, если скорость перехватчика увеличить в 1,5 раза [25].

Снижение ЭПР БРДД желательно добиваться на всех участках ее траектории. Несмотря на относительно простые геометрические формы конструкции ракеты, величина ее ЭПР меняется на различных участках ее траектории. Это связано с последовательным отделением ступеней ракеты и непрерывным изменением радиуса затупления последней ступени (ГЧ с боевым блоком). ЭПР меняется из-за рассеяния радиоволн факелом двигателя вследствие неоднородностей ионосферы. Дальность и вероятность обнаружения ГЧ на среднем участке траектории снижают выбором оптимальной формы носового конуса и использованием РПМ. Чтобы наконечник ГЧ был все время направлен на РЛС системы ПРО, для сохранения минимального значения ЭПР ГЧ ее стабилизируют (современные ГЧ не «кувыркаются»).

После обнаружения ГЧ для создания дезориентации используют легкие или тяжелые ложные цели (эффективны на среднем участке траектории). При входе ГЧ в плотные слои атмосферы в результате торможения кинетическая энергия набегающего потока переходит в тепловую, начинается абляция, набегающий поток, благодаря диссоциации и ионизации его компонентов, превращается в плазму. Время распада плазменного следа составляет около 2 с и длина его для ГЧ, летящей со скоростью 600 м/с, будет примерно равна 1,2 км. При тонкой конусообразной форме ГЧ создается интенсивный набегающий плазменный поток, однако для большей эффективности абляции используют конусы с определенным радиусом затупления R , что обеспечивает расширение сжатого стоя (отсоединенный скачок уплотнения) и уменьшение подвода к конструкции тепла за счет конвекции, так как $q_{\text{конв}} \approx 1/\sqrt{R}$. Закругленная часть основания ГЧ способствует подавлению турбулентного ионизированного, отражающего ЭМИ следа, имеет форму, близкую к полусфере с двойной кривизной. Для уменьшения дифракции и обратного рассеяния используют многофункциональные материалы, выполняющие одновременно роль теплозащитных (абляционных) и радиопоглощающих, и, все чаще, конструкционные теплозащитные радиопоглощающие материалы.

Обратное рассеяние от головной части ракеты имеет частотную зависимость. Энергия, излучаемая обратно в направлении источника облучения вследствие дифракции, достигает максимума, когда длина волны приближается к размерам головной части. Энергия радиоволн, рассеиваемых от острия конуса и от острых кромок головной части ракеты, возрастает прямо пропорционально длине волны: чем длиннее волна, тем больше энергии рассеивается в обратном направлении, и чем меньше угол раствора конуса, тем обратное рассеяние меньше.

ЭПР ГЧ БРДД обычно принимается равной 0,2 м², но при применении радиопоглощающих материалов может быть уменьшена в 1000 раз. Теплозащитные радиопоглощающие материалы являются широкодиапазонными магнитоэлектриками трех типов (рис. 2.138):

1) теплозащитные материалы (ТЗМ) с магнитными (ферриты) и токопроводящими (ацетиленовая сажа, углеграфитовая вата, ленты КЛШ) компонентами в составе ТЗМ с требуемыми значениями эффективной энтальпии $N_{\text{эфф}}$ (АТ-1РП, СТКТ-РП);

2) многослойные радиопоглощающие конструкции, приклеиваемые к силовым оболочкам;

3) многофункциональные материалы (кварце-, угле-, органопластики) с магнитными и токопроводящими наполнителями.

Открытая информация о составах теплозащитных радиопоглощающих материалов носит, в основном, рекламный характер.



Рис. 2. 138. Типы многослойных теплозащитных радиопоглощающих конструкций: 1 — резонансные РТК-Р; 2 — сотовые РТК-С; 3 — ферритовые РТК-Ф; 4 — латунная сетка; 5 — феррит

Фирма *TDK Electronics* разработала ферритовую краску для лакокрасочных радиопоглощающих покрытий толщиной 1 мм (маскировка стартовых платформ, АО системы самонаведения в ИК-диапазоне ракет *SA-7*, применение для вертолетов фирмы *Marine Vorp* [124].

Ракета *Stealth* класса «воздух–корабль» типа *80AsM-I* разработана фирмой *Mitsubishi* для установки на истребителе *F-1*. Модификация этой ракеты *XSSM-1* с турбовинтовым двигателем представляет собой ракету дальнего действия. На корпус ракеты *XSSM-1* нанесено радиопоглощающее покрытие (ЛКП на основе кристаллического феррита типа обратной шпинели). Толщина слоя такого покрытия 2,54 мм. Покрытие способно поглощать 24 дБ при частоте 9 ГГц и свыше 10 дБ при частоте $\pm 2,25$ ГГц. Феррит разработан фирмой *Denki Kagaku Kogyo* [125].

Особой проблемой считается загоризонтное обнаружение низколетящих целей. ЭПР конструкции противокорабельной ракеты можно уменьшить до такого уровня, когда эффект отражения радиолокационных сигналов от факела пламени ракетного двигателя будет более значительным, чем эффект от ЭПР конструкции. При решении указанной проблемы предпочтительней использовать в двигательных установках противокорабельных ракет воздушно-реактивные двигатели. В данном случае ионизация выхлопом двигателя атмосферного воздуха, определяющая ЭПР ракеты по этому фактору, значительно меньше [114].

Тенденция введения радиопоглощающих компонентов в конструкционные материалы характерна для ряда разработок. Фирма *Avco* разработала головную часть ракеты, в теплозащитное покрытие которой непосредственно введен радиопоглощающий материал [104].

Фирма *North American Aviation* отказалась от идеи непосредственного покрытия ракет радиопоглощающими слоями и создает материалы, которые, являясь обшивкой ракеты или управляемого снаряда, обладают в то же время свойством поглощать радиолокационное излучение в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. Толщина такого материала составляет всего 6 мм [102].

Многослойный материал фирмы *Eltro* (ФРГ) представляет собой комбинацию полимерных слоев, нанесенных на токопроводящую подложку методом напыления, окраски или наклеивания. В целях получения независимо друг от друга ослабления амплитуды и поворота фазы, необходимого для гашения волны, материал имеет фазосдвигающий нижний слой и нанесенные на него поглощающий и рассеивающий слои [103].

Фирма *Aerospace Corp.* (США) для защиты космических летательных аппаратов от радиолокационного обнаружения предложила наносить покрытие из радиопоглощающего материала на поверхности, примыкающие к отверстиям (люкам, щиткам и т. п.) в корпусе аппарата, а сами отверстия закрывать заглушкой также из этого материала. Применение заглушки отверстий и покрытия таких поверхностей радиопоглощающим материалом связано с тем, что величина сигнала, отраженного от космического летательного аппарата конической формы (например, носового конуса ракеты), определяется геометрической неправильностью поверхности летательного аппарата.

Именно такими нарушениями электрической непрерывности поверхности летательного аппарата и являются различные отверстия, которые необходимо маскировать радиопоглощающим материалом. Структура радиопоглощающего материала выбрана так, что величина

потерь последовательно возрастает, а импеданс внешнего слоя имеет величину, аналогичную импедансу свободного пространства. Толщина радиопоглощающего материала плавно увеличивается на примаикающих к отверстиям поверхностях конуса аппарата; она равна нескольким микронам, в то время как в центре заглушенного отверстия достигает двух длин волн падающего излучения. Величина электромагнитных потерь материала заглушки совпадает с величиной электромагнитных потерь той части покрытия из радиопоглощающего материала, которой это покрытие примыкает к отверстию. Полученная комбинация заглушка–покрытие надежно устраняет отражения радиолокационных сигналов. В качестве радиопоглощающего материала покрытия и заглушки фирма рекомендует применять ПТФЭ с порошком углерода в качестве наполнителя. Максимально допустимая толщина покрытия составляет 0,5 см [103].

Одним из видов применения радиопоглощающего материала в конструкции летательных аппаратов является сбрасываемый экран для управляемых ракет, поглощающий электромагнитное излучение. Экран предназначен для поглощения радиолокационных сигналов, вызывающих случайное и преждевременное срабатывание радиовзрывателя во время хранения, испытания и транспортировки ракеты.

Ни рис. 2.139 показан носовой конус ракеты с многоцелевыми антеннами 2, на рис. 2.140 — антенна 1, а на рис. 2.141 — сбрасываемый радиопоглощающий экран. Каждая антенна (рис. 2.140) включает прямоугольный волновод 2 с платой 3 (служащей крышкой волновода) и монтажными фланцами 4. В плате 3 сделана прорезь 5, в которой установлен узел многоцелевой антенны. Экран 1 (рис. 2.141) включает полосу 2 из радиопоглощающего материала на основе резины. Полоса имеет коническую часть 3, закрывающую верхнюю часть крышки 4. Сверху полоса 1 и ее коническая часть 2 полностью закрываются алюминиевой фольгой 3 для экранирования излучения передающих антенн (в процессе испытаний) и случайных радиолокационных сигналов; полоса крепится клеем к крышке из диэлектрика 4. В полете радио-

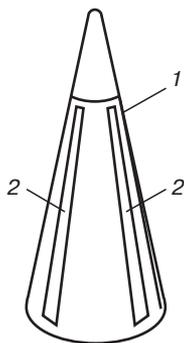


Рис. 2.139. Носовой конус ракеты с многоцелевыми антеннами, защищаемыми радиопоглощающим экраном [104]

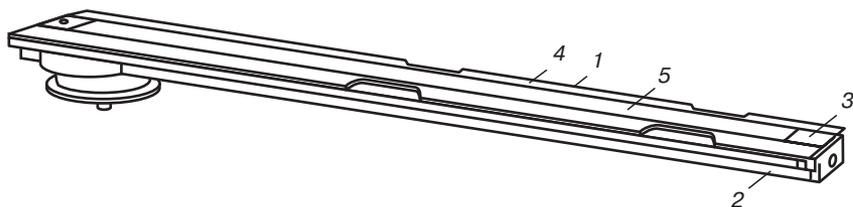


Рис. 2.140. Конструкция антенны [104]

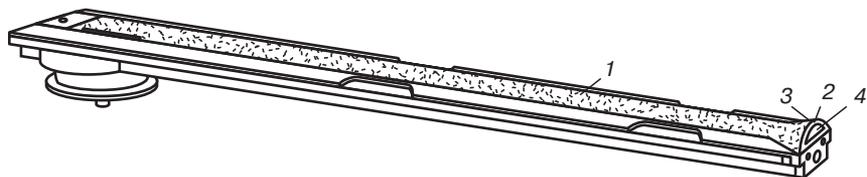


Рис. 2.141. Антенна с радиопоглощающим экраном [104]

поглощающий экран срывается воздушным потоком из-за увеличения давления воздуха на коническую часть полосы [104].

Группа по авиационно-космической технике фирмы *Boeing* применила радиопоглощающий материал в конструкции стабилизатора ударной ракеты *SRAM* (*Short Range Attack Missile*) малой дальности действия класса воздух – земля. Этими стратегическими сверхзвуковыми ракетами оснащены самолеты *F-111*, *B-52*, *B-1*. Стабилизаторы ракеты *SRAM* выдерживают температуру до 540 °С и нагрузки, возникающие при сверхзвуковом полете. Материалы для стабилизатора выбраны так, чтобы свести к минимуму эффективную отражающую поверхность.

Стабилизатор состоит из пяти элементов (рис. 2.142), к каждому из которых предъявляются специфические конструктивные требования. Основой стабилизатора является лопасть и вал, выполненные методом штамповки как одно целое из нержавеющей стали 17-4PHI. Поскольку вал предназначен для передачи высоких нагрузок, воспринимаемых стабилизатором, на конструкцию ракеты, то он должен обладать высокими усталостными характеристиками. Вторым элементом стабилизатора является наполнитель низкой плотности из эпоксидного связующего, наполненный микрокерамиками (фирма *Emerson and Cuming*, тип *Stycast 1090*).

Заполнителем заливают внешнюю поверхность стальной лопасти. После его отверждения деталь помещают во вторую пресс-форму и заливают радиопоглощающим материалом марки *Eccosorb CR*, *Eccosorb 114* или *124*. Этот материал состоит из эпоксидного связующего с наполнителем из порошка углерода. Сверху располагают слой конструкционного фенольного стеклопластика *BMS-8-58*. Внешняя поверхность выполнена из теплозащитного фенольного

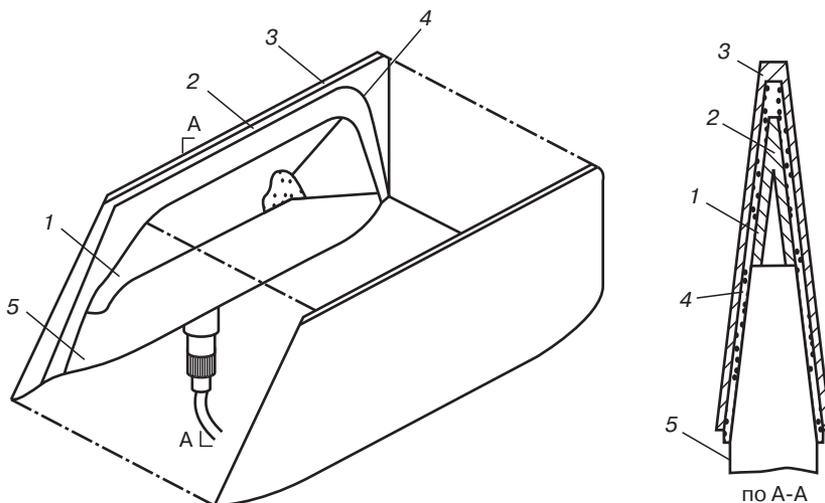


Рис. 2.142. Применение различных материалов в конструкции стабилизатора ракеты *SRAM* [104]: 1 — радиопоглощающий материал; 2 — конструкционный фенольный стеклопластик; 3 — теплозащитный кварцелластик; 4 — эпоксидный сферопластик; 5 — стальная лопасть

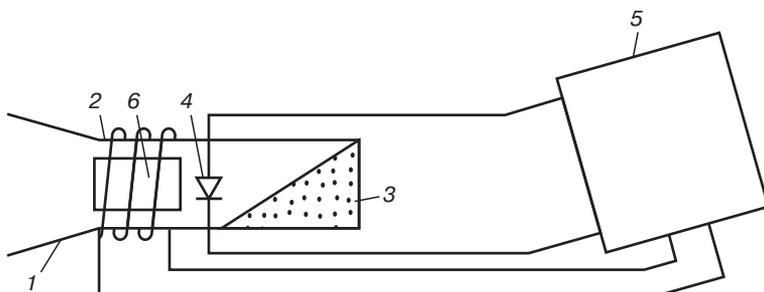


Рис. 2.143. Устройства для программированного изменения эффективной отражающей поверхности цели [104]

пластика *BMS-72*, упрочненного кварцевым стекловолокном. Этот слой выдерживает воздействие температур до $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ [104].

Для противорадиолокационной маскировки искусственных спутников и космических летательных аппаратов, проходящих через плотные слои атмосферы, в ВВС США разработан метод и устройство для программированного изменения характеристик отраженных радиолокационных сигналов и, следовательно, уменьшения эффективной отражающей поверхности цели. Изменение характеристик отраженных сигналов резко снижает возможность быстрой оценки параметров цели: скорости, ускорения, нагрузки на тягу (отношение веса ракеты к суммарной тяге двигателей). Маскируются также такие характерные признаки цели, как флюктуация отметки цели на экране РЛС. Использование данного метода ухудшает также и такие характеристики РЛС, как разрешающая способность по дальности, точность сопровождения, видимость цели. Метод требует мощности на 6 порядков меньше, чем станция искусственных помех.

Схема описываемого устройства показана на рис. 2.143. Рупорная антенна *1* размещена на цели и соединена с волноводом *2*, который заканчивается поглощающей нагрузкой *3*, так что энергия падающего излучения почти полностью поглощается. Между нагрузкой и антенной помещен диод *4*. Путем изменения напряжения смещения на диоде изменяют отражательную способность так, что часть электромагнитного излучения не будет поглощаться нагрузкой, а отразится от рупора. Амплитуду отраженных электромагнитных волн можно изменять с помощью программирующего устройства *5*, управляющего напряжением смещения диода. Кроме диода, волновод содержит ферритовый фазовращатель *6*, который также управляется программирующим устройством *5*. Таким образом, отражательная способность, а следовательно, эффективная отражающая поверхность цели, изменяется с изменением фазового сдвига и/или затуханием в передающей линии, которой нагружена антенна, если необходима противорадиолокационная маскировка от ряда РЛС.

2.4.4.4. Использование технологии *Stealth* в самолетостроении

В 1950-х гг., в ходе проработки в США концепции и проектирования первого специализированного самолета для ведения скрытной разведки, было установлено, что эффективность системы ПВО полностью зависит от РЛС дальнего обнаружения и точного слежения за вторгнувшимися в воздушное пространство самолетами. Уменьшенная радиолокационная заметность была отличительным свойством самолетов *RB-57* и *U-2*, однако она оставалась значительной. Это впервые вызвало интерес к проблеме заметности, и в конечном итоге была разработана соответствующая технология, которая впоследствии нашла свое воплощение в системах оружия.

Отделение *ADP* фирмы *Lockheed*, специализирующееся на разработке перспективных проектов, достигло существенных результатов при определении конфигурации самолета-разведчика *A-12*, рассчитанного на полет с числом $M = 3,5$. Многие особенности этого самолета были продиктованы или обусловлены стремлением уменьшить ЭПР: узкий профиль в боковой

проекции; установленные в крыле двигателя; большие наплывы на корневых частях крыла, плавно переходящие в обводы фюзеляжа; фюзеляж с носовой частью, плавно переходящей в наплыв крыла; небольшие наклонные внутрь кили. Отделение *ADP* разработало поглощающий материал готовой конструкции, который был применен в кромках по периферии всего контура самолета. Хотя самолет *A-12* легко обнаруживается с помощью РЛС в крейсерском полете (из-за ионизационного следа), точное слежение было затруднительно, а на небольших скоростях полета он представляет собой очень небольшую радиолокационную цель. Самолет *A-12* явился предшественником одноместного самолета-разведчика *SR-71* и впервые начал летать в 1961 г.

В 1961 г. фирма *Ryan* начала испытывать модифицированные беспилотные ЛА (БПЛА) *Firebee*, имеющие покрытие из поглощающих ЭМЭ материалов и снабженные экранированными воздухозаборниками. На основе этих БПЛА были созданы беспилотные разведчики. Применяющееся вначале покрытие было затем заменено на усовершенствованное типа *HIDE*.

Фирма *Lockheed* создала БПЛА *D-21*, стартующий с самолета *A-12* и рассчитанный на полет с $M = 4$. Разработанный фирмой *Ryan* крупноразмерный дозвуковой БПЛА *AGM-91 Compass Arrow* обладал характеристиками *U-2*. БПЛА *D-21* и *AGM-91* послужили отправной точкой для создания технологии *Stealth*.

С 1962 г. в США проводилась работа по программе *ABRES (Advanced Ballistic Missile Re-entry Systems)*, исследование и разработка средств преодоления противоракетной обороны головными частями баллистических ракет), с 1965 г. по программам *LORV (Low Observable Re-entry Vehicle)* — летательные аппараты с уменьшенной радиолокационной обнаруживаемостью) и *REX (Reduced Exoatmospheric Crosssection)* — уменьшенное радиолокационное сечение при полете в экзосфере) [26, 104, 110].

Предложение ВВС к Управлению перспективных разработок министерства обороны США (*DARPA*) о создании боевого самолета с использованием технологии *Stealth* было сделано отделением *ADP* фирмы *Lockheed* приблизительно в 1974 г. [110].

Официально о программе *Stealth* было объявлено в 1981 г., когда фирма *Lockheed* получила заказ на производство первой партии из 20 истребителей *EST (Experimental Stealth Tactical)*, названных *F-19*, позднее *F-117A* [111, 112].

Фактической точкой отсчета начала работ по созданию первоначально истребителя, а затем и бомбардировщика «*Stealth*» является начало 1970-х гг., когда министерством обороны США была утверждена исследовательская программа «*Hew blue*». В конце 1973 г. командование ВВС объявило о своей готовности рассмотреть конкретные предложения промышленных фирм, намеревающихся приступить к созданию демонстрационных образцов летательных аппаратов, построенных с использованием технологии «*Stealth*». Условия, выдвинутые им в то время, предусматривали, что новый самолет *XST* должен отвечать следующим требованиям: обладать низкой ЭПР, отличаться пониженной шумностью двигателей и невысокой температурой выхлопных газов. Требовалось также, чтобы аэродинамическая схема самолета не только затрудняла его обнаружение даже на небольших удалениях, но и позволяла создавать достаточные внутренние объемы для размещения в них высокоэффективной аппаратуры РЭБ.

Рассмотрев поступившие предложения фирм, командование ВВС США остановило свой выбор на проекте компании *Lockheed* и подписало с ней контракт на строительство пяти экспериментальных образцов самолета *EST*. Первый демонстрационный полет одного из построенных самолетов состоялся в ноябре 1997 г.

В рамках программы разрабатывались перспективный бомбардировщик *ATB (Advanced Technology Bomber)*, перспективный тактический истребитель *ATF (Advanced Tactical Fighter)* и усовершенствованная крылатая ракета *ACM (Advanced Cruise Missile)*.

Фирмы *Northrop*, *Boeing* и *Vought* (все США) победили в конкурсе на получение контрактов по производству бомбардировщика *ATB (B-2)* фирмы *Northrop*. В то же время фирме *Lockheed* была поручена разработка усовершенствованной крылатой ракеты *ACM* для ВВС США.

Программа фирмы *Lockheed* по созданию *ACM* была свернута из-за большой стоимости и результатов, полученных фирмами *Boeing* и *General Dynamics* в ходе работ по программе *Teal*

Dawen, также предусматривающей создание усовершенствованной крылатой ракеты. В итоге в 1983 г. фирма *General Dynamics* была выбрана в качестве главного субподрядчик по созданию ракет *АСМ* для ВВС США, которые заменили крылатые ракеты фирмы *Boeing AGM-86B*. Технология *Stealth* рассматривалась в качестве важного фактора при разработке легкого многоцелевого вертолета *LHX*, обладающего достаточно низкой акустической сигнатурой несущего винта. Но даже при полете *LHX* в режиме обгибания рельефа местности, разработка полностью «невидимого» вертолета является маловероятной. Несмотря на одинаковые технологические решения, применяемые при создании ракет и самолетов с уменьшенной радиовидимостью, самолеты и вертолеты имеют большие размеры и более сложный внешний облик, что значительно усложняет задачу снижения их радиовидимости по сравнению с ракетами. Главной проблемой при создании слабоотражающих ракет является разработка компактной, надежной и неизлучающей аппаратуры системы наведения.

Основной целью программы «*Stealth*» является создание ЛА, обладающих минимальными демаскирующими признаками при облучении с любого ракурса в радиолокационном, ИК, оптическом и акустическом диапазонах волн.

Несмотря на положительный опыт, накопленный при разработке самолетов *A-12*, *Shark*, *SR-71 Blackbird* и *B-1*, интерес официальных кругов США к малоотражающим ЛА был ограничен до конца 1973 г. ВВС США считали, что наиболее эффективными средствами радиопротиводействия РПД являются создание радиоэлектронных помех (РЭП) и применение дипольных отражателей.

Интерес ВВС США к программе «*Stealth*» резко возрос после отказа от производства бомбардировщика *B-1A* в 1997 г. К концу 1997 г. в США была исследована возможность по созданию малоотражающей конструкции самолета *B-1* и принято решение о производстве бомбардировщика *B-1B* с уменьшенной ЭПР для снижения степени технического риска при разработке перспективного бомбардировщика *ATB*.

В 1985 г. в Палмдейл (Калифорния) фирма *Northrop* начала строительство *B-2* (представлен в ноябре 1988 г., первый полет — 17 июня 1989 г.) [111, 112].

Интенсификация работ в области радио- и ИК противодействия выражается прежде всего в многообразии направлений исследований. Наиболее существенны следующие разработки: многоабаритные устройства с малой эффективной отражающей поверхностью, запускаемые с ракет-носителей для перехвата спутников; работы по улучшению радиопротиводействия для космических летательных аппаратов, проходящих через плотные слои атмосферы; методы преодоления противоракетной обороны для баллистических и маневрирующих головных частей ракет; защита самолетов от ракет с ИК-системами наведения [105].

В соответствии с принципами технологии *Stealth* к основным способам уменьшения радиолокационной заметности военных объектов (ЛА, кораблей и т. д.), обеспечивающим снижение вероятности их поражения, помимо радикального изменения внешней формы объекта, относятся:

1) использование в качестве основных конструкционных материалов ВПКМ, обеспечивающих создание легких и прочных конструкций, способных поглощать электромагнитные излучения в широком диапазоне частот с малым коэффициентом отражения;

2) применение специальных покрытий и конструкций, способствующих уменьшению уровня электромагнитных волн, отраженных от объекта.

Примерами применения принципов технологии *Stealth* служат:

1) работы по созданию самолетов-«невидимок» (бомбардировщика *B-2*, истребителей *F-117A*, *F-22*);

2) работы по уменьшению радиолокационной заметности вертолетов, проводимые в Японии, Великобритании в Исследовательском центре МО и на фирме *Elliot Brothers*, в частности, по снижению вклада в ЭПР вращающихся винтов вертолетов посредством нанесения радиопоглощающих покрытий на передние кромки их лопастей;

3) работы по созданию малого ракетного корабля водоизмещением 650 т, выполненные фирмой *Hydro Research Systems*;

4) исследовательские работы по снижению радиолокационной заметности выдвигаемых устройств подводных лодок, выполненные в Военно-морском региональном центре Финляндии.

Применение радиопоглощающих материалов (РПМ) и покрытий (РПП) перспективно для обеспечения требуемого закона распределения отраженного сигнала по апертуре зеркальных антенн посредством установки радиопоглощающих элементов, определенным образом распределенных по апертуре; устранения влияния интерференции переломленных от соседних объектов электромагнитных волн (для устранения «ложного» эха) [113].

2.4.4.4.1. Снижение ЭПР оптимизацией архитектуры авиационных конструкций

Практические работы по программе «*Stealth*» позволили ВВС США уже в конце 1988 г. сообщить о разработке по этой технологии двух бомбардировщиков *B-2* и истребителя *F-117A*, не обнаруживаемых обычными радиолокаторами СВЧ-диапазона. При проектировании основное внимание уделялось оптимизации аэродинамических характеристик этих самолетов, минимизации радиолокационной и тепловой заметности и учету взаимосвязей перечисленных факторов. Основными техническими проблемами, которые были решены в процессе проектирования самолетов по технологии *Stealth*, являлись: размещение двигателей внутри элементов конструкции самолета; уменьшение площади поперечного сечения самолета; внутренняя подвеска оружия; ликвидация вертикального оперения; создание адаптивной многофункциональной антенной системы с управляемым минимумом диаграммы направленности (для уменьшения влияния помех), совмещающей три функции: глобальной системы навигации, объединенной системы тактической информации и системы опознавания «свой–чужой»; использование ВПКМ, в частности эпоксидных и полиимидных углепластиков; использование радиопоглощающих конструкций сотового и шахтного типов.

Реализация программы «*Stealth*» основана на использовании принципов формирования рациональной архитектуры объектов, определении типа РПМ и оптимальной топологии их нанесения [29, 36].

Обеспечение уменьшения заметности начинается с выбора основной конфигурации самолета, в которой устраняются отражающие поверхности — уголковые отражатели, плоские вертикальные поверхности и полости. Двигатели экранируются от радиолокационных излучений посредством криволинейных перегороденных входных каналов и особой конструкции выходных устройств. При передних и задних ракурсах двигатели являются основными агрегатами, определяющими величину ЭПР самолета. Тепловая заметность уменьшается благодаря тщательному контролю теплоизлучений частей самолета и применению холодного воздуха, отбираемого из окружающей атмосферы снижения температуры шлейфа газов [110].

При разработке в США бомбардировщика *B-52* (конец 1940-х и начало 1950-х гг.) стремление снизить ЭПР оказало определенное, хотя и не очень заметное влияние на его конструкцию. Стремление максимально снизить величину ЭПР лежит в основе комплекса мер, обязательно предусматриваемых при проектировании и строительстве самолета системы *Stealth*. Низкая обнаруживаемость летательного аппарата военного назначения в видимом оптическом, инфракрасном диапазонах, радиодиапазоне электромагнитного излучения является его важнейшей характеристикой. Она приобретает особенное значение для таких самолетов, которые предназначаются для ведения боевых действий, предусматривающих прорыв системы ПВО противника.

Резкие изломы и перегибы при переходе одной плоскости в другую являются прекрасными источниками отраженных сигналов. Хорошими «отражателями» являются также первые ступени компрессоров и вентиляторов двухконтурных турбореактивных двигателей [112].

Кромки крыльев, большие плоскости крыльев и фюзеляж являются источниками сильного вторичного излучения и поэтому больше нуждаются в противорадиолокационной маскировке, чем другие части корпуса летательного аппарата. На фюзеляже, кроме того, может возникать

блуждающая волна, которая усиливает эхо-сигнал. При измерениях эхо-сигналов от самолетов максимальное значение эффективной площади рассеяния, соответствующее боковой поверхности фюзеляжа, составляло несколько тысяч м².

Основные мероприятия по формированию слабоотражающего облика самолетов заключаются в экранировании двигателя; применении интегральных компоновок планера, фюзеляжного гребня (как на самолете *SR-71*) и наплывов в местах стыка крыла с фюзеляжем; уменьшении фронтальной и боковой проекции площади ЛА; применении внутрифюзеляжной (конформной) подвески вооружения. Многие из перечисленных требований отвечают ЛА нетрадиционного облика, выполненные по аэродинамической схеме «летающее крыло» или с несущим корпусом. Рули и стабилизаторы на слабоотражающих ЛА должны отсутствовать или иметь минимальную площадь [111].

Снижение ЭПР может быть достигнуто за счет размещения двигателей внутри элементов конструкции самолета, плавного сопряжения крыла и фюзеляжа и максимально возможного уменьшения площади поперечного сечения летательного аппарата. Поскольку для встроенных двигателей, их входных и выходных устройств, а также для внутренней подвески оружия требуются определенные объемы, компоновка самолета «*Stealth*» должна предусматривать выделение дополнительных внутренних пространств в больших масштабах, чем у равного ему по размеру самолета, построенного по обычной схеме. Этот фактор, а также стремление ликвидировать вертикальное оперение подтолкнули конструкторов к выбору схемы «летающее крыло» в качестве наиболее вероятного варианта компоновки, так как при этом обеспечивается не только идеальное сопряжение крыла и фюзеляжа, но и максимальный размер полезного внутреннего объема. Такая компоновка позволяет уменьшать размеры вертикального оперения или даже вообще отказаться от его применения, хотя в этом случае безусловным требованием становится использование автоматизированной электродистанционной системы управления полетом [112].

На стадии испытаний использована система управления *AFCFS (Automatic Flight Control System)* самолета *X-29* фирмы *Grumman*, которая обеспечивает устойчивый полет ЛА без вертикального оперения [111].

Весьма сложно уменьшить влияние двигателей на общую величину ЭПР самолета. Классическая конструкция воздухозаборников в целом отрицательно сказывается на величине ЭПР, поскольку при этом не исключается «прямой доступ» радиолокационных сигналов к первой ступени компрессора, представляющей собой, по сути дела, большой вращающийся металлический диск. Для устранения такого явления целесообразно применить искривленные воздухопроводы, внутри которых устанавливаются перегородки и дефлекторы из радиопоглощающих материалов [112].

Кроме использования искривленных (как на самолете *B-1B*) каналов воздухозаборников возможно применение утопленных воздухозаборников (впервые разработанных в 1940-х гг., но не нашедших широкого применения).

Утопленные воздухозаборники не пригодны для сверхзвуковых скоростей полета. В большинстве проектов рассматриваются полуконические воздухозаборники, имеющие хорошие висотно-скоростные характеристики, небольшую массу и экранирующие значительную часть излучения от двигателя.

Достижение минимальных уровней скрытности сверхзвуковых ЛА затруднено вследствие их высокого ИК-излучения в результате аэродинамического нагрева планера.

Обычные плоские воздухозаборники, выполненные заподлицо с обшивкой крыла или фюзеляжа, не могут быть использованы на сверхзвуковом самолете. Вертикально-клиновые воздухозаборники, отличающиеся относительной конструктивной и технологической простотой, также считаются непригодными для самолетов «*Stealth*» из-за присущего им высокого значения величины ЭПР. Предпочтению отдается воздухозаборникам с центральным полуконическим телом, которые не только достаточно просты и эффективны, но и позволяют не пропустить значительную часть электромагнитной энергии к первой ступени компрессора.

Размещение любых видов оружия на внешних узлах подвески также вступает в противоречие с требованием снижения обнаруживаемости самолета. Единственным исключением из этого правила является «конформная» подвеска оружия заподлицо с поверхностью фюзеляжа, когда ракета или авиабомба полуотоплена в специально сделанном в обшивке углублении и незначительно выступает за его пределы. Но такой вариант подвески оружия применим разве что для истребителя, поскольку обеспечивает ему достаточную гибкость использования в боевых условиях, в то время как для бомбардировщиков единственным приемлемым решением остается подвеска оружия в закрытых внутрифюзеляжных отсеках [112].

Прямоугольные комбинации и антенные устройства являются специфическими отражателями.

Оптимизация условий, обеспечивающих УРЗ, проводится с использованием представлений специальных разделов теоретической и прикладной радиофизики, например, ЭПР угловых отражателей определяют методами равномерной геометрической теорией дифракции (РТД) для импедансных поверхностей. Так, величина ЭПР ($\sigma_{\text{ц}}$) клина, образованного двумя идеально поглощающими полуплоскостями с углом φ равна

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2\varphi} \right)$$

при $\varphi = 180^\circ$ $\sigma_{\text{ц}} = 0$. При $\varphi \neq 180^\circ$ укорочение длины волны снижает $\sigma_{\text{ц}}$, но не при любых значениях φ может быть достигнуто $\sigma_{\text{ц, мин}}$. $\sigma_{\text{ц}}$ тела, покрытого идеальным поглотителем и имеющего размеры, превышающие длину волны, не выше $\sigma_{\text{ц}} = L^2/4\pi$, где L — длина теневого контура на поверхности объекта при заданных углах наблюдения.

Обратное отражение от квадратной пластины и от диска, покрытых идеальным поглотителем, будет отсутствовать ($\sigma_{\text{ц}} = 0$) только при их наблюдении с направления, совпадающего с нормалью к поверхности. По всем остальным направлениям отражение будет иметь место ($\sigma_{\text{ц}} \neq 0$).

Эффективность нанесения РПМ на отражающую поверхность зависит от соотношения размеров поверхности (характерный размер B) и длины волны.

В рэлеевской области (рассеяние энергии на закрепленных электронах при энергии < 10 кэВ) уменьшение $\sigma_{\text{ц}}$ ($2\pi B/\lambda < 4$) наблюдается в случае РПМ с большими значениями μ , в резонансной ($4 < 2\pi B/\lambda < 40$) — в узких пределах значений B/λ , в коротковолновой области ($2\pi B/\lambda > 40$) коэффициент отражения $R \cong \lambda/2\pi B$ (снижение $\sigma_{\text{ц}}$ только на одной из поляризаций за счет взаимной компенсации отраженного, геометрооптического и рассеянного, дифракционного поля, порождаемого волнами, огибающими тело) и $R \gg \lambda/2\pi B$ (только геометрическое отражение; дифракционного вклада нет).

При разработке объектов с низким уровнем РЛЗ в основу положено формирование архитектуры поверхности с разработкой оптимальной топологии нанесения РПМ. Рациональным является нанесение РПМ и РПП на наиболее отражающие поверхности объекта с учетом ДОР элементов поверхности и углом эффективности работы РПМ. При определении суммарной ДОР объекта учитываются эффекты, связанные с нанесением РПМ.

Важное практическое значение при разработке средств снижения РЛЗ имеет тот факт, что чем больше размеры отдельных элементов, тем большее снижение их ЭПР может быть достигнуто. Более того, чем меньше размеры покрываемого участка, тем больше должен быть коэффициент отражения наносимого РПМ. При несоблюдении этого условия возникает дифракционный вклад во вторичное поле, который может привести к возрастанию уровня суммарного электромагнитного поля.

При определении мест размещения РПМ необходимо располагать материалами с различными коэффициентами отражения. Недопустимо формировать архитектуры наружной поверхности объекта из мелких элементов, необходимо исключать из архитектуры многоэлементные структуры. Чем меньше число элементов и чем больше их размеры, тем целесообразнее применение РПМ с меньшим коэффициентом отражения и тем большую эффективность по снижению уровня РЛЗ можно достичь.

Так как дифракционный вклад во вторичное поле обусловлен краевыми эффектами, исключение многоэлементности касается непосредственно и самого РПМ, то есть расчленение РПМ на отдельные части при его нанесении на какой-либо элемент поверхности объекта может привести к росту уровня вторичного поля. Наиболее целесообразным является сплошное нанесение РПМ на элемент поверхности.

Для уменьшения ЭПР в пределах всех угловых направлений необходимо создавать на разных поверхностях покрытия с различными импедансами. Для существенного снижения ЭПР уголкового отражателя необходимо подбирать соответствующие угол и материал покрытия. Предпочтение следует отдавать тупым углам, поскольку в этом случае не возникают отражения высоких порядков. Применение РПП эффективно не только на прямоугольных конструкциях, но и на разваленных уголкового отражателях. Для оптимального использования покрытий необходимо в каждом случае выделять доминирующие механизмы рассеяния и подбирать соответствующий поверхностный импеданс в требуемом угловом секторе. Оптимизация формы конструкций и применение покрытий взаимно дополняют друг друга, что позволяет дополнительно и весьма существенно снизить ЭПР не только этих элементов, но и ЭПР всего объекта в целом [29].

Наиболее трудному управлению поддается электронное излучение от бортового самолетного оборудования: радиовысотометров, систем обнаружения, наведения и др. Кроме того, любая антенна даже в нерабочем состоянии является интенсивным отражателем радиоволн.

Радиоволноводы в диапазоне СВЧ служат в РЛС для передачи энергии от передатчика в антенну и от антенны к приемнику как излучающие элементы в антеннах.

Поле, рассеянное антенной, по характеру своего возникновения разделяется на две составляющие. Первая из них появляется в результате приема и последующего переизлучения энергии падающего электромагнитного поля; она характерна для короткозамкнутой антенны. Вторая составляющая не связана с антенной спецификой и появляется в результате дифракции падающей волны на внешних элементах антенны. В общем случае обе составляющие существуют одновременно, но в направлении главного лепестка ДОР и вблизи него второй составляющей можно пренебречь. В направлениях, значительно отклоняющихся от главного лепестка, пренебрежимо малой становится первая составляющая. В связи с использованием в антеннах нескольких функциональных облучателей главный лепесток ДОР оказывается значительно шире диаграммы направленности антенны.

ЭПР (σ_A) антенны:

$$\sigma_A = \left[\sqrt{\sigma_{\text{стр}}} - (1 - R_A) \sqrt{\sigma_{\text{ант}}} \cdot e^{i\varphi} \right]^2,$$

где $\sigma_{\text{стр}}$ — структурная часть ЭПР; $\sigma_{\text{ант}}$ — антенная часть ЭПР; R_A — коэффициент отражения антенны; φ — относительная фаза.

Когда антенна работает как отражатель при коротком замыкании $R_A = 1$, $\sigma_{\text{стр}} = \sigma_{\text{кз}}$, при разомкнутой цепи $R_A = -1$ и $\sigma_{\text{рц}} = \left[\sqrt{\sigma_{\text{стр}}} - 2\sqrt{\sigma_{\text{ант}}} \cdot e^{i\varphi} \right]^2$ при согласовании $R_A = 0$ и $\sigma_c = \left[\sqrt{\sigma_{\text{стр}}} - \sqrt{\sigma_{\text{ант}}} \cdot e^{i\varphi} \right]^2$. При нулевом рассеянии ($\sigma_A = 0$) $R_A = 1 - \cos\varphi \sqrt{\sigma_{\text{стр}}/\sigma_{\text{ант}}}$ или $R_A = \sin\varphi \sqrt{\sigma_{\text{стр}}/\sigma_{\text{ант}}}$.

Поскольку $R_A = \frac{z_A - z_1}{z_A + z_1}$, где z_A — выходное сопротивление антенны; z_1 — сопротивление нагрузки, то посредством подбора нагрузки можно определить реализуемое на практике значение R_A , при котором поле, рассеянное в заданном направлении и на заданной частоте, обратится в нуль.

Используются и другие пути создания малоотражающих антенн в главных лепестках диаграммы направленности, основанные на применении частотно-селективных структур на зеркалах антенн в виде решеток вибраторов с различными нагрузками; создании «ступенчатых

обтекателей»; использовании частотно-селективной и поляризационно-селективных структур с управляемыми свойствами; использовании фазированных антенных решеток [29].

Большинство зарубежных военных самолетов оснащено бортовыми средствами радиопротиводействия: *AN/ALR-46* (США), *ARI 18223* (Англия), *Serval-B* (Франция, *Mirage 2000*), *ELT/56* (Италия) — приемники предупреждения об облучении РЛС, *AN/ALQ-101, -119* (США), *Caiman, Remora* (Франция), *ELT-457÷460, 555; SL/ALQ-234* (Италия), *LOKE 200* (Швеция), *ARI 23246/1 Sky Shadow* (Англия) — контейнерные системы активных помех; системы электронной и радиотехнической разведки [127].

Снижение ЭПР позволяет значительно уменьшить мощность передатчиков активных помех, устанавливаемых на защищаемом объекте (если уменьшить $\sigma_{\text{ц}}$ в n раз, то мощность передатчика помех, установленного на этом объекте для его защиты, можно уменьшить в n раз).

Прогресс в создании средств обнаружения внес свой вклад и в технологию *Stealth*. Первые ЛА с использованием техники *Stealth* разрабатывались для ведения разведки главным образом из-за того, что тогда было невозможно выполнять полеты наступательного характера без использования электронных излучающих устройств того или другого вида. Теперь применяются усовершенствованные процессоры радиолокационных сигналов, которые способны извлекать множество данных из небольшого импульса принимаемой энергии; новые пассивно-действующие электронные системы с устройствами быстрой обработки данных для точного определения местонахождения передающих средств противника; усовершенствованные инерциальные навигационные системы повышенной точности; устройства, основанные на лазерном излучении, которое не поддается перехвату; целый ряд тепловых и электрооптических приемников [110].

Частично проблема снижения электронного излучения может быть решена при использовании ИК-системы обнаружения *FLIR* для низко-высотной навигации или ночного применения. Вместо радиолокационных доплеровских систем и радиовысотометров могут быть использованы инерциальные и лазерные системы, создающие меньшее излучение. На самолетах *Stealth* устанавливают бортовые астроинерциальные системы навигации (разработана фирмой *Northrop* для самолетов *A-12* и *SR-71*, позволяет осуществлять автоматический поиск звезд в неблагоприятных погодных условиях).

В ходе выполнения программы *Stealth* созданы радиолокационные системы малой массы, мощности с высокими разрешающей способностью, дальностью действия и помехозащищенностью. Разработаны методы обработки радиолокационных сигналов бортовыми процессорами, позволяющие резко сократить время излучаемых импульсов. Для уменьшения ЭПР осуществляют маскировку антенн бортовых РЛС в нерабочем состоянии (на самолете *B-1B* неработающая антенна *APQ-164* отклоняется вниз). Обтекатель антенны может быть выполнен из РПП с радиопрозрачными окнами, которые при необходимости могут закрываться панелями из РПП.

«Шум» от радиоэлектронной аппаратуры может быть уменьшен путем применения более плотной компоновки оборудования и использования световодов, обладающих высокой помехозащищенностью.

В электронной системе *IEW* (*Integrated Electronic Warfare System*) для самолетов *Stealth* используется оптикоэлектронная система, не создающая собственного излучения.

Самыми перспективными системами связи и передачи информации являются волоконно-оптические системы, в которых информация передается с помощью лазерного излучения по волоконным световодам. Они позволяют передавать информацию в 100 тыс. раз большую, чем самые лучшие системы радиосвязи, включая спутниковую связь. Созданы системы связи со скоростями передачи информации 10^{12} бит/с (в перспективе — до 10^{15} бит/с). В США оптические кабели используются в системе управления, контроля и отображения информации, посадки *Space Shuttle* на авиабазе Эдвардс (7 систем изображения и звука, 1 — управления, длина оптических кабелей — 8 км) [128].

На самолетах «*Stealth*» сохраняются средства радиоэлектронной борьбы, и они также оснащаются волоконно-оптическими адаптивными системами, настраиваемыми на частоту РЛС для создания помех, установления дислокации средств ПВО и автоматической смены курса самолета.

2.4.4.4.2. Материалы, покрытия и конструкции, уменьшающие РЗ объектов в самолетостроении

При разработке поглощающих материалов для самолетов определяющими факторами являются весовые характеристики и широкодиапазонность материалов из диэлектрических связующих, магнитных и токопроводящих компонентов. В соответствии с требованиями технологии *Stealth* широкая гамма РПМ и РПП позволила значительно расширить диапазон рабочих длин волн, снизить массогабаритные характеристики и уменьшить коэффициент отражения. К разработке этих средств привлечен ряд ведущих фирм США, Японии, Великобритании и Германии. С учетом возможностей бистатических РЛС перспективными считаются РПМ производства фирмы *Plessey*. Они обладают широкой полосой поглощения и имеют относительно небольшую массу (1–2 кг/м²).

Несмотря на очевидные достоинства РПМ по снижению уровня ЭПР, им присущи и значительные недостатки. К их числу следует отнести зависимость эффективности РПМ от рабочей длины волны РЛС, угла падения радиоволны, формы поверхности элемента, на который наносится материал, условий эксплуатации и ряда других факторов, которые предопределяют необходимость их многофункциональности.

Тепловое излучение самолета является весьма важным фактором, для уменьшения влияния которого принимаются специальные меры. Подобно радиолокаторам ИК-средства обнаружения способны надежно отслеживать противника по тепловой сигнатуре задолго до его входа в зону оптического наблюдения. Различают три составляющих тепловой сигнатуры летательных аппаратов: нагрев работающих двигателей; горячие газы реактивной струи и тепловое излучение бортовых агрегатов и приборов; аэродинамический нагрев планера. В целях ослабления этих факторов применяются различные экраны, теплоизоляционные материалы, отвод горячих газов на верхнюю часть фюзеляжа (или крыла) для смешения их с окружающим воздухом, а также использование двухмерных реактивных сопел [112].

ИК-излучение – второй по важности демаскирующий признак ЛА. Излучение от двигателя может быть экранировано в широком диапазоне углов наблюдения элементами конструкции фюзеляжа, оперения или плоскими соплами. Последние с системами отклонения и реверсирования вектора тяги двигателя позволяют улучшить управляемость, маневренные характеристики самолета и эффективно уменьшают ИК-излучения от выходных устройств силовой установки. Сила ИК-излучения планера самолета может быть существенно уменьшена путем применения теплозащитных покрытий и особой краски светло-коричневого цвета, применяемой на самолетах А-10.

Верхний слой конструкции самолетов А-12 и SR-71 покрыт радиопоглощающей краской «*iron ball*», состоящей из микроскопических частиц для создания максимальной электропроводности [111].

Фирма *Bell Helicopter Co.* (США) применяет покрытия для маскировки вертолетов от поражения ракетами с ИК-системой наведения. Метод включает использование лент со специальным покрытием фирмы *G.T. Schjeldahl* (США). Ленты крепят к обтекателю двигателя. Они на 90% уменьшают ИК излучение двигателя в диапазоне длин волн 1–20 мкм.

Для маскировки от ракет с ИК-системой наведения выхлопные трубы двигателей вертолетов США *Hughes OH-6* и *Bell-AH-1 G Huey Cobra* выложены трехслойными панелями (металл-асбест-металл), предохраняющими трубы от нагрева [105].

РПМ и РПП используются не только для противорадиолокационной маскировки, но и для защиты объектов от поражения лазерным оружием. Методом защиты от лазерного оружия является использование поверхностей с высокой отражательной способностью (многослойные структуры из металлизированных пленок, фольги). В реальных условиях трудно избежать

коррозии отражающих поверхностей, например, самолета, и их повреждения и загрязнения. Если отражающие поверхности из металла использовать на самолете, из-за большого ЭПР он явится хорошей целью для РЛС. Поверхности, покрытые радиопоглощающим материалом, снижают ЭПР и представляют собой хороший поглотитель светового излучения, что уменьшает возможность поражения объекта лазерным оружием [105].

РПП фирмы *Emerson and Cuming* (США) *Eccosorb AN-W, AN-W-ML* (затухание 46 дБ) — эластичные липкие ленты из неопреновой резины, наполненной полиамидной тканью (табл. 2.101).

Eccosorb RM — эластичный кремнийорганический пенопласт для длительной работы при 260 °С; выпускают в виде листов 300×300×9,5 мм (вес 1 м — 2,98 кг). Изменение плоскости поляризации излучения и угла падения мало сказывается на поглощении энергии ($R < 2\%$, ослабление —17 дБ, 2,4 ГГц, сантиметровый диапазон).

Радиопоглощающий сотовый материал *Eccosorb MC-75* обеспечивает затухание 17 дБ в диапазоне частот 2,5–12 ГГц и может применяться для уменьшения эффективной отражающей поверхности воздухозаборников реактивных двигателей и для перегородок, экранирующих РЛС.

Материал *SF-RB* для самолета 2 *Max* имеет минимальное отражение на расчетной частоте и при параллельной поляризации излучения в интервале углов падения излучения 60–85°. Уменьшение затухания (по сравнению с затуханием на расчетной частоте, когда угол падения излучения равен 85°) составляет 6 дБ при угле падения излучения 60°.

Поглотитель *SF-RB*, предназначенный для работы в диапазоне X, имеет толщину 5 мм и массу 9,76 кг/м², поглотитель *SF-RB* для диапазона 5–16 ГГц толщина 3,175 мм и масса 7,81 кг/м² [105].

Радиопоглощающее покрытие для противорадиолокационной маскировки самолетов состоит из проводящих волокон (из алюминия, меди, железа, стали, титана, углеродные, сплава пермаллой), хаотично расположенных в полимерном связующем (диэлектрик с потерями). Длина волокон составляет половину длины волны падающего излучения (типичная длина волны радиолокационных сигналов равна 5 см). Диаметр волокон 10 мкм. На волокна по всей длине нанесено эпоксидное лакокрасочное покрытие. В связующее вводят также порошки (ферриты, графит) с высокими значениями $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$. Толщину всего радиопоглощающего покрытия выбирают кратной нечетному числу четвертей длины волны падающего излучения. Радиопоглощающее покрытие наносится на поверхность самолета напылением, накаткой, кистью или приклеиванием предварительно отформованного листа. При падении излучения на покрытие волокна действуют как настроенные резонансные диполи на данной частоте и электромагнитная энергия рассеивается в материале за счет диэлектрических и магнитных потерь.

Эластомерная матрица широко используется и в качестве связующего РПП, предназначенных для нанесения на криволинейные поверхности объектов.

РПП для самолетов и вертолетов представляет собой однослойный композиционный материал из черной резины (наполнитель — ацетиленовая сажа). Оно изготовлено в виде

Таблица 2.101. Свойства листовых материалов *Eccosorb AN-W* [26]

| Марка | Диапазон волн, см | Отраженная мощность, % | Размеры, см | Толщина, мм | Вес 1 м ² , кг |
|--------|-------------------|------------------------|-------------|-------------|---------------------------|
| AN-W72 | <1,5 | 1,5 | 60×60 | 3,2 | 0,5 |
| AN-W73 | <4,0 | 1 | 60×60 | 9,5 | 1 |
| AN-W74 | <8,6 | 1 | 60×60 | 15,9 | 1,5 |
| AN-W75 | <12,5 | 1 | 60×60 | 25,4 | 2,5 |
| AN-W77 | <32 | 1 | 60×60 | 63,5 | 4,5 |
| AN-W79 | <66 | 1 | 60×60 | 114,3 | 10 |

тонких листов, обладает высокой гибкостью, небольшой массой и достаточно широкополосно. Его поглощающие свойства могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от соотношения в нем резины и углерода.

Фирма *Mitsubishi Denki K.K.* (Япония) разработала эластичное РПП на основе «жидкого» каучука с наполнителем из коротких углеродных волокон. В его состав на 1000 г жидкого каучука (олигобутадиен) входит 230 г отвердителя (толуолендиизоцианат, блокированный пропилфенолом), 72 г катализатора (производная дибутила), 67 г углеродного волокна диаметром 0,6 мм и 52 г окиси титана.

Фирма *Nippon Carbon Co. Ltd.* разработала РПП, которое при его нанесении на металлическую поверхность уменьшает отражение электромагнитной энергии на 10 дБ в диапазоне частот от 8 до 16 ГГц. Оно представляет собой поглощающий слой из волокон в виде тканого многослойного или нетканого (в виде войлока) материала, пропитанного полимерным или керамическим связующим. Волокна *Nicalon* получают термообработкой кремнийорганического полимера с молекулярной массой до 20 000, после чего из них изготавливают, например, ткань восьмислойного сатинового плетения толщиной 0,5 мм, которая обрабатывается при температуре 1300 °С в течение 6 ч в для достижения требуемого электрического сопротивления, равного 210 Ом·см [113].

Недостатком радиопоглощающих материалов интерференционного типа, выполняемых с металлической подложкой и используемых для противорадиолокационной маскировки, является сложность их крепления на поверхность самолета, наблюдается отслоение радиопоглощающего материала от металлической подложки при изгибе или креплении материалов в процессе его установки на маскируемом объекте. Для устранения этих недостатков фирма *Eltro* (ФРГ) разработала радиопоглощающий материал интерференционного типа, в котором вместо металлической подложки используется тонкий неметаллический слой, отражающий падающее излучение. Чтобы обеспечить такой же фазовый сдвиг, как и при использовании металлической подложки, неметаллическая подложка должна иметь высокие относительные диэлектрическую (100–200), магнитную проницаемости (около 1), тангенсы углов диэлектрических (~0,8) и магнитных (0,6–1) потерь (однако эти величины зависят от длины волны падающего излучения, поскольку при длинах волн выше 3 см относительная магнитная проницаемость ниже единицы). Неметаллическая подложка обеспечивает сдвиг фазы, весьма близкий к 180°.

На рис. 2.144 показаны радиопоглощающие материалы, выполненные по этому принципу. Рис. 2.144, а: неметаллическая подложка 1 с фазосдвигающим слоем 2, слой поглотителя 3 и защитный слой 4 с низкой диэлектрической проницаемостью; рис. 2.144, б: на неметаллической подложке 5 расположен четвертьволновой слой 6 и проводящий слой 7, волновое сопротивление которого равно 377 Ом; рис. 2.144, в: неметаллическая подложка 8 несет два четвертьволновых слоя 9 и 10; рис. 2.144, г: слоистый радиопоглощающий материал, состоящий из неметаллической подложки 11, четвертьволнового слоя 12 с низкой диэлектрической проницаемостью, слоя 13 с сопротивлением около 40 Ом и поглощающего слоя 14, диэлектрическая проницаемость которого уменьшается в направлении от слоя 13 к свободному пространству. Толщина слоя 14 составляет приблизительно 1/6 длины волны падающего излучения. На рис. 2.144, д в неметаллическую подложку 15 введены диполи 15а, занимающие примерно 25% ее поверхности. Диполи могут быть распределены по всему объему подложки. Слой поглотителя 16 аналогичны соответствующим слоям на рис. 2.144, б. На рис. 2.144, е в неметаллическую подложку 18 включена проволочная сетка 18а. Толщина, проволоки составляет 0,1 толщины подложки 18 или 0,08–0,5 мм, размер ячеек приблизительно равен 0,1 длины волны падающего излучения. Слои 19 и 20 соответствуют показанным на рис. 2.144, д слоям Ш и 17. На рис. 2.144, ж изображен материал, состоящий из неметаллической подложки 21, четвертьволнового слоя 22 и диполей 23 на поверхности слоя 22. Диполи, как показано на рис. 2.144, з, могут быть размещены в шахматном порядке и покрывают от 30 до 80% поверхности слоя 22, предпочтительно около 50%. На рис. 2.144, и представлена металлическая

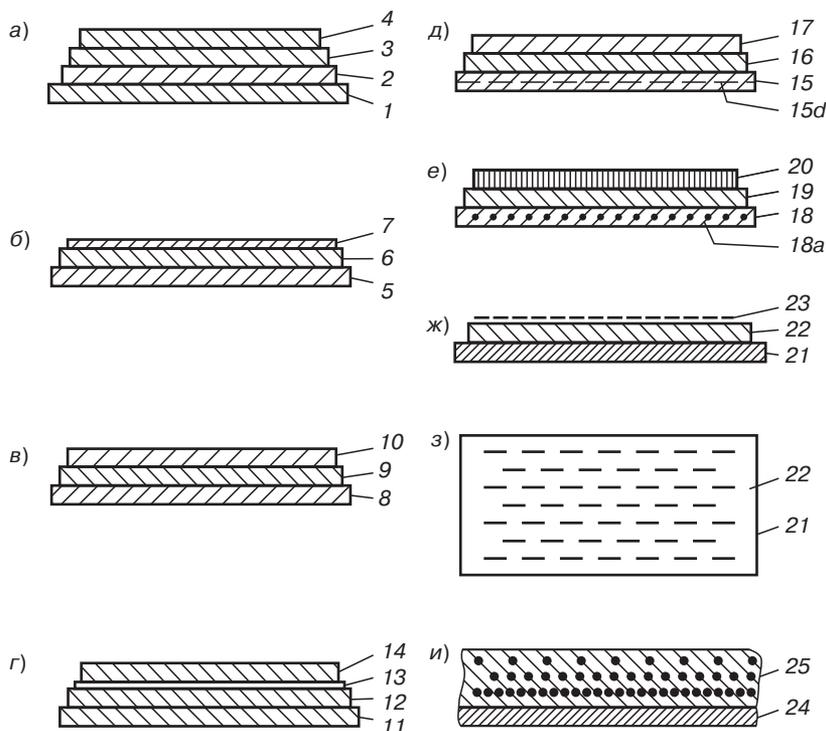


Рис. 2.144. Различные структуры радиопоглощающего материала с неметаллическим отражающим слоем [104]: а) материал с защитным слоем; б) материал, волновое сопротивление верхнего слоя которого равно 377 Ом; в) материал с двумя четвертьволновыми слоями; г) материал, диэлектрическая проницаемость верхнего слоя которого уменьшается в направлении к свободному пространству; д) материал, в неметаллическую подложку которого введены диполи; е) материал, в неметаллическую подложку которого введена проволочная сетка; ж) материал, в верхний слой которого введены диполи; з) ориентация диполей в верхнем слое материала; и) материал, в четвертьволновой слой которого введены проволочные сетки

подложка 24 и четвертьволновой слой 25, в который введен ряд проволочных сеток с различным размером ячеек (размер ячеек каждой последующей сетки в два раза меньше размера ячеек предыдущей сетки). Неметаллическую подложку выполняют из полимера с 60% наполнителя. Наполнителем служит углерод (графит и сажа), ферриты, окись железа и пентакарбонил железа. Размер зерна порошка железа составляет 5–10 мкм.

Трехслойный РПМ (1-й слой из сырой резины из бутадиен-нитрильного каучука типа СКН, графита, сажи, 1:1:1 и группы веществ, обеспечивающих вулканизацию; 2-й слой — ПВХ-пленка, толщиной 1,5 мм; 3-й слой — СКН, магнетит 1:4 вулканизирующая группа) после вулканизации слоев 1 и 3 и их склеивания обеспечивает ослабление 20–40 дБ при длине волны 3,2 см и 7–12 дБ при длине волны 5 см [104].

Диапазоны эффективной работы РПМ расширяются при использовании ферритов. Такие РПП тонкослойны (6–12 мм), имеют малую массу (1 м² — до 5 кг), легко наносятся на криволинейные поверхности с хорошей адгезией, ослабляют отраженное излучение в 20–1000 раз (например РПП фирмы *Conductron* для диапазона метровых и сантиметровых волн [26]). Гибкие листы из кремнийорганической резины с железом (*GDS*) и ферритами (*FCM*) при толщине 0,76–3,2 мм ослабляет излучение до –12 дБ в диапазоне 2–12 ГГц [104].

Ослабление излучения РПМ со спеченными ферритовыми плитами *Eccosorb NZ-1, 2* составляет -15 дБ (УВЧ-диапазон, $300-3000$ МГц, до 370 °С), РМР -17 дБ (2 ГГц). РПМ *SE-T* для работы в космосе выпускает фирма *McMillan Radiation Labs* [104]. РПМ содержит полимерный диэлектрик (СКН), наполненный $Zn \cdot Fe_2O_3$, $CoO_{0,7} \cdot MnO_{0,3} \cdot NiO_{10} \cdot FeO_{13} \cdot Fe_2O_3$, $BaO \cdot Fe_2O_3$, диполями из металлических и полимерных металлизированных волокон и имеет $\epsilon = 10$, $\mu = 1,25$ при длине волны $3,2$ см и соответственно 11 и $1,4$ при 10 см [104].

РПМ покрытий летательных аппаратов содержит литий-кадмиевый феррит ($Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4 \cdot Fe_3O_4 \cdot CdFe_2O_4$). При работе на высоких частотах литий заменяют никелем, а для работы в более широком диапазоне частот кадмий заменяют цинком. Покрытие из такого материала толщиной $0,25-1$ см обеспечивает высокую степень защиты. Ферритовое покрытие размещают на металлической подложке [105].

В США и Японии (фирмы *TDK Electronic Co.*, *Nippon Electric Co.*) разработаны трехслойные ($1-3$ мм) РПП эффективные для диапазона $1-20$ ГГц, см и м (большинство РЛС работает в диапазоне $10-20$ ГГц).

Поглощающий слой (ферриты + эпоксидный диэлектрик + короткие металлические волокна) и «запирающий» слой (ферриты + эпоксидный диэлектрик, $3:2$) разделены слоем резины, обеспечивается поглощение в диапазоне $4-5$ ГГц (для $1-20$ ГГц используют пять трехслойных РПП с индивидуальными характеристиками, определяемые составом ферритов) [129].

Поверхностно-неоднородную структуру имеет поглотитель электромагнитных волн, разработанный в Японии. Он изготавливается либо из керамики, либо из композиционного материала на основе резины или полиуретана, содержащего оксидный магнитный порошок или дисперсный углерод. Из этого материала формируются пластины (или плитки) двух-трех видов, имеющие различную резонансную частоту, которые потом устанавливаются на защищаемой поверхности либо поочередно, либо в определенном порядке. Ширина и длина этих элементов зависит от начальной и конечной частот требуемого рабочего диапазона, а толщина покрытия не превышает 10 мм.

Фирмой *Dornier GmbH* (Германия) разработано многослойное композиционное РПП, которое предназначено для поглощения электромагнитных волн и обладает высокими физико-механическими свойствами, при этом толщины и электромагнитные характеристики материалов слоев подобраны так, чтобы обеспечивалось как гашение электромагнитной отраженной волны, так и увеличение коэффициента ее поглощения от поверхности покрытия к внутренним слоям. Изменение свойств слоев обеспечивается добавкой к пропитывающим волокнистую основу РПП полимерам различного количества железного или ферритового магнитных порошков, графита, угольной пыли. Нижний слой РПП содержит углеродные волокна и выполняет функцию отражающей подложки. Этот РПМ может быть использован в авиастроении в качестве конструкционного материала [113].

Фирма *Grace Electronic Materials* производит радиопоглощающие материалы марок *Eccosorb LN-4-54/1*, *Eccosorb DSF* и *Eccosorb HC*, разработанный в рамках программы «*Stealth*». *Eccosorb LN-4-54/1* представляет собой напыляемое диэлектрическое покрытие, состоящее из трех слоев полиуретана в сочетании с наполнителем; покрытие выпускают в комплекте с катализатором и растворителем. При толщине $1,7$ мм покрытие имеет низкий уровень коэффициента отражения -24 дБ при частоте 10 ГГц, который сохраняется ниже -5 дБ в диапазоне частот $8-13$ ГГц.

Eccosorb DSF — тонкий эластичный листовой материал на основе кремнийорганической резины, предназначен для эксплуатации в диапазоне частот $3-17$ ГГц. *Eccosorb DSF* имеет низкий уровень коэффициента отражения -32 дБ при 10 ГГц, который сохраняется ниже уровня -5 дБ в диапазоне $8-14$ ГГц. Фирма рекомендует применить его для кожухов радаров и в узлах их крепления [130].

Пресс-порошки *Eccosorb MP 130, 124, 117* перерабатываются прямым и литьевым прессованием в антеннаторы и оконечные нагрузки с большими потерями.

Для использования в бортовых самолетных радиоэлектронных устройствах фирма *Hughes Aircraft* разработала керамический магнитодиэлектрик на основе окиси магния и карбида

кремния. Диэлектрическая проницаемость ϵ материала составляет 9–20, а тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ 0,005–0,600. Материал отличается необходимым сочетанием широкого диапазона электрических характеристик, высоких плотности и теплопроводности. Содержание наполнителя (в виде проводящих гранул) и связующего в материале варьируется в зависимости от требуемых диэлектрических свойств. Для применения и качестве аттенуаторов материал содержит 1–35 % масс. проводящих гранул, а для оконечных поглощающих нагрузок до 80% проводящих гранул из карбида кремния. Проводящие гранулы однородно диспергированы в материале и отделены друг от друга диэлектрическими слоями (иначе материал работает как металлический проводник).

Примером данного материала является горячепрессованная композиция, содержащая 20–99% окиси магния, 0–5% фторида лития, 0–20% пиррофосфата кальция, 0–10% двуокиси марганца, 0–20% фосфата бора, 1–80% карбида кремния. Такой керамический материал предназначен для оконечных поглощающих нагрузок.

Материал поглощает непрерывное излучение мощностью 1800 Вт, не подвергается разрушению (ранее используемые работают до 14 Вт) до 1200 °С.

Материал, предназначенный для аттенуаторов и оконечных нагрузок, состоит из гранул карбида кремния, диспергированных в матрице из окиси алюминия. Материал содержит (в % масс.): 1–85 гранул карбида кремния, 15–99 окиси алюминия, 0–6 двуокиси марганца, 0–6 двуокиси титана, 0–20 полевого шпата, 0–20 пиррофосфата кальция, 0–15 нефелинового сиенита, 0,25–1 бентонита. Диэлектрическая проницаемость материала может варьироваться (в зависимости от состава) от 9 до 20, а тангенс угла потерь от 0,005 до 0,600. Материал используется в качестве нагрузки в антенном переключателе для поглощения нежелательных отражении сигналов от антенны самолетной РЛС. Он поглощает излучение, мощность которого по меньшей мере на порядок больше мощности излучения, поглощаемого образцом такой же формы из полимерного магнитодиэлектрика.

Содержание гранул карбида кремния в материале 1–35%. Он без охлаждения работает до 1200 °С и поглощает непрерывное излучение мощностью 100 Вт без разрушения [105].

Для уменьшения энергии электромагнитных волн, распространяющихся вдоль поверхности объектов, например вдоль крыла ЛА, фирма *Lockheed Corp.* предложила структуру, характеризующую сильным загуханием поверхностных волн и состоящую из тонкого диэлектрического слоя с системой плоских проводников, напечатанных, например, в виде решетки из квадратных элементов с размером сторон от 0,05 до 0,025 длины волны. Диэлектрический слой накладывается на защищаемую металлическую поверхность. Такая структура имеет характеристическое сопротивление емкостного характера, поэтому поверхностная волна распространяется вдоль нее с сильным ослаблением. Эффективность подобного применения РПМ подтверждена на самолетах *SR-71*, *U-2*, *TR-1* и *F-19* при использовании токопроводящих поглощающих покрытий. Кроме того, подобные структуры могут найти применение в качестве развязки между передающими и приемными антеннами и для снижения уровня боковых лепестков рупорных антенн. В последнем случае этой структурой покрываются наружные стенки рупора вблизи раскрыва [29].

Одним из направлений в разработке радиопоглощающих материалов и структур является использование экранов, диффузно отражающих излучение. Так, метод уменьшения ЭПР воздухозаборника и выхлопного сопла реактивных авиационных двигателей, разработанный фирмой *North American Rockwell Corp.* в целях маскировки самолетов от радиолокационной разведки противника, предусматривает использование экранов с отверстиями, диаметр которых имеет тот же порядок, что и длина волны падающего излучения. Такой экран диффузно отражает радиолокационные сигналы, в результате чего величина отраженного сигнала будет весьма мала [104].

На рисунке 2.145, а показан конический экран 1 с малыми размерами отверстий, что обеспечивает отражение 3 падающего излучения 2 не в направлении РЛС. Если падающее излучение перпендикулярно поверхности экрана, то в направлении РЛС отражается небольшая часть

излучения, указывая на наличие объекта со сравнительно малой эффективной отражающей поверхностью. На рис. 2.145, б показан реактивный двигатель 4, на концевой экран 1 которого падает направленное по оси экрана излучение 5. Падающее излучение можно разделить на следующие части: диффузно отраженную часть 6; небольшую часть, отраженную в направлении РЛС 8, и часть 7, прошедшую через экран в выхлопное сопло реактивного двигателя. Излучение после многократного отражения и, следовательно, ослабления в выхлопном сопле реактивного двигателя; падает на внутреннюю поверхность экрана, после чего небольшая часть его отражается наружу, а остальная часть снова поступает в выхлопное сопло, где испытывает многократное отражение и затухание. Таким образом, большая часть падающего излучения диффузно отражается не в направлении РЛС, незначительная часть отражается выхлопным соплом и лишь небольшая часть отражается поверхностью экрана.

Ослабленное отраженное излучение указывает на присутствие объекта с малой эффективной отражающей поверхностью. Если диаметр отверстий экрана (рис. 2.145, б) равен $\lambda/4$ (где λ — длина волны падающего излучения), то диффузно отраженное излучение (не в направлении РЛС) составляет примерно 95% падающего излучения. Плоский экран 11, показанный на рис. 2.145, в, также диффузно отражает 10 не в направлении РЛС почти все излучение 9, за исключением небольшой, направленной по оси части излучения, обеспечивая при этом снижение веса. Оптимальной конструкцией во многих случаях является изготовленный из проволоки экран 12 полусферической формы, показанный на рис. 2.145, г. Почти все падающее излучение 13 диффузно рассеивается 16 таким экраном, за исключением излучения 14, направленного по оси экрана; небольшая часть излучения 15 отражается в направлении РЛС.

Для противорадиолокационной маскировки от микроволновых РЛС необходимо, чтобы размер отверстий экрана был порядка $1/4$ длины наиболее короткой волны. Излучение, диффузно отраженное экраном, может быть принято вынесенным дистанционным приемником, входящим в систему данной РЛС, поэтому для поглощения его совместно с экраном применяются радиопоглощающие материалы. На рис. 2.145, д показан реактивный двигатель 17 с экраном 18 и радиопоглощающим материалом 19. Излучение 20, диффузно отраженное экраном, поглощается материалом, размещенным в сравнительно холодной зоне двигателя. На рис. 2.145, е экран 21 имеет форму полусферы, а радиопоглощающий материал 22 — тороидальную форму. Поскольку в экране имеются отверстия, он почти не препятствует прохождению через сопло газового потока. Такая радиопоглощающая структура является широкодиапазонной.

Лучшее прохождение газового потока обеспечивает конструкция, показанная на рис. 2.144, ж. Отверстия экрана 23 здесь выполнены так, что экран отражает излучение с большими длинами волн и пропускает излучение более коротких длин волн. При этом излучение, прошедшее через экран, поглощается материалом 24, расположенным на диффузоре 25. На рис. 2.145, з и 2.145, и представлена конструкция конического экрана с прямоугольными и ромбическими отверстиями 26 и 27 одинаковой формы и размера.

В ряде РЛС используется горизонтальная, вертикальная, круговая или эллиптическая поляризация излучения, что может снижать эффективность радиопоглощающих материалов. Для описанных выше экранов тип поляризации падающего излучения не влияет на способность экранов диффузно отражать излучение. Такие конструкции экранов могут также использоваться в воздухозаборниках реактивных двигателей [104].

В Великобритании специалисты в области технологии *Stealth* (в частности, фирмы *Plessey*) считают, что решение проблемы УРЗ на основе применения материалов, рассеивающих энергию облучения в направлении, отличном от направления на источник излучения (РЛС), может дать эффект только в отношении моностатических, но не бистатических РЛС.

Свойства некоторых радиопоглощающих материалов фирмы *Plessey* приведены в табл. 2.102. Материал LAO имеет полную зависимость коэффициента отражения от частоты в диапазоне 4–36 ГГц при максимальном его значении –25 дБ в диапазоне 12–28 ГГц. Двухдиапазонный материал обеспечивает наибольшее поглощение на частотах 9 и 3 ГГц, причем в диапазоне 2–12 ГГц его коэффициент отражения не выше –12 дБ. Аналогичные особенности имеет

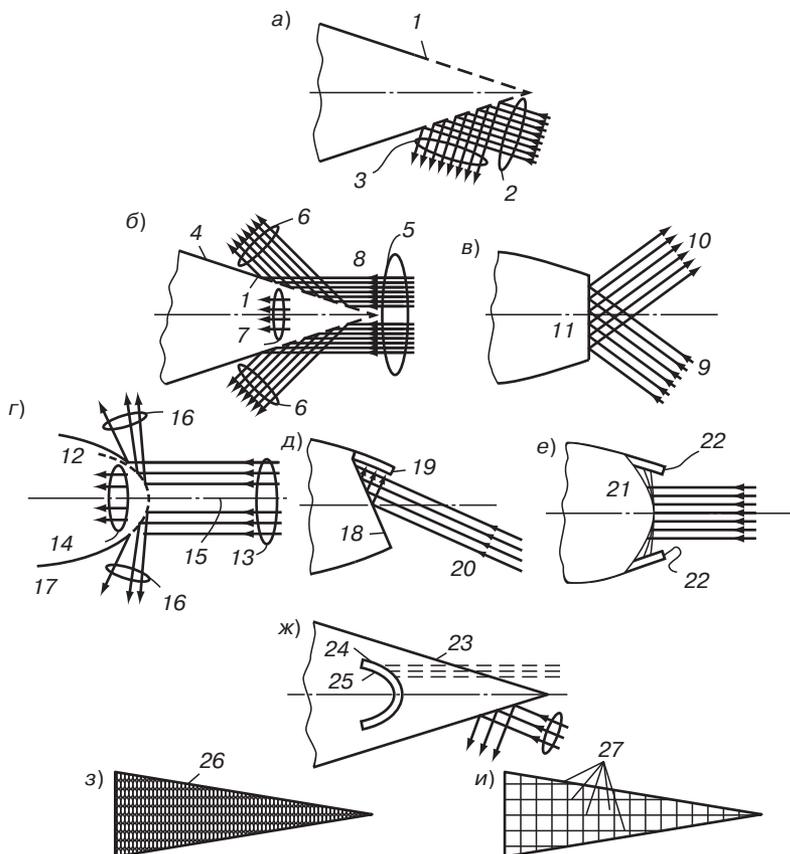


Рис. 2.145. Использование экранов, диффузно отражающих радиолокационные сигналы, для противорадиолокационной маскировки самолетов [104]: а — реактивный двигатель с коническим экраном, падающее излучение направлено под углом к горизонтальной оси двигателя; б — реактивный двигатель с коническим экраном в концевой части, падающее излучение направлено по горизонтальной оси двигателя; в — реактивный двигатель с плоским экраном; г — реактивный двигатель с полусферическим экраном в концевой части; д — реактивный двигатель с экраном и радиопоглощающим материалом; е — реактивный двигатель с полусферическим экраном и радиопоглощающим материалом, имеющим тороидальную форму; ж — конструкция реактивного двигателя с экраном, обеспечивающая лучшее прохождение газового потока; з — конический экран с ромбическими отверстиями; и — конический экран с прямоугольными отверстиями

трехдиапазонный радиопоглощающий материал К-РАМ: коэффициент отражения -20 дБ на частоте 3 ГГц, около -35 дБ при 10 ГГц и около -33 дБ при 13 ГГц, а в диапазоне $2-18$ ГГц он не превышает -7 дБ. Материал АDRAM рассчитан на применение в условиях линейной и круговой поляризации при различных углах радиолокационного облучения [114, 115].

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются наиболее прогрессивными материалами многофункционального назначения. Удельная прочность однонаправленных ВПКМ составляет $50-70$ км (предел для металлов $20-30$ км), усталостная прочность до 70% (металлы не более 30%) от предела прочности. Удельная прочность стеклопластиков в $2-4$ раза выше, органических полимеров в $3,5-7,5$ раз выше, углепластиков в $1,6-4$ раза выше, чем удельная прочность стали. Удельный модуль упругости стеклопластиков близок к E^*/ρ алюминия, органических полимеров

в 1,5–2,6 раза выше, чем у алюминия, углепластиков в 2–4 раза выше E^*/ρ алюминия. Прочность при растяжении однонаправленных стекло-, органо-, углеволоконитов близка к прочности стали, модуль упругости углепластиков равен модулю упругости стали, модуль упругости стекло- и органоволоконитов превышает модуль упругости сплавов алюминия и магния.

Создание эффективных широкодиапазонных конструкционных РПМ и РПП малой массы для ЛА — сложная научно-техническая задача. Коэффициент поглощения современных РПМ меньше единицы, поэтому наибольшего снижения ЭПР ЛА можно достичь в результате комплексного использования малоотражающих форм ЛА в нанесении РПП на блестящие линии и поверхности ЛА. Например, покрытие внутренних каналов воздухозаборников РПП и выполнение передних кромок крыла и фюзеляжного гребня самолета А-12 из углепластиков привело к уменьшению ЭПР самолета на 30%.

Многофункциональность ВПКМ позволяет использовать их в качестве конструкционных радиопоглощающих материалов. Самолетные (и ракетные) конструкции из стекло(кварце-) и органо(кевларо)пластиков являются в принципе радиопрозрачными. Терморезистивные (эпоксидные, кремнийорганические, полиимидные) и термопластичные связующие, стеклянные, кварцевые, полимерные высокомодульные (из ароматических полиамидов, сверхвысокомолекулярного полиэтилена) волокна имеют низкие значения ϵ и $\text{tg } \delta_\epsilon$. При низких показателях отражения ЭМИ этих конструкционных ВПКМ, они чаще всего используются в качестве оболочек, оформляющих аэродинамический профиль ЛА. Находящееся за аэродинамическим контуром оборудование имеет архитектуру с громадным количеством угольковых отражателей, что приводит к существенному увеличению РЗ и требует специальных мер их экранирования. Наиболее ценный комплекс конструкционных свойств имеют углепластики, которые достаточно широко используются в самолетостроении (А-12, УР-23А — 35–55% ВПКМ, АДСА — 68,5% ВПКМ, В-1, 15% ВПКМ)[137, 156]. Углепластиковые конструкции ЛА (будучи токопроводящими, см. раздел 2.3.2) позволяют оптимизировать z_2 за счет показателей μ и $\text{tg } \delta_\mu$, $\text{tg } \delta_\epsilon$, ρ_v .

При очевидной перспективности использования конструкционных материалов с радиопоглощающими свойствами им присущи и определенные недостатки. Поскольку электропроводность углеродных волокон близка к электропроводности металлов, то конструкциям, в которых используются материалы с такими волокнами, трудно придать хорошие радиопоглощающие свойства [114].

Разработки конструкционных РПМ направлены на модификацию ВПКМ радиопоглощающими компонентами. Одним из первых применений таких материалов было изготовление обтекателя двигателя самолета F-111 трехслойной конструкции (оболочки — полиимидный кварцпластик, наполнитель — полиимидный стеклосотопласт), содержащей листы радиопоглощающего материала (экономия массы 20% по сравнению с металлическим обтекателем) [104, 105, 133].

Благодаря применению аналогичных материалов ЭПР В-1 составляет 1/50 ЭПР В-52, в конструкции которого ВПКМ практически отсутствуют.

В связи с реализацией технологии *Stealth* при производстве самолетов с УРЗ особое внимание уделяется разработке сложных радиопоглощающих конструкций с использованием гофр, сот, пирамидальных «шахтных» структур [105, 113, 130]. Применительно к ЛА видоизменяются РПК, ранее разработанные для других целей (см. рис. 2.96, 2.101)

У пирамидального поглотителя электромагнитных волн диэлектрическая проницаемость и проводимость возрастают в направлении движения волны. Пирамиды выполняются на основе пластика или керамики, а в качестве наполнителя используются короткие углеродные или металлические волокна.

Аналогичный принцип использован специалистами фирмы *Mitsubishi Denki K.K.* Покрытие представляет собой ячеистую структуру, состоящую из рядов тонкостенных выступов конической и/или пирамидальной формы с плоским основанием. Поглотители изготавливаются посредством заливки в соответствующую форму жидкого каучука, в котором предварительно

Таблица 2.102. Радиопоглощающие материалы фирмы *Plessey* [114]

| Тип материала | Размеры листов, мм: длина×ширина× ×толщина | Масса 1 м ² материала, кг/при толщине листа, мм | Коэффициент отражения, дБ/ на частоте, ГГц | Примечания | |
|------------------------------|--|---|--|--|-------------------------|
| <i>ADRAM</i> | $\frac{610 \times 610}{0,7 - 2}$ | $\frac{1,7}{1,5}$ | $\frac{-1}{8 \div 16}$ | Узкодиапазонный материал. Обладает хорошими поглощающими свойствами при больших углах облучения | |
| <i>LAO</i> | $\frac{610 \times 610}{12 \text{ и } 20}$ | $\frac{0,85}{12}$ | $\frac{-15^1}{4 \div 36}$ | Широкодиапазонный материал (4–36 ГГц), пенопласт | |
| | | $\frac{0,95}{20}$ | $\frac{-20^1}{6 \div 36}$ | | |
| | | | $\frac{-15^2}{8 \div 36}$ | | |
| | $\frac{460 \times 460}{7}$ | $\frac{28^3}{7}$ | $\frac{-20^2}{12 \div 32}$ | Узкодиапазонный материал (0,95–1,15 ГГц) на основе натурального каучука | |
| | | | $\frac{-15^2}{0,15^5}$ | | |
| | $\frac{915 \times 610}{3,6 - 4}$ | $\frac{16,5 - 17,5}{6}$ | $\frac{-15^2}{0,6^5}$ | Узкодиапазонный материал (2,6–3,95 ГГц) на основе натурального или неопренового каучука | |
| $\frac{610 \times 610}{6,5}$ | $\frac{15}{6,5}$ | $\frac{-15}{2,6 - 3,5}$ | Двухдиапазонный материал (2,6–12,4 ГГц), многослойные листы на основе натурального каучука | | |
| <i>DX20</i> | $\frac{610 \times 610}{4,3}$ | | $\frac{-15}{7 - 11}$ | Узкодиапазонный материал (8,2–12,4 ГГц), листы с подложкой из алюминиевой фольги | |
| | $\frac{610 \times 610}{2,2}$ | | $\frac{-20}{3 \text{ и } 9}$ | | |
| | $\frac{600 \times 900}{2,2}$ | 1,2 | | | $\frac{-15}{\pm 0,5^6}$ |
| | | | | | |
| <i>K-RAM</i> | $\frac{300 \times 300}{5 - 10}$ | $\frac{7 - 15}{5 - 10}$ | $\frac{-20}{\text{на двух-трех резонансных частотах}}$ | Широкодиапазонный материал (2–40 ГГц), обладает высокой механической прочностью. Подложка из углепластика, наполнитель — арамидные волокна | |

¹ Толщина листа 20 мм.

² Толщина листа 12 мм.

³ Без подложки.

⁴ С подложкой из проволочной сетки.

⁵ Ширина полосы частот.

⁶ Интервал относительно номинального значения.

диспергировано от 1 до 60% (по массе) углеродного волокна длиной от 0,1 до 1,5 мм. Данный поглотитель предназначен для СВЧ и миллиметрового диапазонов электромагнитных волн.

Для повышения прочности пирамидальных структур РПМ, которые для уменьшения массы изготавливаются из пористых материалов, фирмой *Kajima Kansetsu K.K.* (Япония) разработан поглотитель из древесины с наполнителем из порошка графита. Пластины древесины пропитываются суспензией порошка графита, которые после сушки склеиваются друг с другом с различной ориентацией волокон в соседних пластинах, после чего всей клееной структуре придается вид пирамиды.

Принцип создания шиповидной внешней рабочей поверхности РПП использован также в разработанной фирмой *Mitsubishi Denki K.K.* (Япония) пластине, поглощающей электромагнитное излучение, и в РПМ на основе эластичного связующего. РПМ предназначен для поглощения электромагнитного излучения с частотой примерно 1 ГГц и выполнен из вулканизированного эластомера на основе каучука, содержащего дисперсный кремнийорганический наполнитель, а рабочая поверхность поглотителя, подвергающаяся воздействию излучения, имеет вид решетки остроконечных пирамид с прямоугольным или треугольным основанием.

«Шахтный» принцип создания РПМ использован специалистами фирмы *Boeing Co.* при разработке СВЧ поглотителя, эффективно поглощающего энергию подающей электромагнитной волны при любых углах падения и поляризациях. РПМ состоит из набора металлических стенок, образующих волноводные системы, которые преобразуют энергию падающей волны. Стенки покрыты поглощающим материалом. Набор направляющих систем закрыт диэлектрической защитной пластиной.

Поглотитель может быть использован как для корпусных объектов, так и для коррекции диаграмм направленности антенн и их развязки в связанных, радиолокационных и радионавигационных системах [29, 113].

Метод уменьшения ЭПР фирмы *American Rockwell Corp.* имеет целью ослабление радиолокационного излучения, падающего под небольшими углами к плоскости воздухозаборника турбореактивного или прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Метод предусматривает установку решетки из гофрированных полос радиопоглощающего материала, закрепленных на опорной конструкции на входе воздухозаборника. На рис. 2.146, *a* показана решетка 1 из радиопоглощающего материала, установленная в воздухозаборнике 2 турбореактивного двигателя 3 перед обтекателем двигателя 4. Решетка расположена в опорной конструкции 5 и состоит из полос 6 радиопоглощающего материала 7, снабженных клеммами (обозначены буквами от *A* до *Q*, рис. 2.146, *b*). Полосы материала (рис. 2.146, *b*) сделаны гофрированными; они имеют слоистую конструкцию, в которой слой поглотителя 5 размещен между защитными слоями 9. Слой поглотителя выполнен из ткани, пропитанной связующим, в которое вводится порошок углерод или алюминий в качестве наполнителя. Слой поглотителя, помимо своего основного назначения, служит также электронагревательным антиобледенительным элементом. Защитные слои выполнены из полиэфирного пластика. В полосы радиопоглощающего материала введен проводник 10 в виде проволоки, находящийся в контакте со слоем поглотителя на каждом концевом участке полосы радиопоглощающего материала. Эти проводники соединяют различные слои поглотителя в решетке с источниками питания. На рис. 2.146, *в* и *г* показан метод соединения полос в узел. Этот узел состоит из непроводящих прокладок 11, непроводящих штифтов 12 и полос 7. Для сборки узлов в решетку используется клей. Проводники размещены в опорной конструкции. На рис. 2.146, *д* и *е* показаны различные конструкции полос радиопоглощающего материала, где цифрой 13 обозначены проводники [104].

Радиопоглощающие сотовые конструкции позволяют получить оптимальное соотношение конструкционных, специальных и весовых параметров. Такие РПК были использованы уже в самолете *A-12* (РПК *HIDE*). РПМ *Eccosorb HC* представляет собой широкодиапазонный материал в виде листов сотовой конструкции (*HC-0,5*, толщина 12,7 мм; *HC-1* – 25,4 мм, цилиндрические ячейки, диаметр 6,35 мм). *R* этих РП сот ниже –10 дБ в диапазоне 2–18 ГГц (минимум в диапазоне 6–7 ГГц) [130].

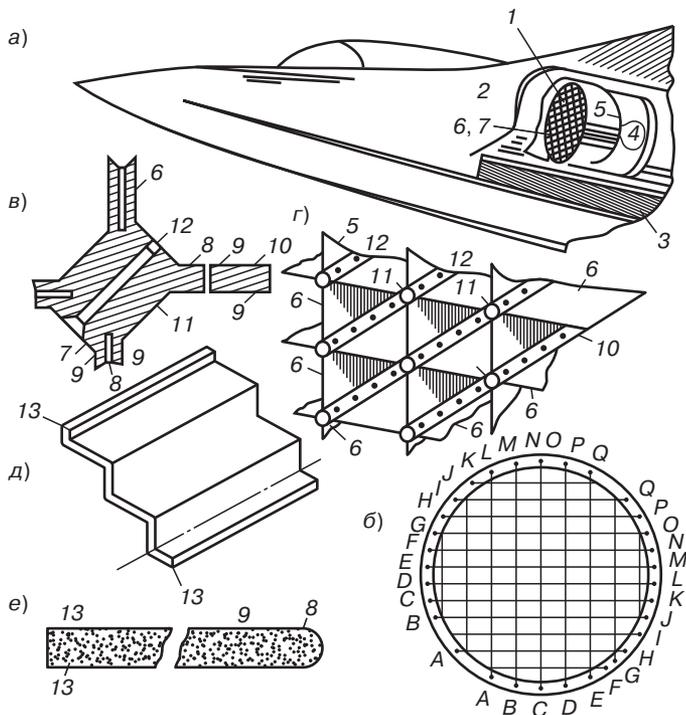


Рис. 2.146. Использование решетки из радиопоглощающего материала для противорадиолокационной маскировки реактивного двигателя [104]: а— самолет с воздухозаборником турбореактивного двигателя с решеткой из радиопоглощающего материала; б— схема электрообогрева с использованием поглотителя в качестве антиобледенительного элемента; в— метод соединения полос материала; г) конструкция решетки из полос материала; д— общий вид полосы материала; е— разрез полосы материала

Сложная сотовая градиентная РПК использована фирмой *North American Rockwell* для воздухозаборника ГТД (рис. 2.147).

Воздухозаборник выполнен из радиопоглощающего слоистого материала с сотовым наполнителем, представленным на рис. 2.147. Верхний слой слоистой конструкции образует наружную поверхность воздухозаборника. Первые три листа *1*, на которые падает радиолокационное излучение, представляют собой препреги из стеклоткани. Толщина ткани 0,1 мм. Материалом листа *2а* является радиопоглощающий материал из стеклоткани с покрытием из СКН, содержащего суспензию частиц графита, углерода или сажи. Импеданс листа близок к импедансу свободного пространства. Следующий лист *2б* изготовлен из того же материала, что и лист *1*. Листы *2а* и *2б* образуют поглощающий слой 2. Следующим слоем служит сотовый наполнитель *3*, оси ячеек которого ориентированы нормально к поверхности листов. Сотовый наполнитель *3* из феностеклопластика (покрытие — эпоксидный лак с углеродом). Размер ячеек сотового наполнителя 6,3 мм, общая толщина 5,8 мм, диэлектрическая проницаемость 1,25 в направлении, параллельном осям ячеек. Следующий слой *4* состоит из листов эпоксидного стеклопластика *4а* (аналогично листам *1*). Между листами *4а* размещен второй лист радиопоглощающего материала *4б*, аналогичный листу *2а*, но имеющий другие электрические характеристики, что обеспечивает необходимый градиент электрических свойств. Величина вносимых потерь листа *4б* больше, чем листа *2а*. Слой сотового наполнителя *5* аналогичен материалу

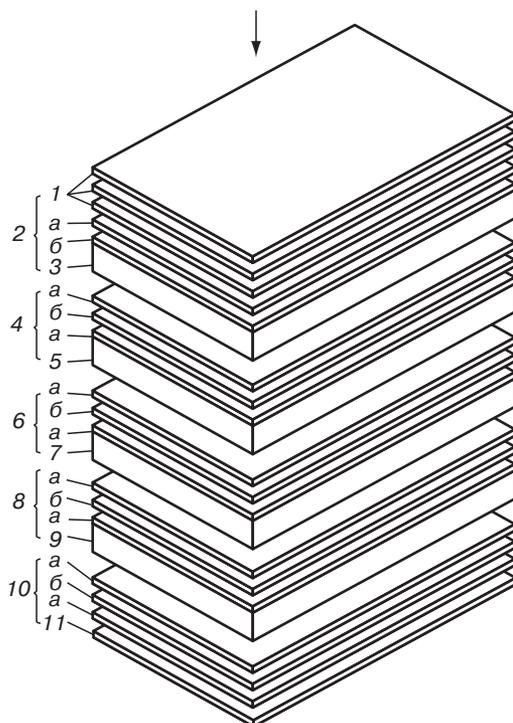


Рис. 2.147. Радиопоглощающий слоистый материал с сотовым наполнителем [105]: 1 — листы из стеклотекстолита; 2 — поглощающий слой (*a* — стеклотекстолит с поглощающим покрытием, *b* — стеклоткань); 3 — сотовый наполнитель; 4 — поглощающий слой (*a* — стеклоткань, *b* — стеклоткань с поглощающим покрытием); 5 — сотовый наполнитель; 6 — поглощающий слой (*a* — стеклоткань, *b* — стеклоткань с поглощающим покрытием); 7 — сотовый наполнитель; 8 — поглощающий слой (*a* — стеклоткань, *b* — стеклоткань с поглощающим покрытием); 9 — сотовый наполнитель; 10 — поглощающий слой (*a* — стеклоткань, *b* — стеклоткань с поглощающим покрытием); 11 — алюминиевая фольга

слоя 3. Поглощающий слой 6 состоит из листов стеклопластика *6a*, аналогичных листам 1, и листа радиопоглощающего материала *6b*, аналогичного листу 4*b*, но имеющего несколько другие электрические характеристики. Величина вносимых потерь слоя *6b* больше, чем листа 4*b*. Слой сотового материала 7 аналогичен слою 3. Слой 8 состоит из двух листов стеклопластика 8*a*, аналогичных листам 1, и листа из радиопоглощающего материала 8*b*. Лист 8*a* аналогичен листу 6*b*, но характеризуется более высокими вносимыми потерями. Сотовый наполнитель 9 аналогичен сотам 3. Листы из стеклопластика 10*a* аналогичны листам 1. Последний слой (лист 11) изготовлен из алюминиевой фольги. Легкий многослойный радиопоглощающий материал (вакуумное формование) обладает высокой жесткостью и прочностью.

Для соединения двух секций 2 и 3 (рис. 2.148) слоистого РПМ между кромками сотового материала 4 приклеивают полосу аналогичного сотового материала 5. Полоса имеет покрытие из неотвержденного эпоксидного связующего, необходимого для точной подгонки места соединения. На полосу сотового наполнителя 5 помещают неотвержденную полосу поглощающего слоя 6, аналогичного материалу 7, при этом величина нахлеста на слое 7 составляет около 6 мм для предотвращения образования зазоров в соединении при усадке. Полоса включает стеклопластиковые препреги и лист поглощающего материала с такими же электрическими

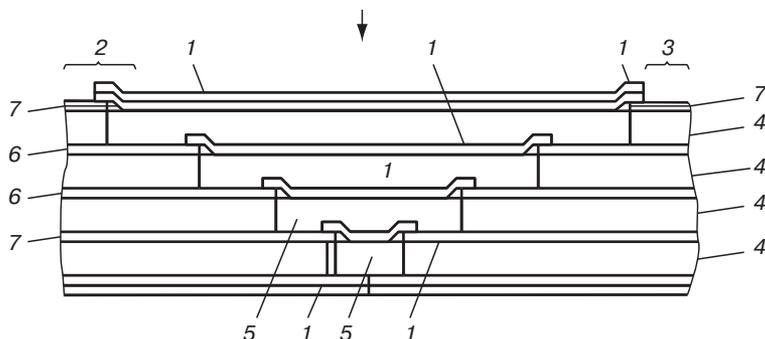


Рис. 2.148. Соединение двух секций слоистого радиопоглощающего материала с сотовым наполнителем [105]: 1 — вставка из неотвержденного предварительно пропитанного радиопоглощающего материала (препрега); 2, 3 — соединяемые секции; 4 — сотовый наполнитель; 5 — вставка из сотового материала; 6 — слой радиопоглощающего материала; 7 — соединяемые слои материала

характеристиками, что и у слоя 7. Аналогично между кромками других слоев 4 сотового материала устанавливают полосы 5 из сот, размеры которых последовательно возрастают по мере приближения слоев к лицевой поверхности. Отверждение всего узла после сборки осуществляют вакуумным формованием при 150 °С в течение 6 ч. После отверждения кромки лицевых слоев 1 и 7 зачищают неровности и заливают эпоксидным компаундом.

Для изготовления аналогичных сотовым ячеистым наполнителям, предназначенных, в частности, для радиопоглощающих материалов, фирмой *Union Carbide* разработана технология «растянутый сотовый наполнитель» (*Expanded Core Process*). Лист термопластичного полимера помещают между двумя половинами пресс-формы. Нагретые половины формы смыкают, а затем размыкают. При нагревании выше температуры текучести силы сцепления расплава полимера с поверхностью пресс-формы оказываются больше, чем когезионные свойства расплава. Вследствие этого при размыкании пресс-формы расплав полимера, сохраняя текучесть, не теряет адгезии к поверхности пресс-формы. Когда форма разомкнута на расстояние, соответствующее желаемой толщине наполнителя, температуру пресс-формы уменьшают до температуры ниже температуры текучести полимера. Вследствие охлаждения пресс-формы силы адгезии между полимерами и пресс-формой ослабевают, и материал легко удаляется из пресс-формы.

Метод позволяет получить образцы любой геометрической формы: квадратные, круглые, ромбовидные или прямоугольные. Плотность материала может изменяться от 0,024 до 0,32 г/см³, а толщина от 0,8 до 100 мм.

Такой наполнитель получают из полиолефинов, полистирола, поликарбоната, полиамидов, термопластичных полиуретанов [105].

2.4.4.4.3. Промышленные самолеты *Stealth*

В соответствии с программой «*Stealth*» в США производят самолеты *Lockheed F-117 Nighthawk* (рис. 2.149), *Northrop, B-2 Spirit* (рис. 2.150), *Lockheed Martin F-22 Raptor*, *F35 Joint Strike Fighter* (рис. 2.152), серию беспилотных малогабаритных разведчиков (рис. 2.153).

Самолеты Су-27М, Су-47, Су-35 (Россия) имеют низкий уровень РЛЗ благодаря использованию интеллектуальных конструкционных и радиопоглощающих ВПКМ.

Первый полет истребителя-бомбардировщика *F-117A* состоялся в 1982 г. на аэродроме Топопа, куда он был доставлен в разобранном виде на военно-транспортном самолете *C-5A*. Самолет имеет длину 16,76 м, размах крыла 10,67 м, максимальную взлетную массу 13 600 кг. Он оснащен двумя модернизированными бесфорсажными турбовентиляторными двигателями *F404* тягой по 5670 кгс, что обеспечивает ему скорость полета $M = 2$. Охлаждающие перегородки и дефлекторы установлены в двигательном отсеке, а по окружности выходного сопла параллельно центральной оси двигателя сделаны щелевые отверстия. Корпуса двигателей

имеют двухслойную конструкцию, причем пространство между слоями заполнено небольшими, обращенными вершинами к оси двигателя, пирамидальными телами со стороны основания 12,7 мм, что способствует существенному ослаблению его шумности.

Поверхность крыла тщательно скруглена, вместо хвостового оперения установлены два небольших стабилизатора. Стратегия сводилась к тому, чтобы подставить лучу лишь острые кромки, рассеивающие его, все линии *F-117A* «рваные», неровными являются даже швы, крепящие фонарь кабины. *F-117A* похож на приземистую ступенчатую пирамиду, фюзеляж почти целиком выполнен из панелей черного цвета, стыкующихся под острыми углами с образованием неровных кромок (рис. 2.149).

Формы *F-117A* — максимум того, что можно было сделать в 1970-е гг., когда на компьютерах соответствующего уровня умели рассчитывать радиолокационные характеристики σ_{Σ} только плоских поверхностей.

В конструкции *F-117A* («летающее крыло», короткий фюзеляж) только 5% металлических элементов и широко используются ВПКМ, в частности боропластики *Fiferloy* фирмы *Dow Chemical* для изготовления лонжеронов, шпангоутов, панелей обшивки. Поверхности *F-117A* закрыты плоскими панелями РПМ *RAM* (широкодиапазонное РПП на основе реактопласта, наполненного SiO_2 , углеродом, и пенополиуретана). Конфигурация (архитектура) затрудняет маневренность самолета. С позиций аэродинамики она настолько неустойчива, что потребовался мощный бортовой компьютер для постоянной корректировки его полета.

F-117A предназначен для уничтожения главных наземных объектов и воздушных командных центров, размещаемых на самолетах типа *Awacs*. Для этого он имеет мощное вооружение, размещаемое в 2-х спаренных отсеках (4,8×1 м каждый). В них расположены шарнирные узлы крепления, на которые подвешивают либо авиабомбы *GBU-10*, *GRU-27*, *Paveway-2*, 3 с лазерными головками самонаведения, либо противокорабельные ракеты *AGM-84* «Гарпун», противорадиолокационные *AGM-88 HARM*, *AGM-65 Maverick*, бомбы *BLU-109* с лазерным наведением, 2×900 кг.

Бортовая РЛС с плоской, направленной вниз решеткой, бортовая аппаратура спутниковой навигационной системы *Navstar*, адаптивная система, устанавливающаяся на частоту РЛС, создающая помехи, устанавливающая дислокацию средств ПВО, изменяющая курс, — все это дает существенный вклад в ее стоимость (50 млн долл, 1999 г.).

F-117A использованы в войне против Ирака (42 самолета совершили 1271 вылет, 1,2% от общего числа, уничтожено более 40% целей, объекты с сильной ПВО) и в Югославии (сбит ЗРК «Куб» (по мнению США ЗРК С-125 «Печора»), обнаружен РЛС «Тамара») [134].

Усредненная по ракурсу ЭПР истребителя *F-117A* находится в пределах 0,001–0,01 м². Для предотвращения облучения внутрикабинных элементов на фонарь кабины пилота нанесено специальное покрытие. ДОР самолета имеет более четырех лепестков рассеяния, поскольку внешняя поверхность — фасеточная, а передняя и задняя кромки не параллельны [29, 36, 112, 115].

Для *B-2* отдельные элементы технологии *Stealth* отработывались при строительстве самолета-разведчика *U-2* (сбит над Свердловском в 1960 г.). Его автор авиаконструктор Кларенс Л. Джонсон возглавлял в фирме *Lockheed* группу специалистов, создавших на базе *SR-71 Blackbird Stealth B-2*.

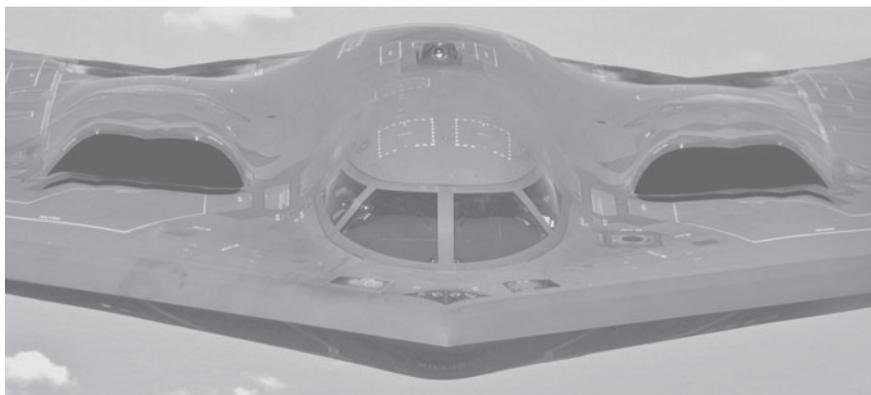
В печати этот истребитель до 1988 г. не имел официального названия, в 1978–1980 гг. он проходил летные испытания на авиабазе Неллис (штат Невада).

Работы по программе «*Stealth*» привели к созданию самолета *B-2* (на стадии проекта фирмы *Northrop* — стратегический бомбардировщик *АТВ*).

Бомбардировщик *B-2* имеет следующие основные характеристики: взлетная масса 136 т, масса полезной нагрузки 13 т, боевой радиус действия 8000 км, практический потолок около 15 000 м, длина 21 м, высота 5,2 м, размах крыла 52,4 м (рис. 2.150).

Бомбардировщик *B-2* выполнен по схеме «летающее крыло» без вертикальных поверхностей управления. По своим очертаниям он напоминает бумеранг с ровной передней кромкой,

1



2



2



Рис. 2.149. Бомбардировщик *B-2 Spirit* (1) истребитель-бомбардировщик *Stealth Lockheed F-117 Nighthawk* (2) фирмы *Lockheed* [29, 36, 112, 115]

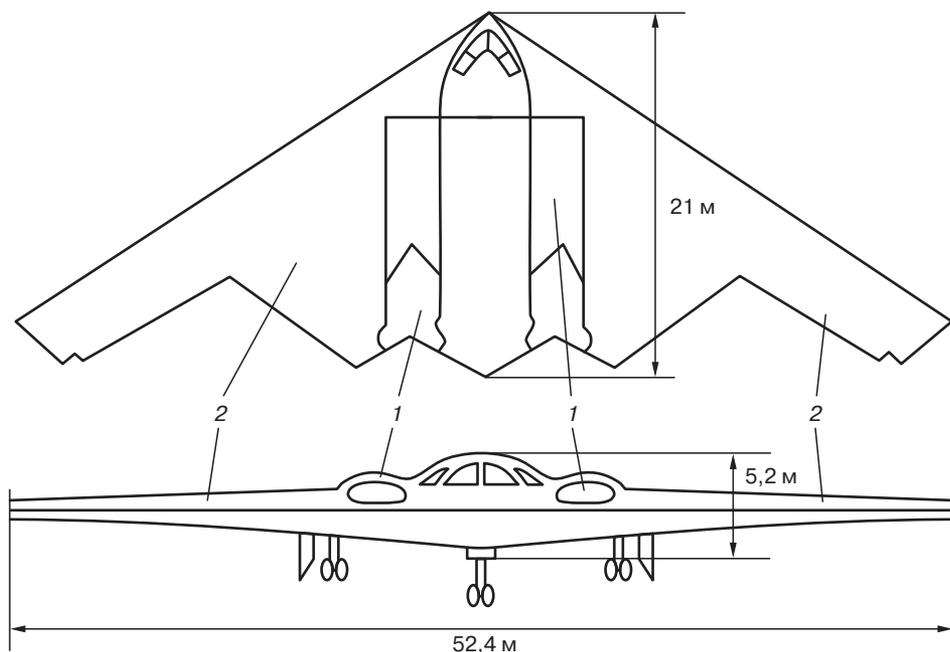


Рис. 2.150. Радиопоглощающие конструкционные полимерные ВПКМ в конструкции самолета *B-2 Stealth* [115, 116]: 1 — малеимидные и полиимидные углепластики; 2 — эпоксидные (типа *MY-720*) угле- и кевларопластики

имеющей стреловидность около 35° , и пилообразной задней кромкой. Управление самолетом по трем осям осуществляется с помощью нескольких аэродинамических поверхностей, размещенных на задней кромке крыла.

Сверхкритические крылья используют толстую обшивку и большую площадь поверхности для создания подъемной силы и смещения критической точки перехода ламинарного течения в турбулентные.

Различия во внешности *F-117A* и *B-2* связаны с освоением систем автоматизированного проектирования и расчета криволинейных поверхностей с УРЗ в трехмерном пространстве на суперкомпьютерах. Обеспечена гладкость поверхности, свободной от отражающих конструкций (антенны, пилоны, подвесные баки, устройства для дозаправки).

Все вооружение бомбардировщика *B-2* размещено внутри фюзеляжа. По бокам кабины экипажа расположены две двигательные гондолы с отогнутыми вниз носками обечайки воздухозаборника, что позволяет экранировать лопатки компрессора от облучения РЛС.

Силовая установка бомбардировщика *B-2* состоит из четырех турбореактивных двигателей *GEF188-GE100* фирмы *General Electric* тягой по 8600 кгс с задним воздухозабором, с 2 выхлопными соплами (модификация *F100* для *F-16*). Основной задачей силовой установки является обеспечение длительного полета на дозвуковой крейсерской скорости. Двигатели *GEF-188* не имеют форсажного режима работы (отсутствие форсажных камер для дополнительного распыления топлива для повышения тяги).

Четыре реактивных двигателя скрыты внутри крылоподобной конструкции. У самолета имеются специальные экраны, отклоняющие РЛС излучение при его проникновении внутрь, в частности, на турбины двигателей, и препятствующие, таким образом, возникновению отраженного сигнала. Тончайший слой позолоты, нанесенный на остекление фонаря кабины — надежная преграда для электронного излучения внутреннего оборудования.

Двигатели самолета спрятаны вглубь корпуса *B-2* и устроены так, что охлаждают и рассеивают выхлопную струю, маскируя ее от наземных детекторов инфракрасного излучения. Выхлоп осуществляется через узкие щели на верхней стороне крыла. Струя при этом быстро расширяется и перемешивается с окружающим воздухом — привычной цели для ракет с тепловыми головками самонаведения нет.

Задние кромки защищены УУКМ [115]. Теплостойкие до 290 °С ВПКМ на основе маленимидных и полиимидных связующих позволили «спрятать» турбины *B-2* (как и *F-117A*) глубоко в фюзеляже и скрыть лопатки компрессоров от РЛС. Углеродные наполнители конструкционных углепластиков в оболочках крыльях и фюзеляжа позволяют значительно снизить эхосигналы и избежать резонанса с рабочими частотами дальнедействующих РЛС. Используемые конструкционные материалы по прочности превосходят сталь и титан и на 30% легче алюминия.

Сочетание высоких упругопрочностных и магнитоэлектрических свойств модифицированных эпоксидных и полиимидных углепластиков позволило использовать их при изготовлении планера самолета (в высоконагруженных зонах использован титан), что внесло свой вклад в снижение его ЭПР.

В силу естественной аэродинамической неустойчивости схемы «летающее крыло» для управления самолетом используются не только аэродинамические поверхности, но и другие менее традиционные способы, например, способ, основанный на избирательном изменении тяги отдельных двигателей.

Основа управления *B-2* — высокоэффективная электродистанционная системы с использованием оптоэлектроники, работающая на базе быстродействующей ЭВМ. Разработка специализированных программ для бортовых ЭВМ и оснащение самолета автоматизированными устройствами позволили сократить количество членов экипажа бомбардировщика до двух человек.

Самолет *B-2* не оснащен столь мощной системой РЭП, как бомбардировщик *B-1*, поскольку снижение РЛЗ дает лучшие результаты, чем применение таких средств.

На самолете установлена выпускаемая фирмой *Hughes Aircraft Company* бортовая РЛС типа *APQ-118* с синтезируемой апертурой, работающая в диапазоне частот 12,4–18,0 ГГц, в которой применены конформные антенные решетки.

Оснащение бомбардировщиков *B-2* радиолокационной станцией с высокой разрешающей способностью обеспечивает экипажу возможность уверенного обнаружения и опознавания различных объектов на больших дальностях и в различных метеоусловиях.

На этапе проектирования основной целью *B-2* являлось разрушение подвижных ракетных комплексов и мобильных РЛС, объектов концентрации войск, предприятий военной промышленности [29, 36].

Осенью 1997 г. 13 бомбардировщиков *B-2 Spirit* приступили к несению боевой службы (509-е авиакрыло, база Уайтмэн, Миссури), в 2002 г. разрушили военную инфраструктуру в Афганистане, совершая полеты с базы на о. Диего-Гарсия (Индийский океан). Один *B-2* может заменить 70 бомбардировщиков, штурмовиков палубной авиации, заправщиков, самолетов РЭБ и управления [131].

Передняя и задняя кромки крыла *B-2*, покрытые многослойным радиопоглощающим материалом, имеют сотовую конструкцию. Каждая ячейка этой конструкции представляет собой шестиугольную в сечении трубку длиной 80–100 мм, продольная ось которой расположена примерно параллельно продольной оси самолета (рис. 2.151). Внутренний объем каждой трубки заполнен радиопоглощающим материалом, плотность которого повышается в направлении от переднего среза трубки к заднему. В результате этого энергия, приходящая от РЛС электромагнитных импульсов, частично поглощается многослойным покрытием, затем наполнителем трубки и, наконец, ослабляется при многократном отражении от ее внутренних стенок и поглощении. Отражения сигнала РЛС от передней кромки крыла практически не происходит.

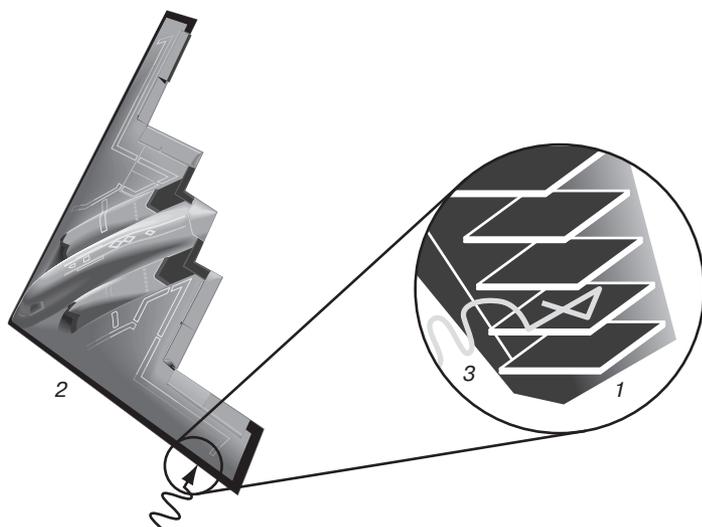


Рис. 2.151. Радиопоглощающие(3) сотовые конструкции (1) передних кромок крыльев самолета B-2 Spirit (2) [112, 115]

Сотовые (шахтные) РПК поглощают СВЧ при любых углах падения излучения. Набор стенок ячеек сот образуют волноводные системы, их стенки покрыты РПМ и защищены диэлектрическими покрытиями. Ранее аналогичные РПК с плоской передней поверхностью, увеличение магнитодиэлектрических потерь, в которых достигается с помощью конических вставок или сот с коническими ячейками, использовались в безэховых камерах.

Силовые оболочки из полиимидных и эпоксидных углепластиков — многослойные, с наполнителем из сотопластов, в ячейки которых введены широкодиапазонные РПМ и РПП (вероятно, фирмы *Plessey*), обеспечивающие поглощение ЭМЭ до 12–20 дБ (99%) в диапазоне 2–18 ГГц [115].

Бомбардировщик B-2, разработанный фирмой *Northrop*, имеет ЭПР в передней полусфере порядка $0,01 \text{ м}^2$ (до $0,0464 \text{ м}^2$). Для получения столь малой ЭПР были разработаны машинные программы для оптимизации архитектуры наружной поверхности самолета. При этом был использован принцип формирования рациональной архитектуры, заключающейся в концентрации всех отражений в нескольких узлах сектора. Применена «четырёхлепестковая» схема (параллельные передние и задние кромки корпуса и пилообразные других элементов), которые формируют X-образно расположенные четыре основных сектора отражения.

Восьмимоторный бомбардировщик B-52 имеет ЭПР носовой части около 100 квадратных метров, B-1A — 10 м^2 , B-1B — около 1 м^2 , B-2 — $0,0464 \text{ м}^2$, то есть по возможности обнаружения он сравним с птицей.

Истребитель *Lockheed Martin F/A-22 Raptor* разрабатывался с 1997 г. на смену F-15 Eagle на заводе фирмы в штате Джорджия (США). Его скорость $1,6 \text{ Max}$, мощность двигателей с поворотными соплами без форсажных камер выше, чем у F-15, вооружение конформное, мощная компьютерная программа (2 млн строк программного кода, у *Saturn V* 1967 г. — 16 000 строк, контракт на 100 млрд долл, выпуск 648 истребителей, полеты с 2003 г., на 2004 г. заказ на 339 машин, в эксплуатации с 2005 г.).

В США разработаны самолеты пятого поколения — одномоторный СВВП F-35 B (на смену AV-8 B Harrier II, Boeing F/A-18), с обычным взлетом F-35 C (с оптимальными углами стреловидности крыла и оперения, радиопоглощающими покрытиями плоскостей и фюзеляжа (рис. 2.152) и серия БПЛА, использующих технологию *Stealth* (рис. 2.153).



Рис. 2.152. Самолет вертикального взлета и посадки (ВВП) 5-го поколения *F-35 Joint Strike Fighter* (США)

Технология *Stealth* используется при разработке боевых беспилотных самолетов (БПЛА, UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) с различными системами запуска и посадки. Вооруженные силы 41 страны мира в 2007 г. использовали около 80 типов БПЛА, разработанных в США, Канаде, Австралии, Великобритании, Франции, Германии, Швеции, Израиле, России:

- 1) самолет-разведчик *RQ-3 Dark Star* (США);
- 2) тяжелый, высотный БПЛА *RQ-4A Global Hawk* (рис. 2.153, США, полеты с 1996 г., размах крыльев из углепластика 35 м, длительность полета 36 часов, ТВД *Allison AE300 7H*, тяга 3450 кгс, стоимость 20 млн долл, управляется с наземного командного пункта, РЛС миллиметрового диапазона способна разобрать цифры автомобильного номера с высоты 20 км, за 24 ч сканирует 100 000 км² поверхности, данные о цели передаются воздушному командному пункту *Awacs*);
- 3) «*Lou Flaut*» (США, дельтавидный, полеты с 1997 г.);
- 4) «*Sayfer 2*» (США, *Sykorsky*, дискообразный, испытания с июня 2001 г.);
- 5) «*Simecon*» (Норвегия, дископлан, диаметр 4,5 м, с октября 2002 г.);
- 6) «*Shark*» (Швеция, *SAAB Airspace*, длина 14 м, с августа 2002 г., на вооружении с 2010 г., технология *Stealth*);
- 7) «*PtiDuk*» (Франция, *Dasso Airashen*);
- 8) «*Halo*» (*British Aerospace*, технология *Stealth*);
- 9) «*Raven*» (рис. 2.153; размах крыльев 3 м, потолок 30–150 м, 40 000 долл, продолжительность полета 80 мин);
- 10) «*Tragon E*» (США, с 2003 г., масса 1,8 кг, высота 150 м, скорость 75 км/ч);
- 11) *Teher* (США, в системе Эшелон, 1990-е гг.);
- 12) *Fenex* (Великобритания, 1998 г.);
- 13) *Sperwe* (Франция);
- 14) *CL-289* (ФРГ);
- 15) *RQ-8A Fire Scout* (США, оперативно-тактический, 1200 кг, 2005 г.);
- 16) *Whormer* (США, многоцелевой большой дальности полета);
- 17) *X-43A* (рис. 2.153; *NASA*, гиперзвуковой, 9,8 *Max*, высотный разведчик);
- 18) *RQ-1,1A Predator* (рис. 2.153; США, с 1997 г., разведчик, скорость до 240 км/ч, высота полета до 7600 м, радиус полета, 3 млн. долл., вооружение — ракета *Hellfire* с боеголовкой массой 7 кг);



Рис. 2.153. Зарубежные беспилотные малогабаритные использующие технологию *Stealth* боевые самолеты БПЛА [132]: 1 — *Global Hawk*; 2 — *Raven*; 3 — *X-43A*; 4 — *RQ-1 Predator*; 5 — *X-45A*; 6 — *X-45C* (бомбардировщик)

19) *Bird of Prey* (США, *Boeing Fantom Workes, BOP*, двигатель ТРДД *Dant WYT 15D* тягой 1360 т, бесхвостный без вертикального оперения, длина 14,3 м, высота 2,82 м, ширина 6,91 м, масса 3405 кг, конструкции планера полностью из углепластиков *LTM* – 10 с использованием крупных панелей сложной конфигурации, обеспечивающих малую РЗ, результаты 38 полетов в 1996–99 гг. использованы для проектирования БПЛА *X-45A*);

20) *Boeing X-45A* (для ВВС США, *X-47A* – для ВМС, рис. 2.153; фирма *Boeing*, 1350 кг вооружения, стоимость 15 млн долл.);

21) *Boeing X-45C* (рис. 2.153; бомбардировщик, длина 12 м, размах крыльев 15 м, взлетная масса 16,5 т, грузоподъемность 2040 кг, 8 бомб *SDB* малого диаметра или 2 бомбы *JDAM* по 900 кг с лазерным наведением; двигатель *F404 – GE – 102D* тягой 5 т, потолок 12 000 м, скорость 0,8 *Мах*, радиус действия более 2200 км);

22) БПЛА России (Пчела-1, с 1989 г., 135 кг, длина 2,78 м, размах крыльев – 3,25 м, высота полета 100 – 2500 м, продолжительность полета 2 ч, в комплексе Строй П, М на шасси БТР-Д, модели Пчела-1. 1Т, 1К, 1ВМ, 1ПМ с различными типами электронного оборудования; БЛА ТУ-123 в комплексе ДБР-1 «Ястреб»; ТУ-243, ТУ-300 в комплексе «Коршун», «Коршун-У»; БЛА «Типчак» (60 кг, 2005 г.), «Колибри», «Элерон» (2,8 кг); БЛА комплексов Рейс-Д, Зонд (АХК «Сухой»); Иркут; комплекс Вертикаль (БПЛА-20, 80, 81 с оптико-электронной аппаратурой «Панорама-ТВ»); *ZALA 421-08, 421-12* (2007 г., Ижевск, ООО «Беспилотные системы»); «Птеро» (ООО «АФМ-Сервис»); «Данэм» (ОАО ОКБ «Сокол», Казань) [155].

2.4.4.5. Способы обнаружения объектов, использующих технологию *Stealth*

В РЛС используется горизонтальная, вертикальная, круговая, эллиптическая поляризация излучения.

Поляризация волн – нарушение симметрии в распределении ориентации возмущений (смещений и скоростей в механической волне и электрических и магнитных полей в электромагнитной волне) в поперечной волне относительно ее распределения. Поляризация связана с упорядоченностью в ориентации векторов напряженности электрического E и магнитного H полей электромагнитного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению электромагнитных волн. Различают:

1) линейную поляризацию ЭМВ, когда E сохраняет постоянное направление (плоскостью поляризации называют плоскость, в которой лежит E и световой луч);

2) эллиптическую поляризацию (конец E описывает эллипс в плоскости, перпендикулярной лучу);

3) круговую поляризацию (конец E описывает окружность).

Современные РЛС – высококогерентные (когерентность – согласованное протекание во времени нескольких колебательных или волновых процессов. Если разность фаз двух колебаний остается постоянной во времени или меняется по строго определенному закону, то колебания называют когерентными) импульсно-доплеровские устройства, которые могут использовать и радиоотражение от ионосферы для обнаружения малозаметных целей за горизонтом (загоризонтные РЛС). СВЧ РЛС стоят миллиарды рублей (1995 г.).

В излучающих устройствах импульсных РЛС используется принцип кратковременного отклонения напряжения или тока от некоторого постоянного значения, обеспечивающий излучение ЭМЭ радиодиапазона в виде радиоимпульсов [42].

Несмотря на малое значение $\sigma_{\text{ц}}$ конструкций авиатехники, созданных с использованием технологии *Stealth*, они могут быть обнаружены (их навигация и наведение на цель осуществляется с использованием бортовых РЛС и излучающих электронных высотомеров) РЛС с фазированными решетками, формирующими излучаемые сигналы сложной структуры (прямоугольные импульсы).

Использование РЛС, обеспечивающих ЭМИ СВЧ-диапазона, модулированные прямоугольными импульсами, позволяет получить от объектов с УРЗ по технологии *Stealth* эхо-сигналы с мощностью, достаточной для их обнаружения. Зондирование производится

радиосигналами со сложной внутренней структурой, на свободных от носителей РЛС (сигналы прямоугольной формы в большом диапазоне частот). Отраженный сигнал от движущегося со скоростью v относительно РЛС объекта при облучении ЭМЭ с длиной волны λ имеет другую частоту, отличающуюся от частоты f на величину Δf (частоту Допплера):

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda},$$

Сигнал частоты Δf выделяется в приемной аппаратуре путем сравнения частоты отраженного сигнала с частотой сигнала РЛС. Амплитуда сигнала частоты Δf пропорциональна ЭПР движущегося объекта.

Измерение времени запаздывания Δt отраженного импульса по отношению к излученному позволяет рассчитать расстояние r до отражающего объекта $r = c \cdot \Delta t / 2$.

С повышением длины волны излучаемого импульса методы технологии *Stealth* начинают утрачивать свою действенность, а обнаруживаемость летательных аппаратов соответственно возрастает. Перспективным методом, способным обеспечить достаточно высокую вероятность обнаружения «невидимых» самолетов, является использование бистатических РЛС, состоящих из разнесенных на большее расстояния друг от друга передатчика (наземного или космического базирования) и наземного приемного устройства. Дополнительным достоинством этого метода является то, что приемное устройство работает в пассивном режиме, то есть не излучает электромагнитную энергию, в связи с чем его координаты практически не могут быть определены бортовыми средствами бомбардировщиков, летящих в направлении объектов удара [112].

РЛС фирмы *Hughes* системы ПВО, работающие в диапазоне частот 2–4 ГГц, способны с высокой вероятностью обнаружить цели с ЭПР 1 м² на дальности более 370 км [114].

На перехватчиках Су-27, Су-35 (глубокая модернизация Су-27, переходный этап к истребителям 5-го поколения), РЛС обнаруживает и сопровождает 20 целей (одновременно может поражать 8 целей); на МИГ-29 РЛС вертикального действия обеспечивают слежение за самолетами, находящимися в различных эшелонах. На МИГ-29 СМТ установлена РЛС с фазированной антенной решеткой «Жук-МФЭ» (корпорация «Фазотрон-НИИР»), в конструкции которой исключены механические приводы поворота антенны, работающая в режиме картографирования местности и обнаруживающая малоразмерные цели (крылатые ракеты, беспилотные ЛА). Эффективность МИГ-21 с бортовой РЛС «Копье-М», картографирующей местность, возрастает в 7 раз (Известия, 19.7.2004). Для обнаружения по тепловому излучению (прежде всего двигателей) используется ИК локация (λ 0,76 мкм–0,75 мм) и радиотеплолокация (λ неск. мм – 3–5 см).

Способны обнаружить самолеты *Stealth* РЛС «Кольчуга», П-12, П-18, Небо-СВ (метровый диапазон), РЛС с фазированной решеткой ЗРК «ТОР-М1».

Пассивный радарный комплекс «Кольчуга» (не излучает радиосигналов и неуязвим для обычных антирадарных ракет) оснащен шестью различными типами антенн, улавливающих радиосигнал в частотном диапазоне от сотен МГц до десятков ГГц (рис. 2.154).

Плохо отражая радиоволны, самолеты *Stealth* их поглощают и рассеивают, что позволяет их видеть в радиодиапазоне благодаря космической «подсветке» (излучение космических радиопередатчиков различного назначения). Нахождение самолета *Stealth* в электромагнитном поле радиодиапазона видоизменяет это поле, приводит к кажущемуся изменению направления на источник сигнала. Компьютерный анализ динамики изменения картины космического излучения позволяет точно локализовать «нарушителя» (каждый летающий объект имеет свое влияние на изменение электромагнитного излучения, зависящее от высоты, скорости полета, расположение радиоизлучающих спутников, облучающих его и комплекс «Кольчуга») и, подключив традиционные системы целеуказания, поразить самолет *Stealth*.

Способны поражать самолеты *Stealth* ЗРК «Куб», «Куб-М4» (через 22 с после получения сигнала РЛС на дальности 25 км, высоте 14–20 км), ЗРК «С-300, 400», ПЗРК «Игла», «Стрела», ЗРК С-125 «Печора» [29, 36, 112, 115, 133–135].

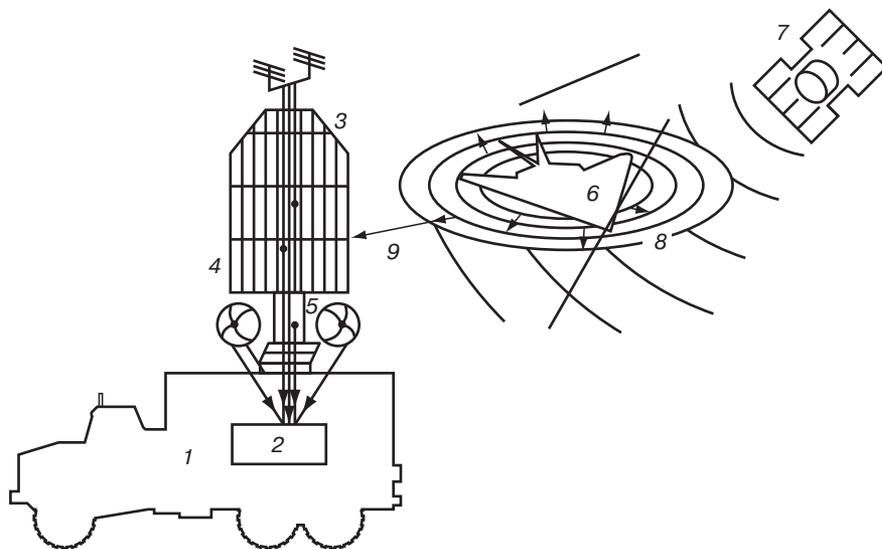


Рис. 2.154. Обнаружение самолетов, изготовленных с использованием технологии *Stealth*, системой радиоразведки «Кольчуга»:

1 — мобильный комплекс; 2 — компьютерное опознавание цели; 3 — две высокочастотные антенны, принимающие сигналы с частотой 18 ГГц (позволяют обнаруживать цели на расстоянии до 600 км, когда они находятся далеко за горизонтом); 4 — антенны ультравысокочастотного и высокочастотного диапазонов (работают в ближней зоне действия до 200 км); 5 — антенна ультравысокочастотного диапазона (принимает сигналы с частотой выше 100 МГц, работает в ближней зоне, точно определяя траекторию полета цели); 6 — самолет *Stealth* (F-117, B-2); 7 — космический аппарат, работающий в радиодиапазоне; 8 — измененная картина космического излучения; 9 — информация о динамике изменения картины космического излучения

Россия имеет развернутую систему ПВО, ПРО, ПКО, включающую объекты раннего предупреждения о ракетном нападении (РЛС «Волга», обнаружение стартов всех типов стратегических БР на дальностях около 5000 км, Барановичи); габлинская РЛС «Дарьял», РЛС «Воронеж-ДМ» (рис. 2.111); оптико-электронный комплекс «Окно» (КБ «Красногорский завод», автоматическое обнаружение высокоорбитальных космических объектов на высотах до 40 000 км, определение их орбит, установление класса, предназначения, состояния, национальной принадлежности, Нурек); РЛС с ФАР диаметром 16 м, ударный информационно-вычислительный комплекс ПРО А-135 (16 противоракет малой, 68 — средней, 16 — большой дальности, Софрино, рис. 2.155, Известия, 24.02.1999, 22.01.2003).

Зенитно-ракетный комплекс С-300 поражает цели с $\sigma_{ц} = 0,02 \text{ м}^2$, ракеты, летящие со скоростью 1000–3000 м/с на расстоянии 40 — более 100 км, на высотах 25 м — 25 км. РЛС кругового обзора обнаруживает до 200 целей, командный пункт ведет 70 целей и 24 из них распределяет в автоматическом режиме между четырьмя станциями наведения ракет.

ЗРК «Волхов» (С-300 с середины 1980-х гг.) сопровождает до 100 целей. ЗРК С-300 ПМУ-1 (3-9 «Авангард») использует 36 ракет (5В55, 48Н6Е) по 36 целям одновременно, с перезарядкой боекомплекта (Известия, 12.11.1997). С-300В — система ПРО на театре военных действий с РЛС кругового и секторного обзора, на гусеничном ходу (концерн «Антей», ПО «Северный завод») для борьбы с БРДД, крылатыми ракетами, самолетами, прикрытием сухопутных войск. Использует ракеты 9М82 «Гигант», 4,6 т, ГЧ 150 кг, 4-трубные ПУ (ОКБ «Новатор», Екатеринбург) и 9М83 «Гладиатор», 2,5 т, 2-трубные ПУ (Известия, 29.06.1993). Системы управления С-300 — Московский радиотехнический завод (Известия, 09.09.2000). Системы

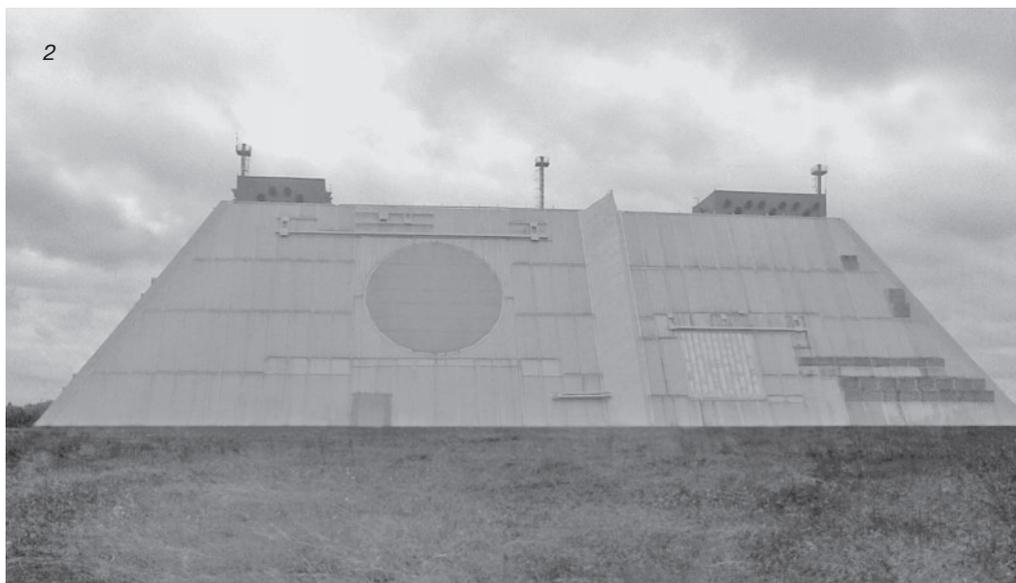
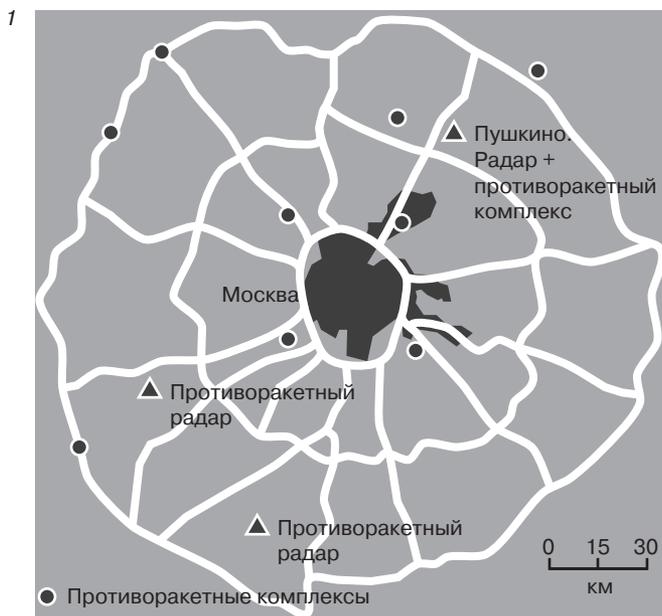


Рис. 2.155. Схема (1) ПРО Москвы (Известия, 24.02.1998 из журнала «Советские вооружения–1985») и РЛС с ФАР (2) комплекса А-135 (Известия, 24.02.1999)

ПВО С-300ПМУ-2 «Фаворит» («Факел», 1994) и «Антей-2500» поражают КР «Томагавк» (длина 5,5 м, 1200 кг, ББ 450 кг, несколько метров над поверхностью). «Антей-2500» — комплекс из 6-ти машин. Готовность после обнаружения цели — 5 мин (*Patriot* — 30 мин, для работы требует информацию со спутников и загоризонтных РЛС), большая площадь ФАР, дальность до 200 км, высота целей — до 30 км, для С-300В соответственно 100 и 25 км, скорость ракет 4500 м/с, поражение ПУ БР (до 15 целей) на расстоянии 2500 км, за счет ББ направленного действия — поражение ГЧ (Известия, 25.08.1998).

В 2000–2001 гг. проведены испытания ЗРК С-400 «Триумф» (Известия, 12.01.2000). Первая противоракета В-1000 (МКБ «Факел») испытана на полигоне Сарышаган 04.03.1961 г. (Известия, 24.12.1998).

В системах ПВО, ПРО России используют:

1) ракеты «Galosh» («Галоша», скорость 10 *Мах*, МКБ «Новатор», Екатеринбург, заатмосферный перехват), «Gazelle» («Газель», МКБ «Факел», шахтное базирование, для верхних слоев атмосферы и другие;

2) ЗРК «ТОР-М» (ракеты 9М330 МКБ «Факел»), ТОР-М1 (НПО «Антей», на гусеничном тягаче на базе среднего танка), РЛС с ФАР, 48 целей на высоте 10–6000 м, ЭВМ, система наведения с аппаратурой пуска, 8 ракет 9М331 вертикального старта, дальность 1–12 км, ББ 15 кг, облако поражающих осколков имеет форму тороида «бублика» (Известия, 19.05.1993);

3). ЗРК «Оса» (ИЭМЗ «Купол», ракеты 9М33), ЗРК «Ганг» (Ульян. МЗ), РК «Тунгуска» (поражает цели на высоте 15 м), комплекс ПВО «Бук-М1-2» (поражает РБ «Ланс-2», противорадиолокационные ракеты «Харм») (Известия, 14.02.1993, 4.06.1993, 25.03.1999, Московские новости, № 7, 14.02.1993);

4) сверхзвуковые ракеты Х-31 (ГНПП «Звезда-Стрела», Болшево), Х-31А, 4,7×0,36 м, дальность 10–50 км, диапазон высот 100–15000 м, стартовая масса 600 кг, масса ББ — 90 кг, Х-31П, дальность 15–130 км, пассивная РЛ головки наведения. Устанавливаются на Су-30 МКИ, Су-24, Миг-29М. Цели — наводные корабли, РЛС ЗРК «Патриот», «Найк-Геркулес», «Хок». Поставляются в США, КНР, Индию (Известия, 21.04.1998);

5) низколетящие (настильная маневренная траектория высотой до 20 м над поверхностью) сверхзвуковые противокорабельные ракеты ЗМ-80 «Москит», «Солнечный ожог» («*Sunburn*»), вес 610 кг (аналог *EFP Vandal* фирмы *AlliedSignal Aerospace* — 4 т) (Известия, 21.04.1998).

Литература

1. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. — М.: Советское радио, 1971. — 298 с.
2. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1960. — 215 с.
3. Советский энциклопедический словарь — М.: Сов. Энциклопедия, 1981. — С. 1554.
4. ССБТ. ГОСТ 12.1.006-76. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. — М.: Изд-во стандартов, 1976.
5. Конструкционные свойства пластмасс; пер. с англ. под ред. Э. Бэра. — М.: 1967. — С. 41–175.
6. Электрические свойства полимеров.; под ред. Б.И. Сажина. — Л., 1970. — 2-е изд. 1997.
7. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение; пер. с англ. — М.; Л., 1959. — 250 с.
8. Сканиви Г.И. Физика диэлектриков. — М.; Л., 1949. — 180 с.
9. Фрелих Г. Теория диэлектриков; пер. с англ. — М., 1960. — 210 с.
10. Энциклопедия полимеров. — М.: Сов. Энциклопедия, 1972. — Т. 1. — С. 740–754.
11. Бозорт З.Р. Ферромагнетизм; пер. с англ. — М.: Изд-во Ин. лит., 1956. — 784 с.
12. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. — М.: Высшая школа, 1986. — 352 с.

13. Гайхман А.Ш. и др. ВИНТИ «Итоги науки и техники». Сер. «Химия ВМС», 1981. — Т. 14. — С. 154–158.
14. Петраковский Г.А. и др. Магнитные диэлектрические и резонансные свойства магнитодиэлектриков. — Красноярск, 1982. — 97 с.
15. Обзоры по электронной технике. Сер. 6, вып. 2 (790), 1981. — С. 3–42.
16. Карасева Т.М. и др. //Зарубежная радиоэлектроника. — 1984. — № 5. — С. 106.
17. Алексеев А.Г. и др. Магнитные эластомеры. — М.: Химия, 1987. — 240 с.
18. Материаловедение: учебник для вузов. Б.Н. Арзамасов и др. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1986. — С. 300–325.
19. Черников В.И. Магнитные измерения. — М.: Изд-во МГУ, 1969. — 387 с.
20. Грохольский А.Л. Измерители параметров ферромагнитных материалов на высоких частотах. — Киев: Изд-во «Наука», 1972. — 120 с.
21. Ковнеристый Ю.К. и др. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. — М.: Наука, 1982. — 164 с.
22. Физическое материаловедение; пер. с англ. под ред. Кана. — М.: Мир, 1968. — 632 с.
23. Крылов В.А., Юченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. — М.: Сов. радио, 1972. — 61 с.
24. Блинов А.А., Дмитриенко О.А. Применение электропроводящих ПМ для защиты от электромагнитных излучений. Обзорная инф. НИИТЭХим. Серия «Производство и переработка пластмасс и синтетических смол». — М., 1988. — 25 с.
25. Степанов Ю.Г. Противорадиолокационная маскировка. — М.: Сов. радио, 1968. — 144 с.
26. Шнейдерман Я.А. Зарубежная радиоэлектроника, 1965. — № 4. — С. 115–135.
27. *Bledzki A., Stankowska D., Kunststoffe*, 1984, v.74, № 2, p. 89–96.
28. *Dreger D.D., Machine Design*, 1979, v.51, № 17, p. 114–119.
29. Зарубежная радиоэлектроника. Проблемные вопросы уменьшения радиолокационной заметности объектов (специальный выпуск).— 1994. — № 4/5. — С. 3–20.
30. Вестник противовоздушной обороны. — 1962. — № 12. — С. 65–67.
31. *Simon R.M., Modern Plastics Int.*, 1983, v. 13, № 9, p. 124–130.
32. Потапов А.И. и др. Технологический неразрушающий контроль пластмасс. — Л.: Химия, 1979. — 288 с.
33. *Electronic Equipment News*, 1963. V. 4, № 10, p. 48–54.
34. Смоленский Г.А. Неметаллические ферромагнетики. — Изв. АН СССР, Серия физическая, 1952. — Т. 16. — № 6. — С. 10–15.
35. *Aircraft Engineering*, 1963. V. 35, № 3, p. 87.
36. Ананьин Э.В. и др., Зарубежная радиоэлектроника. — 1994. — № 4/5. — С. 5–21.
37. Справочник по радиолокации; под ред. М. Скольника. — М.: Сов. радио, 1976. — Т. 1. — 356 с.
38. Ширман Я.Д., Голиков В.М. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. — М.: Сов. радио, 1963. — 278 с.
39. Мейлуks Р.Д. Теория и техника фазированных антенных решеток. ТИИЭР, 1982. — Т. 70. — № 3. — С. 5–59.
40. *V. Wanstall, Interavia*, 1986. V. 41, № 2, P. 173–179 (ЭИ «Авиастроение». — 1986. — № 35. — С. 19–25; № 42. — С. 21–30).
41. Бочкарев А.М., Долгов М.Н. Зарубежная радиоэлектроника. — 1989. — № 2. — С. 3–20.
42. Гаврилов Н., ЗВО. — 1986. — № 5. — С. 41–45.
43. Известия, 25.11.1988
44. За рубежом. — 1984. — № 35. — С. 18; Известия, 09.02.2007.
45. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. — М.: Сов. радио, 1964. — 125 с.
46. Шнейдерман Я.А. Зарубежная радиоэлектроника. — 1969. — № 6. — С. 101–124.

47. Шнейдерман Я.А. Зарубежная радиоэлектроника. — 1975. — № 2. — С. 93–113.
48. *Electronic News*, 1967, № 604, P. 24.
49. Патент США № 3.127.608, кл. 343-18.
50. *August H. Energy absorption by a radioisotope produced plasma*. Патент США № 3.713.157, кл. 343-18, 23.1.1973.
51. *Aviation Week and Space Technology*, 1973, V. 99, № 12, P. 107.
52. Сажин Б.И. Электропроводность полимеров. — М.; Л.: Химия, 1964. — 305 с.
53. Быков О.Г. и др., ТЭИ-ТП, 1984, № 7. — С. 96–100.
54. *Chemical Processing*, 1970, V. 16, № 6, P. 37.
55. *Modern Plastics*, 1970, V. 47, № 7, P. 120–122.
56. *J. Cell. Plastics*, 1973, may/june, P. 130–133.
57. ЭИ «Термостойкие пластики». — 1976. — № 44. — С. 13.
58. *Plast. Design Forum*, 1984, V. 9, P. 80, 82, 86, 88–92.
59. Иванова С.В. Электротехническая промышленность. Сер. 20. Обзорная информация, 1988, 28 с.
60. Альперин В.И. Конструкционные стеклопластики. — М.: Химия, 1979. — 295 с.
61. *Materials Engineering*, 1973, V. 78, № 3, P. 71.
62. Полифениленоксид и материалы на его основе. — М.: НИИЭТХим, 1977.
63. Юдкин Б.И. и др./Пласт. массы, 1987. — № 8. — С. 26–28.
64. Каталог продукции фирмы «Ticona», ФРГ, август 2000.
65. Бейдер Э.Я. Материалы семинара в МДНТП. — М.: 1991. — С. 48–51.
66. *Saechling Kunststoffe — Taschen Luch, 27 Ausgabe, Munchen-Wien*, 1999. S. 495–498
67. Ароматические полисульфоны. — М.: НИИТЭХим, 1977, № 3 (42), 77 с.
68. Термоустойчивость пластиков конструкционного назначения. — М.: Химия, 1980 — 240 с.
69. Попова В.П. Производство и переработка пластмасс и синтетических смол. — М.: НИИЭТХим, 1983. — № 5. — 81 с.
70. Панкратов В.А. ЖВХО, 1979. — Т. 34, № 5. — С. 459.
71. *Van Hoesve P.W., Mater. plast. ed. elast.*, 1984, № 10, p. 562–565.
72. *Maschine Design*, 1987, v. 59, № 8, p. 146, 148.
73. *Design News*, 1983, v. 4, № 11, p. 24, 25.
74. Пластики конструкционного назначения. — М.: Химия, 1974. — 304 с.
75. Термопласты конструкционного назначения. — М.: Химия, 1975. — 220 с.
76. Гуртовник И.Т. и др. Стеклопластики радиотехнического назначения — М.: Химия, 1987. — 240 с.
77. Углеродные волокна; пер. с япон. под ред. С. Симамуры. — М.: Химия, 1987. — 304 с.
78. *H.G. Erials / Vohwinkel. Nene Polymere Werkstoffe*. 1969–1974, 1975; *Munchen, Wien*, 1983, 408 s.
79. Краткая химическая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия. — Т. 2. — С. 560.
80. Третьобания к матрицам ПКМ: учебное пособие / Михайлин Ю.А. и др. — Уфа, 1996. — 70 с.
81. Михайлин Ю.А. ИБ «Полимерные материалы». — 2001. — № 9(28). — С. 2–4.
82. *Polymer*, 1987, v.28, № 4, p. 574–580.
83. *J. Polym. Sci., Polymer Lett.*, 1984, T. 22, № 6, p. 365–370; 1987, T. 25, № 1, p. 5–10.
84. *Electronic Design*, 1982, № 9, p. 159–164.
85. *Plast. and Rubber Int.*, 1984, v. 9, № 1, p. 29–32.
86. *Modern Plastics Int.*, 1984, v. 14, № 10, p. 89.
87. Электротехническая промышленность. Информэлектро, 1988. — Вып. 1. — 28 с.
88. *Polymer Journal*, 1990, v. 22, № 1, p. 1–6.
89. *AWST*, 1989, v. 10, p. 33–35.
90. *J. Appl. Polymer Sci.*, 1989, v. 38, № 4, p. 1173–1178.

91. *Synth. Metal*, 1989, v. 31, № 3, p. 369–378.
92. *Design News*, 1987, v. 43, № 12, p. 15.
93. Заявка 3025888 (ФРГ) от 01.07.1980.
94. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. — М.: Химия, 1984. — 242 с.
95. Крикоров В.С., Колмакова Л.А. Электропроводящие полимерные материалы, — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 173 с.
96. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. Дж. Любина; пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1988. — С. 252–339.
97. Углеродные волокна и углекомпозиты; пер. с англ. под ред. Э. Фитцера. — М.: Мир, 1988. — 336 с.
98. Левит Р.М., Райкин В.Г. Углеродные волокна и волокнистые материалы с регулируемыми электрофизическими свойствами и изделия на их основе. — М.: НИИЭТХим, 1978. — 52 с.
99. Бушуев Ю.Г. и др. Углерод-углеродные КМ. — М.: Metallurgia, 1994. — 650 с.
100. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов и др. — 3-е изд. перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. — С. 524–557.
101. Металлические стекла; пер. с англ. под ред. Гилмана. — М.: Metallurgia, 1978. — 264 с.
102. Бельский А.Я. Стеклообразные металлы//Природа. — 1987. — № 2. — С. 80–88.
103. Шнейдерман Я.А.//Зарубежная радиоэлектроника. — 1969. — № 6. — С. 101–124.
104. Шнейдерман Я.А.//Зарубежная радиоэлектроника. — 1972. — № 7. — С. 103–131.
105. Шнейдерман Я.А.//Зарубежная радиоэлектроника. — 1967. — № 2. — С. 93–113; № 3. — С. 71–92.
106. Гроднев И.И. и др. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. — М.: Связь, 1972. — 23 с.
107. Попов Г.П. Защитные, токопроводящие и сверхпроводящие пленки для электронной техники. — Воронеж: НИИПолМаш, 1991. — 69 с.
108. *Schlack M., Plast. World*, 1987, v. 45, № 6, p. 66, 67.
109. Проспект НИИРФ. — М., 1985. — 15 с.
110. *Interavia*, 1985, v.49, № 11, p. 1217–1219.
111. *Sweetman B., Int. Defenite Rev*, 1984, № 2, p. 7–12.
112. Кирсанов В.А. Зарубежное военное обозрение. — 1989. — № 3. — С. 40–44.
113. Пирумов В.Е. и др. Зарубежная радиоэлектроника. — 1994. — № 6. — С. 15–25.
114. Беляев Ю.П. Зарубежное военное обозрение. — 1988. — № 6. — С. 45, 46.
115. *Brown A.S., Aerospace America*, 1990, march, p. 16–20, 36.
116. *Flight Int.*, 3 December 1988, p. 2, 3.
117. *Electronic Engineering*, 1984, v. 56, № 693, p. 205.
118. *Yamamoto T., J. Mater. Sci., Soc. Jap*, 1990, v. 27, № 3, p. 153–158.
119. *Hashimoto O. et al., J. Jap. Soc. Aeronaut and Space Sci.*, 1990, v. 38, № 434, p. 156–159.
120. *Plastics World*, 1984, v. 42, № 2, p. 79.
121. *Hatakeyana K., Invi T., IEEE Trans.*, 1984, v. 20, № 5, p. 1261–1263.
122. *AWST*, 1988, v. 9, p. 75–81.
123. Заславская Е.Б. Судостроение за рубежом. — 1986. — № 11. — С. 66–72.
124. *Defense Electronics*, 1982, v.14, № 10, p. 12.
125. *AWST*, 1981, v. 115, № 17, p. 25, 95.
126. *H.B. Wanstall, Interavia*, 1986, v. 41, № 2, p. 169–173.
127. *Sindaram G., Int. Defenite Rev.*, 1982, v. 15, № 2, p. 221–226.
128. Зарубежное военное обозрение. — 1986. — № 1. — С. 54.
129. *Aerospace Daily*, 1982, v. 115, № 17, p. 133.
130. *Aerospace Composites*, 1990, v. 2, № 2, p. 50.

131. Известия, 30.08.2004.
132. *Popular Mechanics*, 2005, № 4, p. 30–36.
133. *Interavia*, 1970, 20.VIII, № 7072.
134. Известия, 30.03.1999.
135. Известия, 26.06.2000.
136. Армированные пластики; под ред. Г.С. Головкина. — М.: МАИ, 1997. — С. 112–124.
137. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006. — 624 с.
138. Винк Х. ИБ Полимерные материалы. — 2003. — № 3(40). — С. 22–24.
139. Макарова Т.Л., Захарова И.Б. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов: учебное пособие / Под ред. В.И. Ильина, А.Я. Яшика. — СПб.: Наука, 2001. — 70 с.
140. Золотухин И.В. Фуллерит — новая форма углерода: структура, физические свойства и применение. — Воронеж, 1996. — 42 с.
141. Ивановский А.Л., Квантовая химия в материаловедении. Нанотубулярные формы вещества. — Екатеринбург: ИХТГ УрОРАН, 1999. — 242 с.
142. Гуняев Г.М. и др. Пласт. массы. — 2003. — № 10. — С. 15.
143. Химия и жизнь. — 2001. — № 12. — С. 18, 19; Известия, 30.08.2003.
144. *Blau W.J., Hugh J., Proc. SPIE*, 2001, № 4468, p. 112–123.
145. Голубкова Т.А. и др. НТС Технология. Сер. «Конструкции из КМ». — М.: ВИМИ, 1995. — С. 3–20.
146. Озолин А.А. др. Композитный мир. — 2006. — № 2. — С. 34, 35.
147. Известия, 25.12.2006.
148. Саблин В.Н., Шапошников В.И. Вопросы создания и применение РЛС нового поколения // Радиотехника, 1995. — № 1. — С. 50–53.
149. Викулов О.В. и др. Успехи современной радиоэлектроники, 1998. — № 12. — С. 3–16.
150. *Wanstall B., Interavia*, 1986, v. 41, № 12, p. 169–173.
151. Логачев П.В., Петров А.С. Успехи современной радиоэлектроники, 2004. — № 3. — С. 35–55.
152. АИФ, 2001, № 22, с. 13; 2003, № 26.
153. *Neitzel M., Mitschang P., Handbuch Verbundwerkstoffe, C. Hanser Verlag, Munchen*, 2004, 440 s.
154. Симонов-Емельянов Н.Д. В кн.: Физика КМ. М.: Мир, 2005. Т. 2. — 344 с.
155. Аэрокосмический курьер. — 2007. — № 5. — С. 38–45.
156. Михайлин Ю.А. Конструкционные ПКМ. — СПб.: НОТ, 2008. — С. 338–379.
157. Бухаров С.В.//Пластические массы.— 2005.— № 1.— С. 51–53.
158. Михайлин Ю.А. ИБ Полимерные материалы. — 2009.— № 7, 8, 9.

3. Полимерные материалы для защиты от высокоскоростного инденторного воздействия (броневые материалы и конструкции)

Для изготовления материалов и конструкций, предназначенных для однократного удержания высокоскоростного высокоэнергетического удара различной интенсивности используют [1–5]:

1) ткани различной текстуры на основе волокон из ароматических полиамидов (*Kevlar*, СВМ, Русар, *Twaron* и др.), сверхвысокомолекулярного полиэтилена (*Spectra*, *Dyneema* и др.) — полимерная текстильная (тканая) броня [25];

2) органо- и стеклотекстолиты на основе тканей из волокон *Kevlar*, СВМ, Армос, Русар, стеклянных и их смесей с полимерными и терморепаративными (олигоакрилаты, олигомалеинаты, эпоксидные), термопластичных (блоксополимерные, иономерные), эластомерных связующих с высокой энергией разрушения при ударных нагрузках — полимерная композиционная броня;

3) супергибридные полимер-металлические и полимер-керамические межслоевые композиционные материалы — комбинированная броня;

4) нанополимерные материалы на основе полимерных гелей и электроактивных полимеров (см. Введение).

3.1. Критерии оценки защитных свойств материалов при высокоскоростном динамическом нагружении

Для оценки эффективности броневых материалов используют большой набор критериев (баллистических показателей), получаемых при проведении испытаний образцов различных типов материалов на пулестойкость (СИБ, системы испытания брони).

Для оценки устойчивости ВПКМ к высокоскоростным нагрузкам используют: показатели работы разрушения при растяжении, кДж/м²; значения импульса, поглощенного при ударном изгибе, кДж/м²; показатели работы разрушения при раскрытии трещины, кДж/м²; величины максимального раскрытия трещины после ударной нагрузки, мм; значения полной энергии разрушения при ударной нагрузке на единицу площади образца, Дж/см²; коэффициенты интенсивности напряжений K_c и K_q , МН/м^{3/2}; удельная энергия, поглощенная материалом после ударной нагрузки, Дж·м²/г, кДж/кг; поглощенная энергия W (*energy-to-break*), приходящаяся на единицу длины волокна, Дж/м·день; скорость « C » = $(E/\rho)^{0.5}$ волны напряжения (*the strain wave velocity*) при высокоскоростном ударе, м/с; максимальная поглощенная энергия (*maximum energy absorption*) $R = w \cdot c$, Дж/с; скорость деформирования $\dot{\epsilon}$ при ударе, с⁻¹; параметр скорости поглощения энергии внешнего воздействия dA/dt , Дж/с; параметр интенсивности поглощения энергии $W = d^2A/dt^2$, Дж/с² и другие.

Методики испытаний постоянно совершенствуются, а критерии являются достаточно условными (качественными) и в большинстве случаев не дают возможности связать состав и структуру материалов с их способностью противостоять высокоскоростному инденторному воздействию. К основным критериям, характеризующим различные по составу и конструкции

средств защиты от высокоскоростного высокоэнергетического ударного (условно, от «баллистического» удара) инденторного (проникающего) воздействия (внедрения, пенетрации), относятся:

1. Классы защиты. По ГОСТ Р 50744-95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» средства индивидуальной защиты человека (бронеодежда, бронешлемы, бронежилеты) классифицируются 6-ю основными и 3-я дополнительными классами защиты (табл. 3.1).

По ГОСТ Р 50744-95, который оценивает показатели уровня защиты, площади защиты, вес, толщину, комфорт при ношении, бронеодежда (БО) — средства индивидуальной защиты, выполненные в виде пальто, накидок, плащей, костюмов, курток, брюк, комбинезонов, жилетов, фартуков, предназначенные для периодического ношения для защиты тела человека от холодного и огнестрельного оружия. Защитная структура БО — совокупность защитных элементов, поглощающих, рассеивающих, амортизирующих энергию средств поражения, останавливающая на коротком пути пули, летящих со скоростями 300–1000 м/с.

ГОСТ предполагает проведение испытаний на биоманекенах или имитаторах в виде желатиновых блоков (заброневая травма не должна превышать тяжесть второй степени) со сложной системой регистрации заброневых процессов.

Чем выше площадь защиты, тем ниже двигательная способность человека, что недопустимо для спецподразделений быстрого реагирования, боевые операции которых длятся порой считанные секунды. Наиболее целесообразна концепция «защиты выше пояса», когда защищен торс человека (площадь торса взрослого человека в среднем составляет 43 дм²) и голова. Важнейшей характеристикой БО является масса (для бронешлемов) и поверхностная плотность брони (масса квадратного метра, кг/м²), толщина БО, критическая величина для бронежилетов скрытого ношения, комфорт при ношении (подгонка по фигуре, возможность вентиляции, длительность непрерывного ношения).

Таблица 3.1. Классификация бронеодежды по стойкости и воздействию средств поражения (ГОСТ Р 50744-95) [6]

| Класс защиты* | Средства поражения | Характеристики поражающего элемента | | | |
|---------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------|---------------|
| | | Калибр, мм | Тип сердечника | Масса, г | Скорость, м/с |
| 1 | ПМ наган | 9,00 | Стальной | 5,9 | 290–315 |
| | | 7,62 | Свинцовый | 6,8 | 265–285 |
| 2 | ПСМ ТТ | 5,45 | Стальной | 2,5 | 310–325 |
| | | 7,62 | Стальной | 5,5 | 415–445 |
| 3 | АК-74 АКМ | 5,45 | Стальной | 3,4 | 870–890 |
| | | 7,62 | Стальной | 7,9 | 710–725 |
| 4 | АК-74 СВД | 5,45 | Стальной термо- упрочненный | 3,4 | 870–890 |
| | | 7,62 | Стальной | 9,6 | 820–835 |
| 5 | АКМ | 7,62 | Стальной термо- упрочненный | 7,9 | 710–725 |
| 6 | СВД | 7,62 | Стальной термо- упрочненный | 9,6 | 820–835 |

* Кроме классов 1–6, специальный класс защиты от холодного оружия с энергией удара 45–50 Дж.

2. «Баллистические» показатели, рекомендуемые стандартами США [8–10]:

а) Стандарт министерства юстиций США (*N.I.J. Standard – 01.01.03 US Department of Justice*).

Критериями, определяющими эффективность брони, являются: число слоев брони, обеспечивающих защиту от поражения индентором; глубина проникновения индентора в подложку из глины (глина *ROMA N1*, нагретая до температуры, при которой глубина отпечатка индентора с полусферической головкой диаметром 45 мм, массой 1 кг, сброшенного с высоты 1 м, составляет 25 ± 3 мм), на которую закреплен образец брони (предельно допустимое проникновение индентора, глубина отпечатка 45 мм);

б) Военный стандарт (*Military specification MIL-P-46593A (ORD)*). Для испытаний используют образцы в виде дисков диаметром 30,5 см, толщиной 2 см, индентор — пули калибра 22, диаметр 9 мм, масса 8 г, скорость полета 610 м/с.

Критериями, определяющими эффективность брони являются:

- *AD (the areal density of the fiber)* — масса волокон в 1 м^2 полимерной брони;
- *ADT (the areal density of the target)* — масса 1 м^2 брони;
- V_{50} — 50 %-ная задержка броней стальных пуль и фрагментов (осколков) массой 0,39 г;
- *SEA (Specific Energy Absorption, the ratio of projectile kinetic energy at V50 to AD)* — относительная (специфическая) энергия, адсорбированная (поглощенная) мишенью после воздействия пули с кинетической энергией от энергии, вызывающей задержку броней 50% пуль, до энергии, поглощенной волокнами в составе брони (энергия, поглощенная волокнами);
- *SEAT (Specific Energy Absorption of the Target, the ratio of projectile kinetic energy at V50 to AD)* — относительная энергия, поглощенная мишенью, после воздействия пули с кинетической энергией от вызывающей задержку броней 50% пуль до энергии, поглощенной всем материалом брони (энергия, поглощенная броней);

в) *MIL Standard 6620 V₅₀ Testing* (образцы соответствуют *MIL-P-46593A*).

Критерием, определяющим эффективность брони, являются баллистический предел V_{50} скорости пули, при которой 50% попаданий пуль в мишень соответствует полному пробитию (пенетрации) материала брони. Полная пенетрация брони определяется по отпечатку на алюминиевой пластине толщиной 0,5 мм, установленной на расстоянии 15, 24 см за преградой. Баллистический предел скорости подсчитывается как среднее от наименьшей и наибольшей скоростей пенетрации (измерение характеризуется большим разбросом значений и требует многочисленных испытаний).

Фирма *Boeing* проводит испытания материалов, используя *Boeing Materials Specification BMS 8-219B*.

В мировой практике наибольшее количество исследований и тестов СИБ проводятся на мастичных подложках, моделирующих тело человека. В требованиях зарубежных методик четко указывается тип подкладного материала, величина максимально допустимой его деформации, что ставит БО разных производителей в одинаковые условия при испытаниях.

3. «Баллистическая» эффективность (БЭ), коэффициент сопротивления (КС).

В методе «отпечатка» *DOT (dept of penetration)* [1] броневая пластина размером $25,4 \times 25,4$ мм приклеивается на толстую плиту и после испытаний определяется глубина деформации передней поверхности стальной плиты как функция толщины брони и скорости удара.

Коэффициент сопротивления определяется по формуле

$$КС = (X - P)/t,$$

где X — глубина деформации поверхности подложки (алюминиевый сплав 6061-T6 или сталь); P — глубина деформации поверхности подложки, защищенной броней; t — толщина брони.

Баллистическая эффективность (БЭ) определяется как

$$БЭ = КС (\rho_n \rho_0),$$

где ρ_n — плотность материала подложки (Al, сталь); ρ_0 — плотность материала брони.

4. Функционал предельной работоспособности материалов, используемых для защиты от высокоскоростного инденторного внедрения в условиях интенсивного механического воздействия.

Для прогнозирования надежности и оптимизации физико-химической структуры полимерных материалов (в частности, полимерных волокон и текстильных форм из них, ВПКМ на основе термопластичных и термореактивных матриц) с позиций оценки их работоспособности в составе изделий динамического назначения (например, в средствах защиты от инденторных воздействий, мягкой защитной одежды, жестких защитных бронееlementов, защитного оптически прозрачного остекления конструкций и сооружений, оболочках, пластинах и др.), эксплуатируемых в условиях высокоскоростных механических нагрузок (скорость деформирования $\epsilon^* = 10 - 10^4 \text{ c}^{-1}$, время действия $0,1 - 0,0001 \text{ с}$, кратность воздействия — до 500 000, нагрузки от 30 до 100% от σ^* , перегрузки — до 30 000g) необходим анализ закономерностей изменения упругопрочностных свойств материалов при переходе от статических (ϵ^* около 10^{-3} c^{-1}) к динамическим ($\epsilon^* 10^2 - 10^3 \text{ c}^{-1}$) скоростям нагружения, контроль реальных волновых процессов, оптимизация соотношений силовых и энергетических характеристик материалов.

Функционал — критерий оценки механического поведения тканых волоконных систем, термореактивных и термопластичных органопластиков, численный расчет динамических значений которого проводится с использованием экспериментальных данных (реально-достижимая ϵ_A и предельная деформация ϵ_B , %; реально-достижимая σ_A и предельная прочность σ_B , ГПа; реальный A_A и предельный уровень A_B энергоемкости разрушения, Дж; время t_A достижения экстремума параметра скорости поглощения энергии; параметр скорости поглощения энергии внешнего воздействия, Дж/с; параметр интенсивности поглощения энергии, $W = d^2A/dt^2$, Дж/с²), получаемых на комплексе испытательных установок (например, установках для высокоскоростных испытаний при различных видах нагрузок — сжатие, растяжение, срез и т. д.).

Энергосиловая оценка работоспособности материалов при динамических нагрузках параметрами dA/dt , A_A , σ_A , анализ диаграмм оценки предельных свойств материалов $A = \Phi[\sigma(N)]$, где Φ — функционал предельной работоспособности материала в условиях интенсивного механического воздействия внешней нагрузки, позволяет оптимизировать структуру защитного материала с требуемым соотношением его силовых (σ) и энергетических (A) характеристик [11–14].

3.2. Полимерные текстильные (тканые) броневые материалы

В полимерных текстильных материалах, обеспечивающих защиту от высокоскоростного инденторного воздействия («мягкая» броня) используют многослойные пакеты из тканей (и войлоков) с определенным плетением волокон (текстурой). Наиболее эффективны ткани из волокон со специфической фибриллярной структурой, образующейся на стадии вытяжки из растворов, расплавов, гелей, волокнообразующих полимеров при оптимальной степени вытяжки.

Наибольшее применение в качестве компонентов материалов «мягкой» брони получили волокна из ароматических полиамидов СВМ, Армос, Русар (Россия), *Kevlar (Du Pont, США)*, *Twaron (Enka, Нидерланды)* и волокна из СВМПЭ *Spectra (Allied Fibers, США)*, *DYNEEMA (DSM, Нидерланды)*.

Для многих полимеров в ориентированном состоянии характерна фибриллярная структура с чередованием аморфных и кристаллических участков с периодичностью порядка единиц десятков нм. При вытягивании многих видов волокон наблюдается изменение характера зависимости свойств волокна от кратности вытягивания, что связано с изменением механизма

ориентации, разворотом кристаллитов, перестройкой аморфных областей, формированием фибриллярных структур.

Наличие фибриллярной структуры (фибриллы в волокнах *Kevlar* — стержни из палочкообразных кристаллов диаметром около 50 нм, в волокнах из СВМПЭ — шпик-кебабной структуры длиной 50–70 нм, длина фибрилл — функция молекулярной массы полимера) является одним из проявлений анизотропии энергетических характеристик волокнообразующих полимеров. Межфибриллярные прослойки в волокнах из гибкоцепных полимеров (например, из СВМПЭ) имеют большое число цепей, проходящих из одной фибриллы в другую в поперечном направлении. Высокая жесткость макромолекул ароматических полиамидов затрудняет межфибриллярный переход цепей, следствием чего является продольная расщепляемость микрофибрилл со значительной затратой энергии на преодоление межмолекулярного взаимодействия.

Удержание высокоскоростного удара полимерными волокнами с фибриллярной структурой обеспечивается комплексным механизмом торможения роста трещин:

1) созданием барьеров на пути трещины — фибриллярное расщепление волокон на плоскости с минимальной поверхностной энергией; участием межфибриллярного взаимодействия в перераспределении механических напряжений между структурными элементами волокна и межфазной областью; ветвлением трещин преимущественно в аксиальном направлении, в результате чего поверхность разрушения волокон в сотни раз превосходит площадь их поперечного сечения; участием межфазной области в перераспределении и релаксации напряжений;

2) затуплением вершины трещины вследствие многостадийного протекания релаксационных процессов; демпфированием и релаксацией напряжений при создании растущей трещины с поверхностью из-за низкого E_{\perp} волокон;

3) низкой чувствительностью волокон к концентраторам напряжений;

4) сильной фибрилляцией с отщеплением микрофибрилл с поверхности волокон при увеличении деформации, накоплением дефектов.

Обмен энергией между двумя системами трещин выражается в том, что при предельном расщеплении и проскальзывании структурных элементов волокна относительно друг друга, волокно частично выполняет функцию матрицы вплоть до момента разрыва фибрилл отдельного филамента. Множественность актов разрушения фиксируется акустической эмиссией, уровень которой более чем в 3 раза выше, чем при разрушении углеродных волокон.

Разрушение волокон практически при всех видах механического нагружения обязательно проходит через стадию межфибриллярного расщепления волокна с последующим обрывом отдельных продольно расположенных структурных элементов.

При разрушении волокон *Kevlar 49* выделяется вдвое больше энергии, чем при разрушении хрупких волокон. Три четверти этой энергии расходуется на создание развитой поверхности разрушения и деформацию расщепленных волокон. Процесс разрушения высокопрочных арамидных волокон можно классифицировать как обширное аксиальное расщепление, в котором при статическом нагружении длина трещин примерно в 70 раз превышает диаметр волокна, а в случае усталостного нагружения волокна знакопеременными нагрузками длина трещин примерно в 485 раз превышает диаметр волокна (в 7 раз больше). Такой характер разрушения волокна обуславливает многие важные эксплуатационные свойства, в том числе высокую стойкость к ударному и усталостному нагружению. При импульсном высокоскоростном растяжении для филаментов СВМ, Армос, *Twaron* характерно одноэтапное разрушение, для филаментов Русар — трехэтапное, что резко повышает стойкость изделий на основе Русар-С, Русар НТ к пенетрации. Использование в качестве критерия защитных свойств тканых материалов функционала (см. раздел 3.1, пункт 4) позволяет провести количественную оценку влияния структурных (структура волокон, нитей, параметры плетения) и технологических факторов на динамические свойства полимерных материалов, используемых для защиты от высокоскоростного инденторного внедрения. Так, соотношение $\sigma_A/\sigma_B = 0,4-0,6$, характерное для трехэтапного разрушения нитей Русар-С, -НТ, определяет повышенную устойчивость тка-

ной брони на их основе к инденторному воздействию (для нитей СВМ, Армос, *Twaron* $\sigma_A/\sigma_B = 0,9-1,0$) [11–14].

Корреляция между прочностью однотипных пакетов из тканей при статических (ϵ^* около 10^{-3} с^{-1}) и динамических (ϵ^* 10^2-10^4 с^{-1}) нагрузках отсутствует.

Исследования, проведенные на образцах «мягкой» (тканевой) брони из тканей ТСВМ (арт. ДЖ-56319) саржевого переплетения, ткани из волокон *Twaron* (фирма *Akzo Nobel*), ткани *Twaros* (полотно из нитей *Twaron* 93 текс), изготовленных на основе волокон подшлифованных, отмытых и гидрофобизированных, показали сложность и многофакторность стойкости «мягкой» брони, которая повышается при увеличении энергоемкости тканевого материала (его прочности и деформируемости). Стойкость брони определяет комплекс свойств (деформируемый объем, его форма, поля нагружений–деформаций, коэффициенты внешнего трения, количество адсорбированной влаги, частота и амплитуда колебаний динамического нагружения, скорости распространения обратимой и необратимой деформаций) и особенно текстуру ткани. Так, искривленность нитей в ткани *Twaros* полотняного плетения по сравнению с тканью ТСВМ (саржа) с учетом зазора между нитями, зависящего от степени натяжения утка и основы, в 1,25 раза выше [15].

Важным свойством арамидных нитей (как и многих других волокнистых конструкций) является дискретность их структуры. Каждая нить состоит из множества моноволокон (филаментов). Например, в нити СВМ линейной плотностью 29,4 текс таких филаментов 200. Дискретность структуры определяет высокую стойкость нитей к изгибным напряжениям.

Малый диаметр моноволокон позволяет нитям выдерживать значительные изгибные напряжения без разрушения. В современной бронеодежде используются ткани полотняного, саржевого, сатинового (атлас) переплетения из нитей с линейной плотностью от 14 до 110 текс. Толщина тканых бронепакетов колеблется от 6–7 мм (1 класс защиты) до 18–20 мм (2 класс – предел текстильной брони).

Разработка тканых структур для «мягкой» брони в связи со сложностью процессов, имеющих место при динамических скоростях нагружения и интерпретации результатов испытаний, ориентируется во многом на результаты экспериментальных испытаний, которые позволяют сформулировать некоторые рекомендации:

1) эффективны пакеты из слоев тканей различного типа. Верхние слои первыми принимают на себя высокоскоростной удар и должны обеспечить максимальный отбор энергии индентора. Нижние слои не должны подвергаться пенетрации и минимизировать травмирование организма человека;

2) лицевые слои пакетов пробиваются по механизму «раздавливания», для которых необходимы ткани со структурой, которая эффективно преобразует локальное воздействие индентора в распределенный по объему конус деформации, в котором нити работают, в основном, на растяжение;

3) лицевые «жертвенные» и тыльные слои многослойного текстильного бронепакета целесообразно изготавливать из плотных тканей; толщина тканей средних слоев и количество переплетений на единицу длины нитей утка и основы должны быть меньше, чем у лицевых и тыльных слоев.

Для оценки прогиба W тканевого бронепакета предложено несколько полуэмпирических зависимостей, например [2]:

$$W = k \frac{mV^{1/3}}{E^{1/6} \rho^{5/6} n_1 n_2 d}.$$

где m – масса пули; V – скорость пули; E – модуль упругости нити; n_1 – количество нитей под пулей; n_2 – количество слоев ткани; d – диаметр нити; k – эмпирический коэффициент (для пуль АПС, пистолета Макарова $k = 1,5-2$).

Материалы для бронеодежды в своем совершенствовании с точки зрения использованных волокон для изготовления «мягкой» брони прошли следующие стадии: *Nylon 6* → *Nomex* →

→ *Kevlar 29* → *Kevlar 129*, *Twaron* → *Kevalar 49*; в России — СВМ, Армос, Русар. Конкурентами волокнам *Kevlar* для бронеодежды являются волокна на основе СВМПЭ *Spectra*, *Dyneema*, волокнам СВМ — Русар С, НТ.

Листы из тканей определенной текстуры, например, саржа 2/2 на основе нитей (д. текс) *Kevlar T963* (3300), *T964* (1100, 1670), для брони военной техники, *Kevalar H_c* (100), *T964F* (1000, 1670), для бронежилетов, *Kevalar H_t* (129), *T964C* (840, 930, 1000), *T965C* (1580), для брони военной техники, *Kevalar 49T965* (215, 420, 1270, 1580, 2400) для бронежилетов. Ткани из волокон *Spectra*, *Dyneema*, *Twaron* обеспечивают в 2 раза более эффективную защиту по сравнению с использованием тканей из волокон найлон-6 при равной массе и равную защиту при массе бронежилета, меньшей в 2 раза. «Мягкая» броня из волокон этих типов в 3 раза легче брони на основе тканей из стеклянных волокон.

Бронежилеты из семи слоев ткани (равнопрочная, полотно) из нитей *Kevlar 29* (111 текс, 31 нить/см) в 5–7 раз легче бронежилетов со стальными бронеэлементами.

Прочность и модуль упругости волокон *Kevalar 129* несколько выше прочности и модуля упругости волокон *Kevalar 29* (соответственно 2,92 и 3,2 ГПа, 69–77 и 75–98 ГПа), что обеспечивает более эффективное поглощение энергии высокоскоростного удара. Бронежилеты из *Kevalar 129* на 10–15% легче и 20–25% тоньше бронежилетов из *Kevalar 29* при одинаковых защитных от высокоскоростного удара свойствах.

Защитные свойства от пуль 9,6 мм касок и бронежилетов с волокнами *Kevalar 49* соответственно на 25 и 50% выше, чем с волокнами *Kevalar 29*.

Свойства бронежилетов из тканей с волокнами *Twaron*, *Twaron microfilament* (в нитях 1000 филаментов меньшего диаметра, в *Twaron-750*) и волокнами *Kevalar 29*, *129* аналогичны.

Легкие и гибкие бронежилеты противопулевой и противоосколочной защиты *Kevalar Comfort*, защищают также от ножевых ударов и проколов, смягчает травмы, бронежилеты *Kevalar Comfort* (артикул 310), *Comfort AS* (артикул 288) — от ножевых ударов с энергией до 65 Дж), *Comfort* (артикул 270), *Kevalar Correctional* — от удара шилом (бронежилеты для тюремной охраны), *KR 42* — от ножевых ударов с энергией до 65 Дж. Противопулевые бронежилеты разработаны на основе волокон *Kevalar HTB-Comfort* (артикул 300) с использованием однослойных АТ-1 и многослойных АТ-2, в том числе женских бронежилетов, АТ-3 бронепакетов, *Comfort A* (артикул 708). Броня *Kevalar Comfort* легче на 15% брони на основе *Kevalar 129H_t* и на 30% легче брони из *Kevalar 29*, соответственно эффективнее (показатель V_{50}) на 10 и 35%, устойчивее к продавливанию на 27 и 75%.

Броня класса *NIJ 0101.03 Level PA* (1998 г.) на основе *Kevalar Comfort* на 13% тоньше брони на основе *Kevalar H_t* и на 18% тоньше брони на основе однонаправленной ткани из волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (соответственно 5,2; 5,9 и 6,25 мм) [16, 17].

Сравнение брони *Kevalar Comfort* с броней из непропитанных связующими однонаправленных тканей из волокон СВМПЭ (более эффективна структура [0/90]) вряд ли корректно [8–9]. V_{50} , *SEA*, *SEAT* для брони из тканей структуры [0/90] и [0] соответственно 582; 41,5; 31,5 и 308; 12,7; 9,2, да и расчетные значения энергии, поглощенной волокнами из СВМПЭ *Spectra*, существенно выше энергии, поглощаемой волокнами *Kevalar 29* (табл. 3.2). Броневые материалы из волокон *Spectra* на 30–40% легче броневых материалов на основе *Kevalar 29*.

В России средства индивидуальной защиты (бронежилеты, защитные шлемы, щиты, костюмы) производят ряд предприятий (НИИ стали, институт спецтехники МВД «Трансмаш», ОАО «Армоком» и другие), используя ткани из волокон СВМ, Армос, Русар (табл. 3.3 и 3.4).

В НИИ спецтехники МВД разработаны модификации бронежилетов: «Консул», «Атлас» (с биостимулятором, который подает слабый электроразряд на мышцы спины), «Кора-2» (армейский жилет с мощной защитой спины и груди от автоматной пули; полимерно-керамический).

В ОАО «Армоком» при ЦНИИСМ разработано и производится более 30 типов защитных средств (К.З. — классы защиты): бронежилеты скрытного ношения СК-Л (класс защиты

Таблица 3.2. Расчетные значения энергетических показателей высокомодульных полимерных волокон при воздействии на них высокоскоростного удара [10]

| Характеристики | Волокна <i>Spectra 1000*</i> | Волокна <i>Kevlar 29</i> |
|--|------------------------------|--------------------------|
| Плотность, ρ , г/см ³ | 0,98 | 1,44 |
| Текстильный модуль E_t , г/денье (Н·м/кг·10 ⁸) | 1,650 (1,455) | 500 (0,441) |
| Поглощенная энергия, приходящаяся на единицу длины волокна W , Дж/м·денье | 0,0067 | 0,0033 |
| Скорость волны напряжения при ударе C , м/с | 12,3 | 6,75 |
| Максимальная поглощенная энергия $R = W \cdot C$, Дж/с; $C = (E/p)^{0,5} = E^{0,5}_t$ | 82 | 22 |

* СВМПЭ *ECPE (extended chain polyethylene)*.

Таблица 3.3. Бронежилеты производства НИИ стали [19]

| Тип жилета ¹ | Масса, кг | Площадь защиты, дм ² | | Средства воздействия и предельные значения скоростей, м/с | | | | | |
|-------------------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|---|---|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | Общая (тканевый пакет) | Усиленная броневыми элементами | 9,0 мм, пуля ПСТ пистолета ПМ | 9,0 мм, пуля <i>Parabellum</i> с мягким сердечником | 7,62, мм пуля ПСТ пистолета ТТ | 7,62, мм пуля ПС-43 автомата АКМ | 5,45, мм пуля 7Н6 автомата АК-74 | 5,56, мм пули <i>SS109</i> и <i>M193</i> винтовки <i>M16</i> |
| Жилет предствительский | 1,3 | 5 | — | 311 | 304 | — | — | — | — |
| | 3,4 | 35 | 15 | 311 | 390 | 437 | — | — | — |
| | 2,6 | 49 | — | 311 | 340 | — | — | — | — |
| Жилет БЖСН | 7,8 | 49 | 28 | 311 | 390 | 437 | — | — | — |
| | 9,7 | 49 | 28 | 311 | 390 | 437 | 705 ²⁾ | 890 ²⁾ | 830 |
| | 4,9 | 74 | — | 311 | 340 | — | — | — | — |
| Комплект БЖК | 11,3 | 74 | 28 | 311 | 390 | 437 | — | — | — |
| | 13,0 | 74 | 28 | 311 | 390 | 437 | 705 ²⁾ | 800 ²⁾ | 830 |

¹ Цена зарубежных аналогов 500–2000 долл (2006 г.).

² Супергибридная броня защищает от пуль, выпущенных в упор из автомата Калашникова. Полимерную броню комбинируют с титаном, сталью, керамикой (карбид кремния, бора и др.), наклеивая пластины из этих материалов на полимерную броню [19].

Таблица 3.4. Защитные шлемы производства НИИ стали [19]

| Тип | Масса, кг | Толщина оболочки, мм | Средства воздействия и предельные значения скоростей, м/с | | | |
|--------------------|-----------|----------------------|---|----------------------------|---------------------|---------------------|
| | | | 9,0 мм, пуля пистолета ПМ | 7,62 мм, пуля пистолета ТТ | 7,62 мм, пуля АК-47 | 5,45 мм, пуля АК-74 |
| Тканево-полимерный | 1,1 | 9 | 315 | — | — | — |
| Тканево-титановый | 1,4 | 1,6 | 315 | — | — | — |
| | 2,1 | 2,1 | 315 | 440 | — | — |
| | 2,5 | * | 315 | 440 | 715 | 900 |

* Супергибридная броня, усиление керамическими или стальными пластинами.

Организовано производство нескольких типов шлемов (каска): стальные шлемы (каска) СП 68 (масса 1,5 кг, защищают от осколков, летящих со скоростью менее 250 м/с); 6Б14 (2000 г.) — с полимерным вкладышем; 6Б26 (0,95 кг, 2006 г.); 6Б27 (1,2 кг, 650 м/с, защита от осколков, 2006 г.); 6Б6-3 (титановый, 3,5 кг, класс 2); шлемы из алюминия (изготавливает фирма «КлаСС», Россия); Тканево-полимерные 6Б7 (1,5 кг, 1990 г.); стоимость касок клееных из *Kevlar*, СВМ, Русар — 250 долл, со слоями из полиэтиленовых пленок — 400 долл США (2007 г.); шлемы по технологии ДТМ (дискретный тканевый материал, Армаком, 2 класс, около 2 кг, 1000 долл США).

К.З.-1), СК-А, СК-П (К.З.-1, 2), СК-Т (К.З.-1, 2, 5), СК-Н (К.З.-1, 2, 3, 5), СК-Б (К.З.-1, 2, 3, 5, 6) с площадью защиты от 8 до 53 дм², массой 1,4–13,4 кг; бронежилеты наружного ношения СК-Р (К.З.-1), СК-Д (К.З.-2, 3, 5), СК-И (К.З.-1, 2, 3, 5), СК-СП, СК-БР (К.З.-1, 2, 3, 5, 6) с площадью защиты 15–63 дм², массой 3,1–16,1 кг; бронешлемы СКАТ, СКИФ (К.З.-1, 2); другие специальные средства — защитные комплексы 6Б15, 6Б25, защитные шлемы 6Б7-1М (дискретно-тканевые на основе микрофиламентных нитей), ЛШЗ-2ДТ, СКАТ-2ДТ (V50 до 800 м/с, в 1,5 раза легче металлоарамидных). Тканевая броня на основе микрофиламентных нитей Русар имеет лучшие на 20–25% показатели противоосколочной стойкости (на 30% пулевых ранений приходится 70% осколочных). Уменьшение числа круток нити на 1 м со 100 до 50 приводит к увеличению противоосколочной стойкости на 10–15%. При воздействии поражающего элемента на ткань саржевого переплетения нити основы и утка одновременно подключаются к противодействию пуле (осколку). Многослойные дискретно-тканевые бронепакеты (слои соединены с нахлестом, «рыбья чешуя») обеспечивают разворот пули до 90° и остановку ее в первых слоях материала [18, 24].

Бронежилеты (в том числе детские) обеспечивают защиту с 5 м от пуль ТТ, РСМ, ПМ.

Защитные тканевые костюмы с бронезементами и навесными бронепластинами (типа Грот-3В) защищают от осколков при взрыве небольшой мощности, например, ручной гранаты, при разминировании.

Использование полиарамидных волокон Русар С, НТ (в тканях Русар № 295, волокна Русар НТ термовытянутые, линейная плотность 28–58 текс, Русар № 395, волокна Русар С термовытянутые, № 392, № 399 производства НПО «Термотекс») в изделиях защиты от высокоскоростных индентерных внедрений типовых индентеров (по ГОСТ Р50744-95) снижает массу элементов мягкой защиты на 50–100% по сравнению с массой брони, использующей волокна *Kevlar*. Использование тканей арт. 11939 (саржа), 11943 (вафля) повышает характеристики защитных изделий на 20–40% [11–15].

Недостатком защитных материалов на основе полиарамидных волокон является их высокая влагоемкость, снижающая защитные свойства бронежилетов (частично снижается при использовании гидрофиброзированных волокон).

Полимерная броня из непропитанных полимерными связующими тканями с определенным плетением волокон применяется в качестве защиты от высокоскоростных ударных нагрузок конструкций вертолетов, самолетов, ГТД (защита конструкций при разрушении раздельных колец турбинных лопаток). Так, кольцевой экран толщиной 38 мм, сформированный из 75–100 слоев тканей из полиарамидных волокон, задерживает осколки разрушенного колеса с частотой вращения 6000 об/мин из ванадий-никель-хромового сплава.

К преимуществам текстильной брони, при сравнении ее с другими защитными структурами 1–2 класса защиты, следует отнести меньший вес и больший комфорт при эксплуатации изделия. Толщина тканых бронепакетов разных фирм-производителей колеблется от 6–7 мм для 1 класса защиты, до 18–20 мм — для 2-го. В составе защитных структур могут применяться демпферы различных конструкций для уменьшения травмирования организма человека.

3.3. Полимерные композиционные броневые материалы

При разработке материалов, эффективных в качестве защитных от высокоскоростных инденторных воздействий, анализ свойств полимерных композиционных материалов с полимерными волокнами, в том числе непрерывными, и тканями из них в качестве наполнителей (ВПКМ, органоволокниты и органотекстолиты на основе терморезистивных или термопластичных связующих, органопластики, Органиты), характеризующих их поведение при статических и динамических нагрузках со скоростью деформирования при ударе $\epsilon^* = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (разрушающие напряжения, трещиностойкость, коэффициенты концентрации напряжений, энергоемкость разрушения при ударе и др.), являются лишь первым шагом к оптимизации состава и структуры материалов с требуемой динамической работоспособностью при $\epsilon^* = 10^2\text{--}10^4 \text{ с}^{-1}$.

Использование ВПКМ различного состава и структуры в качестве броневых материалов имеет ряд особенностей. Пенетрации высокоскоростного индентора в многослойные пакеты из тканей препятствуют волокна, деформирующиеся с растяжением и сжатием и поглощающие энергию удара при разрушении.

Деформации волокнистой фазы ВПКМ, зафиксированной в материале отвержденным, застеклованным связующим, ограничены, что приводит к определенному снижению показателей защитных свойств ВПКМ при воздействии высокоскоростного индентора по сравнению с показателями многослойных тканевых пакетов из волокон *Kevlar*, СВМ, Русар. В то же время легкая формуемость полимерных композиций позволяет:

- 1) изготавливать защитные изделия с дискретными волокнами сложных фиксированных форм (бронешлемы, бронекаски и др.);
- 2) использовать ВПКМ с непрерывными волокнами и тканями в качестве наполнителей для бронезащиты от пенетрации инденторами короткоствольного стрелкового оружия, осколков или бронирования транспортных средств;
- 3) использовать в качестве жестких подложек в различных типах полимер-полимерной, полимер-керамической, полимер-металлической брони.

Для изготовления конструкций, предназначенных для однократного удержания высокоскоростного удара используются органо- и стеклопластики на основе «хрупких» полимерных матриц с высокой энергией разрушения. При высокоскоростном ударном воздействии накопление дефектов в ВПКМ сначала идет отдельно в матрице и волокнах (в матрице и стеклянных волокнах — хаотичная система трещин, в полимерных волокнах накапливаются аксиальные трещины с локальным обрывом фибрилл).

Разрушение полимерных волокон (*Kevlar*, СВМ, Русар, СВМПЭ) при растяжении происходит по межфибрилярному механизму с выровом участков микрофибрилл. При увеличении деформации происходит сильная фибрилляция с отщиплением микрофибрилл с поверхности волокон.

3.3.1. Броневые материалы на основе ВПКМ с полиарамидными волокнами

Эффективность броневых материалов на основе эпоксидных и полиэфирных связующих и полиарамидных волокон определяется высокими показателями энергии, поглощенной волокнами при высокоскоростном воздействии (табл. 3.2), высокими показателями вязкости разрушения и другими показателями, характеризующих их поведение при высокоскоростном динамическом нагружении (рис. 3.1, 3.2).

Для изготовления армейских касок и защитных жилетов в США используют органопластики на основе матов из коротких волокон (*Kevlar 29,970*, длина 6,35 или 50,8 мм и *Kevlar 49,966*, длина 12,7 мм) [7]:

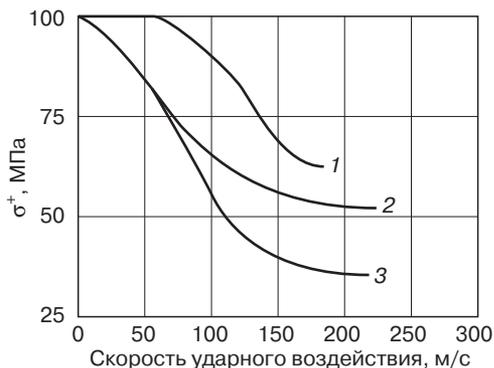


Рис. 3.1. Зависимость остаточной прочности σ^+ волоконитов структуры [0,90] от скорости ударного воздействия [20]:

1 — эпоксидный волоконит на основе волокон *Kevlar 49* (K_{lc} 17,7 МПа/м^{0,5}, для однонаправленного — 26,4 МПа/м^{0,5}); 2 — эпоксидный углекевлароволоконит (22 %об. *Kevlar 49*, 78 %об. углеродных волокон *T300*, K_{lc} 14 МПа/м^{0,5}); 3 — эпоксидный углеволоконит (55 %об. *T300*, K_{lc} однонаправленно — 12,1 МПа/м^{0,5})

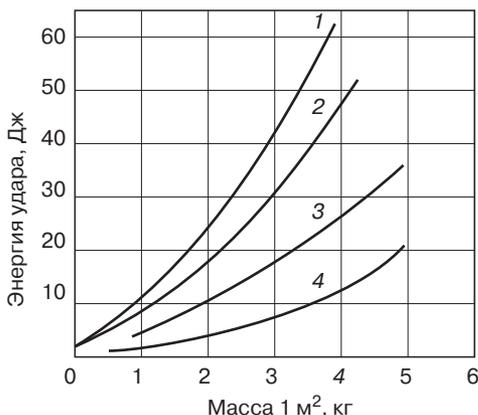


Рис. 3.2. Зависимость энергии ударного проникающего воздействия, вызывающего пенетрацию материала от весовых характеристик (массы 1 м² полимерной брони) и состава эпоксидных пресованных структур [0,90] волоконитов [20]:

1 — органопластик (волокна *Kevlar 29*, *Nomex*, Фенилон); 2 — органопластик (волокна *Kevlar 49*, СВМ, Русар); 3 — органоуглепластик (33 %об. волокон *Kevlar 49*, 67% углеродных волокон *T300*); 4 — углепластик (волокна *T300*)

| Волокно | Число круток на 1 м | Длина, мм |
|--|---------------------|-----------|
| <i>Kevlar</i> 29 тип 970 ¹⁾ | 390–546 | 6,356,35 |
| <i>Kevlar</i> 29 тип 970 ¹⁾ | 390–546 | 50,8 |
| <i>Kevlar</i> 49 тип 966 | 0 | 12,7 |

¹⁾ Аппрет не сообщается. Связующее-иономер-сополимер этилена и метакриловой кислоты, с координационными связями, образованными ионами Na или Zn.

Применяемые в качестве брони органопластики (ОП) в отличие от металлов характеризуются высокой стойкостью к средствам поражения и отсутствием вторичного разрушения, т. е. исключается возможность образования осколков с внутренней стороны стенки конструкции. На вертолете *UH-60A* из ОП на основе волокон *Kevlar* 49 изготовлены конструкции кабины экипажа, обшивки, приборная доска, противобликовый щиток и пульт управления, благодаря чему пилот защищен от действия осколков фугаснозажигательных снарядов 23-мм калибра и исключена возможность образования вторичных осколков при поражении конструкции этими снарядами. Применение для бронирования вертолета вместо толстых стальных плит ОП или комбинированных материалов с сочетанием ОП и матов из стекловолокна позволило не только обеспечить надежную защиту пассажиров от взрывов гранат и поражения пулями среднего калибра, но и снизить массу бронезащиты с 1315 до 362 кг [21].

Вертолет *UH-60A* фирмы *Sykorsky Aircraft* способен продолжать полет в течение 30 мин после попадания пули 7,62 мм с расстояния 100 м в любом направлении в нижней полусфере под углом $\pm 15^\circ$.

Для повышения боевой живучести самолетов и вертолетов фирмой *Norton Co.* разработано бронекресло (комбинированная броня с использованием пластин из карбида бора) с противоударным устройством для вертолета *UH-60A Black Hawk*, снижающее вероятность разрушения кресла при ударе вертолета о землю.

Для получения толстых (13–51 мм) полимерных бронирующих материалов, используемых в конструкциях бронетанковой техники и других видов вооружений, используют препреги плетеной структуры (с волокнами из стекла *S2* показатели на 12–33% выше, чем с волокнами из стекла *E*) с полиэфирными (лучшие показатели на основе диаллилфталата), эпоксидными, бесстирольными винилэфирными связующими, испытания (плоские образцы толщиной 36–48 мм) при ударе цилиндрическими имитаторами осколков диаметром 20 мм подтвердили их хорошие защитные свойства. Толстая броня боевых машин формируется из ОП на основе арамидных волокон с использованием СВЧ нагрева (сокращение цикла с 16–20 ч до 2 ч). Кевларопластики эффективны как демпфирующие материалы, способные поглощать при полете вибрацию и шум, устойчивы к ударным нагрузкам в случае разрушения колеса вентилятора или отрыва лопаток компрессора ГТД.

3.3.2. Броневые материалы на основе ВПКМ с волокнами из СВМПЭ

Конкурентами броневых ВПКМ на основе волокон *Kevlar* являются ВПКМ с волокнами из сверхвысокомолекулярного полиэтилена СВМПЭ *Spectra* (середина 1980-х гг., фирма *Allied Fiber*, США), и *Dyneema* (1990 г., фирма *DSM*, Нидерланды) [25]. Органопластики на основе волокон *Spectra* 900, 1000, *Dyneema* SK-60 имеют высокие показатели упругопрочностных (особенно удельных, при ρ 1,02 г/см³) свойств как при статическом, так и при динамическом нагружении [7–10].

Трещиностойкость эпоксидных органопластиков с волокнами из СВМПЭ (связующее *Epon* 826 типа ЭД-20, температура отверждения 120 °С (3 ч), 150 °С 24 ч) (взаимодействие матрица–ПЭ-волокна повышают использованием ~3 %масс. сополимера из этилена и акриловой кислоты, 5,5% моль; плазменное травление повышает $\sigma_{\text{Ад}}$ ПЭ-волокон к эпоксидному

связующему с 5 до 49 МПа) в 3 раза выше трещиностойкости эпоксидных стеклопластиков, в 3,5 раза выше трещиностойкости эпоксидных однонаправленных углеволоконитов, в 2 раза выше трещиностойкости алюминия. Удельная энергия, поглощенная при ударе, составляет 24,5 Дж·м²/г; 110 кДж/кг, энергия разрушения составляет для однонаправленных волоконитов 16,3 Дж·м²/г, для ортотропных ВПКМ-11,3 Дж·м²/г [25].

Трещиностойкость органопластика с волокнами *Dyneema SK-60* (с трещиной длиной 80 мм) — 300–400 Дж/м², с трещиной длиной 240 мм — 620–775 Дж/м² (G_{ic} органопластика с волокнами *Dyneema* без обработки поверхности — 140 Дж/м², волокнами после плазменной обработки — 230 Дж/м²).

Для органопластиков (содержание волокон 65–70 %об.), предназначенных для работы в условиях высокоскоростного ударного воздействия (табл. 3.5) в качестве наполнителей используют волокна *Spectra 1000* (пряжа А650 из 118 филаментов с E^+ 1650 г/день, σ^+ 36 г/день) и *Spectra 900* (пряжа А1200 из 118 филаментов с E^+ 1100 г/день, σ^+ 30 г/день). Из гибких пластин однонаправленных препрегов, сформированных намоткой на оправку диаметром 30,5 см, изготавливают полуфабрикаты структуры [0,90] (более высокие показатели) и структуры [0|45|90], которые прессуют (термопластичное связующее — блок-сополимер с блоками из стирола-изопрена-стирола) при 130 °С и 550 кПа в течение 30 мин после удаления растворителя-метилхлорида [10].

Показатели полимерной композиционной брони на основе волокон *Spectra* существенно превосходят показатели для стали и алюминия. Такая броня в 1,5 раза легче и вдвое эффективнее (в том числе против пули 357 *Magnum* диаметром 9,07 мм, массой 10,2 г) брони на основе волокон *Kevlar 29*. На эффективность брони с волокнами *Spectra* указывают и расчетные значения энергии, поглощенной волокнами при высокоскоростном ударном воздействии (табл. 3.2). Стойкость эпоксидных органоволоконитов с волокнами *Dyneema* при высокоскоростном ударном воздействии на 25% выше, чем стойкость эпоксидных кевлароволоконитов.

На защитные свойства композиционной брони существенно влияет тип текстуры тканей, сформированной из волокон, тип волокон, скорость и форма индентора (пули, осколка).

Таблица 3.5. Характеристики, определяющие эффективность различных материалов при высокоскоростном ударном воздействии, вызывающем их пénéтрацию [10]

| Тип брони | АД, кг/м ² | АДТ, кг/м ² | V_{50} , м/с | SEA, Дж·м ² /кг | SEAT, Дж·м ² /кг |
|--|-----------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Органопластик ¹ | 5,96 | 8,28 | 724,2 ²⁾ | 48,5 | 34,9 |
| Стандартная броня армии США ³ | 9,0 | 11,0 | 609,6 | 22,7 | 18,6 |
| Сталь (для сравнения) | — | 10,0 | 487,7 | — | 13,1 |
| Алюминий (для сравнения) | — | 17,1 | 464,8 | — | 7,0 |

Примечания: АД, АДТ, V_{50} , SEA, SEAT — критерии оценки в соответствии с *US Department of Justice, N.I.J. Standart-0101.03* и *Military specification MIL-P-46593A(ORD)*; образцы-диски диаметром 30,5 см, толщиной 2 см; воздействие пули калибра 22 (диаметр 9 мм, масса 8 г, скорость полета 610 м/с);

¹ Органоволоконит структуры [0/90]; волокна *Spectra 1000*, 67–70 %об; связующее *Kraton D 1107*, раствор в метилхлориде блок-сополимера с блоками полистирола(14%)–полиизопрена(72%)–полистирола (14%) фирмы *Shell Chemical Co*, США.

² 1 м² брони весит 8,3 кг; небольшие повреждения в точке воздействия в радиусе не более 20 мм, возможность многократной защиты при скорости пули до 610 м/с.

³ Стандартная на 1988 г. броня армии США (*PASGT, Personal Armor System Ground Troops*) из фенолоальдегидных кевларопластиков (65–70 %об. волокон *Kevlar 29*).

Наиболее эффективны в качестве наполнителей ткани с текстурами, не подвергающимися разреживанию при проникновении пули, обеспечивающее высокие деформационные и фрикционные свойства.

Зависимость защитных свойств полимерной брони от плотности тканей, количества их слоев и типа волокон приведены в табл. 3.6, эффективность брони различных типов — в табл. 3.7. Эффективна броня как отформованная из препрегов на основе волокон *Spectra* и связующих, так и изготовленная из непропитанных тканей.

Таблица 3.6. Зависимость защитных (от пуль калибра 22) свойств брони от плотности тканей, количества их слоев, типа волокон [10]

| Тип ткани | Количество слоев | АД, кг/м ² | V ₅₀ , м/с | SEA, Дж·м ² /кг |
|---|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| 50×50 нитей <i>Spectra</i> 1000, 375 денье (гладкая текстура) | 10 | 1,73 | 371,6 | 44 |
| | 13 | 2,24 | 403,3 | 40 |
| | 16 | 2,76 | 442,3 | 39 |
| | 19 | 3,28 | 456,3 | 35 |
| | 23 | 4,31 | 508,1 | 33 |
| 92×92 нити <i>Spectra</i> 1000, 187 денье (8-ремизный сатин) | 8 | 1,22 | 341,3 | 52,6 |
| | 16 | 2,44 | 421,5 | 40,1 |
| | 32 | 4,87 | 568,4 | 36,6 |
| 56×56 нитей <i>Spectra</i> 1000, 185 денье (гладкая текстура) | 25 | 2,39 | 445,6 | 45,8 |
| | 50 | 4,78 | 588,9 | 40,0 |
| Стандартная броня на основе <i>Kevlar</i> | — | 6,75 | 472,4 | 18,2 |

Таблица 3.7. Эффективность защиты полимерной броней (бронезилеты) различных типов (в соответствии с *US Department of Justice, N.I.J. Standart-01.01.03*) [10]

| Тип пули, калибр | Скорость пули, max, м/с | Число слоев брони, обеспечивающих защиту от поражения ¹ | | | |
|-------------------|-------------------------|--|---------------------------------|-----------|--|
| | | Коммерческий жилет из волокон <i>Kevlar</i> | Ткань из волокон <i>Spectra</i> | | Панель из органо-пластов (<i>Spectra</i> 1000, блок-сополимер <i>Kraton</i>) |
| | | | 375 денье | 180 денье | |
| 38 | 274 | 2,3 | 1,2 | 1,0 | 1,4 |
| 22 | 335 | 2,3 | 1,4 | 1,2 | 1,4 |
| | 347,5 | 4,5 | 4,1 | 2,6 | >2,6 |
| 9 мм ² | 373,4 | — | — | 3,0 | 2,5 |
| | 442 | 6,8 | — | 4,0 | 3,9 |
| 357 ³ | 396 | 4,5 | 3,2 | 2,4 | 3,3 |
| | 440 | 5,7 | — | 3,6 | 5,2 |
| 44 | 442 | 6,8 | — | 4,6 | 4,6 |

Примечания:

¹ *N.I.J.-test, summery of areal density.*

² Пуля диаметром 9 мм, вес 8 г, полностью металлическая (медь) оболочка.

³ 357 *Magnum*, диаметр 9,07 мм; вес 10,2 г, медная оболочка, наконечник — свинец.

Таблица 3.8. Зависимость защитных свойств¹ органопластиков⁴ в зависимости от расположения волокон в слоях [10]

| Ориентация волокон в соседних слоях | АД, кг/м ² | АДТ, кг/м ² | V_{50} , м/с | SEA, Дж м ² /кг | SEAT, Дж м ² /кг |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|
| [0/90] ² | 4,49 | 6,01 | 582 ⁵⁾ | 41,5 | 31,0 |
| [±45] | 4,42 | 6,03 | 433 | 23,3 | 17,1 |
| [±22,5] | 4,43 | 5,99 | 428,5 | 22,8 | 16,9 |
| [0] ³⁾ | 4,12 | 5,69 | 308 | 12,7 | 9,2 |

Примечания:

¹ Показатели (воздействие — калибр 22,1; 1,1 г; 610 м/с) по *Military Specification MIL-P-46593A (ORD), MIL Standard 662D V₅₀ Testing*.

² Ортоотропный.

³ Однонаправленный.

⁴ Органоластики на основе волокон *Spectra 900* и термопластичного низкомолекулярного полимера этиленвинилацетата (фирма *Air Products and Chemical Inc*).

⁵ V_{50} при АД 4,4 кг/м², АДТ 6 кг/м² при 23 °С — 604,7 м/с; при 80 °С — 594,7 м/с, при 100 °С — 593,4 м/с, при 120 °С — 558,7 м/с.

Броневые материалы с массой 1 м², равной 8,3 кг, при воздействии пули 22 калибра имеют высокие показатели защитных свойств при $V_{50} = 724$ м/с. Наиболее эффективна броня из материалов структуры [0/90] (табл. 3.8).

Для броневых полимерных материалов различного состава показатель V_{50} определяется типом волокон, ориентацией их в соседних слоях (рис. 3.3), типом связующего. Так, для органоволокниста структуры [0/90] (волокна *Spectra 1000*, 65–70 %об., связующее полистиролизопреновый блок — сополимер) $V_{50} = 724$ м/с, для органоволокниста [0/90] (волокна *Spectra 900*, связующее полиэтиленвинилацетат) $V_{50} = 582$ м/с, для однонаправленного органоволокниста того же состава $V_{50} = 308$ м/с. Длительность высокоскоростного удара не превышает 250 микросекунд (повышение температуры брони с волокнами *Spectra* за счет контакта с пулей не более

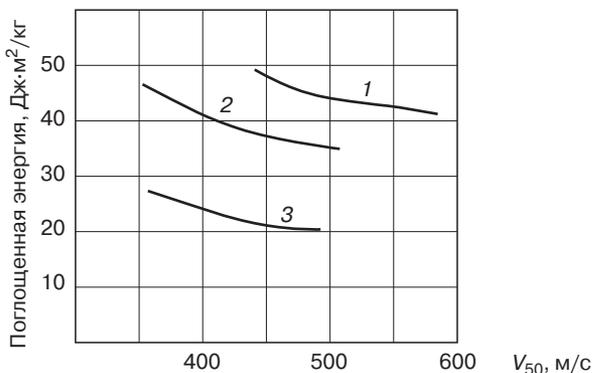


Рис. 3.3. Зависимость энергии, поглощенной волокнами (SEA), от скорости полета пули V_{50} , при которой задерживается 50% пуль калибра 22 и осколков массой 0,39 г для различных типов полимерной брони [10]:

1 — на основе ткани из волокон *Spectra 1000* 185 день; 2 — на основе ткани из волокон *Spectra 1000* 375 день; 3 — на основе ткани *Kevlar 29* (стандартная броня)

Таблица 3.9. Устойчивость к пенетрации полимерной композиционной брони с волокнами *Spectra* 1000 [10]

| АД, кг/м ² | АДТ, кг/м ² | Скорость пули, м/с | Глубина проникновения пули 44 <i>Magnum</i> , мм (<i>NIJ-test</i>) |
|-----------------------|------------------------|--------------------|--|
| 4,85 | 6,93 | 435,6 | 35,6 |
| 4,37 | 6,24 | 426,7 | 40,6 |
| 3,88 | 5,54 | 388 | 43,2 |
| 3,4 | 4,85 | 450,2 | 58,4 |
| 2,91 | 4,16 | 434,3 | Пенетрация |
| | | | Глубина проникновения пули калибра 9 мм |
| 4,85 | 6,93 | 427,9 | 17,8 |
| 4,37 | 6,24 | 434,9 | 25,4 |
| 3,88 | 5,54 | 422,1 | 15,2 |
| 2,91 | 4,16 | 427,9 | 35,6 |
| 2,43 | 3,47 | 438,6 | Пенетрация |
| 1,94 | 2,77 | 438,9 | Пенетрация |

чем на 1 °С), что не приводит к плавлению компонентов броневого термопластичного органо-пластика и V_{50} сохраняется на уровне 600 м/с при 20 °С, 560 м/с при 120 °С. Броня на основе волокон *Spectra* 1000 (связующее в органо-пластике — низкомолекулярный термопластичный блок-сополимер) в испытанных условиях (табл. 3.7) не подвержена сквозной пенетрации. В броню с АДТ 6–7 кг/м² пули проникают на глубину 40 мм и менее (предел по тесту *NIJ*. — 44 мм) (табл. 3.9).

Полимерная композиционная броня из органо-пластиков, в которых компоненты (связующее, наполнитель) имеют одинаковую химическую природу, имеют более высокие защитные свойства по сравнению с тканой броней. Так, пакет из 23–25 несвязанных слоев нетканого полуфабриката *UD 75*, *UD 66* на основе волокон из СВМПЭ пробивается пулей из пистолета ТТ, в то время как пресованный полиэтилен-полиэтиленовый органо-волокнит с 23–25 слоями наполнителя из волокон СВМПЭ не подвергается в этих условиях пенетрации. Разработана полимерная броня, которая обеспечивает удержание высокоскоростных, имеющих высокую пенетрационную способность, автоматных пуль [2].

3.4. Комбинированные (супергибридные) полимер-металлические и полимер-керамические броневые материалы и конструкции

Полимерные текстильные и композиционные материалы не эффективны для защиты от высокоскоростных (1000–1100 м/с) пуль и осколков и низкоскоростных пуль особой конструкции, раздвигающих нити в тканях, пролетающих между нитями, не разрушая их. В этих случаях защита от высокоскоростных ударных воздействий, предотвращение пенетрации защитных материалов осуществляется использованием многослойных комбинированных (супергибридных) защитных конструкций (полимер-металлическая, полимер-керамическая броня). Комбинированная броня основана на использовании различных сочетаний разных типов брони, например, слоев из тканей и металлических или керамических бронеэлементов, слоев

из органопластиков с волокнами или тканями из волокон ароматических полиамидов, СВМПЭ с бронезементами из металлов или керамики, слоев из тканей и органо (стекло) пластиков.

Разработка комбинированных броневых конструкций — наиболее рациональный путь совершенствования средств защиты 5–6 классов защиты (по ГОСТ Р 50744-95), позволяющий оптимизировать их весовые и защитные характеристики. Особенности поглощения энергии высокоскоростного удара различными материалами позволяет разделить защитную конструкцию на функциональные слои, выполняющие специфические задачи: 1) торможение высокоскоростных инденторов, деформация (расплющивание) головной части броневой индентора, его разрушение в слоях с высокой вязкостью разрушения, высоким уровнем поглощения энергии высокоскоростного удара (твердые бронезилеты, пластины, слои из металлов, керамик, ВПКМ); 2) остановка индентора (остатков пули, осколков) в слоях, сформированных из полимерных волокон (тканевых пакетах). Жесткие слои из ВПКМ позволяют реализовать высокую прочность при сжатии керамических элементов, наклеенных на их поверхность, а высокая прочность органо- и стеклопластиков — существенно снизить энергию индентора. Низкая плотность полимерных слоев позволяет оптимизировать массу всей многослойной защитной конструкции.

Принцип проектирования комбинированной брони заключается в обеспечении снижения воздействия индентора до такого уровня, при котором после пенетрации индентором части защитной конструкции, его остаточная энергия уже недостаточна для пенетрации оставшихся слоев защитной конструкции. Например, если наружные слои тканевых пакетов изготавливать из высокопрочных волокон малого диаметра (бронезилеты фирмы «ФОРТ Технологии»), то увеличивается размер осколков, что усложняет их пенетрацию. В бронезилетах 5 и 6 классов защиты используются, как минимум, два типа материалов (ткани из полиарамидных или СВМПЭ — волокон и бронезементами из керамики, стали, титана, алюминия). Масса m^2 брони со стальными элементами составляет 50–60 кг, с керамическими (дороже в 2 раза) — 45–50 кг.

Металлическая броня (защита по 2–5 классу по ГОСТ Р 50744-95) и керамическая броня (защита от мощных броневой винтовочных патронов типа СТ-М2 по 6 классу по ГОСТ Р 50744-95) практически не используется в виде многослойной комбинированной (супергибридной), когда бронепластины из высокопрочных среднеуглеродистых легированных сталей ($\rho = 7,85 \text{ г/см}^3$, σ^+ до 2,1 ГПа, ϵ^+ до 10%), титановых сплавов (σ^+ 0,6 ГПа), алюминиевых сплавов (σ^+ 0,12 ГПа) или керамики (Al_2O_3 , $\rho = 3,9 \text{ г/см}^3$, σ^+ до 0,17 ГПа, B_4C , $\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$, σ^+ 0,18 ГПа) закрепляют на текстильный (из волокон *Kevlar*, СВМ, Русар) или органо(стекло) пластиковый пакет. Для защиты от боеприпасов с твердым сердечником типа 7Н6 автомата АК-74 эффективна полимер-керамическая броня (типа БК-3), для защиты от пуль ПС-43 автомата АКМ — полимер-металлическая (броневая сталь Ц-85) броня. В толстой многослойной броне боевых машин (танки, вертолеты) используются в качестве полимерных слоев тканевые пакеты из препрегов плетеной (саржа, сатин) структуры.

3.4.1. Полимер-металлическая броня

Полимер-металлическая броня — тип комбинированной защиты от высокоскоростного инденторного воздействия, основанный на использовании металлических бронезементах (слоев), закрепленных на подложках из текстильной или композиционной брони. Металлическая броня используется и в качестве самостоятельной защиты по 2–5 классу (ГОСТ Р 50744-95).

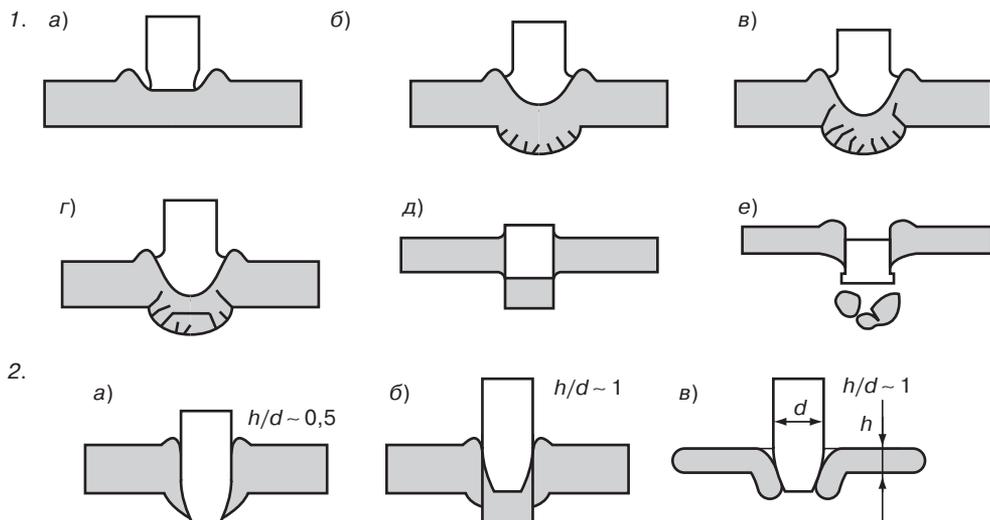
При выборе металла большое значение имеют его параметры, характеризующие вязкость разрушения, величину поглощенной энергии до начала пластической деформации (табл. 3.10). Наиболее часто используют бронепластины из высокопрочных среднеуглеродистых легированных сталей. Высокие защитные свойства металлического слоя полимер-металлической брони достигаются при оптимальном сочетании удельного сопротивления металла пенетрации, которое зависит от прочности и твердости металла, его пластичности, размера объема металлического слоя, деформирующегося после высокоскоростного удара. При этом необходимо

Таблица 3.10. Энергетические характеристики металлов при высокоскоростном ударном воздействии [2]

| Материалы (образцы с надрезом) | Энергия удара до начала пластической деформации, Дж | Энергия удара, вызывающего разрушение, Дж |
|--|---|---|
| Алюминиевый сплав 2024-Т6 | 0,007 | 9,1 |
| Алюминиевый сплав 7075-Т6 | 0,084 | 0,42 |
| Нержавеющая сталь 17-7РН | 0,105 | 9,38 |
| Сталь 4130 | 0,224 | 14,28 |
| Титановый сплав 6А1-4V | 0,294 | 1,47 |
| Сталь 4340 | 0,476 | 0,84 |
| Углепластик <i>Hercules</i> 3501/AS (для сравнения) ¹ | 0,476 | 0,84 |

¹ Эпоксидный (связующее 3501) углеволокнит (волокна *Hercules AS-4*).

обеспечить соотношение толщины брони b и калибра penetrатора d так, чтобы $b/d > 1,5-2$ (для стали b/d около 1). Замена стали на титановые или алюминиевые сплавы равновесовых толщин значительно увеличивает b/d , меняет характер пенетрации (рис. 3.4), повышает деформированный объем металла. Несмотря на меньшую прочность, полная энергоемкость брони возрастает по сравнению с равновесомой стальной. Существенным недостатком металлической брони является ее большая толщина и масса (критичная характеристика для бронеодежды).

**Рис. 3.4.** Схемы пенетрации металлической брони и металлического слоя в металло-полимерной броне при высокоскоростном ударном воздействии [1]:

1. — пенетрация пулями со стальным сердечником (сталь 10, HRC 35):
 а — внедрение в лицевой слой брони; б — образование выпучины на тыльной стороне брони; в — образование трещин в выпучине; г — откол с наметившейся пробкой; д, е — разрушение пробки;
 2. — пенетрация пулями с тонким стержнем (ТУС, сталь У9, HRC 65):
 а — пластическое расширение отверстия, б — выбивание пробки; в — образование лепестков пробины

Проектирование металлических бронепластин для полимер-металлической брони направлено на создание условий, при которых большая часть энергии высокоскоростного удара затрачивается на пенетрацию металлического слоя, а прошедший за бронепластину сердечник и выбитая часть металлического слоя задерживает полимерный (тканевый или композитный) слой. Такая конструкция брони позволяет уменьшить толщину металлического слоя на 1–2 мм, снизить массу защиты, обеспечить только локальное воздействие на защищаемый объект (например, человека, без пенетрации металлического слоя воздействие происходит по значительной площади объекта).

3.4.2. Полимер-керамическая броня

Технические керамики с ценным комплексом упругопрочностных свойств, высокой энергией поглощения ударных нагрузок, высокой твердостью нашли применение при разработке материалов, устойчивых или разрушающихся после поглощения энергии высокоскоростного ударного воздействия, эффективных в качестве керамической и полимер-керамической брони.

Физические и механические свойства керамик определяются характером первичных (химических) связей и кристаллической структурой. Первичные связи в керамиках могут быть ионными, ионно-ковалентными, металлическими. Тип связей определяет пластичность, твердость, жесткость, прочность при сжатии керамик различного состава (табл. 3.11, 3.12).

При разработке керамической и полимер-керамической брони исходят из следующих представлений (метод ДОТ):

- 1) броня (полимер-керамическая, керамическая) является эффективным средством для защиты от пули с твердым сердечником;
- 2) материал индентора влияет на характер процессов при взаимодействии с преградой;
- 3) характер процессов, происходящих при взаимодействии индентор–броня, зависит от скорости взаимодействия;
- 4) энергетические затраты на процесс пенетрации брони зависят от толщины материала брони сложным образом (не только количественно);
- 5) толщина блока подложки должна обеспечивать деформацию блока за счет объемного деформирования и деформирования передней поверхности блока.

При выборе материалов для керамической и полимер-керамической брони определяющими для метода ДОТ являются значения «баллистической» эффективности (БЭ) и коэффициента сопротивления (КС):

1. При определении БЭ оценивается энергия, затраченная на преодоление преграды, по оценке энергии, затрачиваемой на деформирование подложки.

Энергия пули E_p расходуется на разрушение преграды E_c , разрушение элементов пули, упругоэластичную деформацию подложки E_{pl} и энергию разлетающихся осколков брони и пули $E_p = E_c + E_{pl}$.

Затрата энергии на разрушение брони сводится к измерению энергии, затраченной на пластическую деформацию подложки $E_{pl} = \sum \sigma_i d \epsilon_p$, где σ_i – интенсивность напряжений; ϵ_i – интенсивность деформаций.

Таблица 3.11. Физико-механические свойства керамик различного химического состава [1]

| Тип керамики | ρ , г/см ³ | Продольная скорость звука, км/с | E^* , ГПа | μ | σ^* , МПа |
|--|----------------------------|---------------------------------|-------------|-------|------------------|
| Корунд (Al ₂ O ₃) | 3,9 | 10,4 | 18,0 | 0,22 | 170 |
| Карбид бора (B ₄ C) | 2,4 | 12,7 | 28 | 0,20 | 180 |
| Карбид кремния (SiC) | 3,0 | 10,5 | 20 | 0,21 | 140 |

Таблица 3.12. Физико-механические свойства керамических материалов, используемых в конструкциях керамической и полимер-керамической брони [1, 2]

| Свойства керамических материалов | Типы керамических материалов | | | | | | |
|---|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| | Al_2O_3 ТСМ-303 | Al_2O_3 Б-6 | Al_2O_3 ХС-22 | SiC ОТМ-920 | Si_3N_4 ОТМ-960 | Si_3N_4 ОТМ-914 | Al- Al_2O_3 - MgO |
| | $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ | $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ | $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ | SiC – 90% B ₄ C – 10% | Si_3N_4 – 94% Y_2O_3 – 6% | Si_3N_4 – 94% Y_2O_3 – 14% | – |
| ρ , г/см ³ | 3,75 | 3,65 | 3,75 | 3 | 3,3 | 3,45 | 3,5 |
| Микротвердость, ГПа | 16–21 | – | 8,5–11 | 30–43 | 14–18 | 17–20 | – |
| E^* , ГПа | 260–300 | – | – | 310 | 290 | 290 | – |
| Модуль Вейбулла | – | – | – | – | 8,5 | 8,6 | – |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа | 300 | 280 | 290 | 650 | 700 | 830 | – |
| σ^- , МПа | 700–1100 | – | – | – | – | – | – |
| Скорость звука, м/с | 9500 | 9000 | 9600 | 12400 | 0400 | 10700 | – |
| Импеданс, МПа·с/м | 356 | 330 | 360 | 372 | 359 | 358 | – |
| μ | 0,22 | – | – | 0,22 | 0,27 | 0,27 | – |
| K_{1c} , МПа·м ^{0,5} | 3,5–5,5 | 2,8–3,0 | 4,0–4,6 | 3,1–4,8 | 6,0–9,0 | 6,5–10,0 | – |
| Удельная работа деформирования, МДж/кг | 4,8 | – | – | 12,3 | 7 | 7,5 | – |
| Относительная эффективность при применении в качестве броневых материалов | 0,77 | 0,63 | 0,41 | 0,85 | 1,0 | 0,91 | 0,68 |

Для пластинных подложек при больших значениях пластических деформаций изменение напряжений незначительно и $E_{pl} = \epsilon_i V_1$, где V_1 — объем деформации на передней поверхности пластичной подложки.

Объем деформации передней панели поверхности подложки (А1) прямо пропорционален энергии удара после прохождения слоя брони (сравниваются тип 1 и тип 2), поэтому:

$$БЭ = (\rho_1/\rho_2)(v_1/v_2)^2(t_1/t_2)^k(V_1/V_2),$$

где ρ_1, ρ_2 — плотность брони типа 1 и 2; v_1, v_2 — скорость пули; t_1, t_2 — толщина брони; V_1, V_2 — объем деформации передней поверхности блока подложки, защищенной броней типа 1 и 2.

2. КС — коэффициент, отражающий зависимость эффективного сопротивления индентору от толщины брони. Энергия пули затрачивается на разрушения ударника, брони и деформацию в пределах конуса разрушения (рис. 3.5) с образованием большой поверхности разрушения и соответственно с большими затратами энергии.

Коэффициент КС должен учитывать различные факторы. Так, затраты энергии пропорциональны кубу толщины брони t_3 . С учетом уменьшения давления и поглощения энергии высокоскоростного удара, перераспределение энергии от области контакта к основанию конуса разрушения брони (рис. 3.5) КС = 2–3, с учетом массы брони КС = 3–4.

Для слоев брони толщиной t_1 и t_2

$$(t_1/t_2)^{КС} = (V_1/V_2)^2(V_1/V_2), \text{ и}$$

$$КС = \frac{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + 2\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{\frac{t_1}{t_2}}; t_1, t_2, V_1, V_2 - \text{ см. в расчете БЭ.}$$

Коэффициент КС — коэффициент пропорциональности в координатах $\ln(t_1/t_2) - \ln(V_1/V_2)$ в серии испытаний образцов с различной толщиной брони.

Затраты энергии индентора на преодоление керамической преграды равны работе, затраченной на разрушение керамики, то есть на образование поверхности разрушения в зоне взаимодействия индентора и преграды. Эта область разрушения ограничивается конусом Герца (рис. 3.5, в объеме конуса разрушения происходит дробление материала, которое обеспечивает почти все затраты энергии на разрушение керамического слоя). Объем вовлеченного в работу материала определяет затраты энергии индентора на преодоление керамической преграды (затраты энергии на образование поверхности разрушения). Размеры конуса разрушения определяются в основном калибром индентора (размер контактной зоны в начале взаимодействия индентора и преграды) и толщиной керамического слоя. Угол конуса $\alpha \sim 63^\circ$ определяется упругим полем контактного взаимодействия. Степень затрат энергии на разрушение керамики в объеме конуса разрушения отличается и зависит от его зоны.

Исходной точкой для определения формы и размеров керамического элемента брони является пулестойкость сплошной керамической пластины с размерами достаточно большими, чтобы исключить влияние края пластины на пулестойкость. Так, для пуль калибра до 7,62 мм достаточный размер керамической пластины составляет 100 мм при отклонении попадания от центра пластины не более 20 мм. Минимальная толщина пластины, удовлетворяющая требованиям по пулестойкости, — толщина керамического элемента брони в центре элемента.

Размер нижнего основания конуса разрушения D определяет минимальный размер (формат) пластины, который позволяет локализовать разрушение керамического слоя без потери пулестойкости. Как показывает практика, установленным требованиям отвечает размер бронееlementa 50×50 мм. Если пуля попадает не в центр пластины, то конус разрушения будет неполным и затраты на разрушение керамического слоя будут меньше при постоянной толщине керамики. Обеспечить равную пулестойкость для любой точки керамического элемента можно, увеличивая толщину пластины в зависимости от края пластины. Увеличение толщины должно компенсировать отсечения конуса разрушения на краю пластины («потерянный» объем).

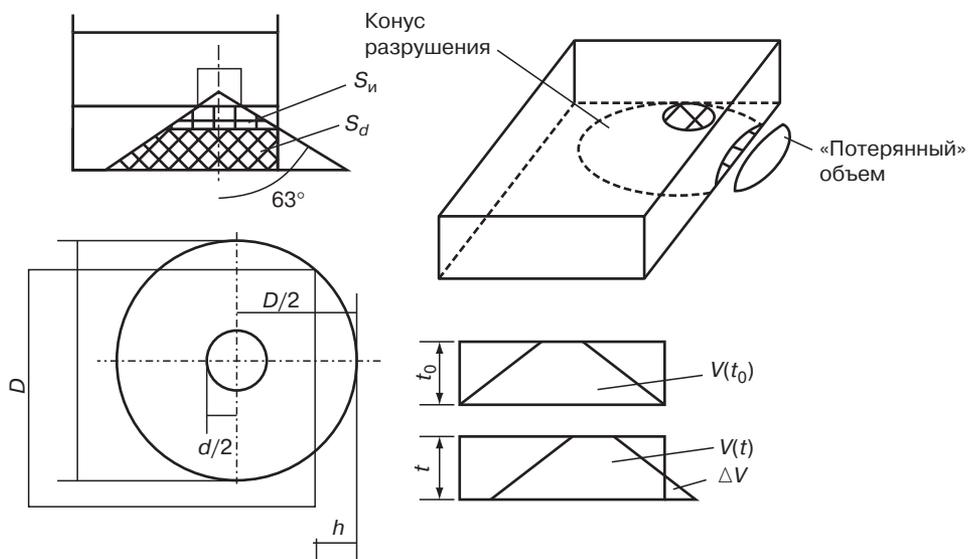


Рис. 3.5. Схема разрушения керамического бронезлемента в полимер-керамической и керамической броне при высокоскоростном индекторном ударном воздействии [1]

Вклад в затраты энергии на разрушение для различных элементов объема конуса разрушения различен. Для учета этого обстоятельства используется простейшая модель, представляющая объем конуса разрушения из двух областей, которые отличаются удельной поверхностью разрушения керамики: первая (S_u) расположена на верхней части конуса разрушения с размерами осколков керамики менее 0,5 мм и составляет 20% объема конуса; вторая (S_d) расположена в нижней части — с размерами осколков керамики более 0,5 мм и составляет 80% объема конуса разрушения, причем оптимальные соотношения $S_u/S_d = 10$.

Для обеспечения оптимальной формы пластины толщина керамического элемента по краям должна быть больше, чем в центре (определяется в опытах на пулестойкость сплошного керамического слоя с соответствующей подложкой) примерно на 2 мм (для корундовой керамики). Профилирование плитки позволяет облегчить керамическую броню на 10–15%.

Метод ДОТ используются для определения броневых свойств мощных броневых винтовочных патронов (типа СТ-М2, табл. 3.13), соответствующих 6-му классу защиты

Таблица 3.13. Характеристики некоторых боеприпасов [1]

| Тип пули ¹ | Масса пули, г | Масса сердечника, г | Материал, твердость H_{RC} , форма сердечника | Скорость полета пули, м/с ² |
|-----------------------|---------------|---------------------|---|--|
| Б-32 | 10,6 | 5,38–5,48 | Сталь У-12, 65-68, острый | 800–815 |
| СТ-М2 | 9,6 | 4,72 | Сталь 65Г, >56, острый | 860–875 |
| ЛПС (ТУС) | 9,6 | 4,76 | Сталь 65Г, >56, тупой | 845–860 |

¹ А также низкоскоростные пули особой конструкции (с заостренной головной частью, подкалиберные пули в виде тонкого стержня в легком сбрасываемом после вылета из ствола поддоне) и другие [2].

² Скорость высокоскоростных пуль и осколков 1000–1100 м/с.

Таблица 3.14. Условия испытаний и характеристики эффективности керамической брони* [1, 2]

| Тип пули | Скорость пули, м/с | Энергия пули, кДж | Энергия сердечника, кДж | Объем деформированной брони, см ³ | Относительная эффективность |
|----------|--------------------|-------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| Б-32 | 800–815 | 3530 | 1820 | 3850 | 1 |
| СТ-М2 | 860–875 | 3610 | 1790 | 3445 | 0,95 |
| ЛПС(ТУС) | 845–860 | 3480 | 1700 | 355 | 0,98 |

* Керамическая броня — корунд ТСМ-303 (ОНПО «Технология»), пластины 100×100 мм толщиной 10 мм приклеены клеем 88 НП к подложке 150×150×8 мм из АМГ6; выстрелы из винтовки СВД штатными патронами с расстояния 10 м.

по ГОСТ Р 50Э44-95. Керамическая броня эффективна для защиты от пуль Б-32, ЛПС (ТУС) (табл. 3.14).

Бронебойные качества боеприпасов существенно зависят от типа брони. Так, для защиты от боеприпасов с твердым сердечником типа 7Н6 (автомат АК-74) более эффективна керамическая броня БК-3; металлическая броня из стали Ц-85 эффективна для защиты от пуль автомата АКМ (рис. 3.6).

Оценка керамической и металлической брони по традиционным показателям физико-механических свойств материалов ненадежна и плохо коррелируется с реальным поведением этих материалов при высокоскоростном ударном инденторном воздействии. Керамические материалы используются в составе брони для танков, вертолетов и других типов военной техники. Преимуществами керамической брони являются малая величина заброневого контузионной травмы и существенно меньший вес, по сравнению с металлической броней, обеспечивающий тот же уровень защиты.

Учитывая эксплуатационные особенности керамики, ее применение эффективно в броневых материалах специального назначения высоких классов защиты.

Низкая вязкость разрушения, трещиностойкость керамических материалов препятствуют созданию броневых материалов, выдерживающих многократные попадания поражающих средств с сохранением защитных свойств соседних участков бронезащитных элементов и стимулирует разработку многослойных полимер-керамических броневых материалов, особенно, для использования в бронеодежде.

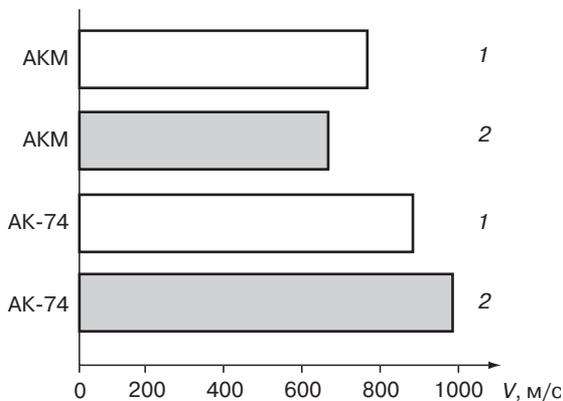


Рис. 3.6. Эффективность защиты от высокоскоростного ударного воздействия металлической (1) и керамической (2) брони различными инденторами [1, 2]:

АК-74 — пули 7Н6 со стальными термоупрочненными сердечниками автомата АК-74; АКМ — пули ПС-43 со стальным сердечником автомата АКМ

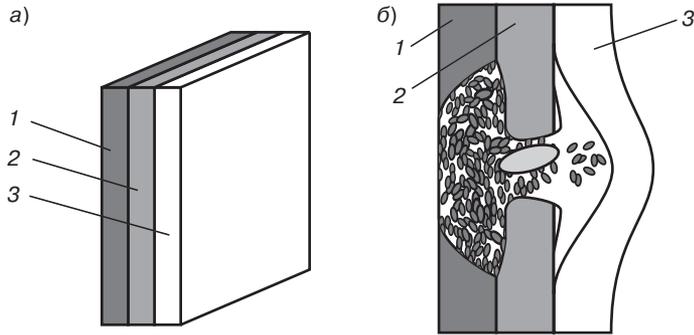


Рис. 3.7. Принципиальная схема (а) комбинированной супергибридной брони (1 — лицевой керамический или металлический слой; 2 — органопластик или стеклопластик; 3 — полимерная тканая броня) и характер разрушения бронепанели (б) после воздействия высокоскоростного удара [1]

Многослойная полимер-керамическая броня включает в себя слой из высокотвердой спеченной или полученной горячим прессованием (шликерным литьем) керамики (наружные слои, поглощающие большую часть энергии пули и разрушение ее), слой из ВПКМ (органопластики, стеклопластики), поглощающие большую часть остаточной энергии осколков, керамической бронепанели и пули, и слой из полимерных тканей, задерживающих осколки и демпфирующие удар (рис. 3.7).

Полимер-керамическая броня, как правило, представляет собой двухслойную конструкцию, передняя поверхность которой выполнена в виде набора из керамических пластин. Наиболее распространенной является схема исполнения керамического слоя путем набора керамической поверхности брони из элементов прямоугольной формы, расположенных со смещением друг относительно друга или без него. Такая конструкция позволяет локализовать разрушение керамического слоя и обеспечивает необходимую живучесть брони, но для нее существует проблема пулестойкости стыков (рис. 3.8). Попытка сделать прочный стык путем включения в процесс разрушения расположенные рядом пластины приводит к разрушению на большей площади поверхности брони, то есть живучесть брони, соответствие специальным требованиям ухудшаются.

Керамический элемент поверхности брони должен обеспечить равную пулестойкость по всей поверхности и тем более при попадании точно встык, когда имеется полный объем разрушения за счет участия в нем смежной пластины. Проблема обеспечения пулестойкости на

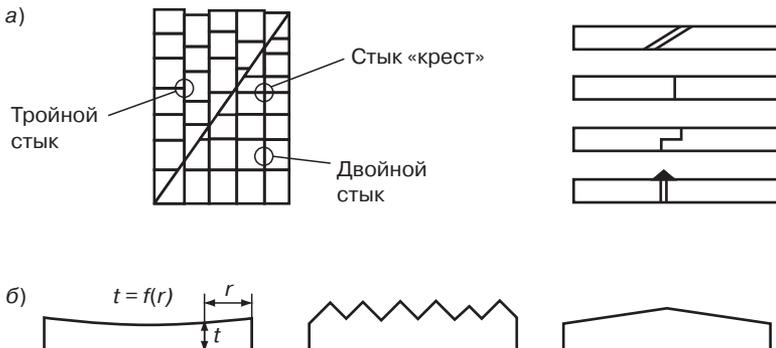


Рис. 3.8. Различные конфигурации керамических элементов брони [1, 2]: а — стыков; б — формы передней поверхности керамических бронееlementов

пластине конечных размеров состоит в том, что при попадании на некотором расстоянии от края пластины уменьшается объем вовлеченного в процесс разрушения материала. Это уменьшает затраты энергии индентора на преодоление преграды и может привести к пенетрации брони. В таких случаях пулестойкость брони определяется пулестойкостью стыков и брони при постоянной толщине керамики и пулестойких стыков получается излишне тяжелой. Чтобы получить равнопрочную пулестойкую поверхность, необходимо изменить толщину керамической пластины в зависимости от расстояния до стыка.

В конструкции керамического слоя между керамическими элементами предусмотрены эластичные, но достаточно жесткие прослойки толщиной примерно 0,5 мм, чтобы удержать и обеспечить разрушение разлетающихся осколков керамики и защитить смежные пластины от контактных нагрузок, осколков разрушенной керамической пластины. Функции такой прослойки выполняет связующее (клей), которым скрепляются керамические элементы в броне.

Толстая многослойная броня боевых машин (танки, вертолеты) использует в полимерных слоях тканевые пакеты из препрегов плетеной структуры.

Разработана технология изготовления керамических бронееlementов размерами 300×300 мм различных конфигураций и форм с высокой вязкостью разрушения, которые выдерживают несколько (2–3) попаданий пуль и не растрескиваются.

Полимер-керамическая броня (внутренний слой из алюмооксидной керамики, пропитанной полимерным связующим, наружный слой из тканевого пакета из волокон СВМ или броневой стали толщиной 2–4 мм) обеспечивает защиту 3–4 классов (ОНПО «Технология», г. Обнинск). Первый тип брони надежно защищает от высокоэнергетических пуль с расстояния более 5 м из винтовок М-16 и СВД или автоматов АКМ и АКМС, второй тип — от бронебойных пуль. Толщина элементов индивидуальной защиты соответственно 14 и 16 мм, масса бронееlementов размером 250×300 мм около 2,5 кг [23].

В броневых супергибридных панелях высших классов защиты центр высокопрочных материалов «Армоком» (Хотьково) в качестве керамики использует пластины из Al_2O_3 , в качестве подложки — органопластик (наполнитель — арамидная саржа, связующее — полиуретановый эластомер СКУ-М) [26].

Оптически прозрачные стеклопакеты — многослойные межслоевые композиционные материалы из слоев 1) керамики ($\alpha-Al_2O_3$ толщиной 2–6 мм); 2) оптически прозрачных полимеров (поликарбонат, полиметилметакрилат, аморфные фторсополимеры, полисульфоны, ароматические полиамиды, пленки толщиной 0,08–0,1 мм); 3) пленок из ПЭТФ и других термопластов; 4) клеевых слоев (фотоотверждаемых, толщиной 0,6–1,8 мм, устойчивых к ударным воздействиям инденторов (диаметр 7,62 мм, масса 5,6; г) без осколочных разрушений при скоростях инденторов до 420 м/с [14].

Литература

1. Добринский Ю.М. и др. ВОР. Серия 15. Вып. 2 (119), 1998. — С. 22–24, 44–47.
2. Летников А.Ю. и др. Форт Технология, 1999 (sales@fort.ru).
3. *Army*, 1976, v. 26, № 9, p. 57.
4. *Army Research Dev. And Acquisition Magazine*, 1978, № 11–12, p. 5.
5. Литовкин Д. Известия. 01.11.2005.
6. ГОСТ Р 50744–95 Бронеодежда. Классификация и общие технические требования.
7. *Prevorsek D.C. et al.*, 30 *Int. SAMPE Symposium*, 1985, v. 30, p. 280–289.
8. *Alesi A.L. et al.*, *Polym. Eng. and Sci.*, 1978, v. 18, № 16, p. 1209–1215.
9. *Arukere V.*, *SAMPE Quarterly*, 1987, v. 18, № 4, p. 43–48.
10. *Prevorsek D.C. et al.*, 33 *Int. SAMPE Symposium*, 1988, v. 33, p. 1685–1695.
11. Рыбин А.А. и др. //Химические волокна. — 1998. — № 6. — С. 50–52.
12. Рыбин А.А. и др. //Механика КМ. — 1998. — Т. 4, № 1. — С. 87–115.

13. Рыбин А.А. и др. //Механика КМ. — 2000. — Т. 6, № 2. — С. 244–260; № 3. — С. 383–400.
14. Рыбин А.А. и др. //Механика КМ. — 2002, Т. 8. — № 2. — С. 261–281.
15. Скляр Н.М. и др. //Пласт. массы. — 2003. — № 10. — С. 8–14.
16. Михайлин Ю.А. //НБ «Полимерные материалы», 2001. — № 3(22). — С. 2–4; № 4(23). — С. 6–8; № 6(25). — С. 4; 2003; № 6(49). — С. 22–24; № 7(50). — С. 16–19.
17. Проспекты фирмы *DuPont «Engineering Fibres Kevlar»*, январь 1999.
18. Проспект ОАО «АРМОКОМ» «Средства защиты», 2000, 32 с.
19. Фрумкин И. Известия, 31.10.2001.
20. *Pinzelli R., Matériaux et techniques*, 1984, № 1–2, p. 43–48.
21. *Flight Int.*, 1978, № 3597, p. 503–509.
22. *Scholle K., 33 Int. SAMPE Symposium*, 1988, v. 33, p. 158–168
23. Техника молодежи. — 1996. — № 3. — С. 7, 8.
24. Харченко Е.Ф. и др. Композитный мир. — 2006. — № 3. — С. 24–26.
25. Михайлин Ю.А. Термостойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006. — С. 450–460.
26. СЖ Полимерные материалы. — 2008. — № 11. — С. 31.

4. Сотовые материалы и конструкции

В различных отраслях промышленности, особенно в авиастроении, судостроении, ракетостроении, гражданском строительстве широко применяют конструкции с заполнителями (интегральные конструкции). Они обладают, как правило, высокими параметрами жесткости и удельной прочности, вибростойкости, хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, специальными свойствами (радиопрозрачность конструкций из диэлектрических материалов). Несущие слои, подкрепленные заполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, иногда превышающие предел упругости материала.

Такие конструкции рассматривают как двутавровую балку, одна из горизонтальных полок которой работает на сжатие, а другая — на растяжение. Заполнитель, связывающий оболочки, аналогичен вертикальной полке балки, работает на сдвиг и повышает изгибную жесткость структуры, но в противоположность двутавру, основным его назначением является обеспечение опоры для разнесенных оболочек. Разновидностью интегральных конструкций являются клееные и супергибридные (рис. 4.1) конструкции, которые все чаще заменяют однослойные конструкции (оболочки), прежде всего, в авиаракетостроении (например, использование алюминий-стеклопластиковых материалов *GLARE* в секциях фюзеляжа *Airbus A-380*).

В конструкциях авиаракетостроения для снижения их массы и повышения трещиностойкости и упругопрочностных свойств однослойные металлические оболочки заменяют многослойными, в которых пластины из алюминиевых и титановых сплавов соединяются не диффузионной сваркой, а склеиванием. Многослойные оболочки *SPF/AB* (*Super Plastically Formed/Adhesively Bonded*) в виде структур из пластин литий-алюминиевого сплава, формуют и одновременно склеивают при 370–400 °С в течение 50 мин пленочным (наполнитель — стеклоткань) полиимидным клеем *LARC-8515* (фирма *IMITEC Inc.*, США) и предназначаются для изготовления криобаков ракетносителя «Дельта-4» (фирма *Boeing*). Многослойные пластины из сплава *Ti-6Al-4V*, склеенные (нагрев до 250 °С со скоростью 5°/мин, выдержка при 250 °С, нагрев до 350 °С, выдержка при 350 °С 60 мин под давлением 0,5 МПа) полиимидным клеем *FM-5* (пленочный, наполнитель — стеклоткань, 85 %масс. адгезива, не более 4 %масс.

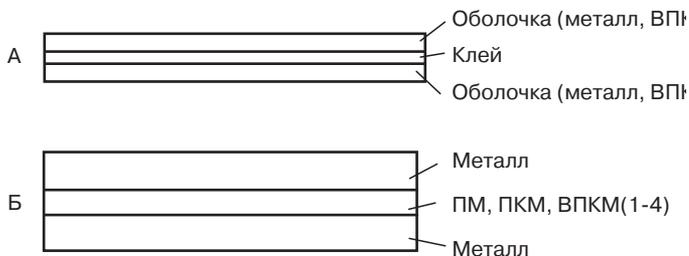


Рис. 4.1. Многослойные клееные (А) и супергибридные (полимер-металлические) оболочки (Б, заполнители): 1 — органопластики в Алорах; 2 — стеклопластики в Сиалах, *GLARE*; 3 — углепластики; 4 — термопластичные КМ, ВПКМ)

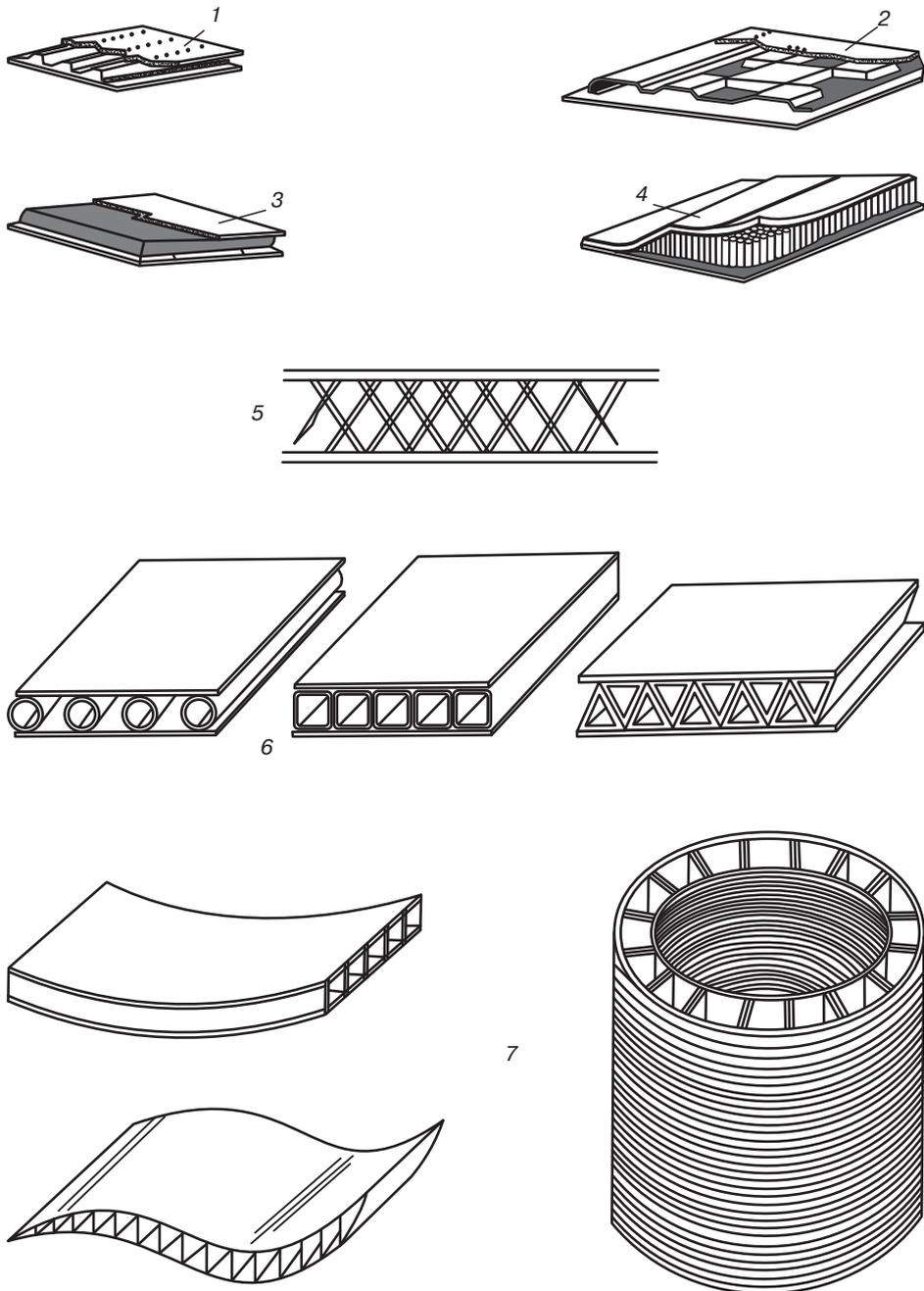


Рис. 4.2. Трехслойные конструкции различной формы с наполнителями [9, 23, 25]: 1 — гофры (рифленые наполнители из пленок, металлической и керамической фольги, листовых материалов из ПМ, ВПКМ); 2 — вафельные; 3 — термопластичные и термореактивные пено- и поропласты (эласты), в том числе наполненные дискретными наполнителями (порошки, волокна, микросферы и их смеси); 4 — соты (металлические, стекло- и углепластиковые, ПСП); 5 — сетчатые структуры («тетра»-заполнители); 6 — трубчатые (в том числе из ВПКМ, получаемых намоткой, пултрузией); 7 — криволинейные

растворителя N-метил-2-пирролидона, фирма *Cytel*, США) предназначены для использования в конструкциях сверхзвукового пассажирского самолета.

Из оболочек титан (фольга из сплава Т-15-333)—углепластик (наполнитель — ленты из углеродных нитей *IM-7*, полиимидное связующее *PIXA-M*. НИЦ *Langley*, *NASA*, толщина препрега 0,125 мм) при 540 °С в течении 8 ч формируют элементы конструкций (оболочки мотогондол, люков доступа к двигателям) конвертоплана *V-22 Osprey*, лонжероны *B-787 Dreamliner* [29].

Для решения вопросов оптимизации весовых, упругопрочностных, специальных свойств в качестве заполнителей используют пеноматериалы (пенопласты, пенометаллы, пенокерамика, пеноуглеродные материалы), гофры, сетчатые конструкции, трубчатые заполнители (рис. 4.2) [1–7, 9, 10, 12, 13].

Для ряда конструкций критическим параметром механических свойств является показатель модуля упругости материалов конструкции при изгибе и изгибная жесткость конструкции в целом. При эксплуатации отсеков летательных аппаратов цилиндрической формы они подвергаются воздействию интенсивных сжимающих нагрузок, при которых существенную роль играет изгибная жесткость элементов конструкции оболочки и ее прочность при сжатии. Использование в качестве заполнителей сетчатых структур (тетра-заполнитель) повышает изгибную жесткость трехслойных конструкций в 6 раз, а сами заполнители изготавливают намоткой [1].

Оболочки с высокими значениями удельной прочности и жесткости используют в конструкции фюзеляжей самолетов, переходных отсеков ракет, корпусных конструкций подводных аппаратов, опорных мачт, водонапорных башен.

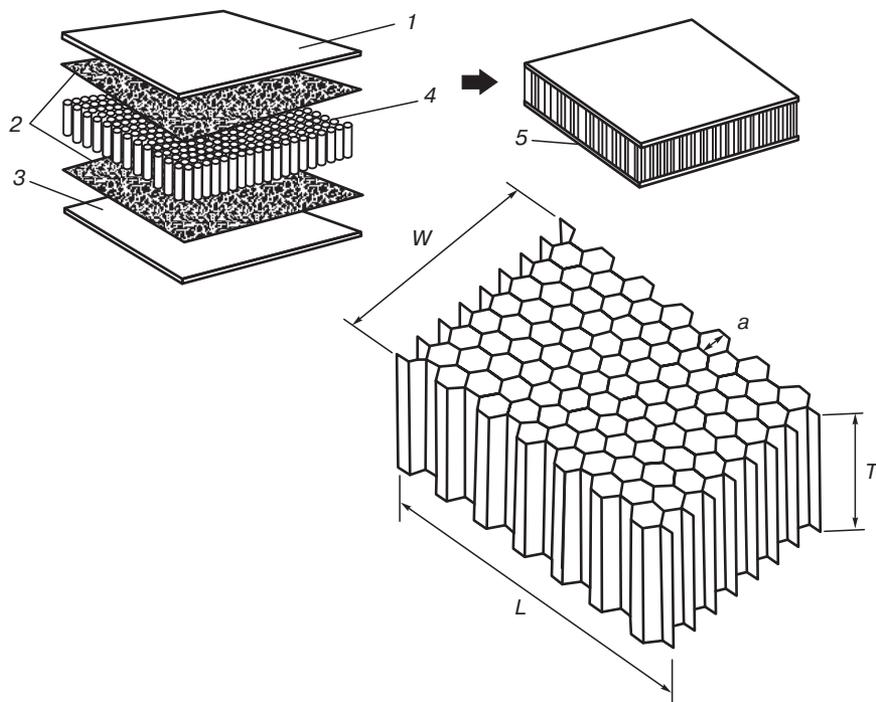


Рис. 4.3. Структура слоев трехслойной сотовой панели [5, 13]: 1 — верхняя обшивка; 2 — клеевые пленки; 3 — нижняя обшивка; 4 — сотовый наполнитель, сотопласты (стекло-, угле-, органосоты, соты из пленок, полимерной бумаги, крафт-бумаги), соты из металлической фольги (Al, Ti, сталь и др.); 5 — трехслойная панель в сборе; W , L , T — параметры сотового блока

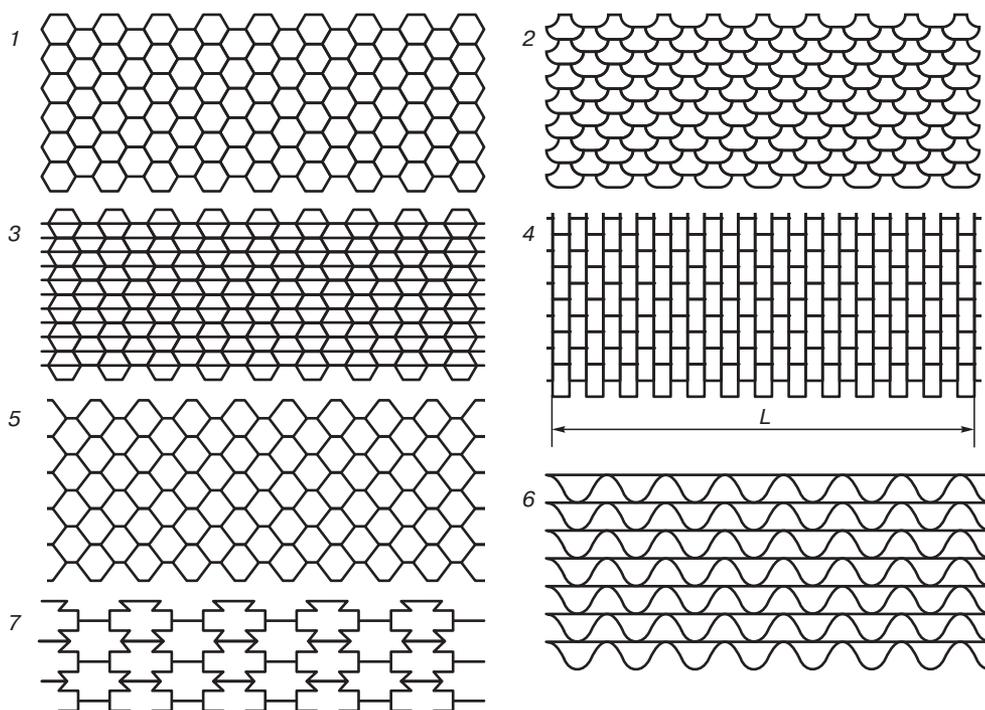


Рис. 4.4. Различные конфигурации ячеек сотовых заполнителей [5, 9]:

1 — гексагональные ячейки (*hexagon*), высокая технологичность, коэффициент формы, площадь склеивания с обшивкой; 2 — гибкие ячейки (*flex-core*), для изгиба сотового блока по двум осям при изготовлении криволинейных оболочек; 3 — ячейки с усиленными слоями (*reinforced hexagon*), чередующимися с рифлеными; 4 — прямоугольные ячейки (*rectangular*), равнопрочные в направлениях Ox , Oy , можно изгибать в направлении « L »; 5 — ромбические (*square*) ячейки для изгиба по одной оси; 6 — рифленые (гофрированные) ячейки для изгиба по двум осям; 7 — мальтийский крест

Использование цилиндрических оболочек из углепластика в конструкциях ЛА, работающих на осевое сжатие, изгиб и кручение, позволяет снизить массу конструкции на 25–40 % по сравнению с алюминиевыми аналогами.

Наибольшее применение в качестве заполнителей, обеспечивающих разнесение оболочек, получили сотовые заполнители, в том числе сотовые пластины на основе реакто- и термопластов, углеродные, керамические и металлические соты (рис. 4.3–4.5). Существенный прогресс в решении проблемы весового совершенства конструкции достигнут после разработки полимерных сотовых пластины (ПСЦ, *Nomex*) [7].

Сотовые конструкции являются типичными представителями слоистых панелей. Они представляют собой конструкцию, состоящую из несущих слоев и сотового заполнителя, расположенного между ними.

Сотовые (сэндвичевые) конструкции позволяют эффективно решать проблему весового совершенства конструкций многофункционального назначения, прежде всего силовых конструкций. Чаще всего они являются 3-слойными (для решения специальных задач, например, в радиопрозрачных антенных обтекателях, они могут быть 3-, 5-, 7-слойными) и состоять из оболочек, расположенных между ними заполнителей, разделяющих несущие оболочки и распределяющих нагрузки между ними, адгезионных слоев, связывающих оболочки с заполнителем и передающих нагрузку от заполнителя к оболочкам и обратно.

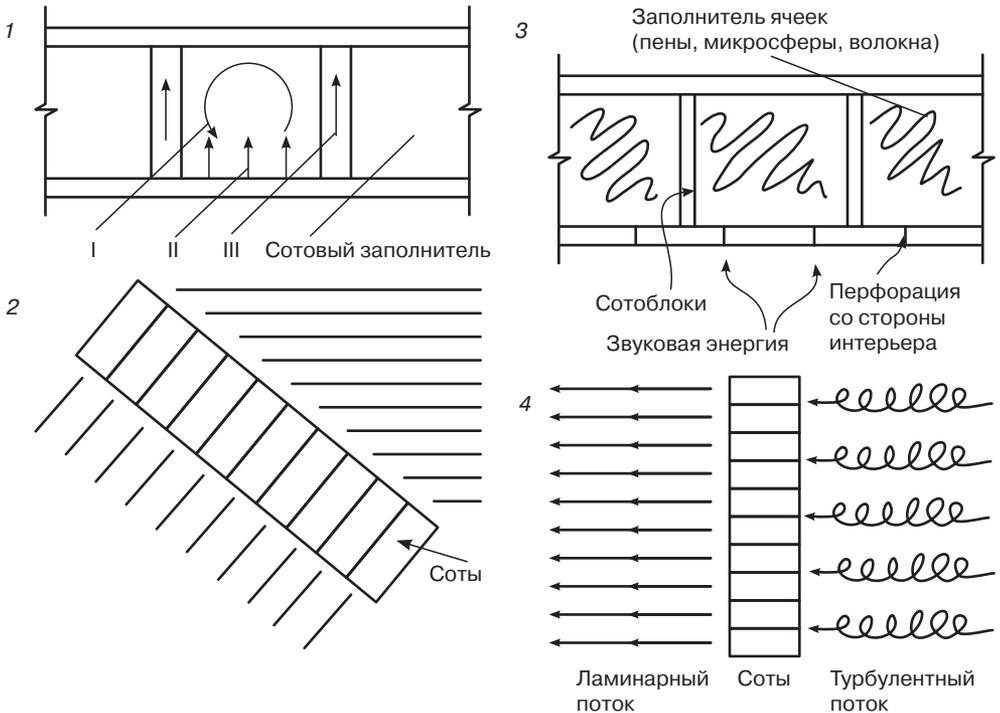


Рис. 4.5. Типы сотовых конструкций (панелей) различного назначения [5, 15, 16]:
 1 — теплоизоляция и теплозащита (I — конвекция, II — излучение, III — теплопроводность); 2 — регулирование (изменение направления движения) тепловых, звуковых потоков, газовых, жидких сред;
 3 — звукоизоляция (интерьерные панели); 4 — аэро- и гидродинамические панели

Применение сотовых конструкций обусловлено их существенными преимуществами перед однослойными. Для них характерна большая удельная прочность, высокая жесткость и устойчивость при продольном сжатии, высокая усталостная прочность, особенно в зонах с повышенными акустическими нагрузками, невысокая трудоемкость при проектировании сборочных узлов за счет уменьшения числа стыков и опорных элементов в конструкции, повышенные тепло- и звукоизоляционные свойства.

4.1. Механические свойства сотовых конструкций

Конструкции с наполнителем при относительно небольшой массе обладают высокими характеристиками прочности и жесткости. Несущие слои, подкрепленные наполнителем, воспринимают высокие напряжения сжатия, превышающие предел упругости слоя, обладают хорошими вибрационными свойствами.

Для конструкций с наполнителем при действии внешних нагрузок характерна совместная работа всех составных элементов конструкций. Наполнитель воспринимает поперечное сжатие и поперечный сдвиг и предохраняет тонкие несущие слои от местной и общей потери устойчивости, обеспечивая в то же время их совместную работу и высокую жесткость. Несущие слои воспринимают продольное растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг в плоскости панели и предохраняют от внешнего воздействия относительно слабый наполнитель, очень чувствительный к сосредоточенным нагрузкам. Такое сочетание и взаимодействие составных элементов

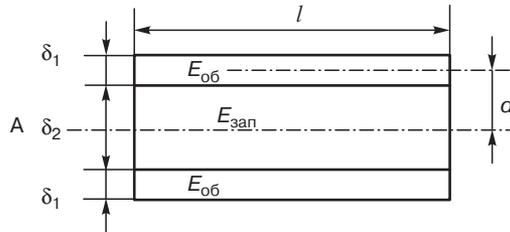
конструкций с заполнителями обеспечивает большую жесткость и высокую несущую способность при сравнительно малой массе этих конструкций.

Прочность, устойчивость и жесткость трехслойных конструкций (ТСК) зависят как от геометрических и жесткостных, так и от прочностных параметров составных элементов конструкций с заполнителями — несущих слоев, заполнителей, их соединений, а также всей панели в целом.

ТСК представляет собой составную конструкцию, состоящую из двух несущих слоев, заполнителя, расположенного между несущими слоями, и элементов каркаса (окантовок, законцовок накладок и др.). Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Заполнитель воспринимает поперечные силы при изгибе ТСК и обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Способность заполнителя воспринимать нагрузку в плоскости несущих слоев зависит от конструкции заполнителя и его жесткостных характеристик. Элементы каркаса обеспечивают местную жесткость конструкции при действии сосредоточенных усилий и в местах крепления повышают сопротивление усталости. Трехслойные конструкции с заполнителем могут быть самые разнообразные: панели, стенки, переборки, балки, плиты, оболочки и т. п.

Трехслойные конструкции — специфические слоистые КМ с высокой жесткостью при изгибе в результате использования тонких оболочек из жестких (высокомодульных) материалов во внешних слоях, связанных с сердцевинной заполнителем. Главной функцией заполнителя является удаление материала оболочки из центральной плоскости (нейтральной оси при изгибе) для увеличения эффекта повышения жесткости (аналогичный эффект достигается при использовании ребер).

Несущие оболочки конструкций обеспечивают жесткость при изгибе и сдвиге в плоскости пластин и передачу нагрузок в той же плоскости. Заполнитель придает устойчивость несущим поверхностям и обеспечивает передачу сдвиговых нагрузок по толщине конструкции.



Жесткость 3-слойной конструкции (А) при изгибе $D_{изг} = 2 \cdot E_{об} \cdot I_{об} + E_{зап} \cdot I_{зап}$, где $E_{об}$, $E_{зап}$ — модули упругости при изгибе материалов оболочки и заполнителя; $I_{об}$, $I_{зап}$ — моменты инерции поперечного сечения каждой оболочки и заполнителя относительно центральной (конструкция симметрична) нейтральной оси.

Так как $I_{зап} = l \cdot \frac{\delta_1^3}{12}$, $I_{об} = l \cdot \frac{\delta_1^3}{12} + l \cdot \delta_1 \cdot d^2$ (моменты инерции каждой оболочки относительно ее собственной центральной оси), то

$$D_{изг} = E_{об} \cdot (l \cdot \frac{\delta_1^3}{6} + 2 \cdot l \cdot \delta_1 \cdot d^2) + E_{зап} \cdot l \cdot \frac{\delta_2^3}{12}.$$

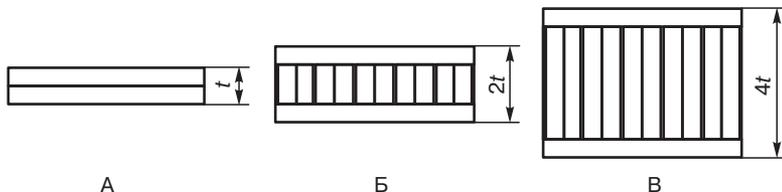
Обычно (и если) $\delta_1 \ll \delta_2$, то $D_{изг} = 2 \cdot E_{об} \cdot l \cdot \delta_1 \cdot d^2$.

($E_{зап} \cdot l \cdot \frac{\delta_2^3}{12}$ и $l \cdot \frac{\delta_1^3}{6}$ пренебрегают, так как $E_{зап}$ обычно мал).

Сравнение $D_{изг}$ оболочки из полиэфирного стеклотекстолита ($E = 7000$ МПа, $\delta_1 = 3$ мм, $D_{ви} = 1,25 \cdot 10^7$ МПа) и трехслойной оболочки (между оболочками из полиэфирного стеклотек-

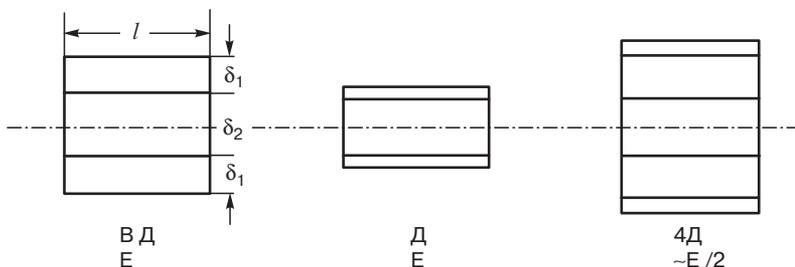
столита, толщиной $\delta_1 = 3$ мм каждая, расположен пенополиуретан с $E = 20$ МПа, $\delta_2 = 24$ мм) показывает, что $D_{\text{вн}}$ 3-слойной оболочки равна $77 \cdot 10^7$ МПа (длина l в обоих случаях 100 мм) увеличивается в 61 раз. Жесткость при растяжении D^+ при этом практически не меняется.

Уникальное свойство 3-слойных сотовых конструкций состоит в существенном увеличении жесткости практически без увеличения массы. Для 3-слойных конструкций (см. ниже, схемы А, Б, В) (оболочки — алюминий, $t/2 = 2$ мм, соты из алюминиевой фольги, шестигранные ячейки $1/4$, фольга из Al 5052) различной толщины $t, 2t, 4t$ (плотность 37 кг/м³) относительное изменение прочности и жесткости могут быть повышены соответственно в 7 и 35 раз [5].



| | А | Б | В |
|---|------|-----------|------------|
| Жесткость (D), кг·см ² /см | 1822 | 13 933 | 71 004 |
| Относительное изменение жесткости | 1,0 | 7–7,4 | 37–39,0 |
| Объемная плотность, кг/м ³ | 29 | 30 | 31 |
| Относительное изменение плотности | 1,00 | 1,03–1,05 | 1,06–1,097 |
| Относительное изменение прочности | 1 | 3 | 7 |

Модуль упругости 3-слойных конструкций не совпадает с модулем упругости однослойной оболочки. Он сохраняется только при увеличении толщины оболочек.



Для удельной жесткости конструкции оптимально соотношение:

$$m_{2\text{-х оболочек}} = 1/3 \Sigma m_{\text{всей конструкции}} \quad (4.1)$$

Для 3-слойной конструкции с плотностью материала оболочки $\rho_{\delta_1} = 1,47$ г/см³ и заполнителя $\rho_{\delta_2} = 0,08$ г/см³: $m_{2\text{-х оболочек}} = 8820$ г/м²; $m_{\text{заполнителя}} = 1920$ г/м²; суммарная масса $10\,740$ г/м². Суммарная удельная масса 2-х оболочек $m_{2\text{-х обол.}} \rho = 4820$ г/м² $\gg 1/3 (1/3 \Sigma m_{\text{всей конструкции}} = 3580$ г/м²).

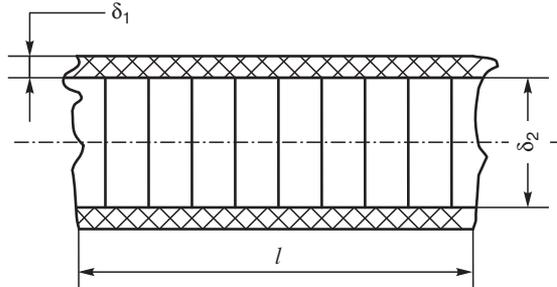
Чтобы повысить жесткость конструкции при изгибе $D_{\text{изг}}$ до $363 \cdot 10^6$ МПа (в 5 раз выше, чем в случае $\delta_1 = 3$ мм, $\delta_2 = 24$ мм), что соответствует соотношению (4.1), необходимы $\delta_1 = 1,22$ мм, $\delta_2 = 89,5$ мм. Но для большей ударной прочности нужны толстые оболочки ($\delta_1 > 1,22$ мм). При $\delta_1 = 1,22$ мм могут быть значительными деформации при сдвиге.

В большинстве случаев вместе с изгибом ($\sigma_{\text{вн}}$) есть и сдвиг ($\tau_{\text{сд}}$) при нагружении в поперечном направлении, причем $\tau_{\text{сд}} = f(l)^1 \rightarrow$ увеличивается медленно с увеличением расстояния между опорами, а $\sigma_{\text{вн}} = f(l)^3 \rightarrow$ увеличивается быстро.

В случае низко модульных заполнителей необходимы испытания при соотношениях $l/b = 48:1$ и нужно рассматривать вклад в уменьшение жесткости сдвиговых напряжений.

Повышение жесткости D при изгибе ТСК дает дополнительный эффект в виде уменьшения как нормальных напряжений σ , так и касательных напряжений τ как при чистом, так и поперечном изгибе: $\sigma, \tau \approx 1/D$, то есть с увеличением жесткости ТСК увеличивается не только деформационная устойчивость, но и прочность ТСК.

С увеличением значения δ_2 хотя и увеличивается резко жесткость ТСК, но одновременно увеличивается и масса $M_{\text{ТСК}}$ ТСК, какой бы малой кажущейся плотностью ρ_{δ_2} не обладал наполнитель. Одной из важных задач в области проектирования ТСК является достижение ее массового совершенства, то есть минимизация соотношения массы $M_{\text{ТСК}}$ и жесткости $D_{\text{ТСК}}$ ТСК. Для каждой отдельной ТСК существует некое оптимальное соотношение значений δ_2 и δ_1 , при котором достигается максимальная удельная жесткость ($D_{\text{ТСК}}/M_{\text{ТСК}}$) ТСК.



Минимально возможную массу $M_{\text{ТСК, min}}$ ТСК при оптимальных значениях строительной высоты δ_2 наполнителя и толщины облоочек ТСК δ_1 , при которых обеспечивается $M_{\text{ТСК, min}}$ ТСК при заданных значениях жесткости $D_{\text{ТСК}}$, модуля упругости обшивок $E_{\text{об}}$; плотностей $\rho_{\text{об}}$ и $\rho_{\text{зап}}$ материала обшивок и наполнителя рассчитывают, используя в качестве объекта балку шириной b и длиной пролета l (на схеме не показано), работающую на изгиб.

Масса ТСК $M_{\text{ТСК}}$ составит:

$$M_{\text{ТСК}} = 2M_{\text{об}} + M_{\text{зап}} = 2\rho_{\text{об}} \cdot l \cdot b \cdot \delta_1 + \rho_{\text{зап}} \cdot l \cdot b \cdot \delta_2.$$

так как $\delta_1 = 2D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}} \cdot l \cdot \delta_2^2$ (4.1), то

$$M_{\text{ТСК}} = (4\rho_{\text{об}}^2 \cdot b \cdot D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}}) \cdot l / \delta_2^2 + \rho_{\text{зап}} \cdot l \cdot b \cdot \delta_2.$$

$$dM_{\text{ТСК}}/d\delta_2 = (8\rho_{\text{об}}^2 \cdot b \cdot D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}}) \cdot l / \delta_2^3 + \rho_{\text{зап}} \cdot l \cdot b = 0.$$

$M_{\text{ТСК, min}}$ достигается при $\delta_2 = 2[\rho_{\text{об}} \cdot D_{\text{ТСК}}/\rho_{\text{зап}} \cdot E_{\text{об}} \cdot l]^{1/3}$.

Подставляем значение δ_2 в (4.1) получим, что толщина δ_1 обшивок в ТСК с минимальной массой составит:

$$\delta_1 = 1/2 \cdot (\rho_{\text{зап}}/\rho_{\text{об}})^{2/3} \cdot (D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}} \cdot l)^{1/3}.$$

Соотношение значений δ_2 и δ_1 в ТСК с минимальной массой зависит только от плотности материалов наполнителя и обшивок и обратно пропорционально их соотношению:

$$\delta_2/\delta_1 = 4\rho_{\text{об}}/\rho_{\text{зап}}.$$

так как

$$2M_{\text{об}} = (\rho_{\text{об}} \cdot D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}})^{1/3} \cdot (\rho_{\text{зап}} \cdot l)^{2/3} \cdot b. \quad (4.2)$$

$$M_{\text{зап}} = 2(\rho_{\text{об}} \cdot D_{\text{ТСК}}/E_{\text{об}})^{1/3} \cdot (\rho_{\text{зап}} \cdot l)^{2/3} \cdot b. \quad (4.3)$$

то масса наполнителя в оптимизированной ТСК должна быть в 4 раза больше, чем масса одной обшивки

$$M_{\text{зап}} = 4M_{\text{об}}.$$

Складывая выражения (4.2) и (4.3) получаем значение $M_{\text{ТСК, min}}$

$$M_{\text{ТСК, min}} = 3 \cdot \rho_{\text{зап}}^{2/3} \cdot \rho_{\text{об}}^{1/3} (1/2 \cdot \delta_1 \delta_2^2) \cdot b \cdot l.$$

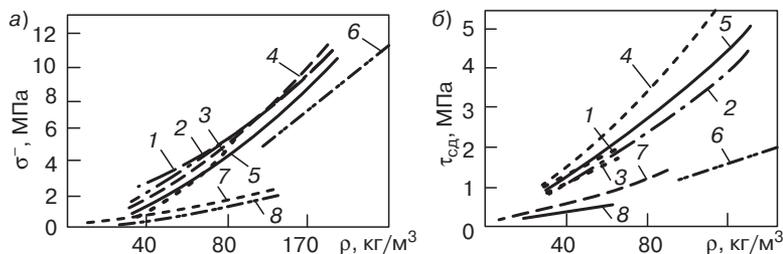


Рис. 4.6. Зависимость прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ (а) и прочности при сдвиге $\tau_{сд}$ (б) в направлении L (см. рис. 4.3) от плотности сотового заполнителя ρ [4]:

1 — водостойкая бумага; 2 — стеклопластик с фенольным связующим; 3 — бумага Nomex; 4, 5 — алюминиевые сплавы соответственно Al-5056 и Al-5052; 6 — бальсовое дерево; 7 — крафт-бумага; 8 — пенопласт

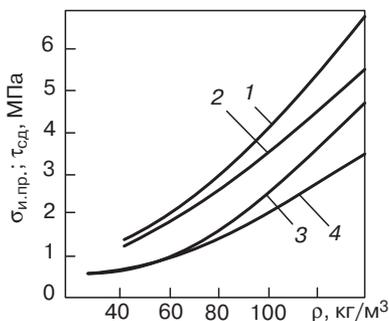


Рис. 4.7. Зависимость прочности при продольном изгибе $\sigma_{и.пр.}$ и сдвиге $\tau_{сд}$ от плотности сотового заполнителя ρ [4]: 1 и 2 — изгиб и сдвиг в направлении L ; 3 и 4 — изгиб и сдвиг в направлении W (L и W см. на рис. 4.3)

то есть при выборе материала заполнителя и обшивок для снижения $M_{ТСК}$ более эффективно использование заполнителя с меньшими значениями кажущейся плотности.

Сотовые конструкции — анизотропные материалы. Они имеют наиболее высокую σ в направлении T , различные $\tau_{сд}$ по осям L и W (рис. 4.3), которые определяются прочностью соединения гофрированных заготовок. $\tau_{сд}$ по осям L и W возрастает, если ячейки сот располагаются параллельно обшивкам. Нагрузки отрыва, сдвига и сжатия воспринимаются в трехслойной панели обшивками и через клеевую прослойку передаются стенкам ячеек сот. Прочность (при сдвиге и отрыве) соединения обшивок с сотовой панелью существенно зависит от величины клеевых слоев на торцах сот и увеличивается при применении для соединения сот с обшивкой пленочных и вспениваемых клеев. Для снижения весовых характеристик используют нанесение клея только на торцы сотопакетов (окунанием). Прочность при поперечном сжатии и объемная масса сот зависит от размера и формы сотовой ячейки, толщины ее стенок, использованных материалов (рис. 4.6, 4.7).

4.2. Материалы сотовых конструкций

Многослойные (трехслойные) сотовые конструкции (панели) состоят из чередующихся сотовых структур и несущих оболочек, с которыми их соединяют обычно склеиванием. Сотовые структуры создают опору для несущих оболочек (обшивок), предохраняют их от потери

устойчивости при нагружении и обеспечивают жесткость сотовой конструкции при изгибе и сдвиге в плоскости оболочек (пластин) и передачу напряжений в той же плоскости.

Для оптимизации свойств сотовых конструкций используют жесткие и ударопрочные оболочки и жесткие наполнители. Для уменьшения влияния τ_{cl} — склеивают оболочки с сотовыми блоками, используя пленочные клеи (технологичные, но повышают массу конструкции), вспенивающиеся клеи, для снижения массы нанесение клея на торцы сотовых блоков. Для криволинейных конструкций используют сотовые блоки с особой формой ячеек (рис. 4.4).

4.2.1. Материалы, используемые в качестве оболочек сотовых конструкций

Выбор материалов для оболочек определяется параметрами эксплуатационных свойств сотовых конструкций (конструкционных — прочность, жесткость, трещиностойкость при статическом и динамическом нагружении, весовых, специальных — радиопрозрачность, радиопоглощение, термоустойчивость и др., возможность механической обработки, применения заклепочных, болтовых соединений). В зависимости от этих параметров используют большой ассортимент материалов как металлических (сплавы алюминия, титана, сталь), так и полимерных на основе реакто- и термопластов (стекло-, угле-, органопластики, поливолоконистые гибридные пластики, которые по прочности и жесткости сравнимы с металлами, но значительно превосходят их по удельным характеристикам и имеют ценный комплекс специальных свойств) (табл. 4.1–4.4).

Высокие упругопрочностные свойства, весовые характеристики, трещино-, тепло- и огнестойкость имеют термопластичные ПКМ на основе полифениленсульфидов типа *Fortron*, полиэфиримидов типа *Utem*, полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) типа *Victrix* при малом водопоглощении [8].

В самолетостроении в качестве оболочек используются стеклопластики, углепластики, другие ВПКМ, алюминиевые сплавы марок 2024 и 7075, титановые или стальные листы.

Большинство оболочек для радиопрозрачных конструкций изготавливают из стекло- и кварцпластиков [3, 9, 10, 27]. Для изготовления ТСК с оболочками из высокопрочных и высококомодульных ВПКМ, применяемых в авиастроении, ракетной, космической технике, для постройки глубоководных аппаратов используются угле- и органо (кевларо) пластики.

Таблица 4.1. Сравнительные свойства материалов, используемых в качестве оболочек трехслойных конструкций [2, 25]

| Материалы для несущих оболочек ² | Предел текучести σ_T^+ , МПа | E^+ , ГПа | $\lambda_g \cdot (1 - \nu^2)^1$ | Масса 1 м ² толщиной 1 мм, кг |
|---|-------------------------------------|-------------|---------------------------------|--|
| Алюминий 2024-Т3 | 800 | 160 | 0,89 | 2,69 |
| Алюминий 5052-Н34 | 416 | 160 | 0,89 | 2,69 |
| Алюминий 6061-Т6 | 560 | 160 | 0,89 | 2,69 |
| Алюминий 7075-Т6 | 1169 | 160 | 0,89 | 2,69 |
| Мягкая углеродистая сталь | 800 | 480 | 0,91 | 7,68 |

Примечания: ¹ Параметр, характеризующий устойчивость пластины (λ — теплопроводность перпендикулярно плоскости; ν — коэффициент Пуассона).

² Обеспечивают жесткость относительно изгиба и сдвига в плоскости пластин, передачу напряжений в той же плоскости. Основным критерием является сравнительный анализ прочностных и массовых характеристик.

Окончание табл. 4.1

| Материалы для несущих оболочек ² | Предел текучести σ_T^+ , МПа | E^+ , ГПа | $\lambda_0 \cdot (1 - \nu^2)^{1/2}$ | Масса 1 м ² толщиной 1 мм, кг |
|--|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|--|
| Коррозионная сталь 316 | 961 | 480 | 0,94 | 7,68 |
| Коррозионная сталь 17-7 | 3200 | 480 | 0,94 | 7,68 |
| Титан отожженный ТТ-75П | 1280 | 240 | 0,94 | 4,52 |
| Титан термообработанный 6А1-4V | 2290 | 269 | 0,94 | 4,42 |
| Эпоксидный углетекстолит | 1280 | 160 | 0,99 | 1,54 |
| Однонаправленный эпоксиглеволокнит | 3500 | 320 | 0,99 | 1,54 |
| Полиэфирный стеклопластик (наполнитель стекломат) | 224 | 14,7 | 0,98 | 1,35 |
| Полиэфирный стеклопластик (наполнитель — ткань из ровинга) | 608 | 29,6 | 0,98 | 1,35 |
| Эпоксидный стеклопластик | 1009/990 ³⁾ | 56 | 0,98 | 1,69–1,83 |
| Фенольный стеклопластик | 770 | 56 | 0,98 | 1,61 |
| Полиэфирный стеклопластик | 770 | 56 | 0,98 | 1,92 |
| Полиимидный стеклопластик | 960 | 56 | 0,98 | 1,83 |
| Эпоксидный кевларопластик | 960/448 ³⁾ | 70 | 0,99 | 1,35 |

Примечание: ³⁾ При сжатии (σ_T^-).Таблица 4.2. Характеристики ВПКМ¹, используемых в качестве обшивок 3-слойных оболочек с сотовым наполнителем в конструкции мотогондол газотурбинных двигателей [2]

| ПКМ; толщина монослоя | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | E^+ , ГПа | G_{12} , МПа | τ_{13} , МПа |
|------------------------------------|------------------|------------------|-------------|----------------|-------------------|
| КМУ-4л; 0,11 мм | 800 | 900 | 140 | 450 | 55 |
| КМУ-4э; 0,11 мм | 900 | 1000 | 120 | 450 | 80 |
| КМУ-4э-0,08; 0,08 мм | 900 | 1000 | 120 | 450 | 80 |
| КМУ-7; 0,11 мм | 1000 | 700 | 140 | 450 | 80 |
| КМУ-7э-0,08; 0,08 мм | 600 | 700 | 140 | 450 | 80 |
| КМУ-7ТГ; 0,22 мм | 600 | 600 | 67 | 600 | 60 |
| Органит 10Т; 0,15 мм ²⁾ | 740 | 240 | 34 | 240 | 40 |
| Органит 16Т; 0,15 мм | 730 | 235 | 34 | 230 | 30 |

Примечания: ¹⁾ Однонаправленные эпоксифенольные и эпоксидные, испытание вдоль волокон. Для склеивания обшивок из ВПКМ с сотами используют клеи ВК-36, ВК-36Р ($T_{\text{раб}}$ от 60 до 150 °С).

²⁾ При использовании препрегов из Органита 10Т — бесклеевое соединение обшивки-соты.

Таблица 4.3. Прочностные, жесткостные и массовые характеристики неметаллических материалов для несущих слоев (оболочек) ТСК [2]

| Марка материала | ρ , кг/м ³ | Прочность, МПа, при | | | $E^+ \cdot 10^{-3}$, МПа | $G \cdot 10^{-3}$, МПа | σ^+ / ρ , км |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------|--------|--------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| | | растяжении | сжатии | сдвиге | | | |
| ТСП | 1400 | 110 | 150 | — | 13,7 | — | 7,9 |
| «Акрилвиплин П» (термопласт) | 1400 | 60 | 80 | — | 0,4 | — | 4,3 |
| Стеклопластики: | | | | | | | |
| 1) КАСТ-В | 1850 | 280 | 110 | 16 | 20 | 4 | 15,1 |
| 2) СК-5-211-БН | 1850 | >600 | >300 | 11 | 32 | 3,5 | 32,0 |
| КМУ-1в ¹ | 1470 | 1020 | 400 | 30 | >170 | 3,5 | 70,0 |
| КМБ-1м ¹ | 2000 | 1200 | 1160 | 60 | 270 | 9,8 | 60,0 |
| КМУ-3л ¹ | 1400 | 550 | 420 | 30 | 81 | 5,1 | >39 |
| Органит 7Т | 1250 | >700 | >200 | 35 | 35 | 3 | 56 |

Примечание: ¹ ВПКМ однонаправленные, содержание волокон 60 %об., нагрузка в направлении волокон.

Таблица 4.4. Свойства оболочек ТСК из ВПКМ на основе клеевых препрегов [24]

| Свойства | Тип ВПКМ | |
|----------------------------|-----------------|---------------|
| | Стеклотекстолит | Углеволоконит |
| σ^+ , МПа | 600–1350 | 900–1250 |
| σ^- , МПа | 600–950 | 900–1000 |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа | 800–1350 | 1200–1400 |
| E^+ , ГПа | 22–52 | 100–145 |
| E^- , ГПа | 20–52 | 96–130 |
| $E_{\text{вн}}$, ГПа | 20–40 | 93–140 |

4.2.2. Материалы для заполнителей сотовых конструкций

В трехслойных конструкциях в качестве заполнителей используют различные материалы, обеспечивающие функцию разнесения оболочек и удаление материала оболочек из центральной (нейтральной оси при изгибе) плоскости для увеличения эффекта повышения жесткости (бальсовая древесина с $\rho = 95\text{--}250$ кг/м³, пенопласты с $\rho = 50\text{--}800$ кг/м³, сотовые структуры). Большое применение находят заполнители в виде сотовых структур, которые изготавливают из металлической фольги (алюминий, реже — сталь, титан) и полимерных материалов (сотопласты на основе терморезистивных и термопластичных связующих, стекло-, угле-, органосотопласты; полимерные сотопласты (соты ПСП, *Nomex*) на основе бумаги из ароматического полиамида; соты на основе полимерных пленок; сотоэласты на основе различных наполнителей (ткани, ленты) и резин; пиролизированные сотопласты, получаемые, например, термообработкой феноглесотопластов).

Свойства сотовых заполнителей (рис. 4.6, 4.7) определяются их плотностью, формой и размером ячеек, толщиной сотоблоков.

Сравнительные свойства сотовых конструкций различных типов, определяемые свойствами оболочек, сотовых заполнителей, качеством склеивания, технологией изготовления как составных частей конструкции, так и сотовой конструкции в целом, приведены в разделе 4.5.

4.3. Технология изготовления сотовых заполнителей

В зависимости от используемых материалов разработаны различные технологические приемы изготовления сотовых заполнителей. По одной из технологий начальной операцией изготовления сотовых блоков является операция гофрирования (рифления) листовых материалов (бумага, пленки, фольга, термопластичные и терморезистивные наполненные волокнами, лентами, тканями препреги).

Гофры в сотовые блоки формируют склеиванием, сваркой, пайкой (соты из Al-фольги) с последующей растяжкой.

Сотовые структуры на основе бумаг (обычно с покрытием термопластичным полимером, ламинированных) получают сваркой гофрированных полуфабрикатов. Сотовые структуры на основе пластиков и резин (эластичные сотовые блоки), использующие в качестве наполнителей стеклянные, углеродные, полимерные ленты, ткани, полимерную бумагу, получают, используя несколько технологических приемов (см. разделы 4.3, 4.4).

Тetra-заполнители на основе термо- и реактопластов, наполненных нитями и жгутами, получают намоткой, используя специальную оснастку (например, из жестких пенопластов).

4.3.1. Сотовые заполнители из металлической фольги

Используют несколько видов фольги различных толщин (калибров) из сплавов с различной прочностью, теплостойкостью, поверхностной антикоррозионной обработкой. Сотовые блоки получают сваркой или пайкой гофрированных заготовок с ячейками не менее 5-ти видов с последующей растяжкой. При использовании алюминиевой фольги плотность сотового заполнителя, получаемого растяжением пакета 32–192 кг/м³, получаемого с использованием рифления 128–880 кг/м³. Растяжка пакетов позволяет изготавливать сотовые конструкции сложных геометрических форм (цилиндры переменного радиуса, сферы). До разработки сотовых ПСП, *Notex* сотовые конструкции с алюминиевыми сотовыми заполнителями имели наиболее приемлемые весовые параметры и широко использовались в многослойных оболочках конструкционного назначения (см. раздел 4.5).

4.3.2. Сотопласты

Сотопласты изготавливают из наполненных и ненаполненных пластиков (для решения специальных задач — демпфирование, ударопрочные конструкции — используют эластичные связующие на основе каучуков) в виде сотового блока, который разрезают на сотовые панели одинаковой или переменной (для оболочек сложной формы) высоты. Используют следующие технологические методы производства сотопластов и сотозластов:

1. Из препрегов в пресс-форме открытого типа получают гофрированные заготовки (при прессовании связующее полностью отверждается, эластичное — вулканизируется). На выступы гофр каждой заготовки наносят клей, заготовки укладывают одну на другую в приспособлении, обеспечивающем их фиксацию таким образом, чтобы образовались сотовые ячейки (форма гофр определяет геометрию ячеек). Во избежание смещения гофрированных заготовок друг относительно друга в нескольких впадинах каждой из гофрированных заготовок укладывают металлические стержни. Собранный блок термообработывают для отверждения клея (рис. 4.8).

Гофры из препрегов со степенью отверждения связующего 80–85% соединяют в блоки сваркой в высокочастотном поле (прессовый и роликовый способ, рис. 4.9, 4.10).

2. Гофрируют не пропитанные связующим листовые наполнители (ткани, ленты) на выступы гофр наносят клей, сверху во впадины устанавливают ряд стержней, прикапывают (гофрируют) следующий слой и т. д. Сотовые термообработывают для склеивания, пропитывают связующим, отверждают (фиксация геометрии ячеек и сотовых блоков, рис. 4.11).

3. На непропитанную связующим ткань, ленту, бумагу наносят клеевые полосы (рис. 4.12; 1) (расстояние между полосами определяет размер ячеек), подсушивают клеевые полосы для

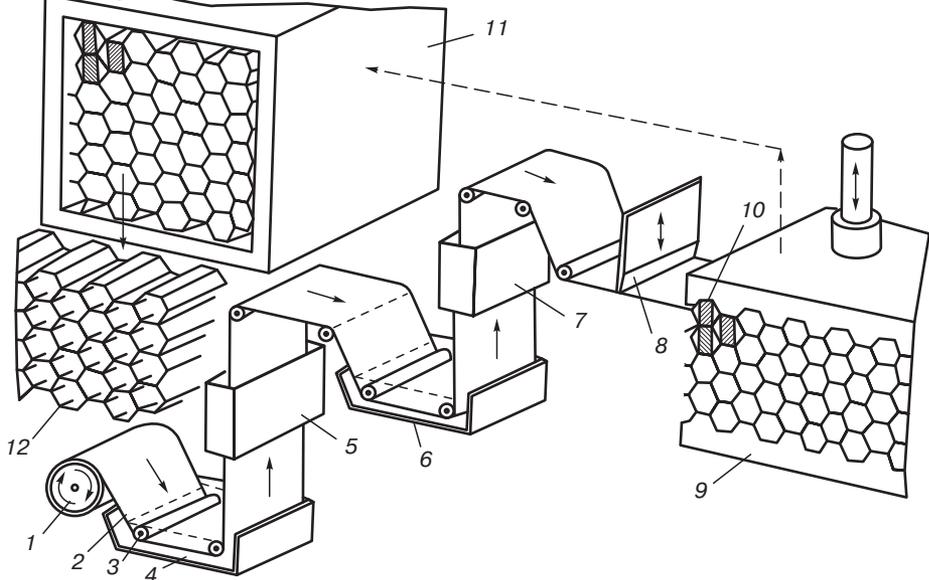


Рис. 4.8. Схема изготовления препрегов (позиции 1–8) и сотового заполнителя (позиции 9–12) блочным методом [4, 7]:

1 — сматывающее устройство; 2 — рулонный наполнитель (ткань, лента, пленка, бумага); 3 — направляющий валик; 4 — ванна с аппретом; 5 — сушильная камера; 6 — ванна со связующим; 7 — сушильная камера; 8 — отрезное устройство; 9 — плита; 10 — металлические стержни (сборка на плите 9 с использованием стержней 10 после нанесения клея на выступы гофр); 11 — печь для термостатирования; 12 — сотоблок

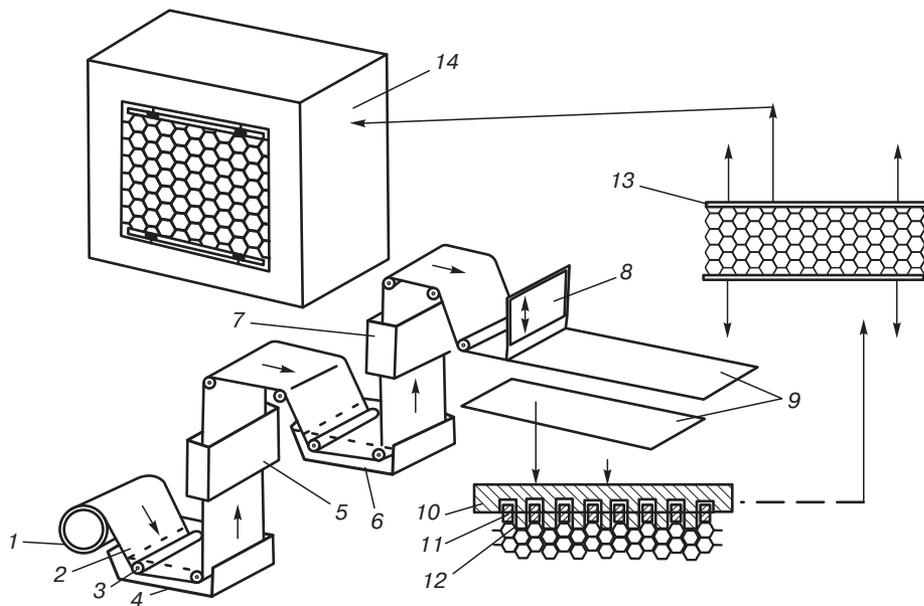


Рис. 4.9. Схема изготовления препрега (1–9) и сотового заполнителя (10–14) послойным методом [7]: 1 — сматывающее устройство; 2 — наполнитель; 3 — направляющий валик; 4 — ванна с аппретом; 5 — сушильная камера; 6 — ванна со связующим; 7 — сушильная камера; 8 — отрезное устройство; 9 — препрег; 10 — сварочный электрод; 11 — разделительная гребенка; 12 — опорная гребенка; 13 — устройство, исключающее усадку материала; 14 — печь для отверждения сотоблока

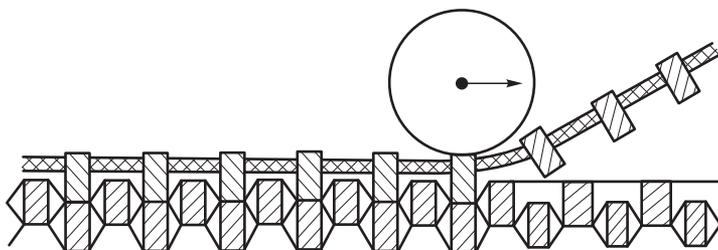


Рис. 4.10. Многопозиционный гибкий электрод для послойной высокочастотной сварки сотопластов

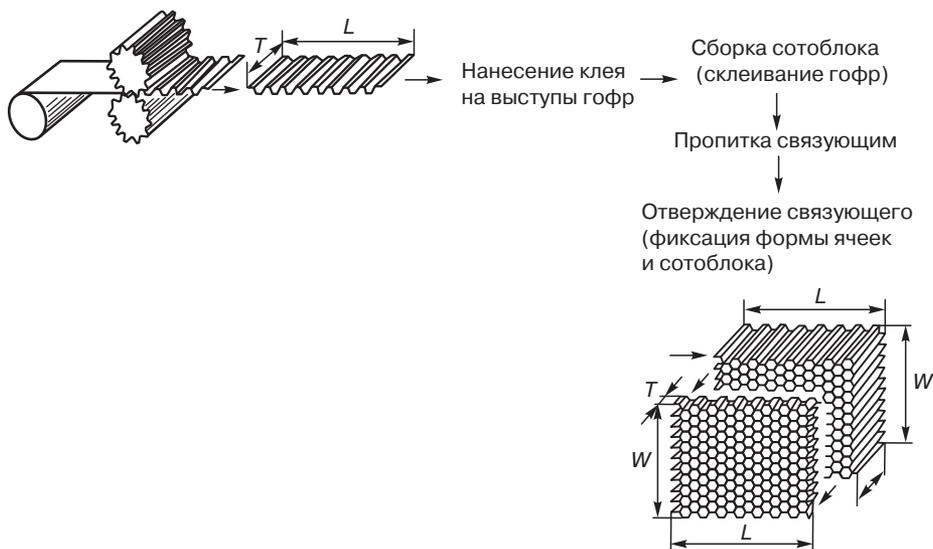


Рис. 4.11. Схема изготовления сотового заполнителя через стадии гофрирования, склеивания гофр, пропитки и отверждения сотопласта [5]

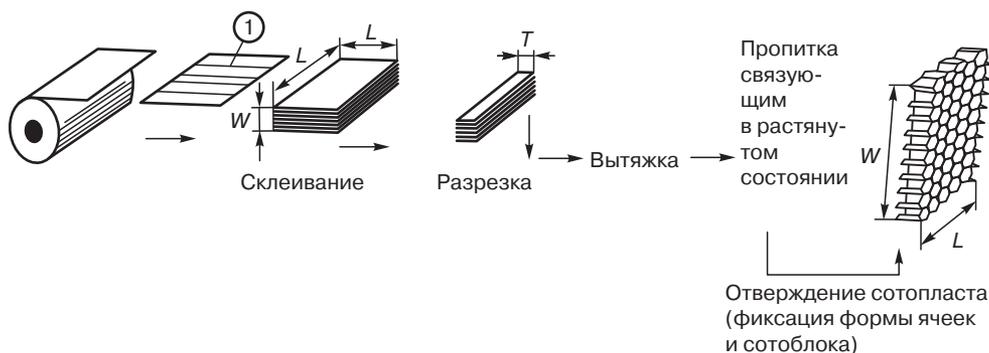


Рис. 4.12. Схема изготовления сотового заполнителя с предварительным нанесением клеевых полос [5, 7]

устранения липкости, собирают в пакет (расстояние между клеевыми полосами в соседних слоях равно размеру ячейки). Пакет склеивают, вырезают заготовки сотовых панелей, растягивают их, пропитывают связующим (полив, окувание), термообработывают для фиксации геометрии ячеек и сотовблока (рис. 4.13).

Сотовблоки, изготавливаемые периодическими методами 2 и 3 со множеством операций без применения давления имеют более низкие прочностные показатели, чем сотовблоки по технологии 1, и нестабильные значения объемной массы.

4. Растянутую объемную тканевую заготовку (в структуре ткани сформированы ячейки) пропитывают связующим и термообработывают для фиксации геометрии ячеек и сотовблока. Неплотная структура ткани (в тканевых заготовках могут присутствовать слои обшивок) и формование без давления снижает прочность сотовблоков при сжатии.

5. Сотопласты из полимерных пленок изготавливают методами, аналогичными методам 1 и 3. Гофры из пленок на основе ПЭТФ и полиимидов соединяют в блоки с использованием присадок, наносимых на выступы гофра («химическая» сварка).

Технология изготовления сотовых панелей профилированием листов ткани, пропитанных связующим, с последующим склеиванием из них блоков включает следующие операции: 1 — пропитка ткани связующим; 2 — профилирование; 3 — нанесение клея и сушка; 4 — сборка блоков; 5 — склеивание. Метод применяют, в основном, для изготовления сотовых заполнителей из хлопчатобумажной ткани (бязи) и стеклотканей в качестве наполнителя стенок ячеек. Сотовые заполнители из пропитанных связующими стеклотканей изготавливают этим методом со стороны шестигранника более 6 мм, так как в процессе прессования гофров меньших размеров разрушаются стекловолокна.

Профилирование листов непропитанной стеклоткани и склеивание из них блоков с последующей пропиткой связующим включает в себя следующие этапы: 1 — наложение стеклоткани; 2 — профилирование валиком первого листа; 3 — нанесение клея; 4 — наложение второго листа стеклоткани; 5 — профилирование второго листа; 6 — прихватывание; 7 — нанесение клея на второй лист; 8 — наложение следующих листов и повторение операций 5, 6, 7; 9 — склеивание блока; 10 — пропитка блока связующим; 11 — сушка блока; 12 — разрезка блока. Сотовые заполнители склеивают этим методом на специальной установке, последовательно наращивая ленты до размера блока. Метод наиболее эффективен для сотовых заполнителей из толстой стеклоткани и с малым размером ячеек. Сотовые заполнители со стороны шестигранника свыше 4 мм деформируются в процессе изготовления даже под влиянием собственной массы, так как стенки, не пропитанные связующим, обладают малой жесткостью.

Оба метода основаны на ручном труде и поэтому не всегда обеспечивают стабильное качество сотовых заполнителей.

Метод растяжения пакетов сотовых заполнителей осуществляется в следующей последовательности: 1 — нанесение на ткань клеевых полос; 2 — склеивание под прессом; 3 — растяжение; 4 — пропитка связующим; 5 — термообработка; 6 — разрезка на заготовки.

Метод используется при изготовлении сотовых заполнителей из бумаги (полимерной типа БФСК, *Nomex*) и из стеклонаполненных препрегов. Он поддается механизации и автоматизации и поэтому нашел широкое применение в отечественной и зарубежной промышленности.

Объемным ткачеством можно получать сотовые заполнители любой кривизны вместе с одной из обшивок или совсем без обшивок. Метод перспективен, так как позволяет ткать сотовые заполнители из волокон не только одинаковых, но и различных материалов.

При изготовлении сотовых заполнителей из предварительно пропитанных и профилированных листов тканей (лент) блоки сотовых заполнителей склеивают из листов, предварительно пропитанных связующими и прессованных в виде гофра. После склеивания блоки разрезают на заготовки требуемой высоты. Сотовый заполнитель (блок) образуется из нескольких заготовок.

Сотовые заполнители из неметаллических материалов, получаемые растяжением пакетов, отличаются более высокой прочностью по сравнению с заполнителями, изготавливаемыми

блочным методом. Метод изготовления сотовых заполнителей растяжением пакетов позволяет механизировать выполнение всех операций процесса, что очень важно для обеспечения стабильного качества и снижения трудоемкости.

Клеевые полосы наносят на непрофилированную и непропитанную связующим ткань. После подсушки клеевых полос ткань складывают так, чтобы в сечении пакета клеевые полосы располагались в шахматном порядке. Листы ткани склеивают между собой по клеевым полосам под давлением с нагревом. Затем пакет растягивают до получения ячеек шестигранной формы. Заполнитель в растянутом виде пропитывают связующим для закрепления формы ячеек и повышения жесткости. После пропитки и сушки сотовый блок разрезают на заготовки требуемых размеров. Существует разновидность этого метода, заключающаяся в том, что клеевые полосы наносят на ранее пропитанную ткань.

Ткань для сотовых заполнителей должна быть плотной, не пропускающей наносимый клей. В пакетах, изготовленных из ткани, пропускающей жидкий клей, смежные листы склеиваются так, что растянуть их практически не удастся. Направление клеевых полос в сотовых заполнителях, применяемых в панелях пола, несилловых перегородках, в потолочных панелях и других подобных узлах, не имеет значения.

Длина и ширина пакетов сотовых заполнителей зависит, в основном, от ширины ткани и применяемого оборудования. Толщина пакетов устанавливается с учетом нужной длины сотового заполнителя после растяжения. Когда сотовый заполнитель составляют из отдельных блоков, толщина пакета не лимитируется.

Стеклоткань из рулона 1, закрепленного в верхней части установки (рис. 4.13), пропускают через систему роликов 2, служащих для разглаживания материала и придания ему направления, и через клеенаносящий ролик 3, расположенный в ванне с клеем 4. Клеенаносящий ролик имеет кольцевые выступы, расстояние между которыми равно шагу клеевых полос. С помощью выступов на ролике клей непрерывно наносится на одну сторону движущейся ткани, которая затем проходит через сушильное устройство (электронагреватель 5) и наматывается на барабан 6. Ткань при движении соприкасается с поверхностью электронагревателя стороной, на которой клеевые полосы не нанесены. Такой способ подсушки позволяет удалять растворитель, в первую очередь, из слоев клея, непосредственно примыкающих к ткани, а затем последовательно из остальных слоев.

Ткань, зажата между клеенаносящим и направляющим роликами, протягивается через механизмы установки при вращении клеенаносящего ролика.

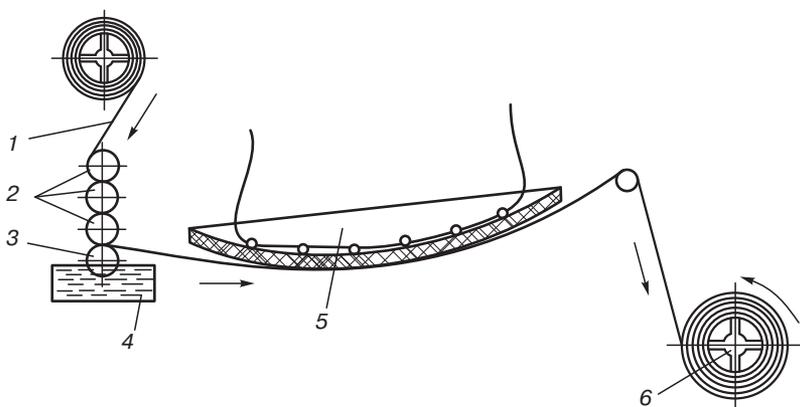


Рис. 4.13. Схема установки для нанесения клеевых полос на ткань и сушки [7]: 1 — ткань; 2 — промежуточные ролики; 3 — клеенаносящий ролик; 4 — ванночка с клеем; 5 — сушильное устройство; 6 — барабан

При использовании однорулонного автоматического станка (рис. 4.14) полосы наносят на ткань с одной стороны листа при прохождении ее через систему роликов клеенаносящего устройства.

Рулон с тканью закрепляется в рулонодержателе 1, откуда ткань через направляющий ролик 2 подается на клеенаносящий ролик 5, смачивающийся клеем от ролика 4. В свою очередь ролик 4 получает клей от ролика 3, вращающегося в ванне с клеем. Ткань с нанесенными вдоль длины рулона клеевыми полосами, проходя через сушильное устройство 6, наматывается на рамку 7, вращающуюся вокруг оси. После каждого оборота рамки клеенаносящий ролик 5 смещается вдоль своей оси на полшага. Благодаря этому в намотанном на рамке пакете клеевые полосы в смежных листах получают также смещенными на полшага.

Трудоемкая регулировка толщины и ширины клеевых полос. Регулировку производят при движении ткани, увеличивая или уменьшая выход клея из-под шариков.

Сушка токами высокой частоты, терморadiационная и другими методами ускоряет процесс в два-три раза. Сушка служит только для удаления из клеевой прослойки растворителя, режимы сушки исключают отверждение нанесенного клея.

При склеивании тканевых сотовых заполнителей давление создают на всю поверхность пакета.

Максимально допустимую толщину пакета устанавливают экспериментально.

Пропитывают сотовые блоки, закрепленные на рамках, либо погружением в ванну со связующим, либо поливом.

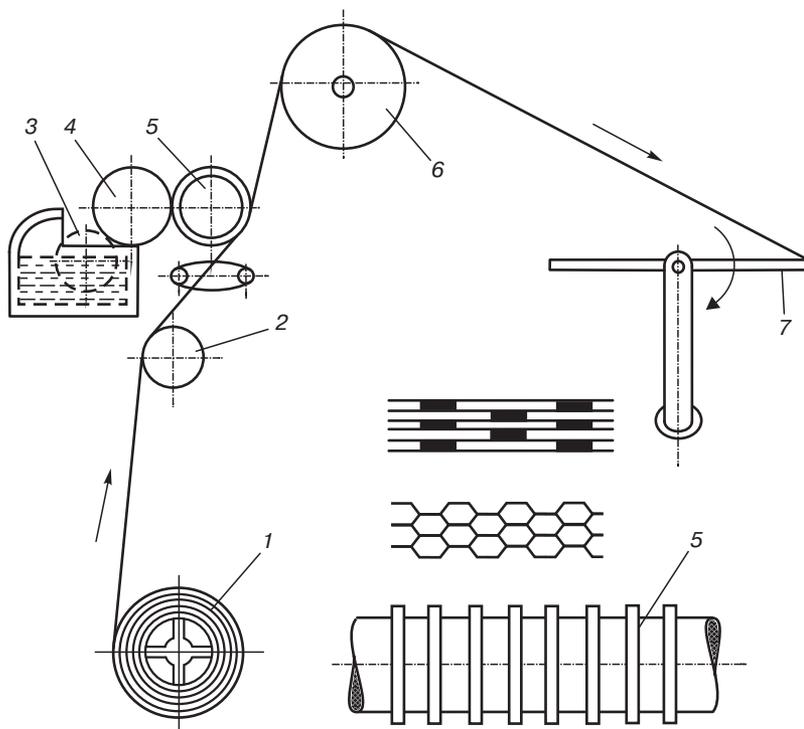


Рис. 4.14. Схема однорулонного автомата для сборки пакетов [7]:

1 — рулонодержатель; 2 — направляющий ролик; 3 — ролик, вращающийся в ванне с клеем; 4 — ролик с клеем; 5 — клеенаносящий ролик; 6 — сушильное устройство; 7 — рамка

При изготовлении сотовых заполнителей растяжением пакетов контролируются геометрические параметры нанесенных клеевых полос (ширина и толщина полос, расстояние между ними); режимы склеивания пакетов (температура, давление и продолжительность выдержки); качество пропитки и сушки (расход связующего, температура сушки и продолжительность выдержки); прочность склеивания ячеек при расслаивании; форма ячеек и геометрические размеры заполнителя.

Объемным ткачеством изготавливают сотовые заполнители с треугольной, квадратной, ромбической и другими формами ячеек, причем сотовый заполнитель получают отдельно или совместно с одной из обшивок, с постоянной или переменной толщиной.

Преимуществами таких полуфабрикатов являются:

1) более высокая прочность в местах соединения сот между собой благодаря механической связи, осуществляемой при движении основной нити от ячейки к ячейке;

2) возможность введения в конструкцию нитей различных типов (стеклянных и металлических, стеклянных и асбестовых и пр.);

3) возможность изготовления сотового заполнителя вместе с оболочками;

4) отсутствие остаточных напряжений и искажений формы ячеек, возникающих при укладке обычного сотового заполнителя, особенно на поверхности с малым радиусом кривизны. Сотовый заполнитель, снятый с ткацкого станка, имеет заданную кривизну поверхности и поэтому не подвергается деформации перед укладкой;

5) возможность получения сотовых заполнителей переменной толщины, что иногда позволяет исключить механическую обработку;

6) возможность усиления отдельных участков оболочек и заполнителя путем наращивания в этих местах ткани;

7) непрерывность волокон при изготовлении изделий любой формы;

8) полная механизация всех операций процесса и связанные с ней стабильность качества и высокая производительность;

9) сокращение трудоемкости и улучшение условий труда.

Тканые полуфабрикаты подвергают механической обработке и растягивают для образования ячеек требуемой формы. В растянутом виде полуфабрикаты пропитывают связующими и термообработывают.

Подготовку торцов сотовых заполнителей, сборку и склеивание изделий производят обычными методами.

Сетчатые заполнители можно рассматривать как особый вид газоструктурного элемента, ячейки которого упрочнены волокнами (нитьями, лентами), что дает значительное повышение их упругопрочностных свойств по сравнению с газоструктурными элементами сотопластов, ячейки которых упрочнены тканями, бумагой, пленками. Тетразаполнители находят применение в конструкциях сетчатой структуры — пространственно армированных оболочках, что позволяет повысить их изгибную жесткость при сохранении высоких жесткостных и прочностных свойств в плоскости укладки нитей [1].

Сетчатая оболочка состоит из семейства ребер, образованных намоткой и уложенных под углами к образующей цилиндрической оболочке (возможны сетчатые плоские и с различной кривизной структуры).

При изготовлении сетчатых тетраструктур металлическая оправка для намотки состоит из корпуса, на поверхность которого наклеен слой резины, и объемных технологических штырей на торцевой части корпуса в местах изменения направления укладки. В резиновом слое вырезаны канавки, в которые при намотке укладываются нити и ленты, пропитанные связующим (препреги на основе терморезистивных, чаще всего эпоксидных, и термопластичных связующих).

Углы укладки, количество ячеек, геометрию ячеек, высоту ребер жесткости предварительно рассчитывают. После заполнения канавки материалом на глубину, равную высоте ребер, намотку прекращают и выполняют кольцевую подмотку в районе технологических штырей.

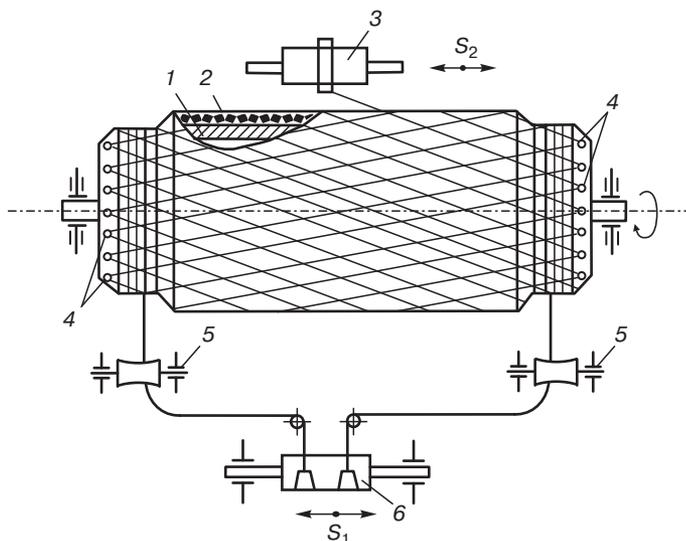


Рис. 4.15. Схема изготовления сетчатых тетраструктур намоткой [1]: 1 — корпус оправки; 2 — резиновый мешок с прорезанными канавками; 3 — раскладчик станка; 4 — технологические штыри; 5 — направляющие ролики кольцевых слоев; 6 — раскладчик кольцевой намотки

Намотку несущей оболочки осуществляют непосредственно на сетчатую оболочку обычным способом (рис. 4.15).

После окончания намотки проводят термообработку (в печи, автоклаве, используется эффект термокомпрессии за счет высокого КЛТР резинового слоя оснастки) в соответствие с технологическими свойствами материала (отверждение термореактивного связующего, расплавление, затем стеклование, кристаллизация термопластичного связующего). Намоткой изготавливают плоские (снятие с оправки и отверждение сетки после придания требуемой формы) цилиндрические, конические оболочки.

4.3.3. Сотовые материалы и конструкции с заполнителями на основе бумаги из ароматических полиамидов (ПСП, *Nomex*)

Сотопласты из бумаги *Nomex*, Фенилон при низкой кажущейся плотности ($22\text{--}60\text{ кг/м}^3$) имеют высокие удельную прочность, жесткость, показатели упругих и деформационных свойств.

По сравнению со стеклосотопластами конструкции из органосотопласта имеют на 30–50% более высокие показатели удельной прочности при сжатии, отрыве и изгибе. При одинаковой кажущейся плотности $0,04\text{ г/см}^3$ и размере ячеек прочность при сжатии сотопластов *Nomex*, ПСП на 35–45% больше прочности сотовых материалов из алюминиевой фольги при температурах до $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Технология изготовления полимерных сотопластов ПСП, *Nomex* включает следующие стадии: 1) синтез ароматических полиамидов (Фенилон, *Kevlar 29*, *Nomex*); 2) приготовление прядильных растворов; 3) формование волокон; 4) термообработка и вытяжка волокон; 5) приготовление бумажной композиции; 6) изготовление бумаги; 7) изготовление полимеросотопластов [4, 7].

4.3.3.1. Полимерная бумага (фенилоновая, БФСК, *Nomex*)

Полимерная бумага, используемая при изготовлении полимеросотопластов, — листовой полимер-полимерный композиционный материал на основе ароматического полиамида

с феноленовыми циклами, соединенными амидными связями в м-положении – поли-м-фениленизофталамида в двух формах: связующее (фибриды) и наполнитель (короткие волокна, флок) [5, 7, 14, 18, 25, 28].

Оба компонента смешиваются в пульпу (суспензию) на водной основе, из которой на длинносеточной бумаго-делательной машине производится непрерывный листовой материал. Рыхлый бумажный полуфабрикат, в котором фибриды соединяются, образуя паутинобразную пленку между волокнами флока, уплотняют высокотемпературным каландрованием, что создает стойкое соединение обоих компонентов с образованием структуры с высоким уровнем механических и электрических свойств. В ходе бумагоделательного процесса флок, обладающий большей длиной по сравнению с фибридами, ориентируется в направлении бумаги, выходящей из машины, что приводит к анизотропии свойств бумаги в продольном и поперечном направлении.

Фибриды – полимерные частицы, приобретающие на бумагоделательной машине прочность в мокром состоянии около 0,018 г/денье. Фибриды имеют неправильную форму, обладают большой удельной поверхностью и высокой гигроскопичностью. Основными методами получения фибридов являются измельчение сильно растянутых тонких полимерных пленок, в том числе полученных при конденсации на границе раздела фаз, прядения в условиях быстрого снятия напряжения, осаждении со сдвигом из растворов полимеров. Наибольшую удельную поверхность (4,5 м²/г) и прочность в мокром состоянии (2,7·10⁻² г/денье) имеют фибриды, полученные последними двумя способами.

Для получения фибридов методом осаждения со сдвигом раствора полимера применяют 10–15 %-ные растворы поли-м-фениленизофталамида в растворителях амидного типа (ДМАА, ДМФА) с добавкой СаСl₂. Осаждение происходит при подаче раствора в осадитель (смесь глицерина или воды, 58–68% и ДМАА) при скорости перемешивания 7000 об/мин. Полученные фибриды промывают водой для снижения содержания ионов хлора и растворителя до 0,3–1%. После промывки продукт проходит рафинировочные вальцы и имеет дисперсность 14 меш – 1%, до 30 меш – 8%, до 50 меш – 38%, до 100 меш – 34%. На многие свойства бумаги, изготовленной с применением фибридов, оказывают существенное влияние используемое оборудование, режим и условия осаждения, составы растворителя и осадителя.

Содержание фибрида в синтетической бумаге должно быть не менее 5%, а для достижения максимальной прочности, содержание фибрида должно достигать 15–60% (в соответствии с условием $\% \text{ фибрида} \cdot \sqrt[3]{E} < 40$, где E – начальный модуль фибрида, г/денье).

При увеличении содержания фибрида электрические свойства бумаги улучшаются, а сопротивление изгибу снижается (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Свойства бумаг из поли-м-фениленизофталамида в зависимости от содержания фибрида в пульпе (суспензии) фибрид–флок [7, 14]

| Свойства | Содержание фибрида, % масс. | | |
|--|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| | 30 | 50 | 70 |
| Масса 1 м ² , г | 165 | 165 | 165 |
| Толщина, мм | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Предел прочности при разрыве, г/денье | 3,15 | 4,06 | 3,45 |
| Относительное удлинение, % | 5,5 | 4,5 | 4,8 |
| Сопротивление изгибу (число двойных изгибов) | 11 200 | 7360 | 4900 |
| Предел прочности при продавлении, МПа | 0,47 | 0,68 | 0,40 |
| Прочность на раздир, г | 800 | 380 | 264 |
| Пробивная электрическая прочность, кВ/мм | 12,0 | 18,6 | 30,0 |
| Удельное объемное сопротивление, Ом·см | 4,6·10 ¹⁵ | 4,3·10 ¹⁵ | 8,1·10 ¹⁴ |

Штапельные волокна поли-м-фениленизофталамида (фенилон, *Kevlar 29*, *Technora*, *Konex*, *Nomex TX 033/3000*), длиной 8–10 мм, выполняющие роль наполнителя в композиционной бумаге, во многом определяют ее механические свойства. Для их повышения в состав бумажной массы могут быть введены короткие волокна с высокой прочностью и модулем упругости (нитевидные кристаллы, углеродные волокна, SiC, *Kevlar 49*, 149, Терлон и др.).

В качестве исходных компонентов каландрованной бумаги БФСК (ТУ 13-04 5988) используют волокно Фенилон (ТУ 6-06-32-283-80, наполнитель) и волокнистое полимерное связующее (ВПС, ТУ6-06-69-80).

Волокнистое полимерное связующее подается (рис. 4.16) в гидроразбиватель, где разбивается водой при непрерывном перемешивании с образованием суспензии (концентрация до 1%), поступает в приемный барабан, далее на энштиппер и рафинер, где происходит диспергирование и измельчение («подмол») частиц, «мешальный» бассейн и перекачивается в дозатор.

Волокно Фенилон загружается («распускается») в гидроразбиватель, поступает в приемный бассейн (концентрация суспензии 0,3%), далее в «мешальный» и «композиционный» бассейны.

В композиционном бассейне формируется бумажная композиция из 27–33% волокон Фенилон и 73–67% ВПС (в бумаге БФСК 50% волокон фенилон с соотношением $1/d \approx 500$, более длинные волокна повышают прочность бумаги, но ее трудно формовать и получать устойчивую суспензию), которая с концентрацией 0,5–1% из бассейна «отрегулированной» массы перекачивается в машинный бассейн с концентрацией 0,35–0,4%, откуда поступает на бумагоделательную машину.

Осаждение («отлив») суспензии с концентрацией 0,01–0,02 (оптимальная концентрация 0,05–0,02%) проводится на сетках бумагоделательной машины с последующим уплотнением суспензии.

Уплотнение листового полуфабриката, полученного осаждением суспензии, проводят на вальках буммашины (давление на втором войлочном прессе 30 бар). После уплотнения и формования («наката») бумажный лист со скоростью 10 м/мин поступает на продольно-резательный станок, где разрезается по формам на листы длиной 1070 мм. После резки бумага поступает на 4-вальный каландр (температура 280 °С, давление 30 бар, скорость 10 м/мин). Сгустки непрорезанных и непропряденных волокон Фенилон приводят к браку (разнотолщинность). Белая или со слегка желтоватым оттенком бумага имеет глянцевую поверхность.

Дублирование в процессе высокотемпературного каландрования двух полотен бумаги Фенилон одинаковой толщины повышает на 50% разрушающее напряжение при растяжении

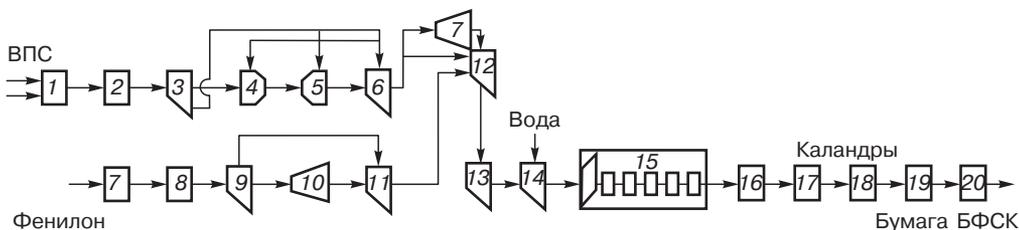


Рис. 4.16. Схема производства бумаги БФСК:

1 — транспортирующее устройство с таховесами; 2, 8 — гидроразбиватели; 3, 9 — приемные бассейны (концентрация суспензии 0,3%); 4 — энштиппер; 5 — рафинер; 4, 5 — диспергирование, смешение, измельчение суспензии; 6, 11 — «мешальные» бассейны; 7, 10 — дозаторы; 12 — смеситель («композиционный» бассейн) для приготовления композиции (волокна Фенилон + фибриды); 13 — бассейн «отрегулированной» массы с композицией Фенилон/фибриды (суспензия с концентрацией 0,5–1%); 14 — машинный бассейн (концентрация суспензии 0,35–0,4%); 15 — бумагоделательная машина; 16 — продольно-резательный станок; 17 — двухвальная каландра; 18 — четырехвальная каландра; 19 — суперкаландра ($T > 280$ °С); 20 — рулонно-упаковочный станок

(бумаги БФСК-100, толщиной 105 мкм и БФСК-130, толщиной 145 мкм). На основе бумаг БФСК-50, БФСК-75 разработаны сотопласты ПСП-1,2-25,35,40,45,50,60,70 для мало- и средненагруженных конструкций. Полимерные сотовые наполнители силового назначения ПСП-1-60,85,100 разработаны на основе дублированных бумаг.

Благодаря высоким диэлектрическим свойствам бумаги она находит применение в качестве электроизоляционного материала. Удельное объемное сопротивление бумаги составляет $2 \cdot 10^{16}$ Ом·см. С повышением температуры сопротивление снижается, но даже при 250 °С оно составляет более 10^{11} Ом·см. Тангенс угла диэлектрических потерь и (в меньшей степени) диэлектрическая проницаемость зависят от температуры и частоты. При 1000 Гц они составляют, соответственно, 0,014 и 2,9. При тепловых нагрузках пробивная электрическая прочность бумаги снижается примерно до 12 кВ/мм в зависимости от температуры. При 220 °С бумага толщиной 0,25 мм обладает такой электрической прочностью после 10^5 ч (примерно 11 лет) эксплуатации. Особенно высокую пробивную прочность (74 кВ/мм) имеет бумага, обработанная смесью растворителей (N-метил-2-пирролидон/диметилацетамид/толуол = =6/3/4, по объему), отжигом (5 ч при 155 °С) и каландрованием или пропиткой минеральным маслом в вакууме. На диэлектрические свойства бумаги влияет также влажность воздуха. При повышении относительной влажности с 50 до 95% величина $\tan \delta$ увеличивается от 0,014 до 0,025 (1000 Гц), а удельное объемное сопротивление уменьшается от $2 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{14}$ Ом·см. Для улучшения стойкости к коррозийным разрядам бумагу наполняют слюдой.

У фенилоновой бумаги (табл. 4.6, 4.7) два основных назначения:

1. Сотовые наполнители ПСП многослойных (трехслойных) конструкций авиакосмической техники (несущие, радиопрозрачные, интерьерные, звукопоглощающие и др.).

2. Пазовая электроизоляция электродвигателей, генераторов, трансформаторов.

Пазовая изоляция электрических машин, выполненная из фенилоновой бумаги, позволяет увеличить степень заполнения паза проводом и увеличить коэффициент использования активных материалов в электродвигателях в 1,5–2 раза, а также улучшить теплоотдачу за счет снижения толщины изоляции. Ее целесообразно использовать в электрических машинах не

Таблица 4.6. Свойства каландрованных бумаг из ароматического полиамида Фенилон [7]

| Свойства | Тип, бумаги (ширина листа 914±1 мм) | | |
|---|-------------------------------------|-------|--------|
| | А-55 | Б-80 | В-130 |
| Толщина, мкм | 55±10 | 80±10 | 130±13 |
| Масса 1 м ² , г | 45 | 67 | 118 |
| Прочность полосы 15±100 мм, кгс; Продольно/поперечно | 5/3 | 7/4 | 15/10 |

Таблица 4.7. Физико-механические свойства полиамидной бумаги БФСК (ширина 970 мм) [7]

| Свойства | БФСК-50 | БФСК-75 | БФСК-100 | БФСК-130 |
|---|---------|---------|----------|----------|
| Толщина, мкм | 60±10 | 80±10 | 105%±12 | 145±15 |
| Разрушающее напряжение, МПа в машинном направлении в поперечном направлении | 36 | 52 | 60 | 70 |
| Сопротивление излому в среднем по двум направлениям, не менее раз | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Масса 1 м ² , г | 48 | 65 | 96 | 125 |

только высших классов нагревостойкости F и H , но и в менее нагревостойких, так как увеличивается их надежность в случае перегревов в аварийных ситуациях.

Органогетинакс — пластики, наполненные бумагой из полимерных волокон. Органогетинакс (бумага фенилоновая + полиимидное связующее) сохраняет 50% $\sigma_{\text{вн}}$ при кратковременном воздействии температуры до 500 °С, электрическая прочность практически не изменяется до 200 °С, при 250 °С уменьшается на 5%. Он имеет при 20 °С следующие свойства: $\rho = 1,32 \text{ г/см}^3$, $\sigma^+ = 150 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{вн}} = 170 \text{ МПа}$. В качестве электроизоляционных материалов для низковольтного электромашиностроения (для газовой электроизоляции транспортных электродвигателей ДК-200, метро, трамваи, троллейбусы, завод «Динамо», Москва) в НИИПТН разработаны вместо слюдопласта ГНК-Т-С-ПЛ пленкосинтокартоны (ПСК) на основе фенилоновой бумаги, дублированной лавсановыми пленками СПСМ-А (класс нагревостойкости F) и дублированной полиимидными пленками (ПСК-Н-40-1, ПСК-Н-40-2, имидофлекс листовой, ТУ 18-503, 145-75, класс нагревостойкости H , табл. 4.8.)

Имидофлекс, наполненный стеклотканью, используется в качестве электроизоляции в ускорителях заряженных частиц (изоляция электромагнитов, вакуумных систем, систем управления РУ). После облучения в поле вторичного излучения протонного синхротрона на 70 ГэВ он выдерживает дозу $3 \cdot 10^7 \text{ Гр}$ (после дозы 10^4 Гр прочность снижается на 20% с сохранением ρ_v и $\text{tg } \delta$).

При решении экономических вопросов огнестойкая бумага (КИ > 30) и материалы на ее основе могут быть использованы при создании различных транспортных контейнеров, в отделке интерьеров морских судов, автомобилей (и производстве автомобильных корпусных конструкций), в домостроении в качестве конструкционных отделочных материалов для дверей, перегородок и т. п., где используются многослойные панели с сотовым наполнителем на основе ламинированных бумаг.

Фениловая бумага БФСК-100, в том числе ламинированная ПА-6 (масса $1 \text{ м}^2 - 0,24 \text{ кг}$, толщина 0,25 мм) может быть использована для изготовления сэндвич-панелей для таких областей применения как: отделка интерьеров общественных зданий (офисы, кабинеты), интерьеры детских учреждений, предприятий общественного питания, производства мебели и тары, отделка интерьеров жилых домов, салонов судов, яхт, вертолетов, самолетов.

Несколько типов бумаг *Nomex*, прессованных картонов, нетканых (*spanlace*) полотен фирма *DuPont* производит с 1967 г. (завод Спруане, Ричмонд, США, сертификат качества по ISO 9002 с июля 1991 г.; с 1989 г. — завод Мишима, Осока, Япония), используя пульпу, получаемую из поли-м-фениленизофталамида при высоких сдвиговых напряжениях (фибриды, микроскопические пленкообразные частицы) и коротких волокон (флок), нарезаемых до определенной длины из элементарных волокон *Nomex*, сформированных фильерным «мокрым» способом [8, 28]:

- 1) бумаги *Nomex* тип 410, 411, 414, 418, 419, E56A (табл. 4.9);
- 2) прессованные картоны тип 992, 993, 994;
- 3) нетканые (*spanlace*) материалы тип E-88C, E-140-320H (табл. 4.10);

Таблица 4.8. Свойства пленкосинтокартонов ПСК на основе фениловой бумаги [7]

| Свойства | ПСК-Н-40-1 | ПСК-Н-40-2 |
|--------------------------|------------|------------|
| Толщина, мм | 0,18 | 0,24 |
| σ^+ , МПа | 25 | 30 |
| ϵ^+ , % | 10 | 10 |
| $T_{\text{раб}}$, °С | 180 | 180 |
| Пробивное напряжение, кВ | 10 | 10 |
| ρ_v , Ом·м | 10^{12} | 10^{12} |

Таблица 4.9. Свойства бумаг *Nomex* фирмы *DuPont* [28]

| Свойства | Типы бумаг <i>Nomex</i> | | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------------|--|---|------------------------------|--------------------|--------|
| | 410 каланд- рованная | 411 некаланд- рованная | 414 ⁴⁾ каланд- рованная | 418 ⁶⁾ каланд- рованная | 419 некаланд- рованная | E56A ⁷⁾ | |
| Количество типов | 11 | 5 | 5 | 5 | 2 | 6 | |
| Ширина, мм | 610–914±4 | 965±7 | 914±4 | 914±4 | 914±4 | – | |
| Толщина, мм | 0,05–0,76 | 0,13–0,58 | 0,09–0,38 | 0,08–0,36 | 0,18; 0,33 | 0,13–0,51 | |
| Электрическая прочность, кВ/мм ¹⁾ | 17–33 | 7–9 | 21–30 | 29–36 | 13 | 16–19 | |
| ϵ , 60 Гц ¹⁾ | 1,6–3,7 | 1,2–1,3 1,3–1,4 (1 кГц) | 1,7–2,9 | 2,1–2,3 (сухая) | 2,0 | 1,7–2,2 | |
| $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-3}$, 60 Гц ¹⁾ | 4–7 | 3,5 (1 кГц) | 5–9 | 5–6 | – | 5–6 | |
| ρ_v , Ом·см | 10 ¹⁶ | – | – | 10 ¹⁶ /10 ¹³ при 50% H ₂ O | – | – | |
| σ^+ , Н/см ¹⁾ | | 43–910 | 17–56 | 56–378 | 32–149 | 18–30 | 57–289 |
| | ⊥ | 18–613 | 8–39 | 26–201 | 21–102 | 12–21 | 28–156 |
| ϵ^+ , % ¹⁾ | | 11–23 | 2,4–3,0 | 8–14 | 2,3–3,0 | 1,4–1,5 | 9–14 |
| | ⊥ | 8–19 | 3,5–4,8 | 11–18 ⁵⁾ | 2,3–3,5 | 2,0–2,1 | 12–15 |
| λ , мВт/м·К ³⁾ | 103–175 | – | – | 100 | – | 68–91 | |
| КИ, %O ₂ ¹⁾ | 20 °С | 27–32 | 28,5 | 27–32 | 63 | – | 29 |
| | 220 °С | 22–25 | 21,8 | – | 51 | – | 24 |

Примечания:

¹⁾ В зависимости от толщины.

²⁾ Сохранение на 82% при 250 °С, при 400 °С — 12 кВ/мм в течение нескольких часов.

³⁾ В зависимости от плотности (плотность *Nomex* 410 0,72–1,08 г/см³).

⁴⁾ Хорошая пропитываемость лаками, для витковой и межслойной изоляции.

⁵⁾ Сохраняется после 7000–8500 циклов изгиба.

⁶⁾ Для эксплуатации при высоких напряжениях, хорошая пропитываемость.

⁷⁾ Химический состав как у 410, но другая структура.

4) гетинаксы из бумаг *Nomex*, дублированных пленками *Maylar*, *Kapton*;

5) Войлоки, прошивные войлоки, материалы с простежкой, тканые полотна, жгуты из комплексных нитей, пряжи *Nomex*.

На основе бумаг *Nomex* в сочетании с другими компонентами (эмали, лаки и т. д.) разработано свыше 100 электроизоляционных материалов и изделий (прокладки, вкладыши, штанги, рис. 4.17)

Бумаги из *Nomex* благодаря высоким диэлектрическим свойствам обеспечивают электроизоляционные свойства при напряженности электрического поля от 18 до 40 кВ/мм, в том числе после воздействия ионизирующего излучения мощностью 800 Мрад (кратковременно при 6000 Мрад) при влажности 95% (сохранение 90% диэлектрических свойств), при 220 °С

Таблица 4.10. Свойства нетканых полотен фирмы *DuPont* из волокон *Nomex*, изготавливаемых по технологии *spunlace Sontara* [28]

| Свойства | Типы полотен <i>spunlace</i> | | | |
|------------------------------|------------------------------|------|-------------------|-------------------------|
| | E-88C | | | E-140-320H ² |
| | 309C | 320C | 309H ² | |
| Толщина, мм | 0,08 | 0,13 | 0,04 | 0,09 |
| Масса м ² , г | 31 | 68 | 31 | 68 |
| Плотность, г/см ³ | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,7 |
| σ^+ , Н/см | | 16 | 46 | 9 |
| | ⊥ | 7 | 25 | 2 |
| ϵ^+ , % | | 34 | 42 | 4 |
| | ⊥ | 127 | 82 | 45 |

Примечания:

¹ Структура из 100% *Nomex* с высокой открытой пористостью для пропитки всеми типами лаков электротехнического назначения (полиимиды, силоксаны, эпоксидные, фенольные и др.). Могут содержать волокна *Kevlar*, *Maylar* и другие.

² С высоким модулем упругости.

в течение 10 лет, в криогенной технике при 77 К, отвечают по огнестойкости требованиям стандарта *UL94 V-0*.

Бумаги и прессованные картонные *Nomex* используются для электроизоляции открытых сухих трансформаторов (например, ТСЗ-2500/10АВУЗ, Уралэлектротяжмаш, Екатеринбург, 1995 г.) с естественным охлаждением, с литыми обмотками, с жидкостным охлаждением, дросселей стартеров люминесцентных ламп, подстанций мощностью до 100 МВА/128 кВ (обмотка проводников, межслойная изоляции и изолирующие гильзы, прокладки лобовых частей, гильзы сердечников, секционная и фазовая изоляция, изоляция подводящих проводов и ответвлений, изоляция баков, радиальные и осевые изоляционные прокладки и их крепеж).



Рис. 4.17. Изделия из бумаги и картонов *Nomex* фирмы *DuPont* для электроизоляции, используемых в трансформаторах, электродвигателях, генераторах постоянного и переменного тока [28]

Бумаги и картоны *Nomex* применяются в электродвигателях и генераторах постоянного и переменного тока, с шаблонными и вспынными обмотками, в миниатюрных сервомоторах, в промышленных электроприводах до 13,6 кВ, в 150-мегаватных турбопарогенераторах (обертка проводников, обмоток, пазовые прокладки из гибких бумаг *Nomex* 410, 415 толщиной 0,18–0,38 мм, пазовые вкладыши, средние и верхние изоляционные штанги, сегменты V-образных стержневых колец коллекторов из жестких бумаг толщиной 0,51–0,76 мм, изоляция фаз, концевые пластины, каркасы полюсов и обмоток, изолирующие трубки изгибов, торцевые заглушки, двойная изоляция проходных изоляторов, изоляция концевых выводов, изоляция пазовых гильз двух-трехслойными гетинаксами *Nomex–Mylar–Nomex*, *Nomex–Kapton–Nomex*).

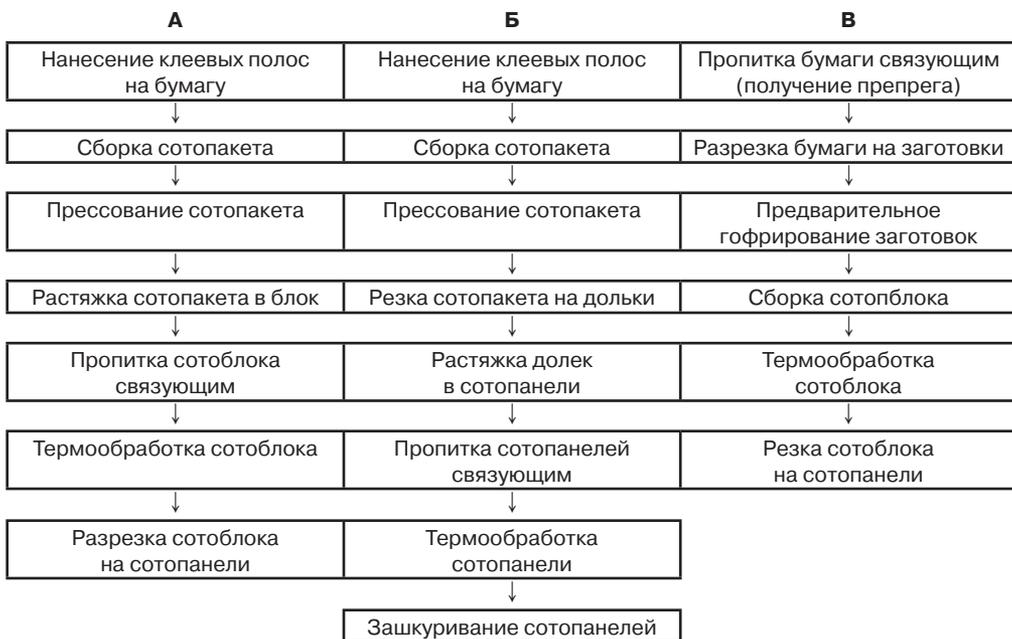
Кроме того, листовые материалы из *Nomex* используются в качестве огнестойких обмоточных маркировочных лент для кабелей, крышек переключателей электробытовых приборов, экранов для печатных плат, тепловых и электростатических изоляторов, звуковых катушек акустических систем [28].

Гибкость и формуемость бумаг *Nomex* 410, 414 облегчает их использование в качестве пазовой электроизоляции. Жесткость бумаг толщиной 0,51–0,76 мм удобна для использования изделий из них для пазовых вкладышей, штанг и т. д. Электрическая прочность бумаг *Nomex* при 250 °С составляет 95% от исходного значения при 20 °С. Температура длительной эксплуатации (температурный индекс *UL-RTI* по *UL 746B*, температура сохранения 50% начальных свойств при эксплуатации в течение 100 000 ч, ~ 11,5 лет) – 220 °С, высокая огнестойкость (КИ до 60%) стимулировали использование бумаг *Nomex* в производстве сотовых пласт *Nomex HRM* и авиакосмических конструкций (силовых, интерерных, радиопрозрачных).

4.3.3.2. Сотовые пластины ПСП, *Nomex*

Для изготовления сотовых пласт на основе фенилоновой бумаги предложено несколько технологических схем (А, Б, В).

По схеме А сотовый пласт получают методом растяжения в виде блоков с последующей разрезкой их на сотовые панели или фрезерованием профильных заготовок. Метод отличается высокой



производительностью. Сотопласты, полученные из блока, не требуют специальной подготовки (зашкуривания) перед изготовлением многослойных панелей.

По схеме Б сотопласт получают методом растяжения в виде готовых (заданной толщины) сотопанелей («дольковая» технология). Сотопанели перед изготовлением деталей необходимо зашкурить для удаления смоляной пленки с торцов сот.

По схеме В сотопласт получают методом тепловой сварки в виде блоков с последующей механической обработкой по схеме А. Этот метод обеспечивает получение сот с шестигранной и прямоугольной ячейками геометрически правильной формы, что является необходимым требованием при изготовлении некоторых типов деталей, например панелей шумоглушения двигателя и мотогондол. Метод позволяет получать соты с гибкой ячейкой, применяемые при изготовлении деталей двойной (сферической) кривизны.

В России при изготовлении полимеросотопластов ПСП основным является рулонный способ, включающий следующие основные операции: получение препрега (пропитка БФСК); нанесение клеевых полос; сборка сотопластов; подпрессовка сотопакета; отверждение клеевой полосы на установке СВЧ; термообработка сотопакета; растяжка сотопакета; фиксация формы сотоблока; резка сотопанели.

Пропитка бумаги БФСК полимерным связующим

При изготовлении сотового заполнителя используют препрег на основе бумаги БФСК и связующего БФОС-1М (с АП-1-БФОС).

Перед пропиткой связующим БФОС бумага обрабатывается аппретом АП-1 (ПА-666 – 1–3%, C_2H_5OH – 75%, H_2O – 18,8%, ДМФА – 5%, Родамин Ж – 0,03%; растворяют 15 г ПА-666 в 850 г смеси, воды (170 г) и этанола (680 г); нанос 1–3,5%). ДМФА разрыхляет поверхностный слой бумаги. Термообработка (120 °С, 20 мин) бумаги перед ее пропиткой связующим улучшает смачивание.

Связующее БФОС-1 М представляет собой смесь из фенолоформальдегидной смолы и оксипропилированных эфиров пентаэритрита и алкилфосфорной кислоты с плотностью $0,890 \pm 5$ г/см³. Связующее состоит из 50–60% бакелитового лака ЛБС-1 и оксипропилированного фосполиола П (соотношение 80:20). Их перемешивают в реакторе при 60–75 °С 2 ч. БФОС-1М содержит 3,5% (от ЛБС) ДМФА. Прочность бумаги БФСК шириной 970 мм достаточна для машинной пропитки (например, УПСТ-1000М).

Оптимальное содержание связующего 29–30 % масс. (табл. 4.11).

Нанесение клеевых полос

Нанесение клеевых полос на полимерную бумагу проводят в продольном направлении (установка типа ОГА-140).

Требуемая вязкость клея ВК-25 (ТР 24-1168, не менее 22 с (до 38 с) по ВЗ-1; сопло 5,4) определяется размером ячейки сотового заполнителя (для сотопласта с ячейками 1,8–4,2 мм шестигранной формы используют клей ВК-25 с вязкостью 22–28 с при 40–50 °С).

Прессование сотопакета, отверждение клеевых полос

Прессование (1,5–2,0 МПа, 165 ± 5 °С, 1–1,5 ч, выдержка 1 ч) сотопакета осуществляется для обеспечения контакта между клеевой полосой и последующим листом в сотопакете, что

Таблица 4.11. Механические свойства препрега БФСК-50 толщиной 50 мкм, используемого в производстве сот ПСП [7]

| Свойства | Значение |
|---|-----------|
| Прочность при растяжении (без термообработки), МПа: | |
| продольное направление | 0,48–0,61 |
| поперечное направление | 0,30–0,45 |
| Прочность при растяжении (после термообработки), МПа: | |
| продольное направление | 0,69 |
| поперечное направление | 0,54 |

влияет на качество сотового заполнителя. Прочность склеивания клеевых полос на уровне 0,4–0,6 кгс/см² достигается при $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин. При изготовлении сот ПСП-1 пакет прессуют при $125\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $12\pm 2\text{ кгс/см}^2$ в течении часа. Доотверждение клеевой полосы проводят в СВЧ-установке. После $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин и $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение часа бумага сохраняет деформационные свойства, необходимые для растяжения сотопакета.

Растяжка и фиксация сотопакета

Для проведения растяжки сотопакета его одевают на рамку, фиксируют стержнями до нормального размера ячейки и растягивают.

Фиксация (придание определенной конфигурации ячейки) происходит при термостабилизации сотовых блоков: нагрев со скоростью $2\text{--}3^{\circ}/\text{мин}$ до $100\pm 5^{\circ}$, выдержка 2 ч, до $160\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 3,5 ч.

После изготовления сотовых блоков необходимые размеры для сотовых конструкций различной геометрии получают резкой сотовых заготовок, фрезерованием, механической обработкой.

Прочность сотопласта зависит от качества резки, на торцах каналов ячеек могут быть трещины и ворсистость. Первый дефект снижает прочность СЗ на 20–30%, второй — обуславливает некачественное приклеивание обшивок к заполнителю при изготовлении многослойных панелей. Для улучшения качества торцевой поверхности сотопанелей их разрезку лучше производить в виде сотопакетов с последующим растяжением заготовок в сотопанели и их термофиксацией. В этом случае ворсистость и трещины в стенках ячеек практически отсутствуют.

Для использования полимерных сотопластов в высоконагруженных конструкциях разработана технология изготовления сотовых заполнителей на основе более прочных бумаг большей толщины, для изготовления которых применен процесс высокотемпературного каландрования двух полотен бумаг фенилон. Прочность бумаг БФСК-100 (толщина 105 мкм) и БФСК-130 (толщина 145 мкм) выше на 50%, а удельная прочность при сжатии сотопласта — на 35–45%, по сравнению с тонкими бумагами.

Изготовление СЗ с малым размером ячеек на основе бумаги большой толщины, обладающей повышенной жесткостью, затруднено из-за повышенного сопротивления сотопласта растяжению. При этом повышается вероятность разрушения сотопласта в местах склеивания. Жесткость препрегов на основе бумаг БФСК-50, БФСК-100, БФСК-130 затрудняет растяжку сотопакета с ячейками 1,8–2,5 мм. Сопротивление сотопакета растяжению снижается на 4–14% после кратковременной выдержки в воде, этаноле (эффект пластификации).

4.4. Технология изготовления сотовых конструкций (СК)

Из сотовых блоков требуемой геометрии и состава, материалов, выполняющих функции оболочек (заранее отформованные заготовки требуемой толщины и геометрии, чаще — препреги с необходимой липкостью и эластичностью) на оправках проводят последовательные операции: выкладка оболочек, нанесение клея (в том числе используют клеевые пленки, вспеняющиеся клеи), закрепление сотовых блоков. Клеевые слои для снижения массы конструкции наносят и на торцы сотовых блоков. При определенных условиях соединение осуществляют, используя клеящие свойства препрегов. Многослойные конструкции с сотовыми заполнителями формируют традиционными способами (для полимерных сотовых конструкций — автоклавное и вакуумное формование, давление ниже, чем при формировании однослойных конструкций из ВПКМ) [4–10, 12–22].

По геометрической форме СК разделяют на плоские панели, панели одинарной и двойной кривизны. По конструктивно-технологическим признакам СК разделяют на конструкции из металлов, включающие, например, алюминиевые обшивки и алюминиевые соты, конструкции

из неметаллических материалов (неметаллические обшивки и неметаллические соты), конструкции комбинированные (неметаллические обшивки и алюминиевые соты и наоборот).

Собирают сотовые конструкции с базировкой по внешним обводам оболочки или с базировкой по сотовому заполнителю и элементам каркаса.

Базировку по внешним обводам оболочки применяют в тех случаях, когда необходимо получить возможно более точные наружные контуры изделия. Сотовый наполнитель выбирают в качестве базы, когда из-за высокой жесткости он не может быть прижат к оболочке.

Обычно наполнитель из неметаллических материалов нежесткий, хорошо укладывается по оболочке и поэтому может изготавливаться с базировкой по наружному контуру. Плоские панели склеивают на вакуумных столах и базируют по любой из оболочек.

Затем проводят механическую обработку оболочек СК.

ВПКМ раскраивают на стандартном оборудовании (ленточные и дисковые пилы; лазерные устройства), разрезают на гильотинных и вибрационных ножницах, на круглопильных станках, обрабатывают на вертикально- и горизонтально-фрезерных или на копировально-фрезерных станках. Листы из дуралюмина раскраивают на гильотинных или роликовых ножницах, штампуют. Панели с сотовым неметаллическим наполнителем выполняют плоскими, одинарной и двойной кривизны. Габариты панелей зависят от конструкции изделия, для которого они предназначаются. Выбор технологического процесса изготовления панелей увязывают с их геометрическими параметрами, материалом обшивки и сотового наполнителя, с видом сотового наполнителя в состоянии поставки, с формой и размером ячеек, с конструкцией заделок кромок и мест передачи сосредоточенных нагрузок, а также с технологическими свойствами клея.

Технологический процесс изготовления панелей любой конструкции включает следующие технологические операции:

- изготовление оболочек и деталей каркаса;
- формирование и механическая обработка сотовых наполнителей;
- предварительная сборка и разборка соединений;
- подготовка элементов СК к склеиванию;
- нанесение клея, вспенивающихся клеевых композиций на поверхность элементов СК, прикатка клеевой пленки;
- сборка и склеивание;
- контроль качества склеивания.

Для придания неметаллическому плоскому сотовому наполнителю необходимой формы (одинарной или двойной кривизны) его предварительно размягчают путем нагрева, а затем деформируют.

Для панелей сотовые наполнители получают разрезкой сотовых блоков. Поверхность сотовых наполнителей из ткани и бумаги не обрабатывают торцовыми фрезами, так как при этом появляются большие заусенцы и рваные кромки. Уступы и пазы в сотовых наполнителях получают с помощью дисковых ножей, частота вращения которых должна лежать в пределах 5–10 тыс. об/мин.

Предварительная сборка панелей

Предварительная сборка панелей позволяет проверить согласованность размеров деталей, качество и прилегание в соединениях, соответствие наружных обводов деталей форме ложементов приспособлений. Если сотовый наполнитель поступает на сборку не монолитным, а в виде отдельных заготовок, то в процессе предварительной сборки должно проверяться качество сопряжения этих заготовок друг с другом и с деталями каркаса. Заготовки сотовых наполнителей располагают в шахматном порядке. Такой вид стыковки заготовок не приводит к заметному ослаблению сечения панели по линии стыков блоков наполнителя. Между собой заготовки склеивают вспенивающимися композициями, соединяют ячейку в ячейку или по выступающим граням.

Заготовки для панелей одинарной или двойной кривизны перед укладкой на оправку изгибают до требуемой кривизны.

Вследствие высокой упругости заготовок не всегда удается придать им необходимую форму. В таких случаях прибегают к нагреву заготовок до температуры, при которой они несколько размягчаются. Нагрев практикуют для сотовых заполнителей, пропитанных термopластичными связующими. Улучшение способности к изгибу сотовых заполнителей ПСП достигается неполным отверждением терморепактивного связующего.

С оболочек и деталей каркаса из ВПКМ перед склеиванием удаляют пленки и смазки, оставшиеся после их формования. Со склеиваемых поверхностей из ВПКМ иногда удаляют поверхностный слой, опескоструивают, промывают растворителями. Пыль и стружку с поверхности сотовых заполнителей удаляют.

Способы нанесения клея выбирают в зависимости от вязкости клея, конструкции детали, площади склеиваемой поверхности, программы выпуска панелей. Наиболее технологичны пленочные клеи.

Клеи малой вязкости наносят на оболочки или безвоздушным распылением, что позволяет получать тонкую и одинаковую по толщине клеевую прослойку.

В зависимости от первоначальной вязкости наиболее распространенные клеи, применяемые для склеивания, можно условно разбить на четыре группы: клеи малой вязкости (от 5 до 30 с по ВЗ-1); клеи средней вязкости (от 30 до 60 с); клеи с вязкостью от 60 и до 100 с; клеи высокой вязкости (свыше 100 с).

Клеи первой группы наносят распылением, разливом, обливом и кистью. Клеи, входящие во вторую группу, наносят вальцами, роликом, отпечатыванием и кистью. Клеи средней вязкости наносят вальцами, роликом и кистью. Клеи высокой вязкости могут наноситься шприцем, шпателем и т. п.

Клеевую пленку прикатывают либо к подслою жидкого клея на оболочке, либо непосредственно к склеиваемой поверхности оболочки. Необходимость подслоя на оболочке определяется свойствами клея. Прикатывают пленки холодным или горячим роликом.

На торцовые поверхности сотовых заполнителей клей наносят способами окунания, накаткой роликом или распылением. Заполнитель погружают в ванну с жидким клеем на глубину 1,5–2 мм. После некоторой выдержки в жидком клее (5–10 с) его вынимают из ванны и в горизонтальном положении, покрытой поверхностью вниз, сушат при нормальной или повышенной температуре (в зависимости от марки клея).

При сборке СК широко используют пленочные клеи различного состава на основе низковязких смол (диановых, на основе резорцина и др.) с латентными отвердителями (дициандиамид, комплексы BF_3 , диаминодифенилсульфон и др.) и загустителями (низкомолекулярные термopластичные полимеры, поливинилацетат, поливинилбутираль, олигоамиды, новолачные фенольные смолы, эластифицированные неопреновым и бутадиеннитрильным каучуками, полисульфон ПСК). В последнем случае олигосульфид с молекулярной массой $4,7 \cdot 10^3$ г/моль растворяют в смоле при 200–260 °С (30–60 масс. частей на 100 частей смолы, после отверждения при содержании 8–12% выделяется в самостоятельную фазу).

При охлаждении клея (связующего) образуется физический гель (застуднение), при нагреве вязкость геля резко снижается до 0,5–1,5 Па·с, что обеспечивает адгезионный контакт и пропитку наполнителей при получении клеевых препрегов. При хранении препрегов обеспечивается сохранение клея в виде нелипкой эластичной твердой ленты толщиной 0,02–0,03 мм (в том числе, наполненной при использовании подложек в виде тканей, сеток и др.). Свойства клеев приведены в табл. 4.12–4.14.

Технологический процесс изготовления СК может быть осуществлен в двух различных вариантах:

1. Одностадийный процесс, при котором осуществляют одновременное формование обшивок и их склеивание с сотовым заполнителем.
2. Двухстадийный процесс, при котором на первом этапе осуществляется формование заготовок обшивок, а на втором осуществляется сборка и склеивание всех элементов конструкции (отвержденных обшивок с сотовым заполнителем).

| Тип клея | Температура отверждения, °С | Прочностные характеристики клеевых соединений образцов из сплава Д16-АТ | | | Применение |
|---|-----------------------------|---|-------------------|-----------------------|---|
| | | Температура испытания, °С | Прочность | | |
| | | | при сдвиге, МПа | при отслаивании, кН/м | |
| ВК-40 | 120–130 | 20 | 28 | 3 | Для склеивания радиопрозрачных обтекателей РЛС из стеклопластиков на основе связующего ЭФ-32-301 и сотового заполнителя. Рабочие температуры от –60 до +80 °С |
| | | 80 | 20 | – | |
| ВК-25 | 125–165 | 20 | 23 | 8 | Для склеивания пакетов сотового заполнителя из фольги АМг2-Н, полимерной бумаги и других материалов в конструкциях, испытывающих высокие акустические нагрузки. Рабочие температуры от –60 до +160 °С |
| | | 80 | 12 | – | |
| ВК-50 ¹⁾ | 130–150 | 20 | 25 | 12 | Для склеивания металлов и неметаллических материалов в конструкциях, испытывающих высокие акустические нагрузки |
| ВК-50АСГ ¹⁾ (со стеклотканью АС ³⁾) | | 80 | 15 | – | |
| ВК-36 ¹⁾ | 170–180 | 20 | 35 | 5 | Для склеивания металлов и неметаллических материалов, сотовых конструкций, работающих при температурах от –196 до +160 °С |
| ВК-36Р ¹⁾ | | 150 | 25 | – | |
| ВК-41 ¹⁾ | 125,3 часа | 20 | 30 | 5 | Для склеивания металлов и неметаллических материалов, сотовых конструкций, работающих при температурах от –196 до +80 °С |
| ВК-46 ¹⁾ | | 80 | 25 | – | |
| ВК-51 ³⁾ | 125 | 20 | 35 | 6 | Вспенивающиеся клеи для заполнения пустот и склеивания сот между собой и с оболочками в конструкциях, работающих при температурах от –60 до +80 °С |
| ВК-51А ¹⁾³⁾ | | | | | |
| ВКВ-9 | 18–25 | 20 | 3,5 ²⁾ | – | Вспенивающиеся клеи для заполнения пустот и склеивания сот между собой и с оболочками в конструкциях, работающих при температурах от –60 до +80 °С |
| ВКВ-27 | 18–25 | 20 | 4,8 ²⁾ | – | |
| ВКВ-3 ¹⁾ | 120–130 | 20 | 2,5 ²⁾ | – | Вспенивающийся клей для склеивания сот между собой и с оболочками в конструкциях, работающих при температурах от –60 до +160 °С |
| | 170–180 | 20 | 2,5 ²⁾ | – | |

¹⁾ Пленочные клеи; температура отверждения 175 °С.

²⁾ Прочность при отрыве клеевого соединения анодированного дуралюмина Д16-АТ с сотовым заполнителем из фольги Амг2-Н.

³⁾ Используется с адгезионным грунтом СПМ-136.

Таблица 4.13. Свойства теплостойких клеев [9, 12, 27]

| Тип клея | $T_{\text{раб}}, \text{max } ^\circ\text{C}$ продолжи- тельность, ч | Условия отверждения клея | | | Жизне- способ- ность при 20 $^\circ\text{C}$ | Прочность при не- равномерном отрыве, МН/м, при $^\circ\text{C}$ | | | $\tau_{\text{сд}}, \text{МПа}$ |
|--|---|--------------------------|-----------------|---------------------------|--|--|--------|--------|---|
| | | $T, ^\circ\text{C}$ | $P, \text{МПа}$ | Продолжи- тельность, ч | | 20 | 200 | 300 | |
| 1. Эпоксикремнийорганический К-300-61 | 300 | 20 | 0,05 | 30 | 2 | – | – | – | 21–36(20 $^\circ\text{C}$)/1,2–1,8 (200 $^\circ\text{C}$) |
| 2. Полиуретановый ВК-20, ВК-20МП | 500, 500 ч 300 | 150 20 | 0,03–0,15 – | 3 – | 3–7 – | – – | – – | – – | 19,7 (20 $^\circ\text{C}$), 8,2 (300 $^\circ\text{C}$) |
| 3. Кремнийорганический ВК-15 | 1200, неск. ч | 150 | 0,1–0,3 | 2 | – | 110 | – | 60 | 11 (20 $^\circ\text{C}$), 3,5 (300 $^\circ\text{C}$) |
| 4. Кремнийорганический ВК-22 | 500, неск. ч | 20 | – | 72–120 | 3–4 | 25 | – | – | 2,5 |
| 5. Эпоксидный пленочный ВК-36 ¹⁾ | 150 | 175 | 0,05–0,1 | 3 | – | – | – | – | 34,3 (20 $^\circ\text{C}$), 24,5(200 $^\circ\text{C}$) |
| 6. Полиимидный СП-6К ¹⁾ | 300, 1000 ч | 300 | 0,2–0,3 | 1 | – | 100 | – | 130 | 9,7 (20 $^\circ\text{C}$), 9,5 (300 $^\circ\text{C}$) |
| 7. Фенольно-каучуковый ВК-32-200 ¹⁾ | 200 | 175 | 0,6–0,2 | 1 | 24 | 300 | 170 | 50 | 20 (20 $^\circ\text{C}$), 2 (300 $^\circ\text{C}$) |
| 8. Фенольно-каучуковый ВК-13 ¹⁾ | 250 | 200 | 0,1–0,8 | 2 | 24 | 450 | 160 | 160 | 80 – |
| ВК-13М | 250 | 150 | 0,3–0,6 | 2 | 24 | 450 | | | 20 (20 $^\circ\text{C}$), 4,5(300 $^\circ\text{C}$), 23 (20 $^\circ\text{C}$), 7 (250 $^\circ\text{C}$) |
| 9. Фенольнокремнийорганические ВК-18 | 250, 500 | 175 | 0,03–0,2 | 3 | – | 200– | – | – | 12 (350 $^\circ\text{C}$), 9,5(400 $^\circ\text{C}$) |
| ВК-18М | 400, 2000 ч, 900, неск. ч | 200 | 0,03–0,2 | 3 | – | – | – | – | 13 (350 $^\circ\text{C}$), 5,7(600 $^\circ\text{C}$) |
| ВК-26П ^{1) 2)} | 350, 60 ч | 200 | 0,3 | 3 | – | – | – | – | 22 (20 $^\circ\text{C}$), 7 (300 $^\circ\text{C}$) |
| 10. Карборансилоксановый ВК-48 ³⁾ | 400 | – | – | – | – | – | – | – | – |

¹⁾ Клеи для сборки многослойных «горячих» конструкций.

²⁾ Клей ВК-26М фенольнокаучуковый, используют при 250 $^\circ\text{C}$ – 500 ч, при 300 $^\circ\text{C}$ – 100 ч.

³⁾ Оптически прозрачный для склеивания оптических волокон (используют также ВК-54М, $T_{\text{отв}}$ 20 $^\circ\text{C}$, $T_{\text{раб}}$ до 300 $^\circ\text{C}$).

Таблица 4.14. Свойства пленочных клеев [9, 12, 27]

| Свойства | Тип клея | | | | | |
|------------------------------------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | ВК-40 | ВК-24 | ВК-24М | ВК-31 | ВК-41 | ВК-36 |
| Температура отверждения, °С | 120 | 175 | 175 | 175 | 120 | 170 |
| $\tau_{\text{ст}}$, 20 °С, МПа | 30–35 | 25 | 20 | 36 | 32 | 35–40 |
| $\tau_{\text{отрыва}}$ от сот, МПа | 8 | 5,5 | 4,2 | 8,0 | 8,9 | 9–11 |

Одностадийный процесс (для изготовления сотовых конструкций с неравновысоким сотовым наполнителем) позволяет обеспечить заданную конфигурацию изделия, снизить трудоемкость, сократить энергетические затраты, уменьшить расход вспомогательных материалов.

Двухстадийный процесс используют при изготовлении крупногабаритных конструкций (различных размеров, конфигураций и различной сложности) с равновысоким сотовым наполнителем.

В зависимости от формы СК для формирования заготовок их обшивок (оболочек) используют выкладку и намотку, при сборке СК используют прессование, вакуумное и автоклавное формование.

Плоские панели собирают на вакуумных столах. Вручную собирают панели простой конструкции, в которых отсутствуют сложные узлы, арматура, лючки и пр. Панели, при сборке которых используют клеи горячего отверждения, подвергают нагреву в процессе склеивания. Для таких панелей в конструкциях вакуумных столов предусматривают подогрев рабочих плит. Вакуумные столы, не имеющие местного подогрева, помещают в электрические воздушные печи или в автоклавы.

Сборку панелей на вакуумных столах ведут в той же последовательности, что и предварительную сборку. По окончании сборки панель накрывают разреженной тканью, затем чехлом и герметизируют. Создают вакуум и выдерживают изделие в течение времени, необходимого для отверждения клея. Плоские панели небольшого размера склеивают на прессах с обогреваемыми плитами рабочего стола. Панели одинарной и двойной кривизны собирают на оправках с фиксацией положения оболочек, вкладышей, сотовых наполнителей, деталей каркаса.

4.5. Эксплуатационные свойства сотовых наполнителей и конструкций (панелей) с сотовыми наполнителями

Использование многослойных конструкций (оболочек, объемных изделий, например, лопастей и др.) с наполнителями и несущими оболочками — эффективный путь снижения массы конструкций в авиа-, ракето-, судо-, и автомобилестроении.

Показателями, определяющими выбор сотовых наполнителей, является размер ячейки, плотность, прочность при сжатии и расслаивании (рис. 4.18), при сдвиге, модуль упругости при сжатии и сдвиге.

Многослойные (чаще трехслойные) панели с сотовыми наполнителями получают клеевым или бесклеевым способом, сваркой, пайкой, соединяя сотовые наполнители с несущими слоями (оболочками) из металлов, ВПКМ.

Показателями, определяющими выбор материалов с сотовыми наполнителями, является удельная масса, прочность при сжатии и отрыве.

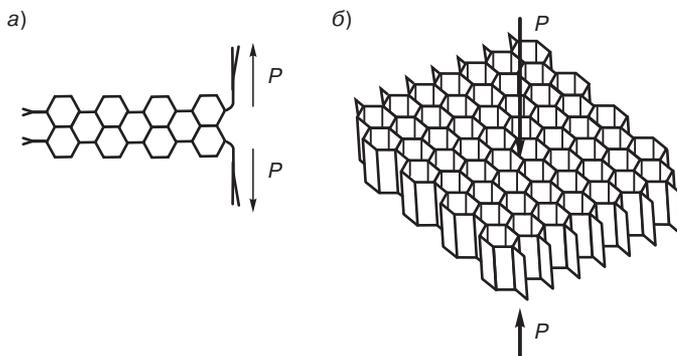


Рис. 4.18. Схема испытаний сотовых заполнителей на расслаивание (а) и сжатие (б) [13]

4.5.1. Сотовые заполнители

Сотовые заполнители с шестигранной формой сотовой ячейки получили наиболее широкое распространение благодаря технологичности, наибольшей площади склеивания торцов сотовых ячеек с оболочками, более высокой прочностью клеевого соединения сот с оболочками ТСК.

Размер сотовой ячейки определяется длиной ее грани a . По своим конструктивным особенностям сотовый заполнитель анизотропен, то есть обладает разной жесткостью и прочностью при нагружении в различных направлениях.

Соотношение прочностных показателей при сдвиге сотового заполнителя в направлениях $0x$ и $0y$ (рис. 4.19) приведены на рис. 4.20. Сотовый заполнитель в слоистых конструкциях целесообразно располагать так, чтобы наибольшие усилия сдвига были направлены вдоль плоскости склеивания его элементов.

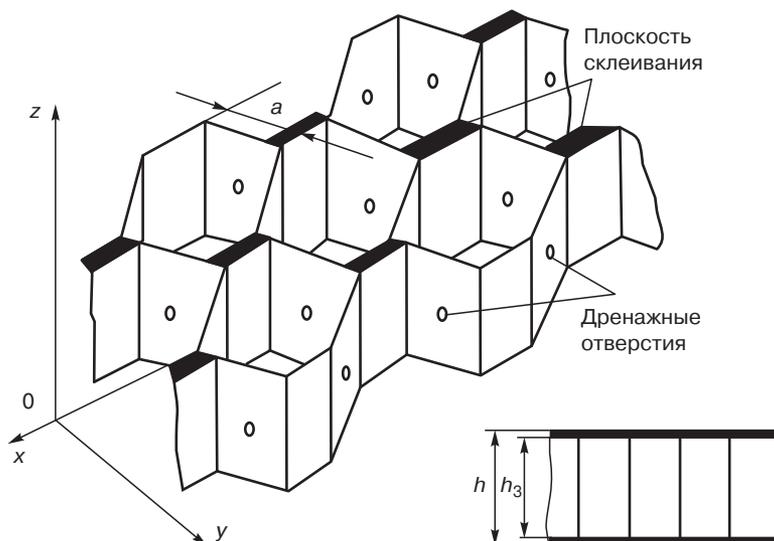


Рис. 4.19. Типичный сотовый блок с гексагональными ячейками и 3-слойная панель [5]: $h = h_3 + (\delta_{01} + \delta_{02})$, где h — толщина панели; h_3 — высота сотовой ячейки; δ_{01} и δ_{02} — толщины обшивок панели

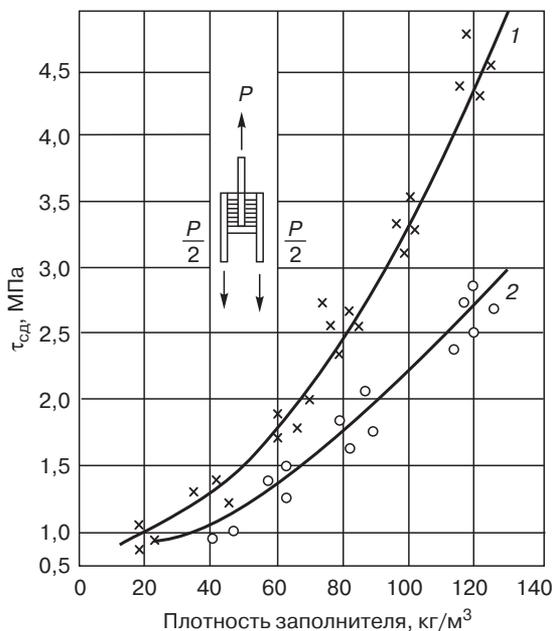


Рис. 4.20. Зависимость прочности при сдвиге $\tau_{сд}$ сотовой конструкции от плотности сотового наполнителя [9, 10]:

1 — нагрузка в направлении плоскости склеивания; 2 — нагрузка в направлении, перпендикулярном плоскости склеивания

Сотовые наполнители изготавливают с дренажными отверстиями и без них. Основное назначение дренажных отверстий (рис. 4.19) заключается в выравнивании давления между полостями сотовых ячеек и окружающей средой, а также в удалении летучих веществ из сотовых ячеек при технологических операциях. Дренажные отверстия способствуют образованию конденсата и проникновению влаги в полости сотовой ячейки, что отрицательно сказывается на долговечности конструкции (дренажные отверстия предусматривают тогда, когда обшивки к сотовому наполнителю приклеивают клеями в панелях специального назначения, например, звукопоглощающих).

Дренажные отверстия располагают в несклеиваемых гранях наполнителя. Для сотовых наполнителей, высота которых $h_3 > 10$ мм, количество дренажных отверстий в ячейке может быть два и более, при этом диаметр отверстия не должен превышать 0,5 мм. В сотовых наполнителях с высотой $h_3 < 5,0$ мм дренажные отверстия обычно располагают на середине высоты.

Дренажные отверстия практически не влияют на прочность при кратковременных статических нагрузках.

Панели с сотовыми наполнителями, имеющими дренажные отверстия, должны быть тщательно загерметизированы по периметру, чтобы исключить проникновение влаги.

Сотовый наполнитель с прямоугольной формой ячеек имеет более стабильные показатели прочности в направлении $0x$ и $0y$.

Для слоистых панелей одинарной и двойной кривизны применяют наполнители с волновой формой сотовой ячейки или шестигранной формой со смещением линий склеивания его элементов.

Повышение прочности и устойчивости сотовых конструкций достигают применением сотовых наполнителей шестигранной формы с дополнительной лентой. Сотовый наполнитель

с ячейками, образующими в сечении мальтийский крест, отличается высокой гибкостью вследствие значительной подвижности стенок ячеек в радиальном направлении. Такие сотовые заполнители используют в узлах конструкций, имеющих сложный профиль поверхности.

В России разработан большой ассортимент сотовых заполнителей, ячейки которых сформированы из стеклопластиков (соты ССП), металлической (алюминиевой и др.) фольги, фенилоновой бумаги (соты ПСП), полимерных пленок.

Основным производителем сотовых заполнителей за рубежом является фирма *Hexcel Corp.* (Дублин, США, около 500 типов сот): соты *CR-111* из алюминиевых сплавов 5052, 5056, 2024; стеклосотопласты *HRP*, *HFT* (фенольные связующие), *HRM 327* (полиимидные связующие), *NP* (винилэфирные, олигоакрилатные связующие); *HRH-10* на основе бумаги *Nomex* и фенольных связующих; соты *HFT-G-1/4-5,0* с углеродными тканями; *HKH-750* — силицированные углеродные соты; *HRH-60-1/4-3,5(3)*, *60-3/16-4,5(3)* — на основе бумаги из волокон ПЭТФ и фенольных связующих; *HRH-750-3/8-4,5(LS-9203)* — эластичные соты из бумаги на основе минеральных волокон и кремнийорганической резины; *XHRH 357M-4,5PCF*, *11PCF* — соты на основе высокомодульных стеклянных волокон; соты с особой формой ячеек (*tube-core HBP*); соты (*iso-core*) с изотропными свойствами в направлениях *L* и *W* (рис. 4.3; $\sigma = 34,3$ МПа, $\tau_{сд} = 16,1$ МПа; гексагональные с $\tau_{сд}$ в направлении *L* — 18,2 МПа, в направлении *W* — 11,9 МПа, $\sigma = 29,4$ МПа); углеродные соты с полиэфиримидным (ПЭИ *Utem*) связующим (табл. 4.18) [5, 15–23].

Металлические соты

В России разработан большой ассортимент сотовых заполнителей из фольги сплава АМГ; за рубежом используются соты из алюминиевых сплавов 3003-Н19, для высоконагруженных конструкций соты 5052-Н39 (с поверхностной обработкой фольги), 5056-Н39 (высокопрочные, с поверхностной обработкой фольги), 2024Т3 и Т81 (высокопрочные, термостойкие). Сотовые заполнители получают гофрированием фольги с ячейками шестигранными, вытянутыми, специальных форм. Эффективная плотность сотовых заполнителей, получаемых растяжением сформированного склеиванием, пайкой, сваркой пакета составляет 32–190 кг/м³, через стадию гофрирования — 130–880 кг/м³ (при показателях ниже 130 кг/м³ снижается сдвиговая прочность). Из сплавов 5052, 5056, 2024 получают соты с шестигранными ячейками размером 1/16, 1/8, 1/4, 3/8, 3/16 (наиболее часто используется), 5/32. Соты для специальных целей изготавливаются из фольги различных типов сталей, жаропрочных сплавов [3, 5, 10, 13].

Стеклосотопласты

Стеклосотопласты получают различными способами (см. раздел 4.3.2), используя в качестве наполнителей стеклянные ткани, в том числе; на основе капиллярных волокон, различной толщины, сотовые ткани с ячейками, сформированными при ткачестве. Основное назначение стеклосотопластов, кроме оптимизации весовых и прочностных характеристик, радиопрозрачность (антенные обтекатели), теплоизоляция, абляционные теплозащитные конструкции. Производятся, в основном, сотовые структуры с размером ячеек 5, 6 и 10 мм (3 мм — при использовании тонких тканей) и эффективной плотностью 32–192 кг/м³. В России освоено производство большого ассортимента стеклосотопластов ССП (табл. 4.15).

За рубежом при производстве многослойных конструкций используют феностеклосотопласты с шестигранными (*HRP 3/16, 1/4, 3/8*), полуцилиндрическими (*HRP/OX 1/4, 3/8*), гибкими (*HRP/F 35, 50*), специальными (*HFT 1/8, 3/16, HFT/OX 3/16*) ячейками; стеклосотопласты на основе полиэфирных связующих с шестигранными (*NP 3/16, 1/4, 3/8*) и полуцилиндрическими (*NP/OX 1/4, 3/8*) ячейками; полиимидные (связующие типа *Skybond 700*) стеклосотопласты *HRH 327 3/8, 3/16* (размер ячеек 2,76; 5,5 мм, табл. 4.16, 4.17).

После организации производства полиариленов их стали использовать не только для изготовления пленок, волокон, формированных изделий, но и в качестве связующих в сотопластах с высокой тепло- и огнестойкостью. Стеклосотопласты на основе термостойкого полиимида БПИ (с группами SO₂) работоспособны длительно при 300 °С (ТПНМ, МАТИ, НПО им. Лавочкина).

Таблица 4.15. Прочность при сжатии (σ^-) стеклосотопластов ССП (объемная масса 80–100 кг/м³) [4, 7]

| Тип соото- пласта | Тип связующего и наполнителя | σ^- , при T , °C | | | | σ^- (МПа, 250 °C), после вы- держки при 250 °C, ч | | | |
|----------------------|--|---------------------------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| | | 20 | 150 | 200 | 250 | 100 | 200 | 300 | 500 |
| ССП-1-2.5 | Фенольное ЛБС, ткань Э | 350 | — | 270 | 260 | — | — | — | — |
| ССП-2-4.2 | Эпоксикремний- органическое К-9Э, ткань Т (клееные гофры) | 260 | 178 | 150 | 140 | 58 | 47 | 40 | 25 |
| ТТСП-2-4.2 | К-9Э, ткань ОССТ ¹ | 350 | 276 | 250 | 230 | 280 | 130 | 109 | 70 |
| ССП-7П ²⁾ | Полиимидное СП-97С ³ , ткань Т-24П | 220 | 150 | 120 | 110 | — | — | 164 | — |

Примечания:

¹⁾ Ткань ОССТ-10П, десятислойная сотовая из капиллярных (П) стеклянных волокон.

²⁾ Для теплоизоляции воздуховодов.

³⁾ Стеклосотопласты на основе связующего АПИ-3 имеют σ^- на 10–15% выше, $T_{\text{раб}}$ до 300 °C (МАТИ, ТПНМ, ОНПО «Технология», звукоизоляция «горячих» секций ГТД).

Таблица 4.16. Типы и свойства стеклосотопластов [7]

| Тип, фирма- изготовитель | Связующее в стеклосотопласте | Размер ячейки, мм | Плотность ρ , кг/м ³ | σ^- , МПа |
|--|--|----------------------|---|------------------|
| <i>Aeroweb, Ciba Geigy</i> , Великобритания | Модифицированное фенольное (двойная пропитка) | 3,48 | 84 | 380 |
| | | 5,23 | 60 | 193 |
| | | 7,0 | 45 | 110 |
| | | 11,0 | 36 | 55 |
| <i>NP, Hexcel</i> , США | Олигоэфиракрилатомалеиновое | 2,75 | 72 | 256 |
| | | 3,7 | 64 | 207 |
| | | 5,5 | 40 | 98 |
| <i>HRP, Hexcel</i> , США | Феноло-формальдегидное | 2,75 | 64 | 246 |
| | | 3,7 | 56 | 183 |
| | | 5,5 | 35 | 74 |
| <i>HRH 327, Hexcel</i> , США | Полиимидное типа <i>Skybond</i> | 2,76 | 72 | 280 |
| | | 5,5 | 64 | 230 |
| ССП, Россия | Феноло-формальдегидное | 2,5 | 100±10 | 350 |
| | | 3,5 | 85±15 | 300 |
| | | 4,2 | 70±10 | 180 |

Таблица 4.17. Типы и свойства зарубежных феностеклосотопластов *HFT* (образцы толщиной 12,7 мм) [5]

| Тип, размер шестигран- ных ячеек, плотность | Сжатие | | | Сдвиг в плоскости пластины | | | |
|--|------------------------------------|--------------------|------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| | Исходная ячейчатая структура | Скрепленные ячейки | | <i>L</i> -направление | | <i>W</i> -направление | |
| | | σ^- , кПа | σ^- , кПа | E^- , МПа | $\tau_{сд}$, кПа | $G_{сд}$, МПа | $\tau_{сд}$, кПа |
| <i>HFT</i> -1/8-3.0 | 1722 | 2480 | 144 | 1275 | 110 | 66 | 44 |
| <i>HFT</i> -1/8-4.0 | 3169 | 3651 | 310 | 2136 | 172 | 1033 | 65 |
| <i>HFT</i> -1/8-5.5 | 5856 | 6545 | 447 | 3169 | 234 | 1654 | 93 |
| <i>HFT</i> -1/8-8.0 | 11024 | 12057 | 654 | 4134 | 296 | 2343 | 137 |
| <i>HFT</i> -3/16-2.0 | 620 | 964 | 117 | 813 | 103 | 379 | 30 |
| <i>HFT</i> -3/16-3.0 | 1722 | 2205 | 220 | 1171 | 137 | 620 | 45 |
| <i>HFT</i> -3/16-4.0 | 3169 | 3652 | 310 | 2135 | 172 | 1033 | 65 |
| <i>HFT/OX</i> -3/16-6.0 | 6890 | 7579 | 461 | 1998 | 89 | 2308 | 207 |

Фирма *Hexcel* изготавливает стеклотканевые сотовые наполнители с полиамидимидным (ПАИ) термопластичным связующим. Они имеют более высокую степень сохранения прочности σ , $\tau_{сд}$ (в сотоблоках с оболочками) после ударных нагрузок по сравнению со стеклосотами других типов и сотами на основе бумаги *Nomex*. Водопоглощение ПАИ-сотопластов после 120 ч выдержки при 95 %-ной влажности не превышает 1 % масс. Сотовые ПАИ-наполнители с плотностью 48–128 кг/м³ изготавливают с гексагональными ячейками, размером 3,2; 4,8 и 9,6 мм и используют в аэрокосмических конструкциях [16,18].

Соты на основе ПЭИ (табл. 4.18) изготавливают фирмы *Supracor Systems* и *Plasore*. Для формирования сотоблоков используют ненаполненную ПЭИ-пленку или пленки, наполненные стеклянными, арамидными, углеродными волокнами. Соты с трубчатыми ячейками с плотно-

Таблица 4.18. Сравнительные свойства сотовых углеродных наполнителей с гексогональными ячейками на основе различных связующих [18, 21]

| Свойства | Сотовые наполнители со связующими | | | | | |
|---------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------|
| | ПЭИ <i>Ultem 1000</i> ¹ | | | | Эпоксидные <i>F-593</i> , 20 °С | Фенольные, 20 °С |
| | 20 °С | 250 °С ² | 280 °С ² | 315 °С ² | | |
| σ^- , МПа | 69 | 70 | 63 | 50 | 62 | 66 |
| E^- , ГПа | 5,8 | 71 | 62 | 53 | 4,3 | 7,0 |
| $\tau_{сд(напр.L)}$, МПа | 34 | 99 | 92 | 72 | 41 | 32 |
| $\tau_{сд(напр.W)}$, МПа | 21 | 97 | 92 | 76 | 25 | 20 |
| $G_{сд(напр.L)}$, ГПа | 5,32 | — | — | — | 4,97 | 6,44 |
| $G_{сд(напр.W)}$, ГПа | 2,17 | — | — | — | 2,0 | 2,45 |

Примечания:

¹ ПЭИ соты *HFT-G-1/4-5.0*.

² % сохранения упругопрочностных свойств.

стью 48–160 кг/м³ могут эксплуатироваться до 150 °С. Панели из пленочных ПЭИ-сотоблоков и оболочек на основе ПЭИ изготавливают сваркой [8, 18, 22].

Углеродные соты

Огнестойкие углеродосотопласты изготавливают из углеродных тканей (типа Т300), эпоксидных, фенольных и полиимидных (ПЭИ) связующих (табл. 4.18). Они имеют высокие показатели при сжатии и сдвиге, сохраняя их при 150–180 °С (фенольные), 260–315 °С (ПЭИ).

Пиролизом углеродосотопластов на основе фенольных и полиимидных связующих (с последующим газофазным осаждением пироуглерода) получают углерод-углеродные соты спецназначения ($T_{\text{раб}}$ до 1650 °С, элементы переизлучающей теплозащиты ВКС *Space Shuttle*; радиопоглощающие сотовые конструкции передних кромок самолета В-2 «*Spirit*», технология *Stealth*) [17].

Полимерные сотопласты (ПСП, Nomex)

На основе фенилоновой бумаги БФСК разработан большой ассортимент сотопластов: ПСП-1 (связующее БФСП-1М, фенолоальдегидное, модифицированное оксипропилированными эфирами пентаэритрита и алкилфосфорной кислоты для повышения огнестойкости, табл. 4.19–4.21), ПСП-1-2,5-100; ПСП-1-20-85; ПСП-1-1,8-60 (для силовых конструкций на

Таблица 4.19. Свойства полимеросотопластов ПСП-1 [7]

| Свойства | Размер ячейки, мм | | |
|------------------------------|-------------------|------|------|
| | 2,5 | 3,5 | 4,2 |
| Плотность, кг/м ³ | 45±5 | 35±5 | 25±5 |
| σ , МПа | 0,9 | 0,73 | 0,48 |
| $\tau_{\text{сд}}$, МПа | 0,76 | 0,55 | 0,38 |

Таблица 4.20. Типы и свойства полимеросотопластов ПСП-1 [7]

| Сотопласт | Размер ячейки ¹⁾ , мм | Плотность, кг/м ³ | σ , МПа |
|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|
| ПСП-1-2,5-45 ³⁾ | 2,5 | 45±5 | 1,3–1,5 |
| ПСП-1-2,5-60 ³⁾ | 2,5 | 60 | 2,2–2,6 |
| ПСП-1-3,5-35 | 3,5 | 35±5 | 1,1–1,3 |
| ПСП-1-3,5-50 | 3,5 | 50 | 1,5–1,8 |
| ПСП-1-3,5-70 | 3,5 | 70 | 2,8–3,1 |
| ПСП-1-4,2-25 | 4,2 | 25±5 | 0,7–0,9 |
| ПСП-1-4,2-40 | 4,2 | 40 | 1,0–1,3 |
| ПСП-1-4,2-60 | 4,2 | 60 | 2,1–2,5 |
| ПСП-1П-2,5-45 ²⁾ | 2,5×5 | 45 | 1,3–1,5 |
| ПСП-1П-3,5-35 | 3,5×7 | 35 | 1,1–1,3 |
| ПСП-1П-4,2-25 | 4,2×8,4 | 25 | 0,7–0,9 |

Примечания:

¹⁾ Для шестигранной ячейки сотопластов типа ПСП-1 приведена длина стороны шестиугольного сечения (перпендикулярно оси) ячейки.

²⁾ П — прямоугольные.

³⁾ Самозатухающие.

Таблица 4.21. Огнестойкость полимеросотопластов ПСП-1 [7]

| Сотопласт | Продолжительность остаточного горения и тления после экспозиции | Высота прогорания, мм | Потеря массы, % | Классификация |
|--------------|---|-----------------------|-----------------|----------------|
| ПСП-1-2,5-45 | Не горит, тлеет 8 с | 50 | 1,2 | Самозатухающий |
| ПСП-1-3,5-35 | Не горит, не тлеет | 42 | 1,0 | Трудногорающий |
| ПСП-1-4,2-25 | То же | 45 | 0,9 | Трудногорающий |

Таблица 4.22. Типы и свойства полимеросотопластов ПСП-2 [7]

| Сотопласт | Размер ячейки, мм | Плотность, кг/м ³ | σ , МПа |
|--------------|-------------------|------------------------------|----------------|
| ПСП-2-2,5-45 | 2,5 | 45 | 0,9–1,3 |
| ПСП-2-3,5-45 | 3,5 | 35 | 0,8–1,1 |
| ПСП-2-4,2-25 | 4,2 | 25 | 0,6–0,8 |
| ПСП-2-2,5-60 | 2,5 | 60 | 1,8–2,5 |
| ПСП-2-3,5-50 | 3,5 | 50 | 1,1–1,4 |
| ПСП-2-4,2-40 | 4,2 | 40 | 0,9–1,1 |
| ПСП-2-3,5-70 | 3,5 | 70 | 2,3–3,0 |
| ПСП-2-4,2-60 | 4,2 | 60 | 2,1–2,5 |

основе дублированных бумаг, высокие показатели σ и $\tau_{ст}$, ресурс ПСП-1-2,5-100 в 20 раз превышает ресурс ПСП-1-2,5-60 и в 5 раз сотопласта *HRH* 10-3/16-4,0); ПСП-2 (связующее ЭФ 32-301, для конструкций с повышенной демпфирующей способностью, табл. 4.22); ПСП-4, ПСП-8С (связующее ФАФЭ-10, хлорэтокси-, аминоэтокси-, анилидофосфазены, повышенная огнестойкость), ПМСП-1Ф (связующее ФАФЭ-10, изготавливают методом растяжения пакета, собранного из чередующихся слоев фениловой бумаги и алюминиевой фольги). Для полимеросотопластов характерна зависимость прочности при сжатии от содержания связующего (в ПСП-1 оптимальное содержание бумаги 81 %масс., при содержании связующего 19–32 г/м² на бумаге БФСК-130 σ повышается в 1,5–2 раза).

Для выбора оптимальных геометрических параметров (формы и размеров ячеек, толщины стенок) сотовых заполнителей, обеспечивающих заданную их прочность при сжатии и сдвиге используют номограммы (рис. 4.21). На нижнем поле номограммы проводят горизонталь, соответствующую заданной плотности. Из точек пересечения горизонтали с кривыми, характеризующими зависимость плотности сотопласта от размера ячеек «а», проводят вертикали вверх до пересечения с кривыми, характеризующими зависимость прочности при сжатии σ от размера ячеек «а» для сотопластов ПСП-1 на основе бумаг БФСК-130, 100, 75, 50.

Свойства различных типов полимеросотопластов *HRH*-10 на основе арамидной бумаги *Notex* и фенольных связующих приведены в табл. 4.23.

Для изготовления панелей с сотопластами и декоративно-отделочных и конструкционных используются целлюлозные бумаги, ламинированные с двух сторон термопластичными пленками каландрованием с расплавами термопластов. Сотовые заполнители изготавливают штамповкой, сваркой (табл. 4.24).

Сравнительные свойства сотовых заполнителей различного типа и состава приведены на рис. 4.22–4.29 и в табл.4.25–4.28.

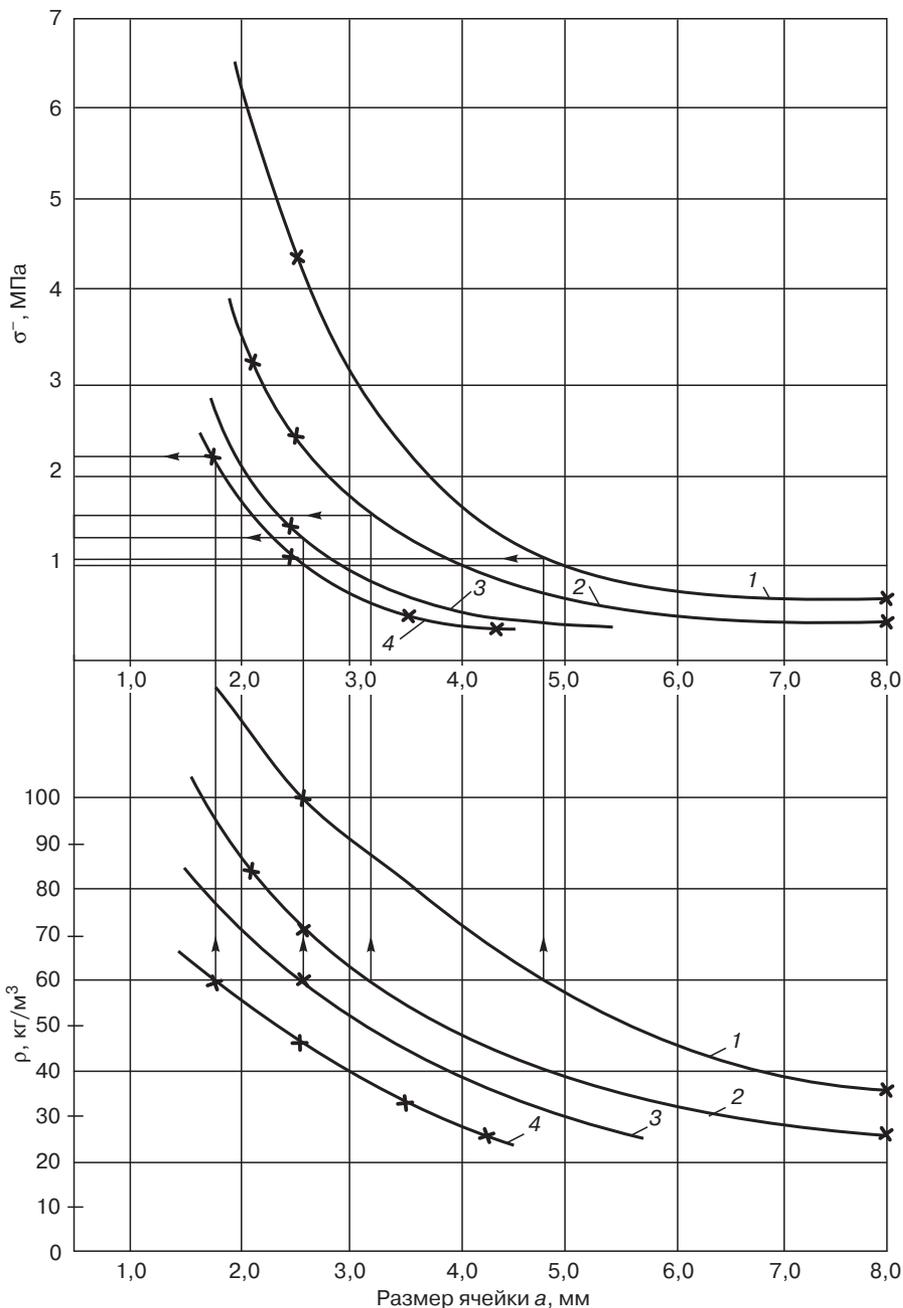


Рис. 4.21. Номограмма для выбора параметров сотовых заполнителей на основе бумаг [7]:
 1 — БФСК-130; 2 — БФСК-100; 3 — БФСК-75; 4 — БФСК-50

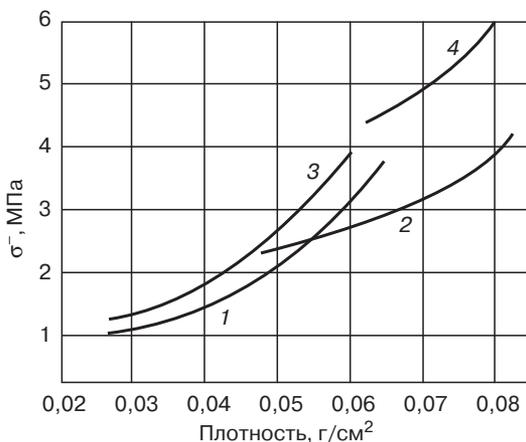
Таблица 4.23. Типы и свойства полимеросотопластов *Notex* на основе арамидной бумаги (образцы толщиной 12,7мм) [5]

| Материал, размер шестигранных ячеек, плотность (калибр) | Сжатие | | | | | Сдвиг в плоскости пластины | | | | | | |
|---|----------------------------------|------|--------------------|-------|-----------|----------------------------|------|----------------|---------------|-------------------|------|----------------|
| | Исходная ячеи- стая структура | | Скрепленные ячейки | | | L-направление | | | W-направление | | | |
| | σ , кПа | | σ , кПа | | E , МПа | $\tau_{сд}$, кПа | | $G_{сд}$, МПа | | $\tau_{сд}$, кПа | | $G_{сд}$, МПа |
| | тип. | мин. | тип. | мин. | тип. | тип. | мин. | тип. | тип. | мин. | тип. | |
| <i>Шестигранные ячейки</i> | | | | | | | | | | | | |
| <i>HRH 10-1/8-1.8-1.8(1.5)</i> | 758 | 482 | 896 | 586 | — | 620 | 448 | 25 | 344 | 248 | 13 | |
| <i>HRH 10-1/8-4.0(2)</i> | 2068 | 1241 | 2275 | 1861 | 137 | 1241 | 1116 | 48 | 655 | 586 | 24 | |
| <i>HRH 10-1/8-4.0(2)</i> | 34473 | 2275 | 3861 | 3240 | 193 | 1689 | 1551 | 63 | 965 | 758 | 32 | |
| <i>HRH 10-1/8-5.0(3)</i> | 6205 | 4136 | 6377 | 4550 | — | 2240 | 1620 | — | 1206 | 827 | — | |
| <i>HRH 10-1/8-6.0(3)</i> | 7411 | 5515 | 7756 | 5688 | 413 | 2551 | 1792 | 89 | 1379 | 930 | 41 | |
| <i>HRH 10-1/8-8.0(3)</i> | 10859 | 7584 | 11721 | 8618 | 537 | 3378 | 2447 | 110 | 1723 | 1310 | 53 | |
| <i>HRH 10-1/8-9.0(3)</i> | 11721 | 9652 | 12410 | 11031 | 620 | 3585 | 2551 | 117 | 1861 | 1654 | 62 | |
| <i>HRH 10-5/32-5.0(4)</i> | 5515 | — | 6205 | — | — | 2482 | — | 72 | 1241 | — | 34 | |
| <i>HRH 10-5/32-9.0(4)</i> | 12238 | — | 12134 | — | — | 3619 | — | 124 | 1965 | — | 65 | |
| <i>HRH 10-3/16-2.0(2)</i> | 1034 | 620 | 1172 | 723 | 75 | 758 | 496 | 28 | 379 | 275 | 15 | |
| <i>HRH 10-3/16-3.0(2)</i> | 2068 | 1241 | 2275 | 1861 | 137 | 1034 | 896 | 34 | 655 | 461 | 24 | |
| <i>HRH 10-3/16-4.0(2)</i> | 3447 | 2206 | 3861 | 3240 | 193 | 1689 | 1482 | 53 | 965 | 758 | 32 | |
| <i>HRH 10-3/16-4.5(5)</i> | 2930 | 2206 | 3275 | 2757 | — | 1999 | 1551 | 65 | 999 | 758 | 27 | |
| <i>HRH 10-3/16-6.0(5)</i> | 4481 | 3998 | 4826 | 4481 | — | 2688 | 2275 | 99 | 1275 | 1034 | 41 | |
| <i>HRH 10-1/4-1.5(2)</i> | 620 | 310 | 655 | 379 | 41 | 517 | 310 | 20 | 241 | 158 | 10 | |
| <i>HRH 10-1/4-2.0(2)</i> | 1034 | 551 | 1172 | 723 | 75 | 758 | 496 | 28 | 379 | 248 | 19 | |
| <i>HRH 10-1/4-3.1(5)</i> | 1896 | 1241 | 1965 | 1654 | — | 1172 | 930 | 48 | 586 | 413 | 20 | |
| <i>HRH 10-1/4-4.0(5)</i> | 2551 | 2137 | 2757 | 2482 | — | 1654 | 1378 | 5,1 | 861 | 655 | 24 | |

| Материал, размер шестигранных ячеек, плотность (калибр) | Сжатие | | | | | Сдвиг в плоскости пластины | | | | | |
|---|----------------------------------|------|--------------------|------|-----------|----------------------------|------|----------------|-------------------|------|----------------|
| | Исходная ячеи- стая структура | | Скрепленные ячейки | | | L-направление | | | W-направление | | |
| | σ , кПа | | σ , кПа | | E , МПа | $\tau_{сд}$, кПа | | $G_{сд}$, МПа | $\tau_{сд}$, кПа | | $G_{сд}$, МПа |
| | тип. | мин. | тип. | мин. | тип. | тип. | мин. | тип. | тип. | мин. | тип. |
| <i>HRH 10-3/8-1.5(2)</i> | 620 | 310 | 655 | 379 | 41 | 517 | 310 | 20 | 241 | 158 | 10 |
| <i>HRH 10-3/8-2.0(2)</i> | 1034 | 551 | 1172 | 723 | 75 | 758 | 496 | 28 | 379 | 248 | 15 |
| <i>HRH 10-3/8-3.0(5)</i> | 1985 | — | 2068 | — | 117 | 1172 | — | 38 | 655 | — | 20 |
| <i>Полуцилиндрические ячейки</i> | | | | | | | | | | | |
| <i>HRH 10/OX-3/16-1.8(2)</i> | 758 | 482 | 826 | — | — | 413 | 310 | 13 | 413 | 241 | 20 |
| <i>HRH 10/OX-3/16-3.0(2)</i> | 2516 | 1723 | 2757 | 1861 | 11 | 792 | 655 | 20 | 861 | 655 | 41 |
| <i>HRH 10/OX-1/4-3.0(2)</i> | 2413 | 1447 | 2654 | 1723 | 117 | 758 | 620 | 20 | 792 | 620 | 41 |
| <i>Гибкий наполнитель</i> | | | | | | | | | | | |
| <i>HRH 10/F35-2.5(3)</i> | 1034 | 723 | 1172 | 820 | 82 | 482 | 337 | 27 | 275 | 193 | 13 |
| <i>HRH 10/F35-3.5(5)</i> | 2068 | — | 2413 | — | 16 | 1034 | — | 39 | 551 | — | 19 |
| <i>HRH 10/F35-4.5(5)</i> | 3102 | — | 3378 | — | 227 | 1861 | — | 59 | 1034 | — | 25 |
| <i>HRH 10/F50-3.5(3)</i> | 2068 | 1303 | 2413 | 1496 | 16 | 1034 | 6929 | 39 | 551 | 386 | 19 |
| <i>HRH 10/F50-4.5(5)</i> | 3102 | — | 3378 | — | 227 | 1861 | — | 50 | 1034 | — | 25 |
| <i>HRH 10/F50-5.0(5)</i> | 3792 | — | 4309 | 3619 | 225 | 2275 | 2068 | 55 | 1310 | 1103 | 28 |
| <i>HRH 10/F50-5.5(5)</i> | 4481 | — | 4826 | — | 289 | 2688 | — | 60 | 1620 | — | 31 |

Таблица 4.24. Сотовые наполнители из бумаги, ламинированной термопластами [11]

| № | Характеристики ламинированной бумаги | | Геометрические характеристики сот | | | Физико-механические свойства сот | |
|---|--|-----------------------------|-----------------------------------|------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| | Состав | Масса 1 м ² , кг | Толщина, мм | Высота, мм | Размер ячейки, мм | σ , МПа | Масса 1 м ² , кг |
| 1 | Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 0,35 | 0,45 | 10 | 8 | 1,02 | 1,12±0,4 |
| | | | | | 10 | 0,72 | 0,85±0,04 |
| | | | | | 15 | 0,92 | 1,06±0,04 |
| | | | | | 10 | 0,65 | 1,30±0,04 |
| 2 | Бумага типа «крафт», ламинированная полиэтиленом | 0,1 | 0,15 | 10 | 0,27 | 0,36±0,02 | |
| | | | | 15 | — | 0,56±0,02 | |
| | | | | 10 | 0,69 | 0,62±0,03 | |
| | | | | 15 | 0,57 | 0,90±0,03 | |
| 3 | Бумага писчая, ламинированная полиэтиленом | 0,13 | 0,15 | 10 | 0,24 | 0,41±0,02 | |
| | | | | 15 | 0,20 | 0,75±0,02 | |
| 4 | Кабельная бумага марки КМГ-120, ламинированная полиэтиленом | 0,30 | 0,30 | 10 | 8 | 0,49 | 0,87±0,02 |
| 5 | Кабельная бумага марки КМГ-120, ламинированная полиамидом | 0,24 | 0,25 | 10 | 6 | 1,39 | 0,85±0,03 |
| | | | | | 8 | 1,04 | 0,65±0,03 |
| | | | | | 10 | | 0,61±0,03 |
| | | | | | 15 | 0,87 | 0,90±0,03 |
| | | | | | 10 | 0,40 | 0,45 |
| 6 | Фенилоновая бумага марки БФСК-100, ламинированная полиамидом-6 | 0,24 | 0,25 | 10 | 8 | 1,33 | 0,80±0,03 |
| | | | | | | | |

Рис. 4.22. Зависимость прочности при сжатии (σ) от плотности ρ сотовых наполнителей [4]: 1 — соты из алюминиевой фольги; 2 — ПСП-1; 3 — ПСП-2; 4 — стеклосотопласты

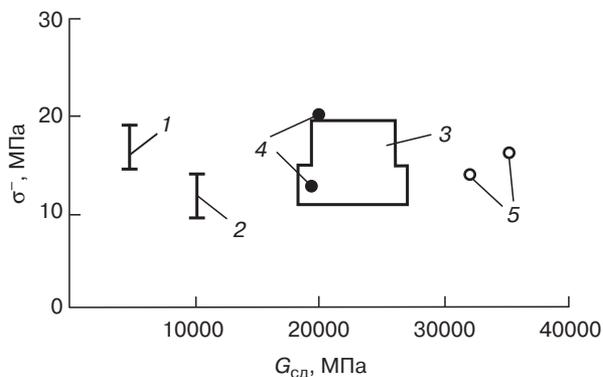


Рис. 4.23. Взаимосвязь прочности при сжатии σ_c и модуля сдвига G_{cd} для сотовых заполнителей (размер ячеек 3,6 мм) из материалов различных типов [4]:

1 — соты ПСП, *Nomex*; 2 — стеклосотопласты; 3 — соты из алюминиевой фольги; 4 — соты из препрегов с тканью из волокон *Kevlar 49* (32–42 кг/м³); 5 — соты из препрегов органоволоконита [± 45] из волокон *Kevlar 49* (36 кг/м³)

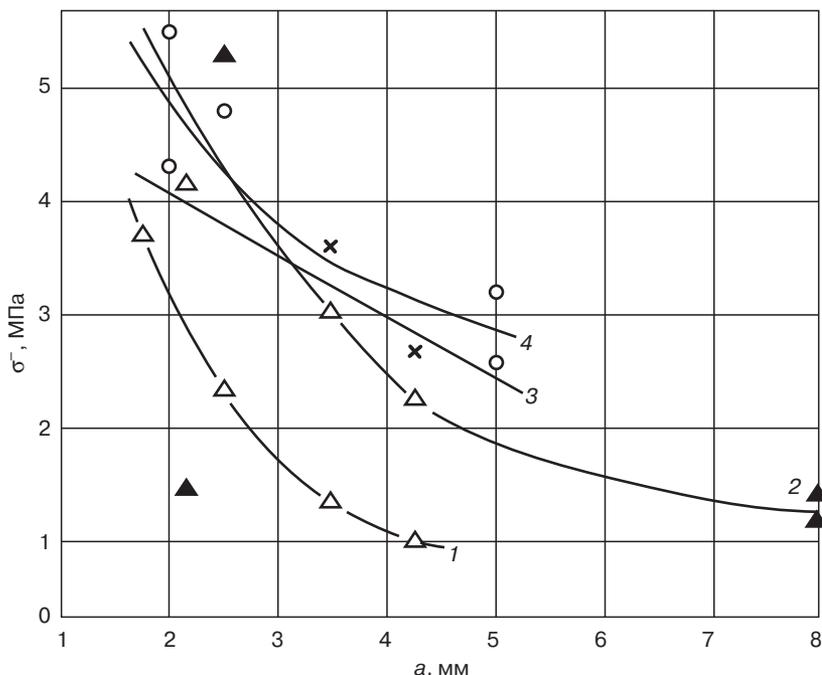


Рис. 4.24. Зависимость прочности при сжатии σ_c сотовых заполнителей от величины шестигранной ячейки «а» [7]:

1 — ПСП-1 (бумага БФСК-50,75); 2 — ПСП-1 (дублированные бумаги БФСК-100,130); 3 — стеклотканевые соты ССП; 4 — соты из фольги АМг 2-Н

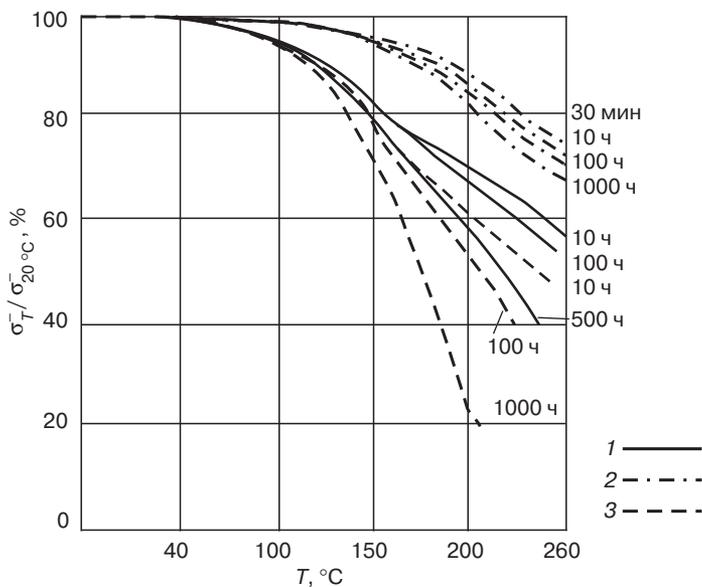


Рис. 4.25. Сохранение прочности при сжатии σ после выдержки при температурах 40–260 °C (% от σ при 20 °C) в течение времени для сотовых материалов различного состава [16, 23]:
1 — из сплава 2024; 2 — соты HRH 324, OCS; 3 — соты HRP

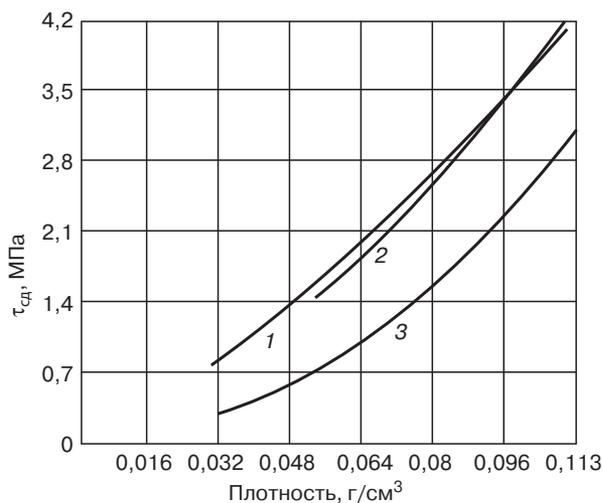


Рис. 4.26. Зависимость прочности при сдвиге $\tau_{сд}$ в направлении L от плотности сотовых материалов [18]:
1 — из алюминиевой (сплав 5052) фольги; 2 — фенолоальдегидный стеклопласт; 3 — из стальной (сплав PH15-7Mo) фольги

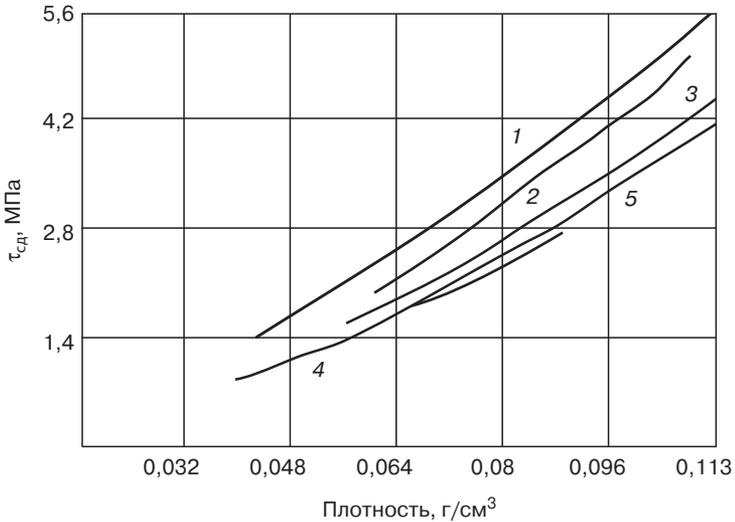


Рис. 4.27. Зависимость прочности при сдвиге $\tau_{сд}$ от плотности сотовых блоков (в направлении L) [18]:

1 — соты из алюминиевой (сплав 2024) фольги; 2 — соты из титановой фольги и соты системы OCS; 3 — соты из фенольных стеклотекстолитов HRP; 4 — гибкие соты HRP Flex-Core из фенольных стеклотекстолитов; 5 — полиимидные стеклосотопласты HRH 327 (стекло E, аппрет А-1100, типа N80, работоспособны 3000 ч при 250 °C)

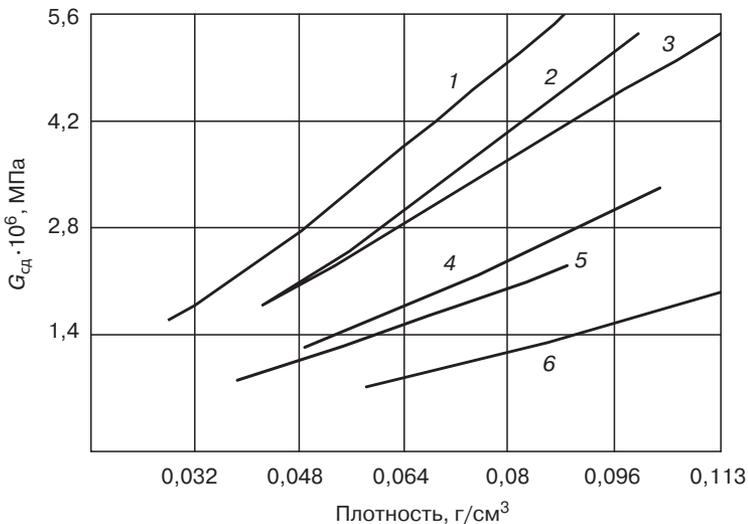


Рис. 4.28. Зависимость модуля сдвига $G_{сд}$ в направлении L от плотности сотовых блоков при 20 °C [16, 18]:

1 — соты из алюминиевой (сплав 2024) фольги; 2 — соты OCS; 3 — соты из титановой (сплав Ti8-1-1) фольги; 4 — полиимидные стеклосотопласты HRH 327; 5 — гибкие фенольные стеклосотопласты HRP Flex-Core; 6 — фенольные стеклосотопласты HRP

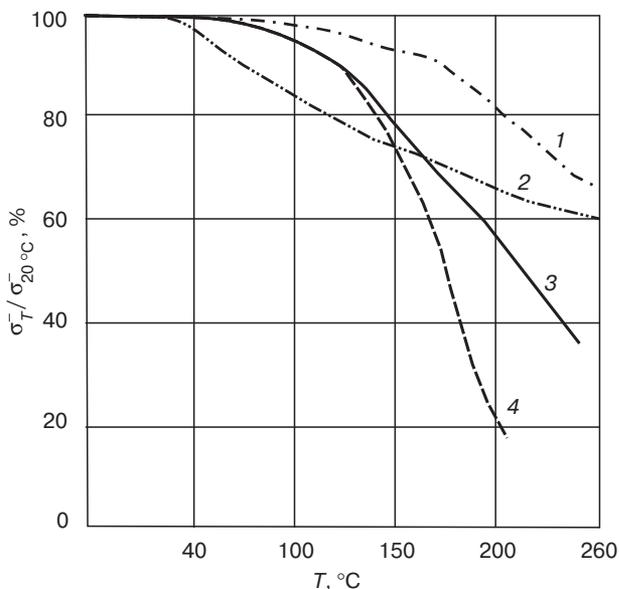


Рис. 4.29. Сохранение прочности при сжатии σ^- после 1000 ч выдержки при температуре 40, 100, 150, 200, 260 °C (% от σ^- при 20 °C) [16, 18]:

1 — полиимидные стеклосотопласты *HRH 327* и соты *OCS*; 2 — соты из титановой (сплав 5-2) фольги; 3 — соты из алюминиевой (сплав 2024) фольги; 4 — феностеклосотопласты *HRP*

Таблица 4.25. Типы и сравнительные свойства сотовых заполнителей для панелей конструкционного назначения [7]

| Марка сотопластов | Объемная масса, кг/м ³ | σ^- , МПа | $\tau_{сд}$, МПа | E' , МПа | G , МПа |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|------------|-----------|
| Полимеросотопласт: | | | | | |
| ПСП-1-2,5-100 | 100±5 | 5,0 | 2,74 | 170 | 115 |
| Стеклосотопласт ССП-1-2,5-100 | 100±10 | 3,5 | — | — | — |
| Зарубежные полимеросотопласты: | | | | | |
| <i>HRH-10</i> | 96±10 | 4,55–5,77 | 1,82–2,30 | 420 | 91–101 |
| <i>Aramex</i> | 96±10 | 4,50–5,50 | 1,90–2,45 | — | 75–80 |
| <i>AFP</i> | 96±10 | 4,50–5,70 | — | — | — |
| Полимеросотопласт ПСП-1-2,0-85 | 85±5 | 3,46 | 2,36 | 110 | 85 |
| Стеклосотопласт ССП-1-3,5-85 | 85±15 | 3,0 | — | — | — |
| Полимеросотопласт <i>HRH10</i> | 72±7 | 2,80 | 1,58 | — | 66 |
| Полимеросотопласт ПСП-1-1,8-60 | 60±5 | 2,20 | 1,70 | 85 | 75 |
| Стеклосотопласт ССП-1-4,2-70 | 70±10 | 1,80 | — | — | — |
| Полимеросотопласты: | | | | | |
| <i>HRH-10</i> | 64±6 | 2,52–3,29 | 0,70–1,58 | 196 | 52,5–64,4 |
| <i>Aramex</i> | 64±6 | 2,40–2,75 | 1,50–1,75 | — | 50,0–54,0 |
| <i>AFP</i> | 64±6 | 2,50–3,50 | — | — | — |

Таблица 4.26. Сравнительные свойства полимеросотопластов ПСП-1 и HRH-10 [7]

| Тип сотопласта | Размер ячейки, мм | Плотность, кг/м ³ | σ , МПа; образцы 50×50×15 мм | $\tau_{сд}$, МПа; образцы 80×80×15 мм | $G_{сд}$, МПа; образцы 80×80×15 мм |
|----------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| ПСП-1-2,5-45 | 2,5 | 45±5 | 1,3–1,5 | 1,4–1,5 | 41–49 |
| ПСП-1-3,5-35 | 3,5 | 35±5 | 1,1–1,3 | 0,8–0,95 | 32–36 |
| ПСП-1-4,2-25 | 4,2 | 25±5 | 0,7–0,9 | 0,45–0,6 | 26 |
| HRH-10-2,7-48 | 2,7 | 48 | 1,3–1,8 | 1,0–1,3 | 49 |
| HRH-10-3,7-32 | 3,7 | 32 | 0,6–1,0 | 0,5–0,8 | 28 |
| HRH-10-5,5-24 | 5,5 | 24 | 0,3–0,7 | 0,3–0,55 | 21 |

Таблица 4.27. Сравнительные свойства сотовых наполнителей различных типов (Россия) [7, 14]

| Свойства | Типы сотовых наполнителей | | | | |
|--|---------------------------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| | АМг-2Н-2,5-30 | ССП-7П-3,5 | ССП-1-4,2 | ПСП-1-3,5-45 | ПСП-2-3,5-50 |
| | ОСТ 1007-28-75 | ТУ 6-1995-78 | | ТУ 1-595-8-742 | |
| Объемный вес, кг/м ³ | 55 | 52 | 70 | 50 | 50 |
| σ , МПа | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,8 | 1,4 |
| $G_{сд}$, ¹⁾ , МПа | 270 | 500 | 500 | 490 | 400 |
| $G_{сд}$, \perp ²⁾ , МПа | 150 | 360 | 350 | 320 | 320 |
| $\tau_{сд}$, , МПа | 1,5 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 1,3 |
| $\tau_{сд}$, \perp , МПа | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |

Примечания:

¹⁾,²⁾ Соответственно параллельно и перпендикулярно клеевым полосам.

В ССП-7П-3,5 полотно Т-24П (капиллярные нити), связующие СП-97с.

В ССП-1-4,2 ткань Т-10, фенольное связующее.

Таблица 4.28. Сравнительные конструкционные свойства сотовых наполнителей различных типов [17]

| Свойства | Типы сотовых наполнителей | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| | Углесотопласт HFT-G (углеродная лента Thornel T-300) | Из алюминиевой фольги (сплав 5052) | Стекло-сотопласт HFT | Полимеросотопласт HRH-10 |
| σ , МПа | 6,60 | 4,53 | 5,45 | 5,70 |
| E , МПа | 914 | 1266 | 422 | 316 |
| $\tau_{сд}$, , МПа | 3,20 | 2,88 | 2,88 | 2,28 |
| $\tau_{сд}$, \perp , МПа | 2,04 | 1,84 | 1,40 | 1,23 |
| G , , МПа | 647 | 548 | 253 | 77 |
| G , \perp , МПа | 246 | 238 | 179 | 54 |

4.5.2. Сотовые панели

Сочетанием многих типов сотовых заполнителей и оболочек разработан большой ассортимент многослойных (трехслойных) панелей различных геометрических форм, выполняющих в современных конструкциях различные задачи (конструкционные, радиопрозрачные, тепло- и звукоизолирующие и т. д.).

Панели с оболочками из металлов и ВПКМ (табл. 4.1–4.4) и сотовыми заполнителями из алюминиевой фольги, стекло- и углепластиков, органобумалитов на основе полимерной бумаги фенилоновой, *Nomex*, термопластичных и термореактивных полимерных связующих (полимеросотопласты ПСП, *Nomex*), панели с сетчатыми и трубчатыми (табл. 4.31) заполнителями, заполнителями в виде гофр дают возможность для выбора оптимального состава компонентов панелей, обеспечивающих требуемый уровень свойств (конструкционные свойства, теплостойкость, табл. 4.29–4.31, рис. 4.30, огнестойкость, звуко- и теплоизоляционные свойства, радиопрозрачность и т. д.)

Панели с полимерными сотопластами в средненагруженных конструкциях обеспечивают снижение массы (замена сот из алюминиевой фольги на соты ПСП, *Nomex* позволяет снизить массу на 12–15%), высокую усталостную прочность (по сравнению с металлическими СК), коррозионную стойкость, пониженную горючесть.

Накоплен опыт, позволяющий целенаправленно использовать трехслойные конструкции с оптимальным соотношением конструкционных и весовых параметров.

Вопросы конструирования сотовых структур, расчеты критических нагрузок при различных условиях их нагружения рассмотрены в работах [5, 10, 13].

Таблица 4.29. Механические свойства сотовых заполнителей ПСП-1 и трехслойных панелей со стеклопластиковыми оболочками [7]

| Температура испытаний, °С | Размер ячейки, мм | σ , МПа | $\sigma_{\text{отрыва}}$ от стеклопластиковой оболочки, МПа | $\tau_{\text{сд}}$, МПа | E , МПа | $E_{\text{отрыва}}$, МПа |
|---------------------------|-------------------|-------------------|---|--------------------------|-----------|---------------------------|
| –60 | 2,5 | 118 | 338 | 138 | 6780 | – |
| | 3,5 | 63 | 227 | 91 | 6040 | |
| | 4,25 | 51 | 145 | 87 | 2840 | |
| 20 | 2,5 | 137 ¹⁾ | 300 | 110 | 4150 | 11250 |
| | 3,5 | 64 | 200 | 76 | 3120 | 9050 |
| | 4,25 | 39 | 185 | 56 | 2460 | 8100 |
| 80 | 2,5 | 124 ²⁾ | – | – | 3960 | – |
| | 3,5 | 58 | 180 | 74 | 2870 | 8600 |
| | 4,25 | 32 | – | – | 2100 | – |

Примечания:

¹⁾ 120 МПа после 1000 ч.

²⁾ 70 МПа после 1000 ч.

Таблица 4.30. Механические свойства сотопластов ПМСП-1Ф (ячейка 2,5 мм, высота $h = 10$ –15 мм) и сотовых панелей с алюминиевыми оболочками [7]

| T , °С | σ , МПа ($h = 10$ мм) | $\sigma_{\text{отр}}$, МПа ($h = 15$ мм) | $\tau_{\text{сд}}$, МПа ($h = 15$ мм) | E , МПа | $E_{\text{отр}}$, МПа | $G_{\text{сд}}$, МПа |
|----------|-------------------------------|--|---|-----------|------------------------|-----------------------|
| 20 | 186 | 485 | 147 | 4600 | 5000 | 1817 |
| 100 | 172 | 418 | 120 | 3740 | 4704 | – |
| 150 | 150 | 308 | 108 | 3700 | 4400 | – |
| 200 | 100 | – | – | 2960 | – | – |

Таблица 4.31. Свойства многослойных панелей с трубчатыми заполнителями из ПКМ квадратного сечения, изготавливаемыми намоткой [23]

| Свойства | Тип многослойной панели | | | |
|--|--|--|--|--|
| | Оболочка – стеклопластик, заполнитель – 1 слой труб | Оболочка – стеклопластик, заполнитель – 3 слоя труб | Оболочка – углепластик, заполнитель – 1 слой труб | Оболочка – углепластик, заполнитель – 3 слоя труб |
| Толщина панели, мм | 9 | 26 | 9 | 26 |
| Плотность, г/см ³ | 0,33 | 0,25 | 0,31 | 0,25 |
| Масса 1 м ² , кг | 3,1 | 6,5 | 2,96 | 6,5 |
| σ , МПа | 4,4 | 2,6 | 5,5 | 4,2 |
| Жесткость при изгибе, Н м ² /м, | 403 | 2209 | 577 | 3101 |
| | ⊥ 358 | 1451 | 461 | 2259 |
| $E_{\text{вн}}$, ГПа | 6,3 | 1,4 | 9,4 | 2 |
| | ⊥ 5,9 | 0,9 | 7,8 | 1,5 |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа, с боку (<i>beam</i>) | 86,1 | | 79 | |
| | ⊥ 20,3 | | 16,2 | |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа, в плоскости (<i>face</i>) | 202 | | 182 | |
| | ⊥ 47 | | 43 | |
| Жесткость при сдвиге, МН/м | 2,41 | 1,3 | 2,7 | 1,23 |
| | ⊥ 0,054 | 0,56 | 0,07 | 0,62 |
| $G_{\text{сд}}$, ГПа | 0,3 | 0,05 | 0,3 | 0,05 |
| | ⊥ 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| $\tau_{\text{сд}}$, МПа | 2,2 | | 2 | |
| | ⊥ 0,5 | | 0,5 | |
| E^* , ГПа | 3,2 | | 4 | |
| | ⊥ 2 | | 4,3 | |

Примечания: составы ПКМ трубчатых заполнителей в первоисточнике [23] не приводятся. || — испытание в направлении, параллельном оси заполнителя; ⊥ — испытание в перпендикулярном направлении.

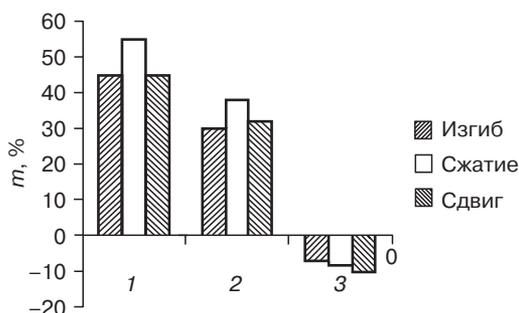


Рис. 4.30. Изменение массы (m , %) трехслойных конструкций (заполнитель-соты из алюминиевой фольги) с оболочками из различных материалов по сравнению с массой конструкции с оболочками из эпоксидного органоволокнита (волокна СВМ, *Kevlar 49*, уровень 0-0) [2]. Типы оболочек сотовых конструкций: 1 — эпоксидный стеклопластик; 2 — алюминий; 3 — эпоксидный углепластик

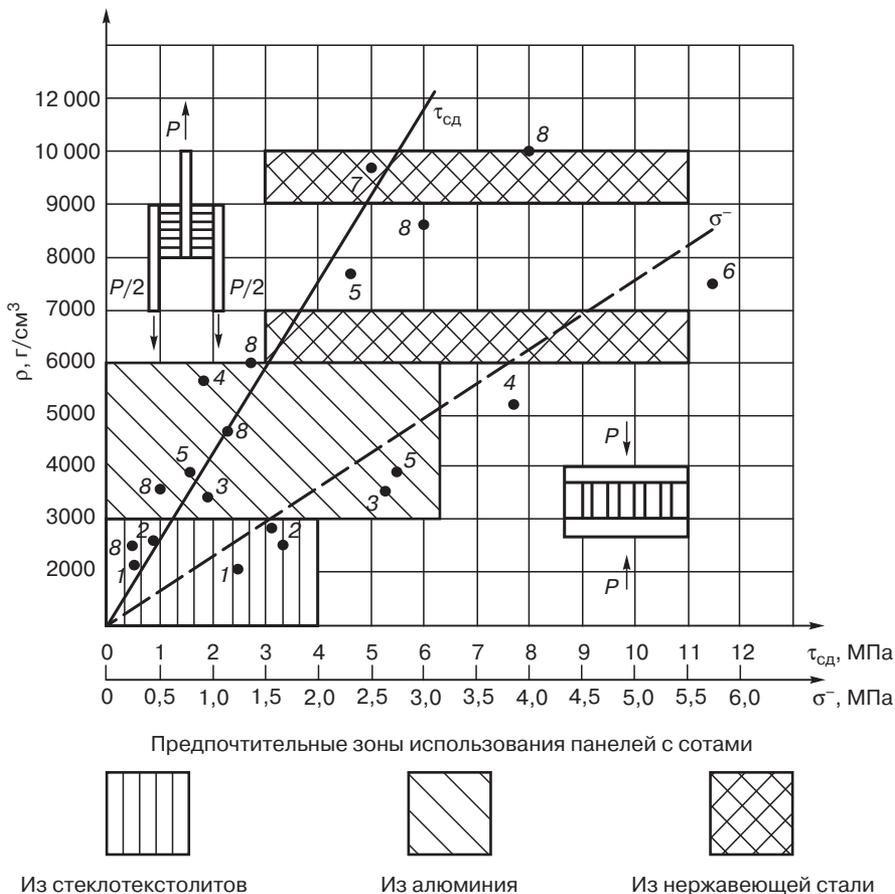


Рис. 4.31. Сравнительные значения прочности при сдвиге ($\tau_{сд}$) и сжатии (σ) трехслойных панелей с различной плотностью (ρ), предпочтительные зоны использования панелей с сотами из стеклотекстолитов, алюминия, нержавеющей стали и оболочками из различных материалов [2]:

| Тип 3-слойной панели | Оболочка в 3-слойных панелях | Сотовые заполнители в 3-слойных панелях |
|----------------------|--|---|
| 1 | Стеклотекстолит | Стеглосотопласты |
| 2 | Стеклотекстолит | Соты из сплава АМg2-Н |
| 3 | Алюминий Д16-ТЛ 0,3 | Соты из сплава А5Т |
| 4 | Алюминий Д16-ТЛ 0,5 | Соты из сплава АМg2-НЛ 0,03 |
| 5 | Алюминий Д16-ТЛ 0,8 | Соты из сплава АМg2-НЛ 0,05 |
| 6 | Сталь СН-2Л 0,6 | Соты из сплава СН-2 Л 0,05 |
| 7 | Сварные панели с гофрами (фирма <i>Stresskin</i>) | |
| 8 | Стеклотекстолит | Полимеросотопласты ПСП, <i>Nomex</i> |

4.6. Применение сотовых материалов в современной технике

Использование сотовых материалов и многослойных конструкций с сотовыми заполнителями позволяет резко повысить упругопрочностные показатели, особенно удельные, силовых конструкций, создать многофункциональные конструкции — радиопрозрачные (РПМ), радиопоглощающие, теплоизоляционные, теплозащитные и другие.

Одним из первых применений, в полной мере использующих специфику сотовых многослойных материалов, было их использование в качестве радиопрозрачных конструкционных материалов.

Радиопрозрачные конструкционные материалы проницаемы для электромагнитных волн радиодиапазона без существенного изменения амплитуды и фазы проходящей через них волны. Радиопрозрачность свойственна материалам с высокими показателями диэлектрических свойств. Поэтому для производства радиопрозрачных конструкций выбираются диэлектрики с низким значением тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta \leq 0,02$) и диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 1,1-9,0$). Соответственно показателям диэлектрических свойств производится электродинамический расчет толщины стенки, обеспечивающей заданные параметры радиопрозрачности.

Особенно сложным сочетанием свойств должны обладать материалы (РПМ), применяемые для изготовления так называемых антенных обтекателей-конструкций, защищающих антенны радиостанций от окружающей среды, механических, температурных и эрозионных воздействий. В зависимости от условий эксплуатации обтекатели производят одно- или многослойными.

Однослойные обтекатели условно делят на тонкостенные (их толщина равна $0,02-0,05$ рабочей длины волны в РПМ), полуволновые (их толщина равна или кратна полуволне) и компенсационные (промежуточной толщины). В стенки компенсационных однослойных обтекателей монтируют металлические решетки, оказывающие проходящей электромагнитной волне реактивное (индуктивное или емкостное) сопротивление. Однослойные обтекатели обеспечивают хорошую радиопрозрачность лишь в сравнительно узкой полосе частот (ширина ее составляет $3-4\%$ от средней рабочей частоты). Их изготавливают из монолитных диэлектриков (плотностью $1,3-2,8 \text{ г/см}^3$): из наполненных реактопластов и термопластов (стекловолокнисты, органопластики, стеклотекстолиты и керамики (ситаллы) в тех случаях, когда обтекатель должен длительно выдерживать температуры выше $300-350 \text{ }^\circ\text{C}$).

Наибольшее применение получили многослойные обтекатели с межслойными заполнителями в виде пенопластов и особенно сотовых.

Многослойные (3-, 5-, 7-слойные) обтекатели из РПМ изготавливаются в виде чередующихся слоев с различным законом изменения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$. Газонаполненные диэлектрические материалы отличаются легкостью ($\rho = 0,02-0,4 \text{ г/см}^3$) и высокими показателями радиопрозрачности ($\epsilon = 1,1-2,5$; $\operatorname{tg} \delta \leq 0,01$).

Для изготовления многослойных радиопрозрачных сотовых конструкций для самолетов со скоростью полета более $2M_{\text{max}}$, используют оболочки из полиимидных стеклопластиков, кварцестластиков и полиимидные стеклосотопласты (табл. 4.32, 4.33).

Многослойные СК используются в конструкциях планеров летательных аппаратов (передние кромки крыла, зализы между крылом и фюзеляжем, стабилизаторы и т. п.), органов управления (элеронов, серворулей, закрылков и т. п.). Соты *Nomex* применяют также для изготовления хвостовых отсеков, лопастей вертолетов, гондол двигателей, внешней и внутренней тепло- и звукоизоляции. В самолете *Boeing 747* около 6500 м^2 сотовых заполнителей, значительная часть которых — полимеросотопласты *Nomex* (в конструкции фюзеляжа — 1390 м^2). Многослойные СК с заполнителями из полимерных сотовых пластов *Nomex* широко используются в конструкциях авиакосмической техники, особенно в широкофюзеляжных самолетах *B727-B787*, Airbus *A310-A380* (в *A-380* — ПСП складчатой структуры, технология Казанского ГТУ им. А.Н. Туполева), ИЛ-86, ИЛ-96.

Таблица 4.32. Многослойные конструкции оболочек антенных обтекателей (оболочки — стеклопластики и органопластики, наполнители — соты из полиарамидной бумаги и стеклосотопласты)

| | |
|--|---|
| 1. Самолет <i>Lockheed C-5A «Galaxy»</i> | Оболочки антенного обтекателя из органопластика фирмы <i>Brunswick</i> с долговечностью в 2,5 раза более высокой, чем у стеклопластика |
| 2. <i>Mirage 2000</i> (Франция) | Обтекатель (фирма <i>DCAN-TOULON</i> , толщина стенки 10–12 мм) на основе цельнотканых чехлов с сотовыми ячейками из стекла <i>D</i> ($\epsilon = 4$) и эпоксидного связующего ($\epsilon = 3,5$) |
| 3. Самолеты системы <i>AWACS: E-3A Centry, Defender, Centinel, TB-88, EC-130ASW, 767-200EP</i> (США); <i>TU-126, A-50</i> (Россия) | Стеклопластики, кварцепластики, кевларопластики в оболочках слоистых конструкций обтекателей антенн в носовой части и над фюзеляжем, диаметром 4–6 м; наполнители — стекло-, кварце- и полимеросотопласты (<i>ПСП, Nomex</i>) |
| 4. КА «Спектр Р» (радиоастрон) | Параболические трехслойные оболочки радиотелескопа |
| 5. ПЛАРБ «Ohio» (США) | Трехслойные оболочки конструкций антенн гидроакустического комплекса <i>ANIBQQ</i> (диаметр 4,6 м), антенна шумопеленгаторной станции <i>H4AN/BQR-15</i> (диаметр 82,5 мм), обтекатель РЛС <i>AN/BPS-15</i> для обнаружения надводных целей; стеклопластики, стеклосотопласты |
| 6. <i>B-1B, Rockwell International</i> | Носовой обтекатель, хвостовые обтекатели. Многослойные конструкции: оболочки из малеинимидных кварцепластиков (связующее <i>F-178</i>), наполнитель — кварцесотопласты <i>HRH 327</i> |

Таблица 4.33. Характеристики ВПКМ, используемых для малонагруженных конструкций радиотехнического назначения [7]

| Материалы, состав | | | Масса 1 см ² , г | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | E^+ , МПа | Диэлектрическая проницаемость, ϵ | tg δ |
|--|-----------|------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|--|---------------------------|
| Тип ВПКМ, толщина монослоя | Связующее | Наполнитель (ткани) | | | | | | |
| СТ-69Н; 0,23 мм | ЭДТ-69Н | T-10-80 T-10-1 T-10-14 | 1,0 | 630 | 450 | 29500 | 4,3 | 0,021 |
| Органит 12ТКС/42 ²⁾ 0,22 мм | ЭДТ-69Н | T-42/1-76 | 1,5 | 830 | 230 | 42000 | $\frac{0,0137^1}{0,0202}$ | $\frac{0,0411^1}{0,0435}$ |
| СТ-ВК-36Р; 0,23 мм | ВК-36Р | T-10-80 | 1,05 | 650 | 520 | 35000 | 4,2 | 0,013 |

Примечания:

¹ После 30 сут при влажности 98% (знаменатель).

² При изготовлении радиопрозрачных конструкций соединение обшивок с ССП-1 бесклеевое (может быть использован препрег T-42/1-76 с ВК-36Р).

Относительная масса конструкций с сотовым наполнителем составляет большую долю массы конструкции планера самолета. Конструкции с наполнителем применяются в качестве силовых элементов в крыле, фюзеляже, оперении (оболочки, лонжероны, шпангоуты, нервюры, стенки), особенно в агрегатах, воспринимающих местную нагрузку (закрылки, элероны, щитки, рули, различные обтекатели) и поперечную распределенную нагрузку (полы грузовой и пассажирской кабины, канала воздухозаборника), а также в качестве несилевых элементов (детали интерьера, элементы крепления оборудования). После террористических актов 11 сентября 2001 г. FAA США приняла решение об укреплении дверей в самолетах *Boeing 737, 757, MD-80* (сотовые структуры с оболочками из кевларопластиков, вариант полимерной брони).

В самолетах ИЛ-76 сотовые конструкции используются в верхних и нижних панелях крыльев, дефлекторов закрылков хвостовых и основных звеньях закрылков, тормозных щитках, спойлерах, сервокомпенсаторах элеронов, триммерах элеронов, сервокомпенсаторах и триммерах рулей направления, триммерах-флетнерах руля высоты, панелях пилонов. В самолетах ИЛ-86 сотовые конструкции используются в нижних и верхних, правых и левых закрылках, в нижних и верхних, правых и левых панелях крыльев, левых и правых элеронах, тормозных щитках, стабилизаторах, рулях высоты, киле, руле направления, капотах двигателей (мотогондолы).

Весьма ответственными и сильно нагруженными агрегатами в авиационной технике являются лопасти несущих винтов вертолетов. Практически единственным способом соединения элементов конструкции лопасти, обеспечивающим необходимый уровень надежности и высокий ресурс, является склеивание. При изготовлении лопастей используются высокоэластичные клеи конструкционного назначения, которые обеспечивают стойкость клеевого соединения к воздействию больших статических нагрузок от центробежной силы и весьма сложного спектра переменных нагрузок от аэродинамических и инерционных сил.

Основной силовой элемент лопасти — лонжерон, представляющий собой полый профиль Д-образного сечения. Для защиты от коррозии металлический лонжерон покрывается клеем. К лонжерону с помощью клея крепятся хвостовые отсеки, состоящие из оболочек, нервюр и сотового наполнителя, склеенных между собой соответствующими клеями.

Сотовые клееные конструкции являются наиболее тонкостенными агрегатами, выходящими на наружный контур самолета. С сотовым наполнителем выполняются ответственные элементы механизации крыла и оперения (закрылки, элероны, клинья рулей, тормозные щитки, спойлеры и т. д.). Они более других чувствительны к сосредоточенным нагрузкам, часто повреждаются как от попаданий посторонних предметов (птиц, камней и др.), так и от небрежности обслуживающего персонала.

Примеры применения сотовых материалов в авиаконструкциях приведены в табл. 4.34–4.36, на рис. 4.32–4.38.

Важнейшим применением сотовых пластов ПСП, *Nomex* является их использование в панелях интерьера и полов пассажирских самолетов. Важнейшим требованием, предъявляемым к материалам интерьера, является их высокая огнестойкость (низкая горючесть, категория не ниже самозатухающих, $KI \geq 28$; малое дымовыделение, малая токсичность продуктов горения).

Сотовые пластины из бумаги *Nomex*, Фенилон при низкой кажущейся плотности ($22–60 \text{ кг/м}^3$) имеют высокие удельную прочность, жесткость, показатели упругих и демпфирующих свойств. По сравнению со стеклосотовым конструкцией из органосотопласта имеют на 30–50% более высокие показатели удельной прочности при сжатии, отрыве и изгибе. При одинаковой кажущейся плотности $0,04 \text{ г/см}^3$ и размере ячеек прочность при сжатии органосотопласта на 35–45% больше прочности сотовых материалов из алюминиевой фольги при температурах до 150°C .

Для внутренней отделки самолетов используют трехслойные панели, между оболочками которых, изготовленных из стекло-, угле-, органопластов, гибридных пластиков на основе эпоксидных или фенольных связующих, модифицированных антипиренирующими добавками (хлорэндиковый ангидрид, хлорированный и бромированный дифенилолпропан,

фосполиолы) приклеены соты из бумаги на основе ароматического полиамида Фенилон, *Nomex* (табл. 4.37–4.40).

Декоративный слой получают мокрой печатью на поливинилфторидной пленке толщиной 0,005 см с последующей защитой его полиметилметакрилатной пленкой толщиной 0,0025 см.

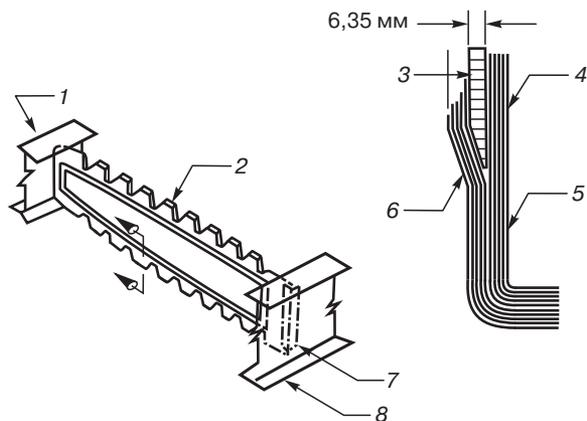


Рис. 4.32. Нервюра кессона горизонтального стабилизатора самолета *Boeing 737* из эпоксидного углепластика Т 300/5208 [19, 20]:

1 — передний лонжерон; 2 — нервюра; 3 — соты *Nomex*, 48 кг/м^3 ; 4 — 2 слоя ткани и 4 слоя углеродной ленты; 5 — поверхность контакта с оснасткой; 6 — 6 слоев ткани; 7 — уголок крепления; 8 — задний лонжерон

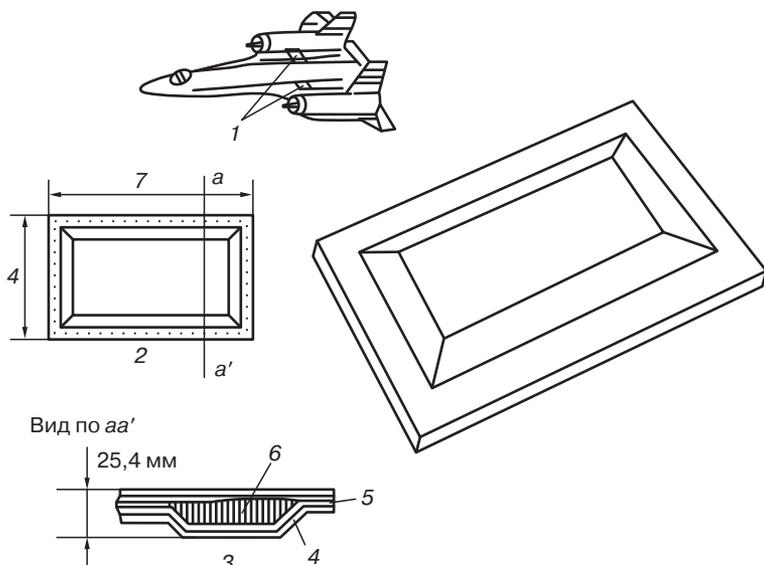


Рис. 4.33. Трехслойная панель крыла (2) самолета *YF-12* (1) [19, 20]:

1 — расположение панелей 2 на *YF-12*; 2 — панель; 3 — сечение панели 2 по *aa'*; 4 — имидоуглепластик (*PMR-15/T300*); 5 — полиимидный клей *LARC-13*; 6 — имидостеклосотопласт типа *HRH 327*

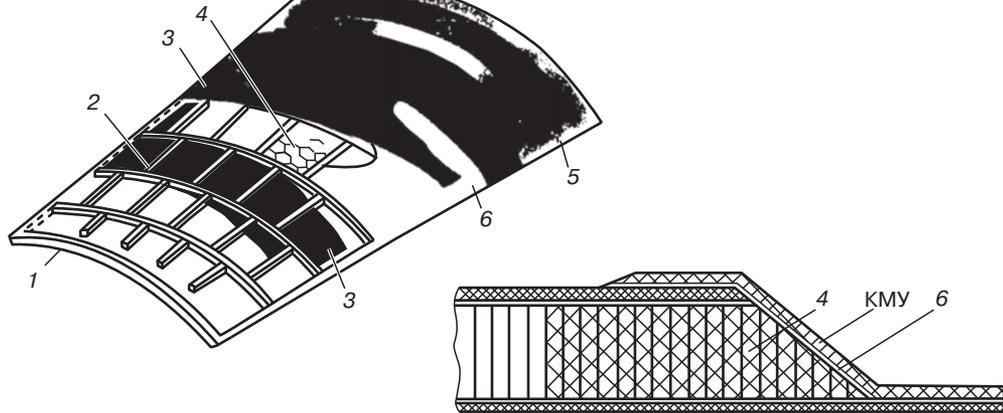


Рис. 4.34. Трехслойная панель створки грузового отсека [1]: 1 — силовой каркас; 2 — внутренний каркас; 3 — несущий слой (КМУ); 4 — сотовый наполнитель (АМГ, ПСП); 5 — герметик; 6 — пленочный клей

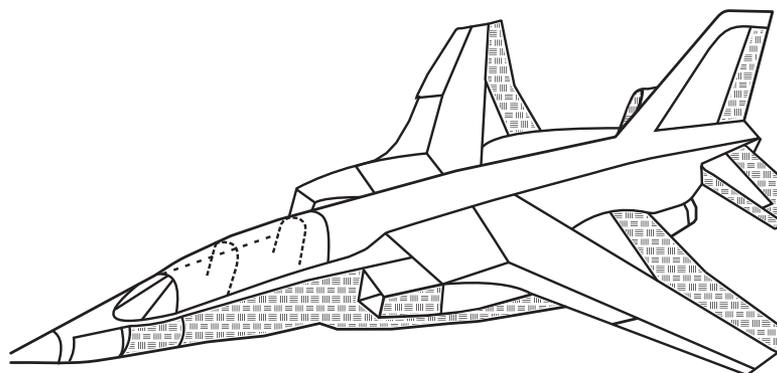


Рис. 4.35. Сотовые конструкции в самолете F-111 (80% клееных конструкций) [21, 23]

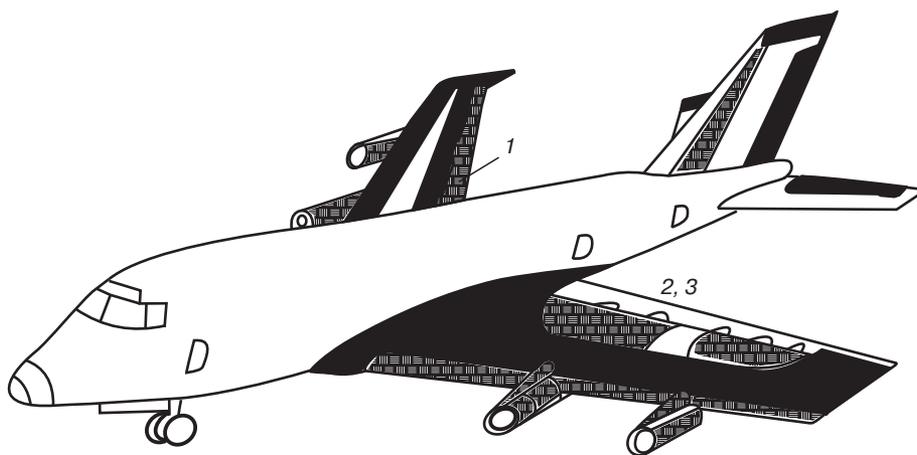


Рис. 4.36. Сотовые конструкции в самолете Boeing 747 [23, 26]:
 1 — Al-соты CR-111 из сплавов 5052, 5056, 2024 с плотностью 32–192 кг/м³ и 128–880 кг/м³, рифленые, на основе сплава 5052-М-39 с коррозионностойкой поверхностной обработкой; 2 — стеклосотопласты HRP (эпоксидные), HFT (фенольные); размер ячеек 3 (из тонких тканей), 5, 6, 10 мм (32–192 кг/м³); 3 — органосотопласты HRH-10 (Nomex + фенольное связующее); размер ячеек 3; 5; 5, 6; 10 мм (24–144 кг/м³, для половых панелей — более 64 кг/м³)

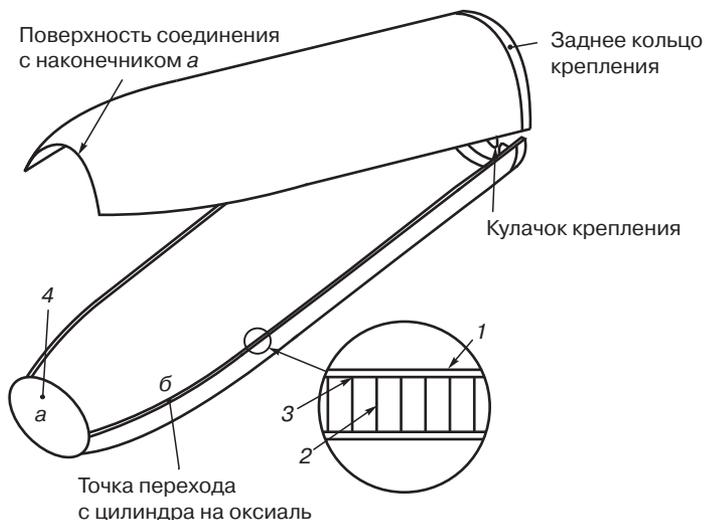


Рис. 4.37. Трехслойная конструкция обтекателя полезной нагрузки ракетного ускорителя *Pegasus* (США) [21]:

1 — оболочка из эпоксидного углеволокна *IM6/3501 (MY720)*; препрег из 6 слоев толщиной 0,14 мм, $[\pm 60,0]_{2S}$; 2 — Al-соты, 1/4-5056-2,3; 3 — пленочный клей *NB 102/104*; 4 — оболочка из эпоксидного углетекстолита А 193 Р/3501-6; препрег, толщина 0,19 мм, 3 слоя $[\pm 45]t$, 2 слоя $[0,90]t$

Слой материала со структурой армирования 0/90

Боковой профиль

Сотовая структура типа 1/450520, 0015р

Сотовая структура типа 3/85052 0,0007р

Слой углепластика на основе волокон *Thornel 75S* и эпоксидной смолы *CY208/HT972*, толщина 0,16 мм
Металлизирующая пленка *Kapton*, толщина 8,6 мкм
Слой подгезива *BSL 312 UL*, толщина 0,1 мм

Рис. 4.38. Трехслойные панели для решетки солнечной батареи спутника «*Intelsat-5*» [5]

Таблица 4.34. Применение конструкционных сотовых материалов в современной технике

| | |
|--|---|
| 1. <i>Boeing 747</i> (рис. 4.36) | Подфюзеляжный аэродинамический обтекатель, оболочки — эпоксидные стеклопластики, наполнитель — соты <i>Nomex</i> . 105 трехслойных панелей |
| 2. <i>Lockheed C-5A «Galaxy»</i> | Обтекатель антенны диаметром ~ 5 м (стеклопластиковые оболочки, стеклосотопласты); передняя и задняя кромки оперения, канал кондиционера воздуха, зализы между крыльями и фюзеляжем, створки люка основного шасси (оболочки — алюминий, стеклопластики, наполнители — стеклосотопласты, соты из алюминия). В зоне сопловых блоков ГТД — титановые панели, наполнитель — стеклосотопласты |
| 3. Аэробусы <i>A-310-100</i> ; <i>A-310-200</i> | Обтекатель стойки главного шасси, шарнирная створка шасси, руль высоты (оболочки — эпоксидные угле- и кварцелластики; соты <i>Nomex</i> , Δm 30%). Трехслойные конструкции с обшивками из органопластиков и сотами <i>Nomex</i> . Снижение массы обтекателей воздухозаборников системы кондиционирования на 14 кг (по сравнению с алюминием), на 7 кг (по сравнению со стеклопластиком) |
| 4. Самолет <i>Jetstream 31</i> | Трехслойные панели пола, перегородки, пассажирские трапы. Стеклопласты <i>Fibrelam</i> (фирма <i>Ciba-Geigy</i>) с высокой $\sigma_{\text{вт}}$; соты <i>Nomex</i> . Снижение массы с 6,8 до 4 кг, количества деталей с 23 до 3 |
| 5. Турбореактивный самолет местных линий <i>Azoteh 400</i> (Франция) | Первое применение органопластиков в силовых трехслойных конструкциях, планер на 60% из ВПКМ: оболочки органоластик <i>Kevlar DOW 383</i> , соты <i>Nomex</i> высотой 3–9 мм. Фюзеляж, носовой и хвостовой обтекатели, крыло включают по 6 трехслойных панелей. E^+/ρ в 9 раз превышает E^+/ρ монолитных стальных панелей |
| 6. Самолет <i>Boeing 757</i> | 757 кг элементов конструкций из ВПКМ, обтекатель стыка крыла с фюзеляжем: оболочки — органоластик, соты <i>Nomex</i> ; 12 интерцепторов: оболочки — эпоксидный углепластик, соты <i>Nomex</i> (длина 1,8 м, ширина 686 мм, масса 9,5 кг), фирма <i>Grumman Aerospace Co</i>) |
| 7. Самолет <i>Boeing 767</i> | Детали интерьера: панели потолка, перегородки, двери, туалеты, контейнеры (органопластики, соты <i>Nomex</i>), антенные обтекатели (органопластики, соты <i>Nomex</i>), руль направления (длина 900 мм), органоуглепластики, соты <i>Nomex</i> |
| 8. <i>T-38</i> | Законцовки крыльев, отсек фюзеляжа (длина 6 м), кевлароластик, соты алюминиевые и <i>Nomex</i> |
| 9. <i>F-111</i> (рис. 4.35), <i>USAF</i> (<i>General Dynamics</i>) | Хвостовой отсек фюзеляжа, боковые и нижние панели, лонжероны — трехслойные конструкции с оболочками из углепластика |
| 10. <i>Beech Starship 2000</i> | 70% ВПКМ в конструкции, трехслойные панели с оболочками из эпоксидных углепластиков |

Окончание табл. 4.34.

| | |
|--|---|
| 11. ТУ-204 | Интерцепторы, трехслойные оболочки, панели — из препрегов из саржи 5384 СВМ и лент ЭЛУР-П-0,1; связующее УП-2227; стеклопласты ССП-1П; связующее ФП-520; пленочный клей ВК-51 |
| 12. СУ-27 | Оболочки из клевого препрега ПКУ-1,80-70,08 (углепластик, ЭЛУР-0,08, клей ВК 36-46; соты ПСП — 1×2, 5×60, заливочная паста ВП 3-5), для крепления сот — вспенивающийся клей ВК-В3 |
| 13. <i>Intelsat-5</i> (рис. 4.38) | Трехслойная конструкция (обшивки — углепластик, 0,16 мм; тетразаполнитель) для крепления антенны |
| 14. Пищевые блоки коммерческих самолетов | Трехслойные панели с сотами из алюминия и <i>Nomex</i> |
| 15. СУ-27; СУ-37; ЯК-80 | Сотовые панели крыла, панели фюзеляжа, лонжероны |
| 16. Самолет <i>DC-9, Super 80</i> | Хвостовой корпус фюзеляжа, обшивки — кевлароуглепластики, алюминиевые соты. Зализы крыло-фюзеляж: кевлароэпоксидные обшивки, соты <i>Nomex</i> (снижение массы на 30% по сравнению с обшивками из стеклопластика) |
| 17. Самолет <i>Boeing 727</i> | Обшивка руля высоты: углепластик, соты <i>Nomex</i> ($\Delta m = 20\%$ по сравнению с алюминиевыми) |
| 18. Самолет <i>Boeing 747</i> (рис. 4.36); <i>Boeing 767</i> | Углепластиковый кессон стабилизатора с нервюрами трехслойной сотовой конструкции. Панели пассажирского салона, толщина 10,2 мм, углепластиковые оболочки, соты <i>Nomex</i> , ячейка 3,2 мм, плотность 0,08 г/см ³ . Панели грузовых отсеков (толщина 17,3 мм) кевларостеклопластиковые обшивки, соты <i>Nomex</i> , 0,12 г/см ³ |
| 19. <i>L-1011</i> | Внутренний элерон, кевлароэпоксидные обшивки, соты алюминиевые и <i>Nomex</i> |
| 20. Интерьер КС | Многослойные панели интерьера: 1) оболочка — ворсовое покрытие ПФАО-2 (мононить фторин Ф-2М, диаметр 0,09 мм, 31,3%; комплексная нить Аримид С 11 текс, 29,4%; капроновая прошивная мононить, 3,3 текс; 39,3%; пропитка 18% раствором соли, антипирен А-18; пропитка 6 %-ной эмульсией латекса СОФ-32), КИ 28% 2) оболочка — органопластик ПФП-Т, слой тканей из фторина Ф-2М, 12,8 текс; терлона, 29,4 текс; и фторина Ф-2М, 12,8 текс; КИ ≥ 40 . 3) соты из АМГ-2Н. 4) клей ВК-51 (температура склеивания 25 °С) |
| 21. Вертолет <i>S-76</i> | Горизонтальный стабилизатор (обшивки — органопластик, полки лонжерона — углепластик, соты <i>Nomex</i>) |
| 22. СУ-26М, ИЛ-86, ИЛ-96 | Силовые трехслойные оболочки с заполнителями — сотами ПСП |

Таблица 4.35. Площадь клееных конструкций в самолетах *Boeing* [20, 21]

| Тип самолета <i>Boeing</i> | Площадь клееных конструкций, м ² | | | Срок службы самолета, часы полетные |
|-------------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|---|
| | Сотовые кон- струкции | Соединения металл– металл | Стеклопластиковые конструкции | |
| 707 | 23 | 92 | 23 | 49 100 |
| 727 | 139 | 325 | 65 | 28 400 |
| 737 | 92 | 278 | 185 | 14 000 |
| 747 ²⁾ | 334 ¹⁾ | 924 | 1115 | 11 000 |

Примечания:

¹ Соты *Nomex HRP*.

² Замена клепаных металлических сот на *Boeing 747* сотами *Nomex (HRH)* снизила массу самолета на 1,5–2 т и увеличила ресурс работы конструкций с 3000 до 10 000 ч.

Таблица 4.36. Площадь сотовых конструкций в самолетах [20, 21]

| Тип самолета | Площадь клееных конструкций, м ² | |
|------------------|---|--------------------------------|
| | С алюминиевыми сотами | Со стеклотекстолитовыми сотами |
| <i>KC-135</i> | 83 | 5 |
| <i>B 707-320</i> | 200 | 24 |
| <i>B 727</i> | 250 | 70 |
| <i>B 747</i> | 3000 | 200 ⁴⁾ |
| <i>DC-10</i> | | 850 ¹⁾ |
| <i>C-5A</i> | | 2300 ^{1,2)} |
| <i>L-1011</i> | | 2800 ¹⁾ |
| ИЛ-62 | 16 | 14 |
| ТУ-154 | 110 | 15 |
| ИЛ-76 | 320 | 60 |
| ИЛ-86 | | 1200 ³⁾ |

Примечания:

¹ Общая площадь сотовых конструкций.

² Общая площадь клееных конструкций > 4500 м².

³ Соты ПСП-1 (использование сот ПСП в сотовых панелях интерьера позволяет снизить массу ИЛ-86 на 1000 кг, ЯК-42 на 120 кг, ТУ-154 на 200 кг).

⁴ 334 м² сот *Nomex HRP*.

Таблица 4.37. Характеристики ВПКМ, используемых для изготовления оболочек панелей интерьера ЛА [7]

| Тип ВПКМ | ρ , г/см ³ | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | $\sigma_{\text{вн}}$, МПа | E^+ , МПа |
|-------------------------|----------------------------|------------------|------------------|----------------------------|-------------|
| СТ-520 | 1,4 | 350 | 200 | 430 | 14 000 |
| Органит 15Т | 1,15 | 530 | 140 | 300 | 26 000 |
| Органит 15ТМ | — | 400 | 110 | 200 | 21 000 |
| Органит 15ТМО | — | 30 | 20 | 40 | 3200 |
| КТСМ-1 (с микросферами) | 1,6 | 410 | 410 | 540 | 16 000 |

Таблица 4.38. Типы сотовых декоративных панелей интерьера (Россия) [7]

| Тип панели | Сотопласт ПСП-1 | | Оболочка (стеклотекстолит ЭПС-1МП) | | | | Декоративные пленки | | Высота панели, мм |
|----------------------------------|-----------------|------------------------------|---|------------------|---|------------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| | Ячейка, мм | Плотность, кг/м ³ | Внешняя | | Внутренняя | | Марка | Материал крепления | |
| | | | Стеклоткань | Количество слоев | Стеклоткань | Количество слоев | | | |
| Панель потолка ²⁾ | 3,5 | 35±5 | ТС-8/3-П-78 или Т-38-П-78 | 1 | ТС-8/3-П-78 или Т-38-П-78 ¹⁾ | 1 | ПДОАЗ-20 ⁴⁾ | Клей ВК-11 | 5–7 |
| Акустическая панель | 3,5 | 35±5 | ТС-8/3-П-78 или Т-38-П-78+ПДОА-20+ГС-1П | 1 | То же | 1 | ПДОА-20 | Связующее препрега ГС-1П | 5–7 |
| Боковая панель | 3,5 | 35±5 | ТС-8/3-П-78 или Т-38-П-78 | 2 | “ | 1 | ПДОАЗ-20 | Клей ВК-11 | 5–7 |
| Панель перегородок ³⁾ | 2,5 | 45±5 | То же | 2 | “ | 2 | ПДОАЗ-20 | То же | 10–25 |

¹⁾ В некоторых случаях возможно использование стеклоткани Т-24-П-78.

²⁾ Для изготовления панелей потолка и стен салона используют ПСП-1-3,5-35 и ПСП-1-4,2-25 высотой 5 и 7 мм, в качестве оболочек стеклотекстолиты (сатин ТС-8/3-П-78, 205 г/1 м²; полотно Т-24-П-78, 80 г/1 м², четырехремизный сатин шириной 1550 мм Т-38-П-78, 200 г/1 м², эпоксиизоцианатное связующее ЭП-1М); за счет капиллярных волокон снижение массы на 20–30%.

³⁾ Для панелей перегородок используют ПСП-1-2,5-45, ПСП-1-3,5-35 высотой 15–25 мм (оболочки из стеклотекстолитов: ТС-8/3-П-78; Т-38-П-78 и ЭП-1М).

⁴⁾ ПДОАЗ — ПВХ-пленки, ВК-11-полиуретановый клей, модифицированный перхлорвинилом (полиэфир 24К-20ч, продукт М102Т-5ч, ПСХ-ЛС, 15 %-ный раствор в ацетоне — 30 ч).

Таблица 4.39. Типы и свойства сотовых декоративных панелей интерьера (Россия) [7]

| Тип панели | Тип со- топласта | Высота со- то- пласта, мм | Оболочка (стеклотекстолит ЭП-1МП) | | | | Масса 1 м ² пане- ли, кг | $\sigma_{отр}$, МПа | Характер разру- шения при отрыве |
|----------------------|---------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|-------------|---------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|
| | | | Внешняя | | Внутренняя | | | | |
| | | | Стеклоткань | Количе- ство слоев | Стеклоткань | Количество слоев | | | |
| Панели под- толка | ПСП-1- 3,5-35 | 7 | ТС-8/3-П-78 | 1 | ТС-8/3-П-78 | 1 | 1,02 | 1,8 | По сотам |
| | | | Т-38-П-78 | 1 | Т-38-П-78 | 1 | 1,00 | 1,9 | То же |
| | | | ТС-8/3-П-78 | 1 | Т-24-П-78 | 1 | 0,85 | 1,0 | Отрыв внутренней обшивки |
| | | | Дублирован- ный слой ¹⁾ + +ГС-1П | 1 | ТС-38-П-78 | 1 | 1,6 | 2,12 | По сотам |
| | | | То же | 1 | Т-24-П-78 | 1 | 1,47 | 1,05 | Отрыв внутренней обшивки |
| Боковые | ПСП-1- 3,5-35 | 7 | ТС-8/3-П-78 | 2 | ТС-8/3-П-78 | 1 | 1,5 | 2,03 | По сотам |
| | | | ТС-38-П-78 | 2 | Т-38-П-78 | 1 | 1,5 | 2,1 | То же |
| | | | Т-38-П-78 | 2 | Т-24-П-78 | 1 | 1,22 | 1,08 | Отрыв внутренней обшивки |
| Перегород- ки | ПСП-1- 2,5-45 | 10 | ТС-8/3-П-78 | 2 | ТС-8/3-П-78 | 2 | 2,1 | 2,33 | По сотам |
| | | | | 2 | | 2 | 2,2 | 2,37 | То же |
| | | | | 2 | | 2 | 2,4 | 2,34 | “ |
| | | | | 2 | | 2 | 2,6 | 2,37 | “ |
| | | | Т-38-П-78 | 2 | Т-38-П-78 | 2 | 2,55 | 2,20 | “ |

¹⁾ ТС-8/3-П-78+ПДОА-20 или Т-38-П-78+ПДОА-20.

Таблица 4.40. Характеристики ВПКМ, используемых для изготовления оболочек панелей пола [7]

| № | Материал ¹ , состав | | | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | E^+ , МПа | $\sigma_{отрыва}^2$ (панели от сотоблока), МПа | Масса 1 см ² , г |
|---|--------------------------------|--------------|---------------------|------------------|------------------|-------------|--|-----------------------------|
| | Тип, толщина монослоя | Стеклоткань | Пленочное связующее | | | | | |
| 1 | 0,25 мм | T-26(ВМД)-78 | ВК-46 | 350 | 750 | 45000 | 250 | 1,0 |
| 2 | 0,2 мм | T-60(ВМП)-78 | ВК-46 | 350 | 800 | 55000 | 250 | 1,0 |
| 3 | 0,23 мм | T-10-80 | ВК-46 | 500 | 360 | 40000 | 240 | 1,0 |

Примечания:

¹Используется также СТ 520.

² Разрушение по сотам ПСП-1-2,5-45 (данные для образцов, полученных вакуумным формованием). Формование и склеивание обшивок с сотами совмещены.

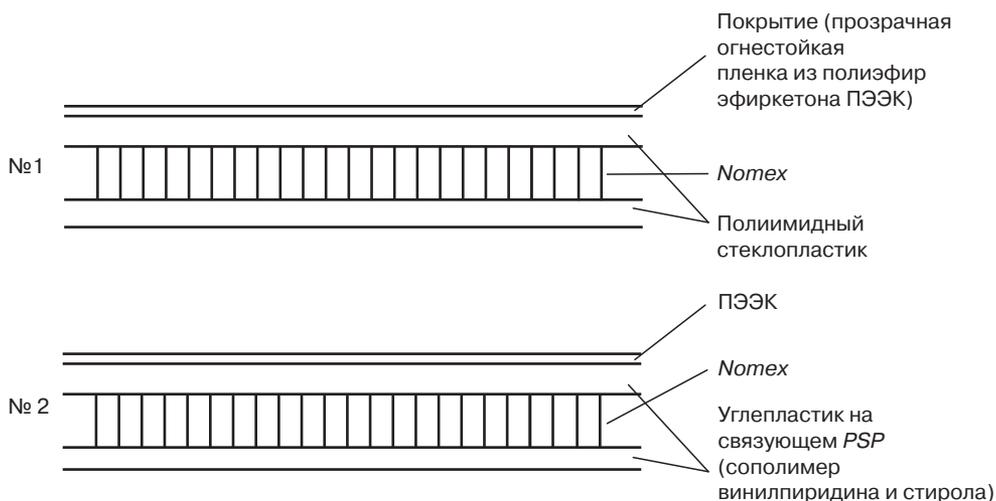


Рис. 4.39. Трехслойные конструкции с сотовым наполнителем Nomex для интерьера ЛА (разработка NASA) [21, 22]. Панели № 1 не воспламеняются в течение 6 мин (используемые панели в современных самолетах воспламеняются через 2 мин). Панели № 2 в интерьере широкофюзеляжного самолета дают экономию массы на 272 кг

Требования к огнестойкости интерьерных материалов постоянно ужесточаются с введением стандартов *ISO* и требованиями *FAR, FAA*, что стимулирует разработку удовлетворяющих современным требованиям интерьерных материалов (рис. 4.39, 4.40).

Шумопоглощающие декоративные панели интерьера (рис. 4.41) в сочетании со слоями материала АТМ-1 обеспечивают в салоне пассажирского самолета равномерное поглощение звука во всем речевом диапазоне частот, так как поглощение звука более высоких частот приводит к искажению звучания согласных, а низких к искажению гласных звуков.

Шумы по всей длине салона широкофюзеляжного самолета имеют различные диапазоны частот, поэтому акустические облицовочные панели, установленные в том или другом месте салона, имеют различную конструкцию. Коэффициент звукопоглощения α_{cp} — типовых сотовых трехслойных панелей в области низких звуковых частот (100–800 Гц) равен 0,4.

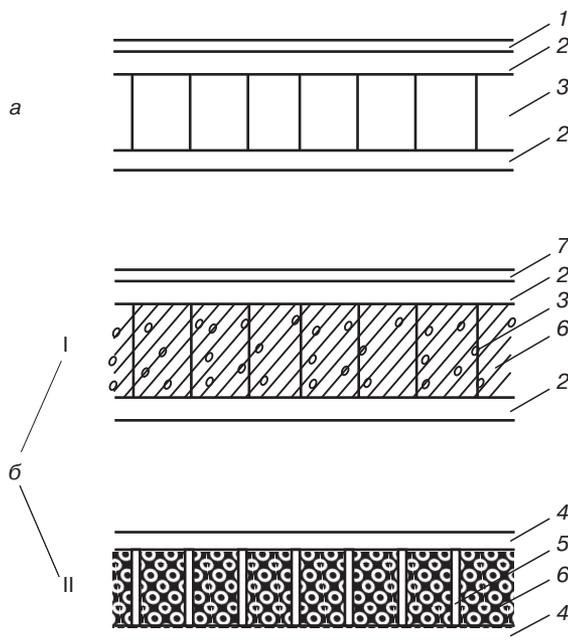


Рис. 4.40. Трехслойные панели, используемые в интерьере летательных аппаратов (а — промышленные; б, I, II — экспериментальные) [16]:

1 — декоративный слой из поливинилфторидной пленки с защитным слоем из ПММА (пленка, краска); 2 — оболочка трехслойных панелей из стекло- (различный состав стекла), угле-, органи- или гибридных пластиков на основе эпоксидных, фенольных (с различными антипиренами), полиимидных связующих; 3 — органосотопласты на основе бумаги из ароматического полиамида и огнестойких эпоксидных и фенольных связующих; 4 — полиимидные стекло- или углетекстолиты на основе полибисмалеинида или сополимера винилпиридина и стирола; 5 — стеклосотопласты на основе полибисмалеинида; 6 — полихиноксалиновый пенопласт или углеродные микросферы из карбонизованного полихиноксалина; 7 — декоративный слой из поликарбоната на основе фенолфталеина, прозрачная огнестойкая пленка из полиэфирэфиркетона

Одно из первых применений радиопоглощающих сотовых конструкций было реализовано в беззювых камерах (см. главу 2).

Беззювые камеры служат для измерений отражающих и поглощающих ЭМЭ параметров. В зависимости от типа радиопоглощающих материалов используют различные конструкции беззювых камер, в том числе с поперечными и продольными гофрами. Уровень отраженной мощности составляет 0,1% (–40 дБ) и ниже благодаря дифракции на ребрах гофр.

Эффективность составов и структур материалов для беззювых камер (ячеистые, полые пирамидальные, конусовидные, сотовые и другие) стимулировала разработки поглощающих материалов для уменьшения радиолокационной заметности (технология *Stealth*). Поглотители сотового («шахтного») типа работают на частотах до 100 МГц, при частотах выше 2–3 ГГц используют соты с мелкими ячейками.

В широкополосных поглотителях радиоволн сантиметрового диапазона используют диэлектрические сотовые наполнители с покрытиями из материалов с высокими значениями магнитодиэлектрических потерь со скошенными ячейками.

Углесотопласты используют токопроводящие углеродные наполнители-полупроводники, для которых полное волновое сопротивление [29]:

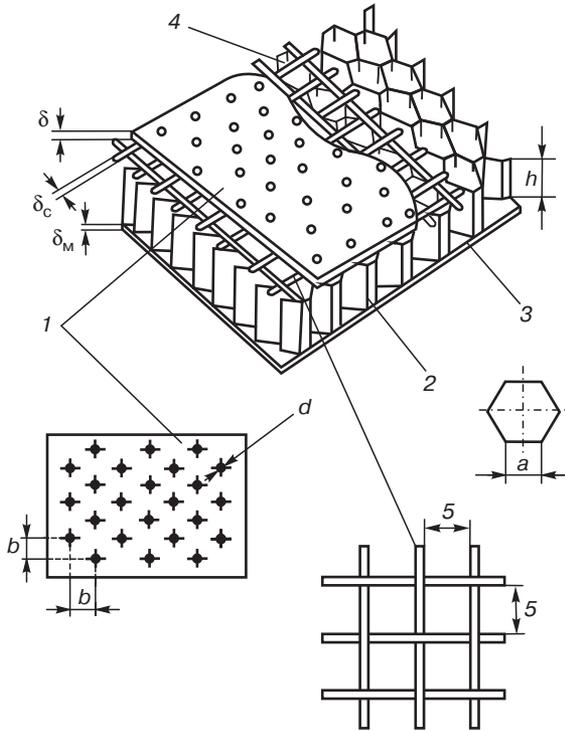


Рис. 4.41. Конструкция акустической облицовочной панели [7]:

1 — перфорированная оболочка; 2 — полимеросотопласт; 3 — внутренняя оболочка; 4 — стеклосетка

$$z_2 = \sqrt{\frac{(\mu')^2}{(\epsilon')^2 + \frac{\gamma}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2}}},$$

где μ' , и ϵ' — магнитная и диэлектрическая проницаемость, $\gamma = \epsilon'' \cdot \omega = 1/\rho_v$, γ — проводимость материала, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; ω — угловая частота, Гц; f — частота ЭМЭ, Гц; ρ_v — удельное объемное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{см}$.

Для отсутствия отражения z_2 должно удовлетворять условию: $z_2 = z_1$, где $z_1 = 377 \text{ Ом}$ (полное волновое сопротивление воздуха), что обеспечивается значениями μ , ϵ , γ радиопоглощающего материала.

Угленепластиковые конструкции ЛА, будучи электропроводными, позволяют оптимизировать z_2 за счет показателей μ , $\text{tg } \rho_\mu$, γ , ρ_v .

Одно из первых применений радиопоглощающих сотопластов — конструкция обтекателя воздухозаборника ГТД самолета F-111 трехслойной конструкции (оболочки — полиимидный кварцелластик, наполнитель — полиимидный стеклосотопласт, связующее с радиопоглощающими компонентами).

Радиопоглощающие сотовые конструкции (поглощение до -10 дБ в диапазоне $2-18 \text{ ГГц}$, трехслойная, оболочки толщиной $12-25 \text{ мм}$, цилиндрические ячейки $6,35 \text{ мм}$) использованы в самолете A-12.

Градиентная многослойная сотовая радиопоглощающая конструкция (стеклопластики и стеклосотопластики с использованием связующих с углеродными наполнителями, ячейки 6,3 мм, высотой 5,8 мм) разработана для оболочек воздухозаборников ГТД.

Передняя и задняя кромки крыла самолета «*Stealth*» B-2 используют многослойные радиопоглощающие сотовые конструкции. Каждая ячейка (оболочки из эпоксидных и полиимидных углепластиков) — шестиугольная в сечении трубка, длиной 80–100 мм, внутренний объем которой заполнен радиопоглощающей композицией, плотность которой повышается в направлении от переднего среза трубки к заднему (рис. 2.151). Сотовые (шахтные) РПК поглощают СВЧ при любых углах падения излучения. Набор стенок ячеек сот образуют волноводные системы. Отражения сигнала РЛС от передней кромки крыла практически не происходит ($\sigma_{\text{ц}} B-2$ 0,01–0,0464 м²) [20, 21].

Силовые оболочки B-2 из полиимидных и эпоксидных углепластиков — многослойные, с наполнителями из сотопластов, в ячейки которых введены широкодиапазонные РПМ и РПП, обеспечивающие поглощение ЭМЭ до 12–20 дБ (99%) в диапазоне 2–18 ГГц.

Сотовые конструкции применяются в отделке интерьеров морских судов, катеров, яхт, для производства деталей автомобилей, при создании различных предметов быта (корпуса телевизоров, лыжи и т. д.), в строительстве в качестве конструкционных отделочных материалов (двери, перегородки).

Декоративно-отделочные панели выполнены с применением сотовых наполнителей на основе технических бумаг, ламинированных полиэтиленом и полиамидом. Панели исключают необходимость выполнения таких строительных операций, как штукатурка, зачистка и шпаклевка стен.

В зависимости от областей применения декоративно-отделочные панели могут иметь различные декоративные покрытия. Для отделки интерьеров общественных зданий (офисы, кабинеты и т. п.) используют панели, имеющие покрытие, выполненное из искусственного или натурального шпона, пластика. Для отделки интерьеров жилых зданий в качестве декоративного покрытия могут применяться обои, ткань, декоративные пленки. В зависимости от комфортности и категории помещения, используемые для отделки панелей ткани, могут иметь различную природу (из хлопчатобумажных, искусственных или синтетических волокон).

Наряду с декоративно-отделочными получены конструкционные панели, содержащие в своем составе бумажный сотовый наполнитель на полиамидном связующем и оболочки, выполненные из композиционных материалов (стекло- или органопластиков). Панели для температур от –60 до 80 °С могут быть использованы для производства машиностроительных конструкций, контейнеров для авиа- и автомобильных перевозок и др. (табл. 4.41).

Литература

1. Буланов Н.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из КМ. Учебник для вузов. — МГТУ, 1998. — 516 с.
2. Щербаков В.Т., Разумовский В.А. и др. Техника, экономика, информация. Сер. Конструкции из композиционных материалов, 1986. — Вып. 2. — С. 67–74.
3. Берсудский В.Е., Крысин В.П., Лесных С.И. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. — М.: Машиностроение, 1975. — 296 с.
4. Шишкин В.А., Сергеев С.К. Пластмассы, 1979. — № 1. — С. 23–25.
5. Справочник по КМ: В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. Дж. Любина; пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1988. — Гл. 21, Маршалл А., Сандвичевые конструкции. — С. 331–379.
6. Промышленные ПКМ., пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. — М.: Химия, 1980. — С. 194–200.
7. Сотовые декоративные панели интерьеров современных самолетов. Авиационные материалы. ОНТИ ВИАМ. — 1977. — № 5. — 90 с.

Таблица 4.41. Состав и свойства многослойных панелей с сотовым наполнителем на основе ламинированных бумаг [11]

| Состав панели | | | | | | | | |
|---|-------------|---|------------|-------------------|---|------------------|-----------------------------|---|
| Оболочки | | Соты | | | Покрытие | σ^- , МПа | Масса 1 м ² , кг | Применение |
| Материал, полуфабрикат | Толщина, мм | Материал | Высота, мм | Размер ячейки, мм | | | | |
| Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 0,45 | Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 15 | 10 | Искусственный шпон | 1,0 | 2,0 | Отделка интерьеров общественных зданий и производство мебели |
| | | | 10 | 8 | | 1,3 | 1,8 | |
| Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 0,45 | Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 10 | 10 | Натуральный деревянный шпон | 1,0 | 2,5–3,0 | Отделка интерьеров общественных зданий (офисов, кабинетов), производство мебели, отделка салонов транспортных средств |
| Техническая бумага, ламинированная полиэтиленом | 0,5 | Техническая бумага, ламинированная полиэтиленом | 10 | 10 | Обои и пленка | 0,7 | 1,6 | Отделка интерьеров жилых домов |
| Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 0,45 | Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 15 | 10 | Нетканое термоскрепленное полотно с печатным рисунком | 1,0 | 2,2 | Отделка интерьеров жилых и общественных зданий |
| | | | 10 | 8 | | 1,3 | 1,9 | |
| Техническая бумага, ламинированная полиэтиленом | 0,5 | Техническая бумага, ламинированная полиэтиленом | 10 | 10 | Ткань из органических волокон (фенилон и т. п.) с повышенной огнестойкостью | 0,7 | 2,1 | Отделка интерьеров жилых и общественных зданий |
| Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 0,45 | Материал на картонной основе, ламинированный полиэтиленом | 15 | 10 | Ткань махровая из хлопчатобумажных волокон | 1,0 | 2,8 | Отделка интерьеров детских учреждений, предприятий общественного питания |

| Состав панели | | | | | | | | |
|--|-------------|---|------------|-------------------|---|------------------|-----------------------------|---|
| Оболочки | | Соты | | | Покрытие | σ^- , МПа | Масса 1 м ² , кг | Применение |
| Материал, полуфабрикат | Толщина, мм | Материал | Высота, мм | Размер ячейки, мм | | | | |
| Полиамидный органический пластик на основе тканого полуфабриката ТОПАФ из фенилоновых и капроновых нитей | 0,8 | Техническая бумага, ламинированная полиамидом-6 | 10 | 8 | Ткань из органических волокон с повышенной огнестойкостью | 1,2 | 2,6 | Отделка салонов судов, яхт, кабин легких самолетов и вертолетов |
| Тканый полуфабрикат из стеклянных и капроновых нитей | 0,7 - 1,0 | Техническая бумага, ламинированная полиамидом-6 | 10 15 | 8 10 | | 1,4 0,92 | 3,8 3,9 | Машиностроительные конструкции, тара и др. |
| Нетканое полотно из отходов текстильных волокон и капрона | 1,2 | Техническая бумага, типа «Крафт», ламинированная полиамидом-6 | 15 | 10 | | 0,87 | 3,2 | Производство тары |

8. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006. — С. 348–462.
9. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем. Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.
10. Ендогур А.И., Вайнберг М.В. Сотовые конструкции, выбор параметров и проектирование. — М., Машиностроение, 1988.
11. Рыбкина Е.Г., Цыбин Э.В.//Пластмассы. — 1995. — № 3. — С. 29–31.
12. Феоктистов В.С. Технология изготовления трехслойных конструкций из ПКМ. Учебное пособие, Самара, 1998 — 32 с.
13. Иванов А.А. Сотовые наполнители. Справочник конструктора в 4-х томах. — НПО «Композит», 1990. — Т. 1. — 264 с.
14. Щербаков В.Т. и др. В сборнике: Технология. Сер. Конструкции из КМ, 1989. — Вып. 1.
15. Gohike V., Baum E. *Acta polymerica*, 1979, v. 30, № 3, p. 170–175.
16. *Advanside Materials*, 1991, № 13, № 8, p. 1–5
17. Skip D., *Research and Development*, 1988, v. 30, № 7, p. 54–56.
18. English L.K., *Materials Engineering*, 1985, v. 101, № 1, p. 29–33.
19. *SAMPE Quarterly*, 1973, v. 5, № 1, p. 1–12.
20. Кирсанов В.А.//Зарубежное военное обозрение. — 1989. — № 3. — С. 40–44.
21. Brown A.S., *Aerospace America*, 1990, march, p. 16–20.
22. Vicars E.C., *Applied Polymer Symposium*, 1970, № 15, p. 93–101.
23. Williams D.J., *33 Int. SAMPE Symposium*, 1988, p. 324–325.
24. Авиационные материалы и технологии. НТС ВИАМ; под ред. Е.Н. Каблова. Вып. 2002 г. — 75 с.
25. Иванов А.А. Новое поколение сотовых наполнителей для авиационно-космической техники. — М.: Высшая школа, 2000. — 98 с.
26. Borris P.W. et all, *34 Int. SAMPE Symposium*, 1989, v. 34, p. 849–860.
27. Гуртовник Н.Г. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков; под ред. В.И. Соколова. — М.: Химия, 2003. — 368 с.
28. *Nomex* (арамидные бумаги, нетканые полотна, прессовочные картоны). Проспект фирмы *DuPont*, апрель 1997 г. — 42 с.
29. Лаврищев Д.С., Михайлим Ю.А. Клеи. Герметики. Технологии, 2006, №8, С. 13–18.

5. Теплозащитные полимерные материалы (ТЗМ)

Развитие техники привело к созданию конструкций, эксплуатация которых связана с воздействием на них чрезвычайно высоких температур («горячие» конструкции). При достижении сверх- и гиперзвуковых скоростей рабочих сред ракетных двигателей, ГТД, скоростей полета ЛА, ИСЗ, ГЧ РН равновесные температуры в точке торможения (как результат перехода кинетической энергии набегающего потока в тепловую) достигают 1500–6000 °С. Температура поверхности защитных от воздействия сверхжесткого рентгеновского излучения ядерного взрыва экранов достигает 10 000 °С.

В этих условиях конструкционные материалы быстро утрачивают эксплуатационные свойства. Несмотря на определенные достижения в области повышения термоустойчивости (жаропрочности, жаростойкости) материалов, для решения задач, связанных с эксплуатацией «горячих» конструкций, прежде всего ракетно-космической техники, потребовалось использование специфических решений, так как конструкционные материалы способны выполнять возложенные на них функции только тогда, когда они защищены от воздействия интенсивных тепловых потоков и высоких температур. Использование для защиты конструкций теплоизоляционных материалов (ТИМ) с низкими значениями тепло- и температуропроводности, с высокой теплоемкостью, создающих тепловой и температурный перепад между горячей рабочей средой и конструкцией за счет хороших теплофизических свойств, ограничено термоустойчивостью ТИМ.

Наиболее эффективно тепловой и температурный перепад между горячей средой и конструкцией достигается за счет разрушающихся («жертвенных») материалов, в которых после поглощения тепла проходят многочисленные энергоемкие эндотермические физико-химические превращения (процесс абляции), прежде всего, благодаря использованию многокомпонентных полимерных композиционных материалов — абляционных теплозащитных материалов (ТЗМ).

Взаимодействие набегающего потока с абляционными ТЗМ сопровождается уносом массы (жертвенное разрушение ТЗМ), протекает с поглощением тепла с автоматическим регулированием температуры абляции (определяется составом ТЗМ), что в значительной степени ограничивает тепловой поток, поступающий к защищаемой конструкции.

Абляция (*ablation*) полимеров и полимерных материалов — сложный саморегулирующийся процесс их разрушения при суммарном воздействии тепла, механических и химических факторов, процесс, в котором наряду с физико-химическими превращениями компонентов ТЗМ (плавление, кипение, сублимация, термо-, термоокислительная, механическая деструкция, горение и другие), важную роль играют процессы тепло- и массообмена.

Тепловой поток, поступающий из окружающей конструкцию среды, поглощается, рассеивается и задерживается по различным механизмам (теплопроводность, конвекция, переизлучение). Вклад тепловых, механических и химических факторов в механизм абляции определяется как составом ТЗМ, так и физико-химическими и газодинамическими параметрами потока (интенсивностью, температурой, давлением, скоростью, характером движения, составом компонентов). Абляционная система теплозащиты в весовом отношении является весьма эффективной, но одноразовой. Работоспособность абляционных ТЗМ исчисляется

минутами (даже секундами). Эффективность абляционных ТЗМ снижается при длительном воздействии теплового потока и увеличивается с повышением температуры рабочей среды [1, 2]. Основными абляционными теплозащитными материалами являются композиции на основе полимеров. Абляция ПМ, ПКМ, ВПКМ проходит наиболее эффективно. Так, для нагрева 1 кг стали до $T_{пл}$ требуется 630 кДж, для абляции фенольного асботекстолита — 2100 кДж. Время разрушения («прогара», T пламени 2750 °С, толщина материала 20 мм) фенольного кварцтекстолита — 200 с, фенольного асботекстолита — 190 с, стали — 70 с. ТЗ ГЧ БРДД из меди в 50 раз тяжелее ТЗ ГЧ из кварцпластика.

Эксплуатационные свойства абляционных ТЗМ представляют сложную функцию свойств самих ТЗМ и характеристик набегающих потоков, которые определяются условиями эксплуатации конструкций ракетно-космической техники. Каждый тип ТЗМ (используется более 600 типов абляционных ТЗМ) проявляет оптимальные свойства только при определенных параметрах набегающего потока.

Особую группу полимерных абляционных ТЗМ составляют ТЗМ специального назначения (радиопрозрачные, радиопоглощающие, радиационно-экранизирующие, оптико-маскирующие и другие), определяющие способность объектов преодолевать ПРО, ПКО, обеспечивающие связь, управление, точность наведения, живучесть (радиомаскировка, экранизация в заданных пределах рентгеновского излучения, регулирование температуры абляции, изменение химического состава спутного следа).

5.1. Условия эксплуатации «горячих» конструкций

Конструкции ракетно-космической техники работают в условиях их обтекания высокоскоростными набегающими потоками с большими числами Маха ($M_\infty = V_\infty/a$, где a — скорость звука; $1 < M_\infty < 6$ — сверхзвуковые потоки; $M \geq 6$ — гиперзвуковые потоки; границы устанавливаются по началу диссоциации продуктов набегающего потока; в атмосфере Земли диссоциация молекул кислорода проходит при $M = 6$, в атмосфере с CO_2 , на Венере — при $M = 10$). Течения с большими числами Маха, в отличие от дозвуковых течений, сопровождаются газодинамическими и физико-химическими (термохимическими) эффектами.

Газодинамический эффект связан с тем, что набегающий поток при контакте с телом, движущимся со сверх (гипер) звуковой скоростью «возмущается», образуется ударная волна (скачок уплотнения), а между ней и стенкой конструкции за ударной волной (зона невязкого течения с повышенной плотностью) — сжатый слой, который формирует газодинамическую картину обтекания. При обтекании острого тела ударная волна присоединена к нему, при обтекании затупленного тела образуется ударная волна, которая отходит от тела (отсоединенный скачок уплотнения). Физико-химический (термохимический) эффект обусловлен ростом температуры, вызванным торможением газа за ударной волной, что сопровождается переходом кинетической энергии набегающего потока в тепловую, возбуждаются колебательные степени свободы молекул — компонентов набегающего потока, начинается их диссоциация и ионизация (образование плазмы).

Выделяют два характерных варианта обтекания:

1) течение в окрестности точки торможения затупленного тела, когда интенсивность теплообмена велика, скорость обтекания, давление и трение сильно изменяются вдоль поверхности;

2) обтекание плоской пластины, когда скорость обтекания поверхности постоянна, изменения в тепловом потоке и трения вдоль поверхности достаточно малы (режим обтекания характерен для нагрева боковых поверхностей РН, крыльев, корпусов, ракет, лопаток турбин, стенок камер сгорания, раструбов сопел, т. е. для конструкций с малыми ускорениями потока).

Сжатый слой формирует газодинамическую картину обтекания и определяет механизм, характер, интенсивность теплообмена, на которые влияет как толщина сжатого слоя Δ , так и

угол θ между осью обтекаемого тела и радиусом, проведенным в точку пересечения звуковой линии с контуром тела (рис. 5.1).

Значения для Δ и θ зависят от радиуса затупления R и скорости потока в числах Маха, M_∞ :

$$\Delta = \frac{0,06\epsilon R}{1-\epsilon};$$

$$\theta = 33,9 + 39,7 \epsilon,$$

где ϵ — отношение плотностей компонентов набегающего потока до и после (в сжатом слое) ударной волны

$$\epsilon = K - 1/K + 1 + 2(K + 1)M_\infty^2,$$

$K = C_p/C_v$ — показатель адиабаты (для воздуха при нормальных условиях $K = 1,4$).

В сжатом слое проходят физико-химические процессы в термодинамически неравновесной (из-за малого времени релаксации) среде, прежде всего, химически неравновесной. Химический

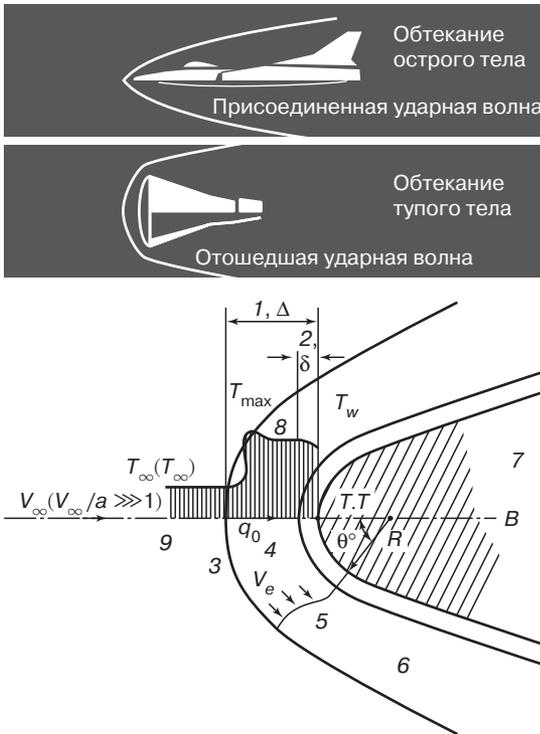


Рис. 5.1. Схемы обтекания острого (а) и затупленного (б) тела и течения гиперзвукового потока в окрестности точки торможения (т. т.) затупленного тела (в, R — радиус затупления) [3]:

1 — сжатый ударный слой толщиной Δ (зона невязкого течения за ударной волной с повышенной плотностью); 2 — пограничный слой толщиной δ (часть сжатого слоя, примыкающая к телу); 3 — ударная волна (отсоединенный на толщину сжатого слоя Δ скачок уплотнения); 4 — зона с дозвуковой скоростью V_e возмущенного потока; 5 — линия (звуковая) перехода потока через скорость звука (в т. т. $V_\infty = 0$); 6 — сверх(гипер)звуковой возмущенный поток; 7 — затупленное тело (R — радиус затупления, θ — угловая координата, определяющая, наряду с толщиной сжатия слоя Δ , механизм и интенсивность теплообмена); 8 — профиль температур, определяемый торможением потока; 9 — невозмущенный набегающий поток

состав потока определяется соотношениями скоростей гидродинамического (диффузионного) и химического процессов.

Химическая неравновесность определяет время установления постоянного состава набегающего потока, что связано со степенью завершенности химических процессов в потоке, определяемой числом Дамкелера (Да)

$$\text{Да} = \tau_{\text{гидр}} / \tau_{\text{хим}},$$

где $\tau_{\text{гидр}}$ — время нахождения компоненты в потоке; $\tau_{\text{хим}}$ — время протекания химического процесса.

При торможении сверх(гипер)звукового потока существенным образом проявляется энергетическая сторона проблемы. Изменению кинетической энергии потока соответствует изменение энтальпии (теплосодержания) компонентов потока. При адиабатических условиях при отсутствии механической работы энтальпия полностью заторможенного потока пропорциональна скорости потока.

При околозвуковых скоростях тепловые потоки сравнительно невелики. При $M = 3$ равновесные температуры $300\text{--}315^\circ\text{C}$, при $M = 5$ — 540°C (рис. 5.2), что позволяет использовать в конструкциях термоустойчивые и теплоизоляционные материалы. Интенсивность тепловых потоков зависит от скорости полета в третьей (до $M = 3$) — десятой ($M \geq 6$) степени. В точке торможения и ее окрестностях (рис. 5.3) кинетическая энергия потока определяет тепловые эффекты диссоциации и ионизации.

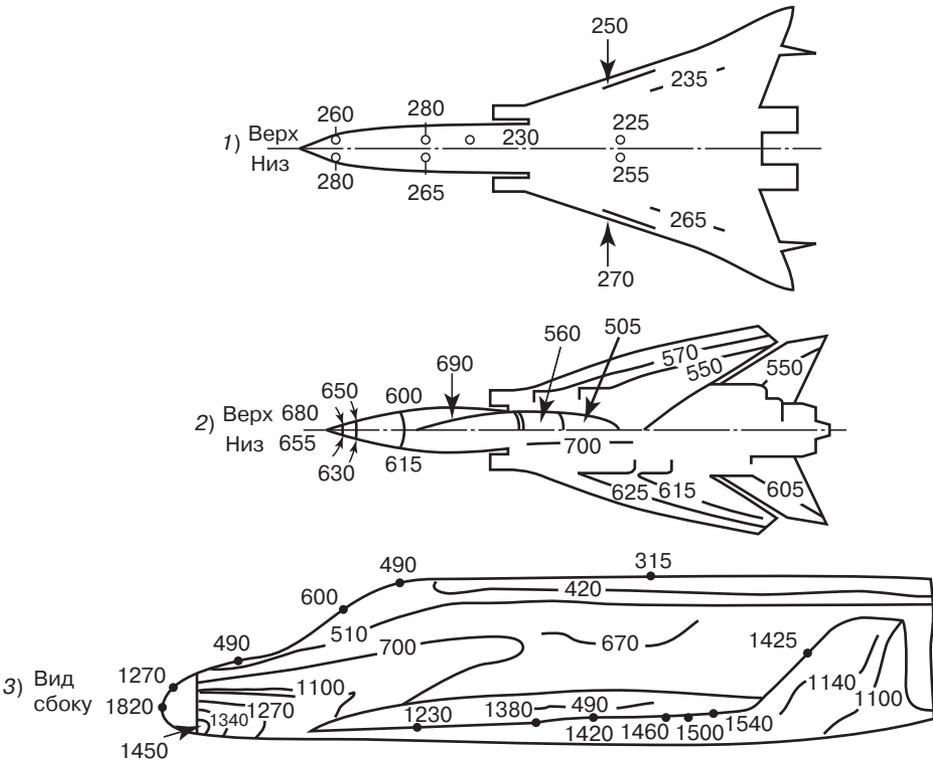


Рис. 5.2. Распределение равновесных температур (в °C) на поверхности ЛА в зависимости от скорости полета в атмосфере Земли: 1 — полет со скоростью 3М; 2 — 4,5М; 3 — 25М (возвращение ВКС типа *Space Shuttle* с орбиты)

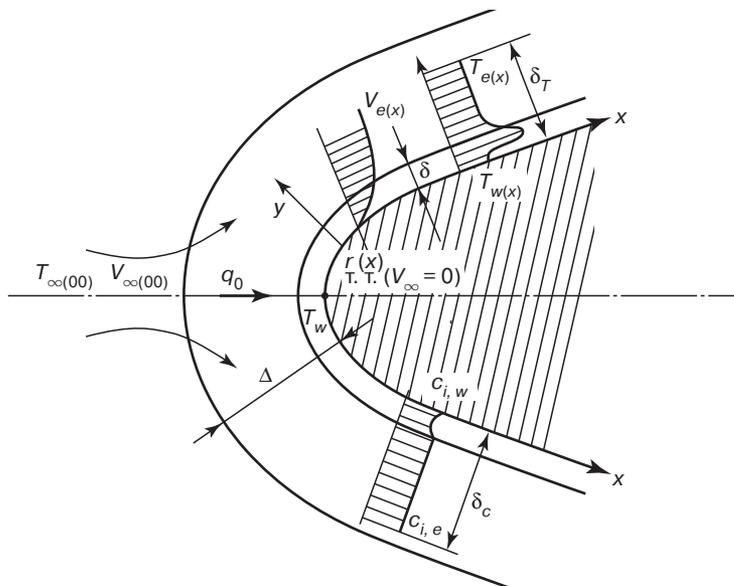


Рис. 5.3. Схема течения в окрестности точки торможения затупленного тела и профили скорости потока $r_x - V_{e(x)}$ в динамическом δ , температур $T_w(x) - T_{e(x)}$ в тепловом δ_T , концентрация компонента набегающего потока $C_{i,w} - C_{i,e}$ в диффузионном δ_c пограничных слоях [3]

Для воздушной среды:

| Компоненты набегающего гиперзвукового потока | Тепловые эффекты, кДж/кг | |
|--|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Диссоциация | Ионизация |
| Кислород | $O_2 \rightarrow O + O + 15\,450$ | $O \rightarrow O^+ + e^- + 41\,000$ |
| Азот | $N_2 \rightarrow N + N + 33\,400$ | $N \rightarrow N^+ + e^- + 50\,000$ |

Тепловые эффекты, связанные с поглощением тепла, определяют повышение теплового содержания компонентов заторможенного набегающего потока. Аккумулированное диссоциированными и ионизированными компонентами набегающего потока тепло выделяется в результате рекомбинации в пограничном слое, стимулируя конвективный и радиационный механизм теплопередачи от среды к стене конструкции (обтекаемого тела).

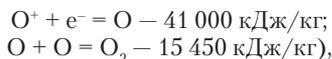
В сжатом слое кинетическая энергия потока переходит в тепловую, что приводит к диссоциации и ионизации компонентов потока с выделением тепла. При переходе газа через ударную волну энтальпия торможения сохраняется неизменной, а температура существенно возрастает.

Если сжатый слой формирует газодинамическую картину обтекания тела, то пограничный слой у его поверхности (составляет малую часть от сжатого) определяет тепловые и диффузионные потоки к поверхности (рис. 5.3).

Теплофизики выделяют в сжатом слое динамический δ , тепловой δ_T и диффузионный δ_c пограничные слои, рассматривая соотношение между ними с использованием критериев подобия: $\delta/\delta_T \approx Pr^{0.5}$, $Pr = \mu C_p / \lambda$, критерий подобия Прандтля для двух неизотермических потоков газа; μ — динамическая вязкость в Нс/м² (в тепловом пограничном слое конвективный перенос тепла соизмерим с молекулярной теплопроводностью); $\delta/\delta_c \approx Sc^{0.5}$, $Sc = \mu / \rho D_{i,j}$, критерий подобия (в концентрационном пограничном слое диффузионные потоки массы соизмеримы с конвективными); $\delta_T/\delta_c \approx Le^{-0.5}$, $Le = \lambda / \rho D_{i,j} C_p$, критерий подобия Льюиса.

Это позволяет уяснить роль и значение каждого отдельного составляющего процесса с помощью аналогии между переносом массы и энергии.

При теплообмене в пограничном слое при высоких температурах участие в переносе тепла принимают атомы и ионы, образовавшиеся в результате диссоциации и ионизации. Они диффундируют в области меньшей атомарной и ионной концентрации, где рекомбинируют, перенося тем самым энергию к поверхности. При определенных условиях энергия, выделившаяся в результате рекомбинации (реакции, обратные ионизации и диссоциации, идут с выделением тепла, например:



может превысить поток тепла к стенке за счет теплопроводности. Рекомбинация ускоряется в каталитически активных условиях, но зависит от типа поверхности и условий обтекания. Кислород рекомбинируется в низкотемпературной зоне вблизи поверхности, азот — вдали от стенки. Когда у поверхности скапливается большое количество нерекombинированных атомов, диффузия уменьшается, перенос тепла за счет рекомбинации уменьшается по сравнению с молекулярной теплопроводностью.

Механизм рекомбинации определяется концентрацией атомов в пограничном слое, энтальпией заторможенного потока, температурой поверхности, радиусом затупления, каталитической активностью поверхности, формирующей пограничный слой. Так, керамическая поверхность на основе оксидов имеют низкую каталитическую активность по отношению к реакции рекомбинации кислорода (в абляционной системе расплавы оксидов, входящих в состав асбеста, кремнезема, кварца, эффективно защищают ТЗМ от окисления, снижая подвод тепла за счет газофазного и поверхностного горения). Подвод тепла к оксидной поверхности в 4 раза меньше, чем к каталитически активной металлической.

Увеличение размеров конструкции, уменьшение высоты полета (условие внешнего обтекания) снижает эффект некаталитичности из-за роста давления за ударной волной (состав пограничного слоя приближается к равновесному). Шероховатость поверхности конструкции способствует переходу ламинарного режима обтекания к турбулентному (уменьшение критерия Рейнольда, Re), увеличению поверхностного трения, интенсификации конвективного теплообмена (тепловые потоки увеличиваются в 1,5–2 раза).

Скорость набегающего потока существенно влияет на подвод тепла к конструкции за счет механизмов конвективного и излучательного (радиационного) теплообмена (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Зависимость конвективной $q_{\text{конв}}$ и излучательной (радиационной, $q_{\text{изл.}}$) составляющей в зависимости от скорости заторможенного набегающего потока [1, 9]

| Скорость набегающего потока, V_∞, V_0 , км/с | Тепловой поток на неохлождаемую стенку, кВт/м ² | |
|---|--|-------------------|
| | $q_{\text{конв.}}$ | $q_{\text{изл.}}$ |
| 8 | 10^6 | — |
| 11 | $5 \cdot 10^5$ | $5 \cdot 10^5$ |
| Более 11 | 10^5 | 10^8 |

Расчеты и аппроксимационные зависимости для T_w, q_0, R показывают, что $q_{\text{конв}}$ резко уменьшается с увеличением радиуса затупления R ($q_{\text{конв}} \approx 1/\sqrt{R}$), например, при $R \approx 0,5$ м для корпуса и кромок крыльев ВКС T_w не превышает 1600°C . Излучение сжатых за ударной волной слоев высокотемпературного (излучающего) газа с ростом R увеличивается медленно, что связано с увеличением оптической толщины слоя газа и ростом самопоглощения. Отвод тепла переизлучением эффективен только в условиях внешнего обтекания. В РДТТ при 3000°C и давлении $2\text{--}4 \cdot 10^6$ Па тепловой поток возрастает на 10–30% за счет излучения паров воды, образующихся при горении каучукового топлива.

Расчеты теплообмена приводятся с учетом критериев Рейнольдса, Нуссельта, Стантона, Прандтля, связывающих газодинамические и тепловые характеристики набегающего потока. При скоростях менее 11 км/с основной подвод тепла проходит по механизму конвективного теплообмена:

$$q_k = \alpha(T_r - T_t),$$

где q_k — конвективный тепловой поток; α — коэффициент теплообмена; T_r — температура набегающего потока; T_t — температура поверхности ТЗМ.

Количество тепла, передаваемого конструкции набегающим потоком, определяется величиной соотношения $\alpha/C_p(I_{\max} - I_{\min})$, где I — теплосодержание потока.

Для входящего в плотные слои атмосферы космического летательного аппарата (КЛА) необходим защитный экран, обеспечивающий работоспособность КЛА при воздействии высокотемпературного теплового потока, сохранение температуры несущей конструкции КЛА и находящихся внутри него узлов ниже определенных критических значений (около 150 °С для алюминиевых свалов, 400 °С для титановых, 250–315 °С для полиимидных ПКМ). Выше этих температур возникает угроза надежности и безопасности полета. На активном участке траектории, на начальном участке входа КЛА в плотные слои атмосферы проблема отражения теплового потока решается сравнительно просто использованием легких сублимирующих материалов с низкими значениями тепло- и температуропроводимости. При постепенном спуске КЛА при увеличении удельного теплового потока и связанных с ним равновесных температур (в зависимости от траектории входа КЛА; рис. 5.4–5.7, табл. 5.2) материалы теплоизоляции и конструкции претерпевают быстрое термическое разрушение и решение проблемы тепловой защиты конструкций КЛА связано с использованием материалов, механизм разрушения которых адекватен параметрам набегающего потока и представляет собой саморегулируемый процесс теплопередачи и массообмена, при котором тепловая энергия расходуется на жертвенный унос материала (абляция ТЗМ).

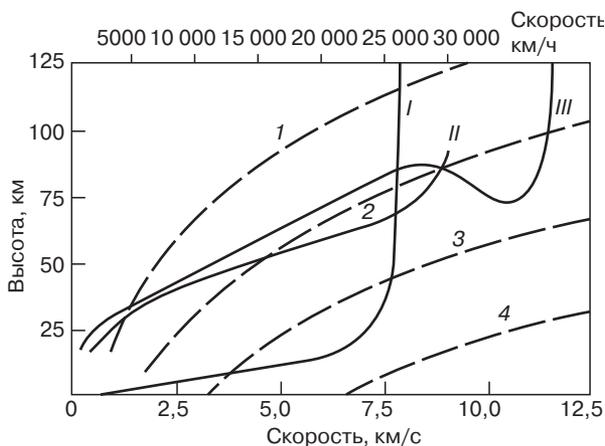


Рис. 5.4. Траектории и значения удельных тепловых потоков при типичных космических полетах [11]:

I — суборбитальная межконтинентальная баллистическая ракета; II — пилотируемый крылатый орбитальный космический аппарат, совершающий полет с использованием аэродинамической подъемной силы; III — пилотируемый крылатый суперорбитальный КЛА, совершающий полет с использованием аэродинамической подъемной силы. Пунктирные линии 1–4 представляют приближенные значения удельных тепловых потоков в указанной последовательности: 0, 1 МВт/м² (1400 К), 1,0 МВт/м² (2200 К), 10 МВт/м² (3900 К) и 100 МВт/м² (свыше 6000 К). В скобках представлены приближенные значения равновесных температур поверхности



Рис. 5.5. Траектория полета (коридоры входа) в атмосфере Земли различных летательных аппаратов [10]: 1 — самолеты, крылатые ракеты; 2 — антиракеты; 3 — воздушно-космические самолеты; 4 — КЛА, возвращающиеся с частичным использованием аэродинамического качества; 5 — КЛА, возвращающиеся по баллистической траектории; 6 — КЛА межпланетного типа

Таблица 5.2. Типичные значения плотности тепловых потоков при эксплуатации конструкций авиакосмической техники [10]

| Тип конструкции | Плотность теплового потока (МВт/м ²)/элемент конструкции |
|--|---|
| Камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) | 5–17 (ЖРД начала космической эры); 80–120 (современные ЖРД) |
| Ракетный двигатель твердого топлива (РДТТ) | 1–20 (камера сгорания); 22–30 (сопловой блок)* |
| Аппараты, входящие в плотные слои атмосферы Земли: | |
| 1) головная часть (ГЧ) баллистической ракеты; | 6–17 (наконечник ГЧ); 0,5–5 (боковые поверхности) |
| 2) спускаемый аппарат (СА) искусственного спутника Земли; | 20–40 (лобовой экран СА) |
| 3) ВКС типа <i>Space Shuttle</i> первого поколения | 7–30 (носик обтекателя, кромки крыльев и рулей); 0,8–1,2 (нижняя часть фюзеляжа) 0,1–0,5 (верхняя часть фюзеляжа) |
| Аппараты, летящие в приповерхностном слое атмосферы Земли: | |
| 1) самолеты (в зависимости от числа М); | 0,02–0,25 (наружная обшивка) |
| 2) ракета на восходящей ветви траектории полета после старта (активный участок траектории) | 0,2–1 (наружная обшивка) |

* В 100 раз больше, чем в топке тепловоза, в 10–30 раз больше, чем в камере сгорания ГТД.

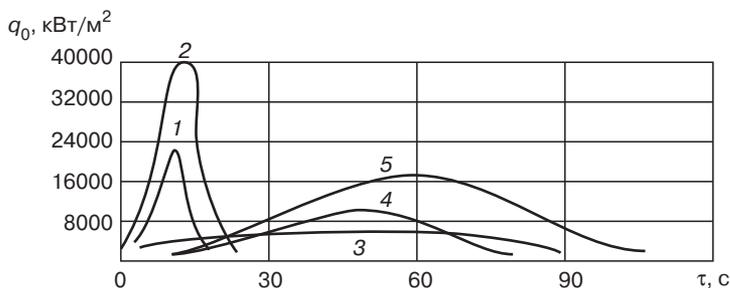


Рис. 5.6. Типичные кривые аэродинамического нагрева ракетно-космических конструкций при их входе в плотные слои атмосферы Земли [6]: 1 — БРСРД; 2 — БРДД; 3 — возвращение с планирующим спуском; 4 — орбитальный ЛА (ИСЗ); 5 — сверхорбитальный ЛА (возвращение с Луны, планет)

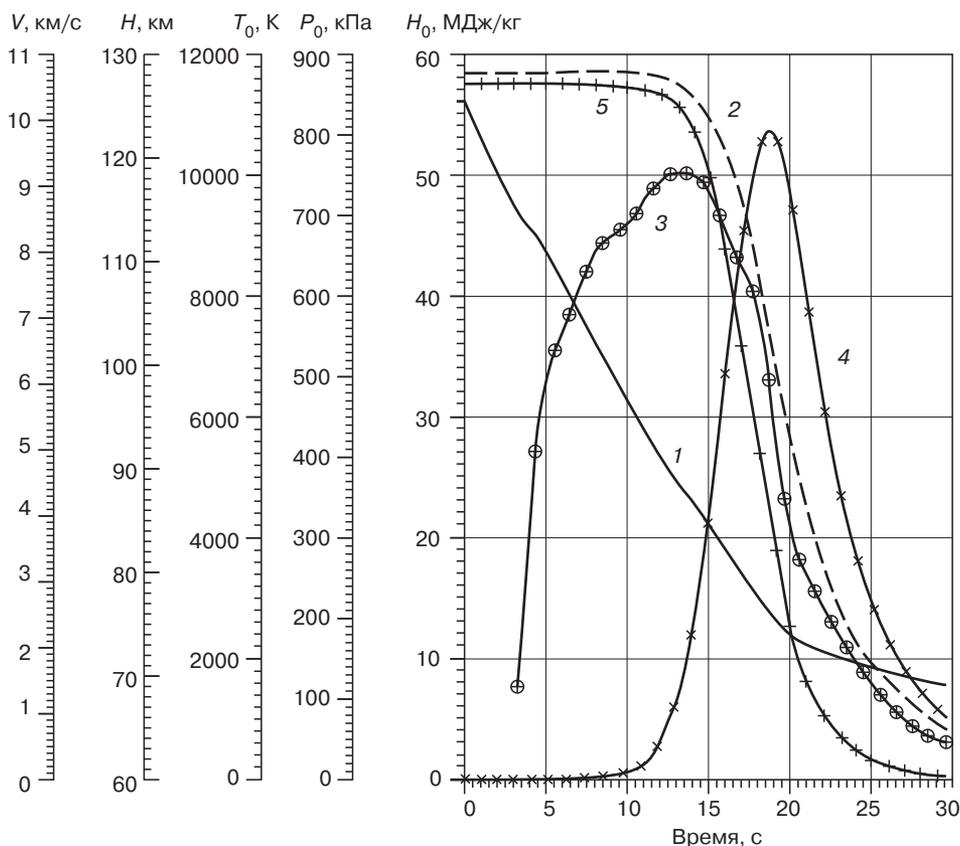


Рис. 5.7. Зависимость параметров набегающего газового потока (3 — температура, К; 4 — давление, кПа; 5 — энтальпия, МДж/кг) в точке торможения от параметров траектории (1 — высота, км; 2 — скорость, км/с) и продолжительности нахождения в атмосфере спускаемого КЛА (сфера, ТЗМ — фенолоальдегидный асботекстолит толщиной 32–6,5 мм, угол входа в атмосферу Венеры — 15°)

В условиях внешнего обтекания гиперзвуковыми высокотемпературными набегающими потоками работают баллистические ракеты, возвращаемые конструкции ИСЗ, ракеты ПВО. Максимальная скорость полета (7–8 км/с, 22–25 М) баллистических ракет достигается за 300–400 с на высоте 300–400 км (на высоте 20–30 км скорость около 6 М). На активном участке траектории (при работающих двигателях) тепловые нагрузки $q_{0, \max}$ составляют 10–100 кВт/м², $T_{w, \max}$ около 800 К (до 1200 К), давление до 0,1 МПа. На участке спуска (пассивный участок траектории, ПУТ) тепловые нагрузки достигают 5000–20 000 кДж/кг.

При баллистическом спуске конических конструкции ГЧ, ББ с углом входа 15–30° (скорость на высоте 100 км 5–7 км/с, при встрече с Землей около 2 км/с, продолжительность спуска с высоты 100 км 30–60 с) подвод тепла для наконечников составляет q_0 10 000–100 000 кВт/м² (давление 10–15 МПа, T_w 5000–7000 К), для боковых поверхностей q_0 около 1000 кВт/м², давление 0,5–1,0 МПа (условия, характерные для возвращения ИСЗ). Ракеты ПВО радиусом действия 20–500 км, летящие с большими ускорениями и малыми углами к горизонту при работе двигателя в течение 10–15 с достигают скорости 3–4 км/с (10–15 М) и условия их нагрева близки к условиям нагрева боковых поверхностей ГЧ и возвращаемых ИСЗ.

В зависимости от величины удельного теплового потока используют ТЗМ различного состава. При удельных тепловых потоках, меньших 0,5 МВт/м² (некоторые типы планирующих КЛА), эффективны композиции малой плотности на основе деполимеризующихся полимеров (сублимирующиеся при температурах не выше 1000–1200 °С). В условиях воздействия средних и высоких удельных тепловых потоков (0,5–30 МВт/м²) эффективны ТЗМ на основе терморезистивных ПКМ, ВПКМ (кварце-, углепластики). При высоких значениях удельного теплового потока, в областях подвода и отвода тепла излучением и переизлучением эффективны углеродные, углеродкерамические композиционные материалы (малогобаритные переизлучающие наконечники головных частей ГЧБР, сопловые блоки РДТТ, при T_w до 1600 °С – многоразовые переизлучающие ТЗМ системы теплозащиты ВКС).

В условиях внутреннего обтекания гиперзвуковыми высокотемпературными потоками работают конструкции химических двигателей (ЖРД, РДТТ, табл. 5.2, 5.3, рис. 5.8, 5.9).

Таблица 5.3. Характеристики жидких ракетных топлив [12]

| Тип топлива ³⁾ | Характер воспламенения | $\alpha^1)$ | ρ , г/см ³ | $T_{\text{горения}}$, К | $I_{\text{уд}}^2)$, Нс/кг | Назначение |
|--|------------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_3)_2$ (несимметричный диметилгидразингептил) | Самовоспламенение | 3,05 | 1180 | 3415 | 2770 | Маршевые двигатели РН типа «Протон» |
| $\text{O}_{2, \text{ж}}$ + керосин | Нет самовоспламенения | 2,7 | 1020 | 3690 | 2930 | Маршевые двигатели РН «Союз» и 1-й ступени «Энергия» |
| $\text{HNO}_3 + \text{N}_2\text{H}_4 + \text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_3)_2$ | Самовоспламенение | 3,0 | 1270 | 3165 | 2680 | Маршевые двигатели ракет и малых РН |
| $\text{F}_{2, \text{ж}}$ + $\text{H}_{2, \text{ж}}$ + Li (LiH) (гидрид лития) | Самовоспламенение | 15,0 | 670 | 4760 | 3970 | Опытные образцы сверхмощных РН |
| $\text{O}_{2, \text{ж}}$ + $\text{H}_{2, \text{ж}}$ | Нет самовоспламенения | 6,0 | 350 | 3420 | 3790 | Маршевые двигатели верхних ступеней РН Энергия, Saturn 5А |

Примечания: ¹⁾ $\alpha = \chi / \chi_0$, коэффициент избытка окислителя, χ – теоретическое количество окислителя для полного окисления 1 кг топлива, χ_0 – практическое количество окислителя;

²⁾ Удельный импульс, характеристика тяговооруженности; ³⁾ Перспективны фторгидразиновые и металлсодержащие гелевые гидразиновые (Al-порошок, окислители – H_2O_2 , N_2O_5).

Для предотвращения крекинга топлива предусматривается теплоизоляция и теплозащита соответствующих конструкций и от воздействия внешних тепловых потоков. Наиболее теплонагруженные сопловые блоки (при увеличении критического диаметра на 5% давление в камере сгорания снижается на 15–20%) защищают различными системами теплозащиты (в ЖРД — массообменные системы, пленочное заградительное охлаждение, самовыпотевание, в РДТТ — абляционная система, использование термоустойчивых углеродных материалов —

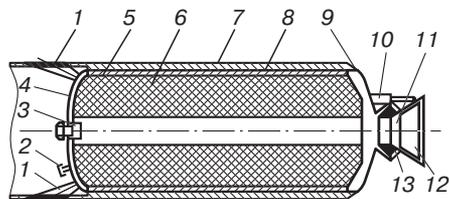


Рис. 5.8. Компонованная схема ракетного двигателя твердого топлива РДТТ [12]:

1 — реверсивные сопла с заглушками на переднем днище; 2 — датчики давления; 3 — воспламенительное устройство; 4 — переднее днище с теплозащитным покрытием; 5 — бронировка заряда двигателя; 6 — заряд двигателя (тиоколовый, полиуретановый эластомер, перхлорат аммония NH_4ClO_4 , 10–20 %масс. мелкодисперсный порошок алюминия, импульс ≥ 2440 Нс/кг); 7 — оболочка РДТТ с теплозащитой внутренней (от продуктов сгорания топлива) и внешней (от аэродинамического нагрева); 8 — крепление (клеевой слой, механические элементы) заряда к оболочке (обечайки) двигателя; 9 — сопловое днище с теплозащитным покрытием; 10–13 — сопловой блок с сопловым вкладышем 13 (зона критического сечения сопла), поворотным соплом 12 с заглушкой 11 и приводом поворота сопла 10 (исполнительный орган управления тягой)

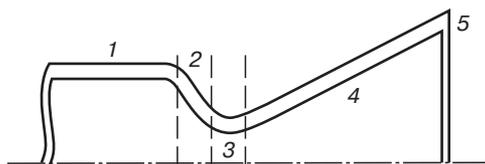


Рис. 5.9. Основные рабочие параметры РДТТ [9, 10]

| Параметр ¹⁾ | Зона | | | | |
|--|---------------------------|---|--|-------------------------------|---|
| | 1-я (камера сгорания) | 2-я (входной конец, дозвуковая часть соплового блока) | 3-я (зона критического сечения, горловина, сопловой блок, вкладыш) | 4-я (раструб соплового блока) | 5-я (выход продуктов сгорания, сверхзвуковой поток) |
| Температура газа T , К | $T_1 = 1750\text{--}4000$ | 80–95% от T_1 | 80% от T_1 | 50–60% от T_1 | 50–40% от T_1 |
| Давление газа P , МПа | $P_1 = 0,5\text{--}20$ | 90–95% от P_1 | 40–50% от P_1 | 25–20% от P_1 | 0,5–2% от P_1 |
| Скорость истечения продуктов горения V , м/с | 0–300 ²⁾ | 350–1000 | До 2500 | Более 2500 | До 3500 |

Примечания:

¹ Величина тепловых потоков 20–200 МВт/м² (420 000–630 000 кДж/м²·ч).

² В зоне переднего днища 25–70 м/с, в застойных зонах 25–50 м/с, в цилиндрической части камеры сгорания 50–300 м/с.

графиты, пироуглерод, углепластики, УУКМ, УКУКМ, — вкладышей в критическое сечение из молибдена, вольфрама, тантала, покрытий на основе оксидов, боридов, карбидов, нитридов, цирконатов).

5.2. Системы и способы тепловой защиты

Плотности тепловых потоков и равновесные температуры (табл. 5.2, рис. 5.4, 5.5), характерные для условий эксплуатации горячих конструкций, существенно превышают тепловые возможности конструкционных материалов.

Предельные температуры эксплуатации металлических сплавов (в °С) составляют: сплавы алюминия — 160 (до 2,7 М, кратковременно до 500), сплавы титана — 400 (до 3,3 М, кратковременно до 850–1000), сплавы бериллия — 450, сплавы магния — 180 (до 300), сталь 30 ХГС — 400–500 (до 3,7 М, кратковременно до 900), никелевые сплавы — 815–1035, никель-хромовые сплавы — 750, коррозионностойкие стали — 500, кобальтовые сплавы — 870–1205, медноникелевые сплавы — 300, бронза — 200–400. Высокой термоустойчивостью обладают сплавы на основе вольфрама, молибдена, ниобия, тантала (рис. 5.10–5.13, табл. 5.4).

Характерной особенностью керамических материалов являются их высокая термоустойчивость (рис. 5.10, 5.11, табл. 5.5–5.8). Карбиды ($T_{\text{раб}}$ до 2000 °С, SiC — до 1850 °С, TiC — до 1100 °С), оксиды ($T_{\text{раб}}$ до 1000 °С), нитриды ($T_{\text{раб}}$ выше 1000 °С, нитрид кремния 1050–1350 °С, устойчив к лазерному излучению, КЛТР в 5 раз меньше КЛТР жаропрочных сталей; $T_{\text{раб}}$ нитридов гафния, циркония — 1500–1700 °С), бориды ($T_{\text{раб}}$ до 2200 °С, для защиты сопловых блоков ракет от окисления и эрозии используют борид циркония с хромом в качестве связующего, сплавы боридов тантала или гафния с хромом) используют для нанесения защитных покрытий изделий ракетной техники из молибдена, вольфрама, тантала, графита, УУКМ.

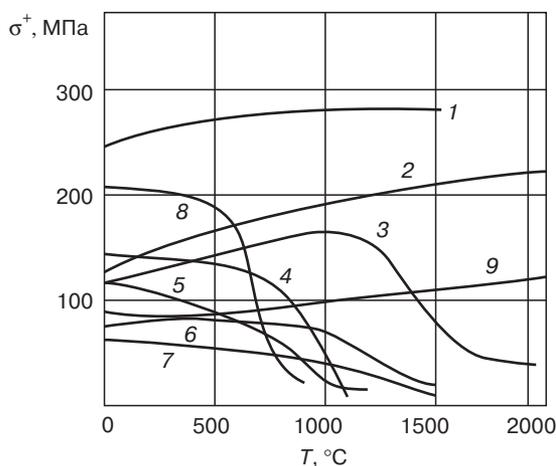


Рис. 5.10. Зависимость прочности при растяжении σ^+ конструкционных материалов от температуры [13]:

1 — керамический *KM Sepcarb* (SiC/C, 2D); 2 — углерод-углеродный КМ-структуры 2D; 3 — керамический *KM Cerasep* (SiC/SiC, 2D); 4 — сплав *Rene 41*; 5 — дисперснонаполненный никель-хромовый сплав; 6 — молибденовый сплав; 7 — ниобиевый сплав; 8 — нержавеющая сталь ($T_{\text{нн}}$ 1430–1510 °С); 9 — графит.

Материалы 1–3 разработаны фирмой *SEP (Societe Europeene de Propulsion)* в рамках программы разработки материалов для ВКС *Hermes*

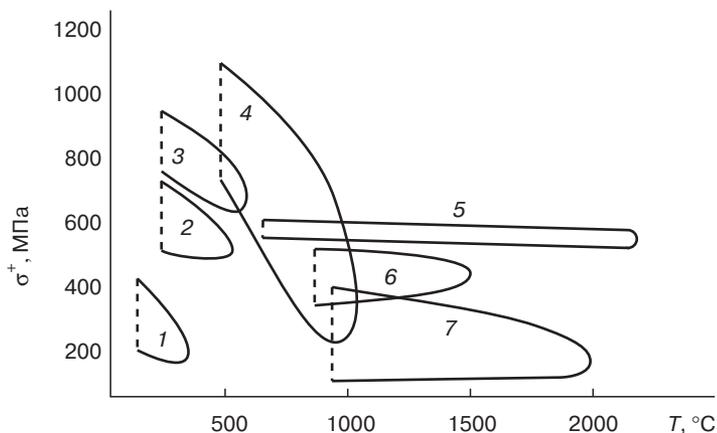


Рис. 5.11. Зависимость прочности при растяжении σ^+ конструкционных материалов от температуры [14–16]:

1 — алюминиевые сплавы; 2 — титановые сплавы; 3 — стали; 4 — никелевые сплавы; 5 — углерод-углеродные КМ слоистые (структура 2D, 0/90); 6 — керамические материалы Si_3N_4 , SiC; 7 — керамика на основе карбидов, оксидов, нитридов

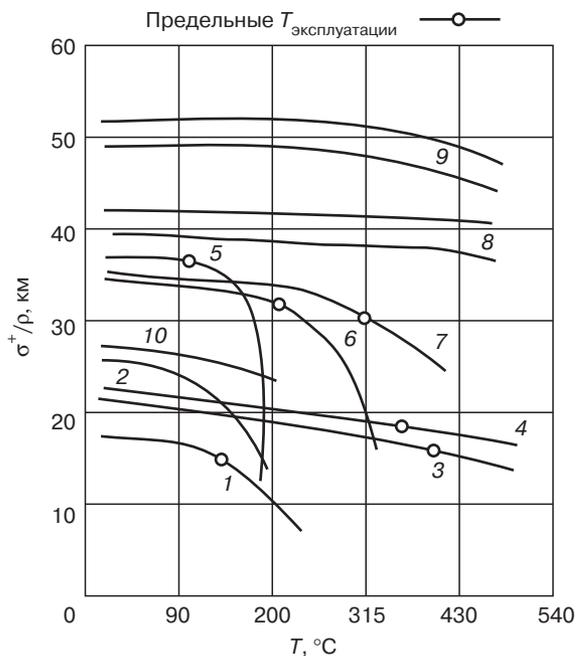


Рис. 5.12. Зависимость удельной прочности при растяжении σ^+/ρ конструкционных материалов от температуры [17]:

1 — алюминиевые сплавы; 2 — МКМ Al/B; 3 — нержавеющая сталь; 4 — титановые сплавы; 5 — эпоксидные углеволокниты; 6 — малеинимидные углеволокниты; 7 — полиимидные (PMR-15, LARC-160) углеволокниты; 8, 9 — УУКМ различных типов и структуры; 10 — МКМ Ti/SiC (Ti 2124 + 15 % масс. волокон SiC)

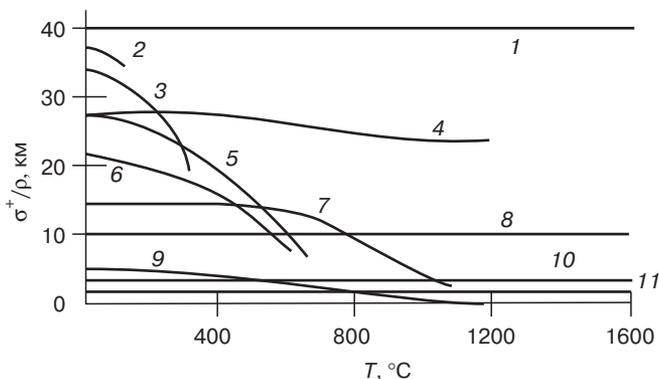


Рис. 5.13. Зависимость удельной прочности при растяжении σ^+/ρ конструкционных материалов от температуры [15]:

1 — однонаправленный УУКМ (высокомодульные УВ + пироуглеродная матрица); 2 — эпоксидный борволокнит; 3 — МКМ Al/B (60 %об. борных волокон); 4 — МКМ Ni/C (60 %об. УВ, МКМ с σ^+ при 450 °С не менее 1,5 ГПа); 5 — бериллий; 6 — нержавеющая сталь; 7 — сплав *Rene 41*; 8 — однонаправленный углеволокнит *Carbitech*; 9 — дисперсионнонаполненный никелевый сплав; 10 — УУКМ (углеродный войлок + пироуглеродная матрица); 11 — графит АТВ

Таблица 5.4. Зависимость прочности при растяжении σ^+ сплавов вольфрама⁴ от температуры

| Тип и содержание модификатора в сплаве, %масс. | σ^+ , МПа при T , °С | | | | |
|--|-------------------------------|------------------|------|------|----|
| | 1370 | 1550 | 1930 | 2200 | |
| Молибден ¹ | 0,5 | 265 | — | 63 | 46 |
| | 2,5 | 340 | 222 | 84 | — |
| Ниобий ² | 0,5 | — | 245 | 77 | — |
| | 1,2 | — | 260 | 100 | — |
| Тантал ³ | 1,6 | — | 141 | 97 | 30 |
| | 5,3 | — | 392 | 140 | 77 |
| Рений | 3,0 | 204 | — | 70 | — |
| | 26,0 | 475 ⁵ | — | 158 | — |

¹ $T_{пл} = 2610$ °С, $\rho = 10,2$ г/см³, $E^+ = 330$ ГПа, высокая теплопроводность, низкий коэффициент линейного расширения. Быстро окисляется, плакируется нихромом, никелем, AlCrNi, AlCrV, используется для получения сплавов с титаном, цирконием, ниобием. Наиболее высокие значения σ/ρ при 1100–1300 °С, при температуре выше 1000 °С по значениям σ/ρ эффективнее сталей и никелевых сплавов.

² $T_{пл} = 2723$ °С, $\rho = 8,6$ г/см³, при $T > 500$ °С быстро окисляется, с защитными покрытиями (цинк) $T_{раб} 1000$ – 1100 °С (кратковременно до 1500 °С), сплавов с танталом — до 1600 °С.

³ $T_{пл} = 3030$ °С, $\rho = 16,6$ г/см³, σ^+ до 350 МПа, $E^+ = 190$ ГПа, при $T > 700$ °С окисляется, $T_{раб}$ сплава 90% тантала, 10% вольфрама до 1650 °С.

⁴ $T_{пл} 3400$ °С, $\rho = 19,3$ г/см³.

⁵ В авиадвигателестроении важнейшим критерием является сточасовая жаропрочность — сохранение σ^+ не менее 420 МПа после выдержки при 750 °С в течение 100 ч.

Таблица 5.5. Температуры плавления керамических материалов, применяемых для защиты критических сечений РДТТ [18]

| Материалы покрытий | $T_{пл}, ^\circ\text{C}$ | Материалы покрытий | $T_{пл}, ^\circ\text{C}$ |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Металлы (для сравнения): | | Карбиды: | |
| Молибден | 2650 | Гафния | 4150 |
| Осмий | 2700 | Молибдена | 2550 |
| Рений | 3000 | Ниобия | 3500 |
| Тантал | 2850 | Кремния | 2550 |
| Вольфрам | 3350 | Тантала | 4150 |
| | | Титана | 3100 |
| Оксиды: | | Вольфрама | 2850 |
| Бериллия | 2500 | Циркония | 3550 |
| Кальция | 2550 | Циркония-тантала | 3900 |
| Гафния | 2800 | Бориды: | |
| Магния | 2800 | Гафния | 3050 |
| Циркония | 2950 | Вольфрама, циркония | 2900 |
| Нитриды: | | Цирконаты: | |
| Бора | 2750 | Бария | 2700 |
| Гафния | 3300 | Кальция | 2660 |
| Тантала | 3300 | | |
| Титана | 3200 | | |
| Циркония | 3000 | | |

Таблица 5.6. Свойства керамических материалов [19]

| Тип керамики | $T_{пл}, \text{K}$ | Микротвердость, ГПа | $E \cdot 10^{11}, \text{Па}$ | $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | Энергия Гиббса, кДж/моль | Энтальпия, кДж/моль |
|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| TaB ₂ | 3037 | 26 | 6,86 | 7,9 | 188,25 | 190,54 |
| TiB ₂ | 3150 | 33,8 | 5,4 | 4,6 | 319,5 | 323,64 |
| HfB ₂ | 3580 | 29 | 4,79 | 6,3 | 320,5 | 329,28 |
| ZrB ₂ | 3500 | 28 | 4,958 | 5,9 | 323,6 | 328 |
| WB | 2800 | 25 | 4,98 | 5,6 | 71,1 | 71,13 |
| B ₄ C | 2723 | 50 | 4,265 | 4,5 | 61,34 | 62 |
| WC | 3054 | 22,4 | 7,37 | 3,85 | 38,79 | 40,58 |
| β -SiC | 2830 | 30 | 4,013 | 3,8 | 303,06 | 305,43 |
| BN | 3000 | 75 | 8,7 | 0,8 | 224,6 | 250,5 |
| TiN | 3220 | 20 | 3,9–5,0 | 9,35 | 294,3 | 323 |
| TaN | 3087 | 14,4 | 5,758 | 3,05 | 223,85 | 252,3 |

Таблица 5.7. Свойства объемных керамических материалов [20, 48]

| Свойства | Типы керамических материалов | | | |
|--|------------------------------|--------------------------------|----------|-----------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | BeO | MgO |
| ρ , г/см ³ | 1,7–2,2 | 3,6–3,9 | 3,0 | 3,58 |
| $T_{пл}$, К | 1980 | 2100 | 2570 | 2800 |
| $\sigma_{вн}$, МПа, 290 К | 30–80 | 210–380 | 110–280 | 110–170 |
| 1300 К | 30–110 | 50–80 | 100–240 | 35–100 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹ в интервале 300–1300 К | 0,5–0,8 | 8,0–8,7 | 8,2–10,3 | 12–14,5 |
| λ , Вт/м К | 0,7–1,3 | 2,7–6,9 | 220 | 40 |
| C_p , кДж/кг К | 0,65–0,75 | 0,7–1,1 | 1,26 | 0,98 |
| Термостойкость, К ¹⁾ | 1200 | 180–240 | 1000 | 120–175 |
| ϵ_t | 0,5–0,6 | 0,3–0,7 | 0,36 | 0,32–0,7 |
| E^+ , ГПа | 200–770 | 220–280 | 320 | 240 |
| K_{Ic} , МПа/м ^{0,5} | — | — | — | — |
| σ^- , МПа | — | — | — | — |
| Коэффициент Пуассона, μ | 0,17 | 0,28–0,3 | 0,29 | 0,36 |
| Диэлектрическая проницаемость, ϵ | 2,7–3,6 | 8,7–9,9 | 6,5 | 8–9 6,9–10,2 |

¹ Сопротивление воздействию термоудара, термоциклическим нагрузкам и перепаду температур (параметр, используемый для характеристики керамических материалов).

² Температуры рабочие: числитель — на воздухе, знаменатель — в азоте.

Таблица 5.8. Свойства карбидов и нитридов [20]

| Тип керамики | Свойства объемных материалов | | | |
|--|------------------------------|-------------------|---|--------------------------|
| | ρ , г/см ³ | $T_{пл}$, °С | $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С ⁻¹ | λ , ккал/см с °С |
| TiC | 4,25 | 3230 | 7,60 | 0,041 |
| SiC | 3,21 | 2820 (разложение) | 4,7 | 0,1 |
| B ₄ C | 2,51 | 2450 | 4,5 | 0,07–0,2 |
| BN | 2,27 | 2983 | 0,05–10 | 0,04–0,12 |
| Si ₃ N ₄ ¹⁾ | 3,44 | 1899 (сублимация) | 2,47 | 0,045 |

¹ σ^+ при 1000 °С — 450 МПа, при 1230 °С — 120 МПа (материалы для направляющих и рабочих лопаток, роторов, дисков, лопастей турбин, вкладышей, пустотелых деталей ГТД с $T_{раб}$ до 1370 °С); композиция Si₃N₄ + O₂ + Al (сиалон, фирма *Rolls-Royce*) имеет прочность стали и плотность алюминия. При плотности пено-Si₃N₄ 0,6 г/см³ $\sigma_{вн}$ 7 МПа, $E_{вн}$ 3 ГПа, при плотности 1,0 и 1,5 г/см³ соответственно 21 и 11, 56 и 63.

Типы керамических материалов

| Ситалл | AlN | BN | Si ₃ N ₄ | B ₄ C | SiC |
|-----------|-----------|----------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2,5–2,84 | 3,24–3,27 | 1,6–2,2 | 2,45–4,3 | 2,5 | 3,05–3,1 |
| 1680 | 2670 | 3300 | 2170 | 2450 | 2800 |
| 80–150 | 280 | 80–180 | 150–550 | 400 | 310–450 |
| — | — | 90–130 | 150–480 | — | — |
| 0,9–5,7 | 5,6 | 0,3–0,85 | 2,5–2,8 | 5,6 | 4,1–4,4 |
| 1,9–3,7 | 30–150 | 10–200 | 3,9–19 | 92 | 80–105 |
| 0,7–0,9 | — | 0,8–1,2 | 0,67–0,8 | — | — |
| 1000 | — | 1500 | 1100 | 1000/ 2200 ² | 1650/ 1900 ² |
| 0,7 | — | — | — | — | — |
| 60–120 | 350 | 30–120 | 78–300 | 400–450 | 360–400 |
| — | 3,35 | — | — | — | 10–12 |
| — | 2100 | 160–190 | — | 2200 | 1300–2900 |
| 0,22–0,26 | — | 0,2 | 0,2–0,27 | — | — |
| 6,9–10,2 | 8,5 | 3,3–3,5 | 10–90 | — | — |

Используя различные технологические приемы (газофазное диффузионное насыщение, ионно-плазменное напыление и др.) для нанесения покрытий Ta₄C₃ + Ta₃C₂ обеспечивают работоспособность УУКМ до 2400 °С (начало «разгара» критического сечения при 3100 °С), B₄C, SiC на графитах, УУКМ до 1850 °С. Покрытия Si₃N₄, Si₃N₄ + BN обеспечивают защиту газовых трактов до 1700–1850 °С, из нитридов гафния, циркония – до 1500–1700 °С. Покрытия из Zr_xB_y, Ta_xB_y, Hf_xB_y на графите, Mo, W, Ta, УУКМ выдерживают температуры 3315–3590 °С в сопловых устройствах ЖРД. Керамические материалы определяют прогресс в авиадвигателестроении.

С 1990-х гг. прогресс в авиационном двигателестроении связывают с разработкой двухконтурных турбореактивных ГТД с форсажной камерой (ТРДДФ), со снижением удельной массы компрессоров высокого и низкого давления (30–50% от массы двигателя), турбины высокого давления благодаря замене металлических сплавов на неметаллические конструкционные керамические, углеродные, углеродокерамические композиционные материалы. Особенно большое внимание уделяют разработке КМ на основе керамических (SiC, Si₃N₄) и углеродокерамических (силицированных) матриц и термоустойчивых керамических и графитизированных волокон.

Фирма *Pratt and Whitney* (США) разработала газогенераторы с керамическими лопатками соплового аппарата, с керамическими КМ в конструкциях жаровой трубы, роторов и выходных аппаратов. ФГУП «ММПП «Салют»» использует углеродокерамические КМ в конструкции ГТД (выходное устройство, элементы компрессора высокого значения, корпусные детали, спрямляющие и направляющие аппараты).

Температура стенок камеры сгорания ГТД составляет 600–700 °С, элементов жаровых труб > 950 °С, внешнего контура дисков турбин 630–930 °С. Лопатки из ККМ на основе SiC, Si₃N₄ могут работать без охлаждения при 1000–1300 °С (сплавы без охлаждения при 630–730 °С).

Использование таких ККМ в конструкции турбин высокого и низкого давления с $T_{\text{раб}}$ до 1400 °С потребует существенно меньшего расхода воздуха на обеспечение работы газогенератора, что позволяет увеличить тягу ГТД.

Эффективно применение ККМ SiC/SiC, Si₃N₄/SiC для форсажных камер ($T_{\text{раб}}$ 1730–2000 °С), теплоизоляционных экранов ($T_{\text{раб}}$ 1400 °С), деталей топливных коллекторов (термоциклы от 900–1000 °С до 100–300 °С), переизлучающих ТЗМ ВКС второго поколения (*Hermes*, *CEV*, Русь).

Из силицированных (осаждение SiC из пара CH₃SiH₃ при 600–850 °С в поры) – УУКМ изготавливают неохлаждаемые раструбы ЖРД (апогейные двигатели ракетополетов, ОАО «РКК “Энергия”»).

УУКМ, ККМ, УККМ эффективны как в качестве многоразовых переизлучающих (табл. 5.9), так и абляционных [21, 22] материалов.

Термоустойчивость ПКМ, ВПКМ определяется, в основном, термоустойчивостью полимерных матриц (рис. 5.12, 5.13) [23].

Стеклотекстолиты (60 %об. ткани Т-10) сохраняют приемлемый уровень конструктивных свойств в зависимости от температуры и типа связующего: фенольные ФН, ФФ, ФФ-А

Таблица 5.9. Свойства углекерамических композиционных материалов [22]

| Свойства | Типы КМ | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| | Гравимол ¹ | Гравимол-В ² | Карбосил ³ | SiC/SiC ⁴ |
| Плотность, ρ, г/см ³ | 1,7–2,0 | 1,7–2,0 | 1,65–2,0 | 2,0–2,1 |
| σ _{вн} , МПа, 20 °С | 90–100 | 118–140 | 270–350 | 500 |
| 1500 °С | 100–120 | 130–160 | 300–400 | 700 (1400 °С) |
| Прочность при 20 °С, МПа: | | | | |
| σ ⁺ | 24–30 | 35–50 | 150–200 | 350 (1400 °С – 330) |
| σ [–] | 100–130 | 100–130 | 160–230 | – |
| τ _{сд} | 32–45 | 25–33 | 12–16 | 35 |
| E* при 20 °С, ГПа | 20–25 | 24–30 | 60–80 | 90 (1400 °С – 100) |
| α·10 ^{–6} , °С ^{–1} | 3,5–4,7 | 3,0–3,6 | 1,6–2,0 | 3 (1 – 6) |
| λ, 20 °С, Вт/м·°С: | | | | |
| ⊥ | 11–18 | 17–22 | 11–13 | 7–8 |
| | 30–45 | 26–35 | 55–70 | 15–22 |

Примечания:

¹ Наполнитель – низко модульная углеродная ткань ТКК-2, для носка фюзеляжа ВКС фрагменты кока фюзеляжа диаметром до 1650 мм; УККМ гравимол структуры [0/90]_в, [0/60/120]_в, [0/45/90/135]_в, [+45/–45/0/0/90/0/0/90/0/0/–45/+45]_в (наполнитель – ВМН-4) имеет соответственно E_{вн} 8; 5,4; 5,6; 6,5 ГПа и σ_{вн} 170; 110; 110; 280 МПа.

² Наполнитель – среднемодульная ткань ТНУ-4, для кромок крыльев (в ВКС-22).

³ На основе высоко модульной высокопрочной ткани ТВМ. Материалы 1, 2, 3 получены газофазным осаждением в поры УУКМ SiC из CH₃SiH₃ при 600–850 °С (газофазное силицирование); в 1, 2, 3 – 45 %об. наполнителя (ФГУП «НИИ Графит»).

⁴ Материал *SEPCARBINOX* фирмы *SEP* (Франция) использован в створках асимметричного сопла с регулируемой площадью расширяющейся части турбореактивного ГТД с форсажной камерой ТРДДФМ88 в самолете *Refaele*; модификации – в многоразовой переизлучающей теплозащите ВКС *Hermes* [13].

при 200 °С в течение 200, 500, 750 ч, при 250 °С соответственно 50, 100, 200 ч; кремнийорганические СК-9А, СК-9Х, СК-9ФА, СК-10С при 300 °С в течение 2000 ч, при 350 °С до 1000 ч (СК-9ФА, -10С); полиимидные СП-97, АПИ-2, 3 при 300 °С — 2000 ч, при 350 °С — 100 ч, при 400 °С — 10 ч.

Стеклотекстолит ФН сохраняет конструкционные свойства при 350 °С:

| | 20 °С | 200 °С 200 ч | 250 °С 50 ч | 300 °С 10 ч | 350 °С 2 ч |
|----------------------------|-------|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| σ^+ , МПа | 350 | 240 | 250 | 170 | 130 |
| $\sigma_{\text{вт}}$, МПа | 2150 | 120 | 100 | 115 | 110 |
| E^+ , МПа | 1885 | 1340 | 1290 | 1400 | 1300 |

И при кратковременном одностороннем нагреве:

| Продолжительность нагрева, с | σ^+ , МПа при T , °С | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----|-----|
| | 400 | 600 | 800 |
| 15 | — | 290 | 220 |
| 60 | — | 230 | 150 |
| 310 | — | 244 | — |
| 325 | 285 | — | — |

Тепловой и температурный переход между «горячей» рабочей средой и стенкой конструкции в определенных пределах обеспечивают теплоизоляционные материалы с низкими значениями коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Эффективность ТИМ определяется соотношением толщины слоя ТИМ (Δ) и коэффициента теплопроводности (λ , Вт/м·К), величиной теплового сопротивления $R = \Delta/\lambda$, м²·К/Вт, равной количеству тепла, проходящему через единичную поверхность в единицу времени при разности температур в один градус.

Коэффициенты теплопроводности (λ , Вт/м·К) для различных ТИМ составляют: пенополистирол — 0,04; волокнистые ТИМ — 0,035–0,18; засыпные ТИМ — 0,1–0,25; вспененные, сотовые, полимерные ТИМ — 0,2–1,5 (рабочие температуры до 300–350 °С в зависимости от типа полимера); минеральные ТИМ: асбестовые — 0,11–0,16 (до 450 °С), шлаковата, плиты, стекловата — 0,15–0,25 (до 600–700 °С, стекловата — до 500 °С), базальтовая вата — 0,038–0,046 (до 700–900 °С), ТИМ на основе шамотных мулитокремнистых алюмосиликатных волокон — 0,07–0,15 (до 1350 °С), волокнистые ТИМ на основе мулитокорунда (до 1450–1600 °С).

Верхний предел применимости конструкционных металлических сплавов без тепловой защиты ограничен воздействием теплового потока около $2,5 \cdot 10^4$ Вт/м², который приводит к равновесной температуре $T_w \geq 1500$ К. Превышение этих параметров приводит к разрушению материалов (процесс абляции, начало при тепловом потоке выше 0,5 МВт/м²). Стали, титановые сплавы сохраняют приемлемый уровень упругопрочностных свойств при воздействии теплового потока величиной 0,20–0,25 МВт/м², сплавы алюминия — 0,14–0,16 МВт/м², ПКМ (в зависимости от состава) — 0,03–0,7 МВт/м² (абляция начинается при воздействии потока величиной 0,5 МВт/м² на термопласты, до 30 МВт/м² на углепластики). Углеродные КМ сохраняют конструкционные свойства с защитой от окисления до 1600 °С, ККМ (Si₃N₄/C, SiC/SiC) — до 1800 °С.

При воздействии тепловых потоков величиной менее 30 МВт/м² УКМ, ККМ эффективно переизлучают тепловую энергию (многоразовая переизлучающая теплозащита ВКС), более 30 МВт/м² — разрушаются (аблируют) с высокими значениями эффективной энтальпии ($H_{\text{эф}}$ > 83 МДж/кг).

Материалы, сохраняющие эксплуатационные свойства при воздействии тепловых потоков величиной более 30–100 МВт/м², отсутствуют. Работоспособность соответствующих конструкций обеспечивается использованием различных систем и способов тепловой защиты.

Тепловая защита — определенный способ блокирования или уменьшения потока тепла от окружающей среды к поверхности конструкции, основанный на использовании механизмов теплопередачи, осуществляемых теплопроводностью, конвекцией и излучением, в том числе реализуемых при различных их сочетаниях.

Теплопроводность — распространение тепла в объеме путем теплового движения молекул, атомов, ионов, электронов; *конвекция* — распространение тепла в объеме путем перемещения макрочастиц вещества; *излучение* — распространение тепла в объеме путем электромагнитных колебаний (часть внутренней энергии частиц вещества преобразуется в лучистую энергию, которая затем, попадая на другие частицы вновь преобразуется в тепловую).

Тепловую защиту обеспечивают простые и комбинированные средства, теплопоглощающие, теплорассеивающие, с газо- и гидродинамическим охлаждением, с расходом и без расхода массы, многоразовые (с сохранением геометрии, аэродинамического качества поверхности), одноразовые (абляционные). Основными системами теплозащиты являются [3, 4]:

1. Система теплового стока, основанная на использовании твердых теплопоглотителей, использует термоустойчивые материалы с высокой теплопроводностью, энтальпией перехода в жидкое (газообразное) состояние (плавление, кипение, сублимация), высокой тепловой активностью $b = \lambda^2 / \sqrt{a} = \sqrt{\lambda C_p}$.

Отвод тепла от поверхности в объем ТЗМ проходит благодаря высокой теплопроводности по закону Фурье $q_0 = -(\lambda \Delta T / \Delta n)$.

Максимальное количество тепла $Q_{\max} = m \int_{T_0}^{T_{\text{пл(субл)}}} C_p dT = m C_p (T_{\text{пл(субл)}} - T_0)$, поглощаемое системой, зависит от равномерного распределения температур между наружными и внутренними слоями при критерии Био (Bi) = $q_0 / \lambda \cdot T_{\text{пл,субл}} < 1$ (чем меньше значение Bi , тем вероятнее, что тепло пройдет через стенку, прежде чем ее температура превысит температуру, определяющую термоустойчивость материалов).

В качестве материалов системы теплового стока используют (сопловые устройства РДТТ, наконечники ГЧ БРДД и др., в скобках — энтальпия в кДж/кг, при температурах К плавления, сублимации): графиты, УУКМ — 8400 (3000), силицированные УУКМ — 4000 (2800), вольфрам — 1800 (3673), бериллий — 3700 (1570, высокая теплоемкость), медь — 350 (1350, высокая теплопроводность), карбид бора — 7000 (2715, высокая теплоемкость). Система имеет ограничения по массовым показателям, величине тепловых потоков, продолжительности нагрева.

2. Системы массообменного конвективного газо- и гидродинамического охлаждения. Системы обеспечивают постоянное аэродинамическое качество поверхности, многократность использования и предполагают использование охладителей (системы с замкнутым контуром, с регенерацией охладителя и системы с расходом охладителя). Количество тепла, отводимого от нагреваемых поверхностей жидкостью или газом, определяется массой и теплоемкостью охладителя и площадью теплоотдающей поверхности S и $q_0 \cdot S = m C_p (T_{\text{ст}} - T_{\text{охл}})$.

В качестве охладителей используют водород ($C_p = 15,5$ кДж/кгК), этанол, воду, расплавы (реализация теплоты испарения, кипения) натрия, серебра, лития ($Q_{\text{исп}} 20\ 500$ кДж/кг, $T_{\text{кип}} 1320$ °С).

Системы с расходом массы охладителя, когда рабочее тело (охладитель) подается навстречу потоку, эффективны при максимальных тепловых нагрузках (например, когда температура в критическом сечении ЖРД, работающих на кислороде и водороде, превышает 5000 °С), обеспечивают постоянно аэродинамического контура поверхности, контроль температуры поверхности (зависит от расхода и типа охладителя, но требуют сложных, тяжелых подводных и охлаждающих конструкций и предельно термоустойчивых материалов (табл. 5.4, 5.9).

Массообменный принцип охлаждения, когда навстречу набегающему потоку направляются (вдуваются) пары охладителя, газы, расширяющие сжатый слой, уменьшающие подвод тепла к защищаемой конструкции (эффект вдува, реализуется и при абляции всех типов жертвенных материалов) имеет место при пленочном, заградительном, пористом охлаждении, «самовыпотевании» [3, 7].

При пленочном охлаждении температура перфорированной стенки (шаг перфораций равен толщине пяти пограничных слоев, диаметр 1–2 мм) определяется температурой кипения жидкости, образующей пленку на защищаемой поверхности. Более эффективно защищаемые стенки изолируются от потока слоем холодного пара (газа) при заградительном охлаждении, когда охладитель вдувается по касательной, затрудняя перемешивание потоков и переход с ламинарного к турбулентному режимам обтекания.

При пористом охлаждении охладитель поступает из пор в защищаемых стенках (при использовании жидких охладителей реализуется теплота их испарения), для предохранения от окисления навстречу потоку вдувается аммиак (образование N_2 по схеме $4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$).

Наиболее эффективна при воздействии предельных тепловых потоков система самоохлаждения («самовыпотевание»), когда серебро в порах высокотермоустойчивых материалов (вольфрам) работает как теплопоглотитель (поглощение тепла на образование расплава), затем с образованием паров реализуется эффект вдува (ЖРД J-2 третьей степени PH Saturn 5).

При массообменном газодинамическом охлаждении эффективность определяется коэффициентом теплового блокирования:

$$\Psi = q_{iw}/q_{ko}$$

где q_{iw} — конвективный тепловой поток к поверхности раздела газ/жидкость–твердое тело; q_{ko} — конвективный тепловой поток к непроницаемой стенке.

$$\Psi = 1 - \beta \dot{m} \Delta i / q_{ko}$$

где \dot{m} — массовый расход охладителя в пограничный слой (скорость испарения); Δi — перепад теплосодержаний у стенки и внешней границе; β — коэффициент вдува.

В условиях внешнего ламинарного обтекания (M — молекулярная масса): $\beta_l = 0,67 (MM_{\text{воздуха}}/MM_{\text{охладителя}})^{0,5}$, турбулентного обтекания $\beta_r = 0,20 (MM_{\text{воздуха}}/MM_{\text{охладителя}})^\alpha$, причем $\alpha = 0,33$, если $MM_{\text{воздуха}}/MM_{\text{охладителя}} < 1$, $\alpha = 0,8$, если $MM_{\text{воздуха}}/MM_{\text{охладителя}} > 1$.

Расход массы охладителя при вдуве:

$$\dot{m} = (q_{ko} - q_{изл}) / (i_{\text{окл}^*T_w} - i_{\text{окл}^*T_0}) + \beta \Delta i.$$

Необходимо, чтобы пары (газ) охладителя имели минимальную молекулярную массу.

Вдв вносит существенный вклад и в эффективность абляции (см. разделы 5.3–5.5).

3. Система радиационного охлаждения использует способность нагретой поверхности излучать тепло.

Для абсолютно черного тела излучаемый поток — интеграл от плотности потока излучения:

$$q_R = \int_0^\infty I_{\lambda(T)} d\lambda = n^2 \sigma T^4,$$

где константа Стефана–Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴.

При определенных условиях, когда $\epsilon \cdot \sqrt{R} = 1,92 m^{0,5}$ [33], где ϵ — интегральная степень черноты; R — радиус затушения, поверхность находится в состоянии радиационного равновесия, излучаемый тепловой поток определяется как $q_R = \epsilon \sigma T_w^4$ (T_w — равновесная температура).

Эффективность системы радиационного охлаждения определяется термостойкостью используемых материалов. Когда $T_w = \sqrt[4]{q_0/\epsilon\sigma}$, радиационная составляющая набегающего потока переизлучается, материалы обеспечивают многократность использования. Систему

целесообразно использовать в условиях внешнего обтекания (из-за переоблучения T_w в камере сгорания РДТТ возрастает на 20%). Термоустойчивые переизлучающие углеродные и керамические композиционные материалы (УУКМ, ККМ $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$, в *Space Shuttle*, Буране; SiC/SiC — в ВКС *Hermes* — основной тип многоразовой (по расчетам до 100 спусков с орбиты) теплозащиты ВКС).

В зависимости от температуры элементов конструкции ВКС (рис. 5.14) при спуске с орбиты в течение 20–30 мин используются различные типы теплозащитных материалов (с покрытиями специального назначения — терморегулирующие, гидрофобные и др.).

Зона 1 — створки грузового отсека, боковые поверхности фюзеляжа, верхние обшивки крыльев, обшивки гондолы ЖРД.

FRSI (*Flexible Reusable Surface Insulation*), плитки 900×1200 мм из волокон *Kevlar 29*, *Nomex*, Фенилон, СВМ (ГТП, гибкие теплоизоляционные плитки) с покрытием из кремнийорганической резины.

Зона 2 — верхняя, передняя, средняя и хвостовая часть фюзеляжа, киль, гондла ЖРД системы орбитального маневрирования, некоторые участки верхних поверхностей крыльев.

AFRSI (*Advanced Flexible Reusable Surface Insulation*, 3-слойные гибкие листы с внешними и внутренними слоями из кварцевой ткани, наполнитель — пористый слой из спеченных кремнеземных волокон), *LRSI* (*Low temperature Reusable Surface Insulation*, тоже без покрытия с боридом кремния).

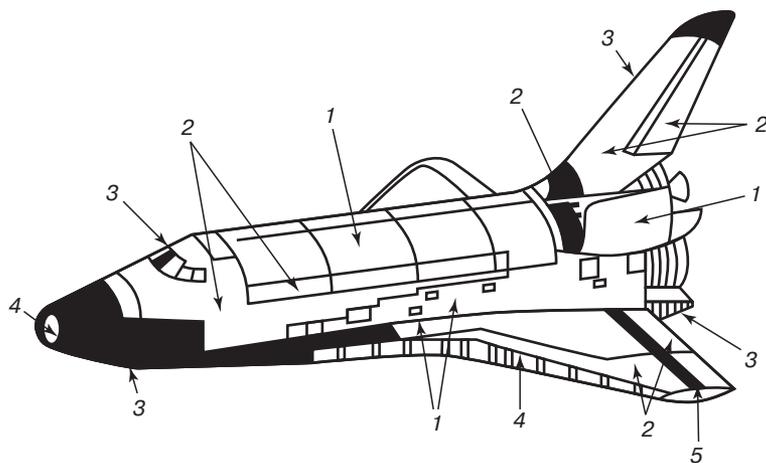


Рис. 5.14. Температурные зоны (1–5) и материалы переизлучающей многократной системы теплозащиты ВКС *Space Shuttle*, Буран [24–28]

| Зона | Температура поверхности, °С | Давление торможения, кПа | Площадь поверхности, м ² | Масса ТЗМ, кг | Тип ТЗМ США/Россия |
|------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------|--|
| 1 | 350–400 | 3,5–2,5 | 330 | 530 | <i>FRSI</i> /ГТП |
| 2 | 350–650 | 7–4 | 270 | 1100 | <i>LRSI</i> , <i>AFRSI</i> /НКП |
| 3 | 650–1250 | 3,5–2,1 | 480 | 5000 | <i>HRSI</i> , <i>FRCI</i> /ВКП, ТЗМК-10,25 |
| 4 | 1250–1650 | 5,6–2,3 | 40 | 1400 | <i>RCC</i> /Гравимол |
| 5 | 1800 | – | – | 10 | Абляционный материал |

Зона 3 — нижняя поверхность фюзеляжа и крыльев, носок, задняя кромка киля, передняя часть фюзеляжа.

HRSI (High temperature Reusable Surface Insulation), FRCI (Fibrous Refractory Composite Insulation), ККМ из спеченных при 1315 °С в течение 5 ч алюмоборосиликатных, Al_2O_3 — 62%, V_2O_5 — 4%, SiO_2 — 34% волокон, волокон *Nextel* диаметром 11 мкм, длиной 31 мм и кварцевых волокон диаметром 1–3 мкм, полученных раздувом Al–B–Si волокон с последующим выщелачиванием до содержания SiO_2 99,7%; различные модификации содержат 20–50% волокон первого типа.

ВКП, ТЗМК-10,25 (Россия) — высокотемпературные керамические плитки, состав которых близок к составу *HRSI, FRSI*.

Зона 4 — носовой обтекатель (*RCC*, Гравимол), передние кромки крыльев (*RCC*, Гравимол В, табл. 5.9). *RCC (Reinforced Carbon/Carbon)*, УУКМ, силицированный газофазным осаждением SiC в поры.

Зона 5 — зазор между элементами системы аэродинамического управления ВКС (элевоновые щели); абляционный материал (имидо- или феностеклосотопласты, ячейки заполнены композицией с 15 %масс. стеклянных полых микросфер, 20 %масс. дисперсные кварцевые волокна).

Теплозащитные материалы на конструкционные оболочки из алюминия приклеиваются через демпфирующий слой войлока из волокон *Nomex*, Фенилон (СВМ).

Положительный опыт использования переизлучающих теплозащитных материалов очевидно будет использован при разработке теплозащиты ВКС второго поколения, например, пилотируемого исследовательского корабля *CEV (Crew Exploration Vehicle)*, США, рис. 5.15) и транспортной системы «Русь» (Россия, один из вариантов на рис. 5.16).

Реально тела в каждом диапазоне длин волн λ излучают лишь часть плотности потока I_λ , а именно $\epsilon_\lambda I_\lambda$, где ϵ_λ — спектральная излучательная способность (степень черноты).

Значения спектральной степени черноты ϵ_λ и интегральной степени черноты ϵ_t различны, что используется для терморегулирования, обеспечения требуемого температурного режима конструкций (ДОС, КА дальнего космоса, космические телескопы и др.), в особых типах теплоизоляций, например (экранно-вакуумная теплоизоляция) ЭВТИ.

Различия в ϵ_λ и ϵ_t легли в основу разработки селективных терморегулирующих покрытий:

– черно-белых (покрытия солнечных котлов, поглощение волн 0,2–2,5 мкм, в ИК-черные, в диапазоне УФ и видимом — белые);

– бело-черных (белые в диапазоне УФ и видимого света, черные — в ИК-диапазоне, терморегулирование КА);

– бело-черные-бело-черные (преобразование солнечной энергии λ 0,4–1,2 мкм в электрическую; диапазон 0,4–1,2 мкм — черная поверхность, менее 0,4 мкм и более 1,2 мкм — белая, многослойные покрытия солнечных батарей [30, 31]).

4. Абляционная система теплозащиты — комбинированная система, обеспечивающая тепловой и температурный перепад между горячей рабочей средой и стенкой конструкции за счет поглощения тепла материалом, в котором происходят многочисленные эндотермические физико-химические фазовые и релаксационные процессы, процессы механического разрушения (расслаивание, растрескивание, выкрашивание) материала.

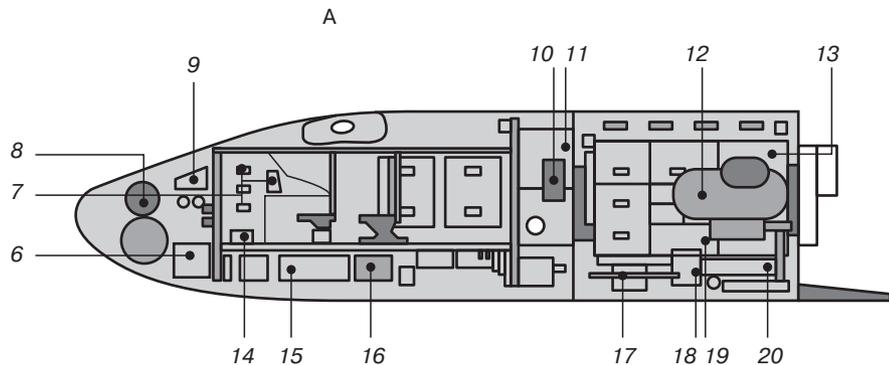
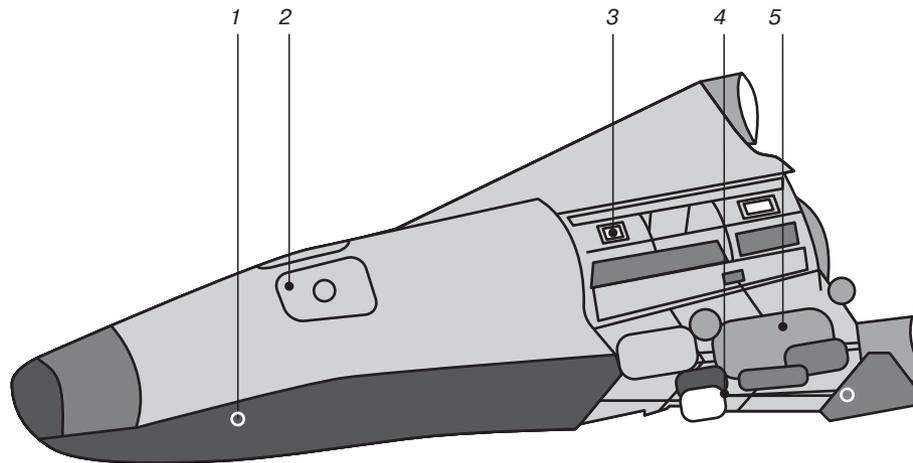
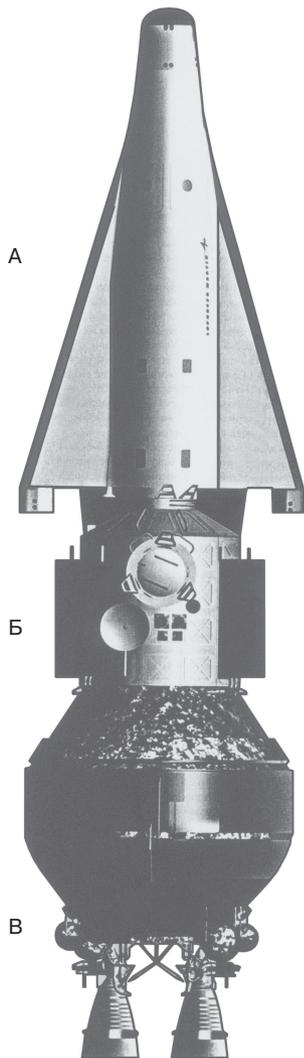
Абляция — саморегулирующийся процесс тепло- и массообмена между компонентами набегающего потока и компонентами материала, сопровождающийся разрушением материала.

Теплозащитная система, основанная на использовании абляционных (жертвенных) материалов, среди которых важнейшими являются полимерные материалы различных составов и структур, является наиболее эффективной (как в весовом отношении, так и с точки зрения параметров набегающих потоков) для защиты одноразовых конструкций от воздействия высокоскоростных высокотемпературных набегающих потоков (рис. 5.17–5.19).

Рис. 5.15. Пилотируемый ВКС второго поколения *CEV* (*Grew Exploration Vehicle*, фирма *Lockheed Martin*, консорциум *Northrop Grumman-Boeing, USA*)[29].

А — непланирующий модуль экипажа (4-6 астронавтов). Оборудован парашютами и воздушными подушками для посадки на землю или водную поверхность. Запускается отдельно от экспедиционного модуля Б и двигательной ступени В. После стыковки длина *CEV* 20 м, масса 40 т (замена *Space Shuttle*, первый полет после 2010 г)

1 — теплозащитный экран (многократная переизлучающая ТЗ); 2 — люк; 3 — иллюминаторы; 4 — закрылки; 5 — ЖРД; 6, 20 — подушки безопасности; 7 — система управления (авионика); 8 — ЖРД для маневров на траектории полета; 9 — «плавающие» мешки; 10 — парашют для сверхзвукового торможения; 11 — главные парашюты; 12 — бак для жидкого кислорода; 13 — система пожаротушения; 14 — система автономного управления; 15 — система терморегулирования; 16 — регенератор питьевой воды; 17 — клапан контроля давления; 18 — система запуска двигателя; 19 — топливные элементы энергоснабжения



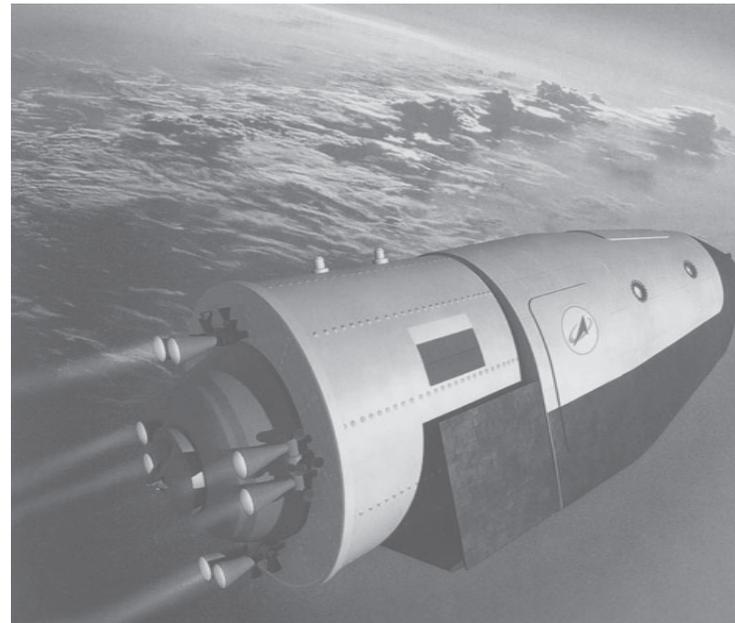
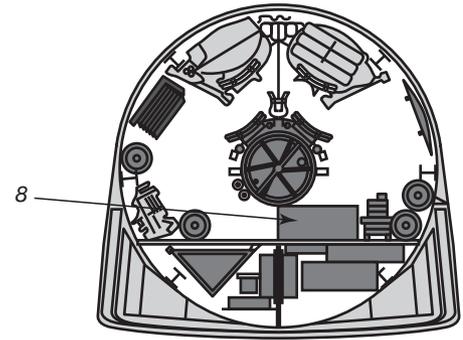
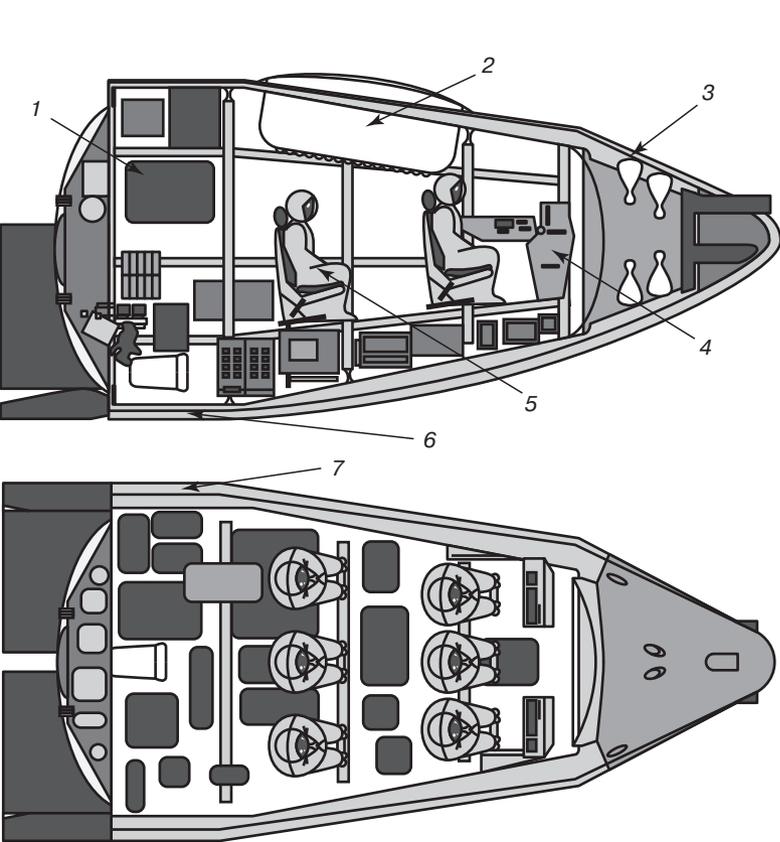


Рис. 5.16. Вариант перспективной транспортной системы РКК «Энергия» (Россия [29]:

1 — посадочный люк; 2 — парашютный контейнер (одноразовая парашютная система); 3 — двигатели ДПО системы спасения; 4 — пульт управления; 5 — поворотные кресла (6-7 космонавтов); 6, 7 — теплозащитный аэродинамический кран (лобовая ТЗ - одноразовая); 8 — приборы и оборудование

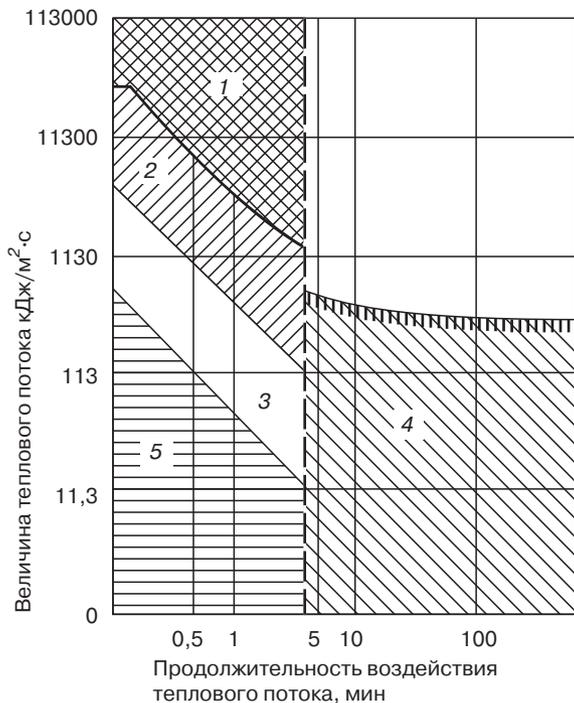


Рис. 5.17. Области применения теплозащитных систем различных типов в зависимости от величины теплового потока и продолжительности его воздействия [32]: 1 — абляционная система, массообменные конвективные системы с эффектом вдува (пленочные, заградительное охлаждение, «самовыпотевание»); 2 — абляционная система; система, основанная на теплопоглощении (тепловой сток); 3 — конвективные системы с эффектом вдува; тепловой сток; 4 — переизлучающие (многоразовые) системы; 5 — тепловой сток



Рис. 5.18. Относительная весовая эффективность различных систем теплозащиты в зависимости от продолжительности воздействия набегающего теплового потока [3]

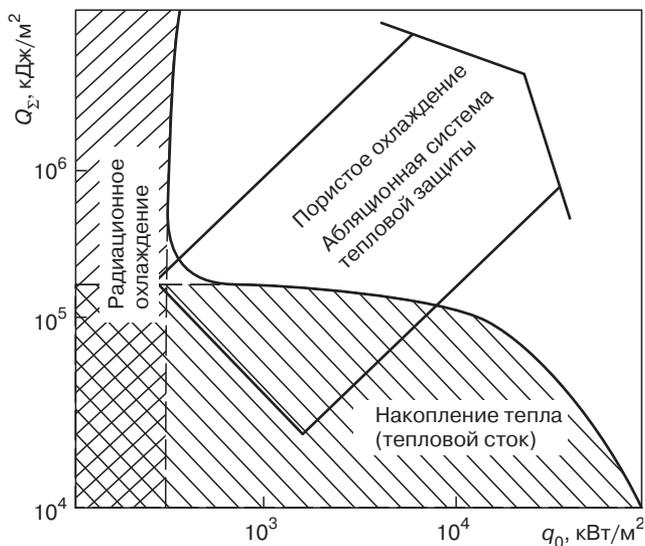


Рис. 5.19. Области применения различных систем теплозащиты в зависимости от суммарного количества подводимого тепла Q_{Σ} и удельного теплового потока q_0 [3]

5.3. Абляция. Критерии эффективности абляционных ТЗМ

При контакте «горячей» конструкции с набегающим гиперзвуковым потоком переход его кинетической энергии в тепловую приводит к нагреву конструкции. Равновесная термодинамическая температура незащищенной поверхности конструкции, как результат перехода кинетической энергии потока в тепловую, достигает 6000–7000 К (без учета диссоциации), 30 000 К (с учетом диссоциации). Температура поверхности защищенной ТЗМ, температура абляции T_w определяется составом ТЗМ и непосредственно температурой, при которой реализуется наиболее энергоемкое физико-химическое превращение компонентов ТЗМ (температурой кипения кварца 2750 °С при абляции кварцпластиков, температурой сублимации углерода из кокса и углеродных графитизированных волокон, >3000 °С при абляции углеродных волокон, температурой деполимеризации полимеров – 200–450 °С).

Тепло q_0 подводится к поверхности абляции при обтекании острого тела путем теплопроводности, конвекции и излучения, при обтекании затуленного тела – конвекцией и излучением (рис. 5.1). Доля тепла, передаваемого конструкции, определяется скоростью набегающего потока, его теплосодержанием.

$$q_0 = \frac{H_0 - H_{T_w}}{H_0} \cdot \alpha,$$

где H_0 – энтальпия набегающего потока; H_{T_w} – энтальпия ТЗМ при температуре абляции T_w ; α – коэффициент теплопередачи.

Тепло, подводимое к поверхности ТЗМ, поглощается им, но распространяется по объему ТЗМ с малой скоростью вследствие низкой тепло- и температуропроводности полимерных ТЗМ (например, теплопроводность кварцпластиков в 10 раз ниже теплопроводности кварца и в 80 раз ниже теплопроводности стали). Тепло аккумулируется тонким поверхностным слоем

(термический слой), в котором проходят различные (в зависимости от состава ТЗМ) физико-химические превращения компонентов ТЗМ (абляция).

Тепловой поток, поступающий к поверхности ТЗМ, поглощается, рассеивается и задерживается благодаря процессам тепло- и массопередачи с использованием механизмов теплопроводности (поглощение тепла за счет эффективной теплоемкости ТЗМ), конвекции (поглощение тепла на физико-химические и механические превращения компонентов ТЗМ с последующим вдувом летучих продуктов, образовавшихся в результате этих превращений, навстречу набегающему потоку, расширение сжатого слоя за счет эффекта вдува), переизлучения (с поверхности и из объема ТЗМ).

Абляция представляет собой саморегулирующийся процесс, в котором одномерный поток тепла, направленный к поверхности абляции, уравнивается движением в противоположном направлении потока тепла и массы, количественно определяемого теплоемкостью ТЗМ; теплом, поглощенным фазовыми превращениями (плавление, кипение, сублимация и др.) и химическими реакциями (деструкция, пиролиз и др.); теплом, уносимым парогазовыми продуктами этих превращений; теплом, рассеиваемым переизлучением ТЗМ.

Начальная стадия абляции связана с поглощением ТЗМ тепловой энергии, когда скорость подвода тепла к поверхности ТЗМ превышает скорость его отвода (нестационарная абляция). При постоянно продолжающемся подводе тепла к поверхности ТЗМ через время

$$\tau = a(1/V_a)^2,$$

где a — температуропроводность; V_a — линейная скорость абляции.

По толщине ТЗМ значения V_a , градиенты температур принимают постоянные значения (квазистационарная абляция) и абляционные свойства ТЗМ определяются температурой T_w абляции (зависит от состава ТЗМ), удельной эффективной теплотой (энтальпией) абляции $H_{эф}$, линейной или массовой скоростью абляции V_a , теплофизическими параметрами (a, λ, α, c_p).

При абляции тепловой поток q_0 , поступающий из окружающей конструкции высокотемпературной высокоэнтальпийной среды, поглощается, рассеивается и экранируется благодаря

- 1) теплопроводности в объем ТЗМ с поглощением тепла за счет эффективной теплоемкости q_r ;
- 2) расходу тепла на физико-химические (и механические — расслаивание, выкрашивание и т. п.), фазовые, релаксационные превращения компонентов ТЗМ, $q_{фх}$;
- 3) поглощению тепла продуктами физико-химических превращений компонентов ТЗМ, парами и газами, движущимися навстречу набегающему потоку, расширяющими сжатый слой, осуществляющие конвективный теплообмен благодаря эффекту вдува $q_{вд}$;
- 4) переизлучению с поверхности и из объема ТЗМ, $q_{изл}$. (рис. 5.20, 5.21).

В начальный период нагрева ТЗМ проявляет себя исключительно как поглотитель тепла, когда энергия, подведенная к поверхности, отводится внутрь ТЗМ и поглощается им за счет теплоемкости. Распространение тепла от поверхности в объем ТЗМ приводит к повышению температуры в поверхностном термическом слое δ_r , толщина которого мала (низкие значения λ , высокие значения c_p для полимерных материалов):

$$\delta_r = \lambda/c_p \cdot V_a,$$

где λ — теплопроводность ТЗМ; c_p — теплоемкость ТЗМ; V_a — массовая скорость абляции.

После разрушения термического слоя в результате комбинированного воздействия термических, химических и механических факторов, фронт абляции движется в направлении к защищаемой конструкции с определенной скоростью (V_a , линейная, мм/с, или массовая, г/с, скорость абляции), которая зависит от состава ТЗМ и параметров набегающего потока и определяет длительность эксплуатации теплозащитной абляционной системы.

Количество тепла, поглощаемое ТЗМ за счет механизма теплопроводности, мало и составляет:

$$q_r = mc_p(T_w - T),$$

где T — температура ненагретого материала.

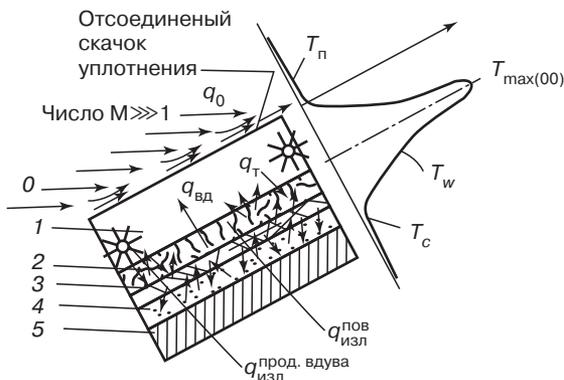


Рис. 5.20. Схема абляционного разрушения ТЗМ:

0 — невозмущенный поток; 1 — сжатый слой; 2 — пограничный слой; 3 — аблирующий (термический) слой ТЗМ; 4 — деструктурирующий слой (длина волокон наполнителя в ТЗМ определяет связь с исходным ТЗМ, обеспечивая прохождение эндотермических процессов).

Температуры: T_n — набегающего потока; $T_{\max(00)}$ — заторможенного слоя; T_w — поверхности ТЗМ; T_c — обратной стороны ТЗ.

Тепловые потоки: $q_{\text{изл}}^{\text{пов}}$ — излучение с поверхности ТЗМ; $q_{\text{вд}}$ — тепло, уносимое из ТЗМ продуктами вдува; $q_{\text{изл}}^{\text{пр. вдува}}$ — излучение нагретых газообразных продуктов вдува

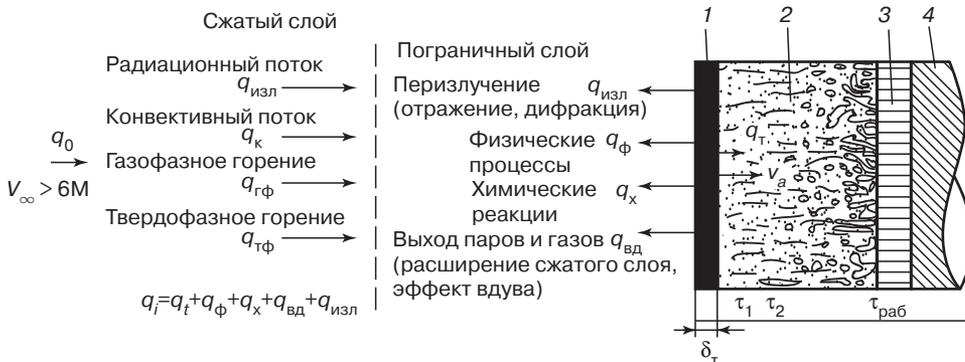


Рис. 5.21. Процессы, определяющие теплообмен и тепловой баланс при взаимодействии абляционных полимерных материалов с высокоскоростными высокотемпературными набегающими потоками [1, 9, 11, 33]:

1 — термический слой (толщина δ_t определяет минимальную длину волокон в ПКМ, обеспечивающих упругопрочностные свойства до температуры абляции T_w ; после прохождения в зависимости от состава ТЗМ физико-химических превращений компонентов ТЗМ перемещается внутрь теплозащиты с линейной (массовой) скоростью абляции v_a ; 2 — зона деструкции органических компонентов, выделение газообразных продуктов с последующим их вдувом навстречу набегающему потоку после нагрева ТЗМ за счет теплопроводности q_t ; 3 — исходный ТЗМ (в идеале уносимый со скоростью v_a с поверхности слоя теплоизоляции или конструкционного, слой 4, ко времени $\tau_{\text{раб}}$, в течение которого конструкция подвергается воздействию набегающего потока

Так как $c_p(T_w - T) = H_{T_w}$ — энтальпия (теплосодержание) ТЗМ при температуре абляции T_w , то $q_0 = mH_{T_w}$.

Аккумуляция тепла в тонком термическом слое позволяет реализовать при абляции более эффективные способы блокирования тепловых потоков, использующие механизмы конвекции и переизлучения.

Тепловой энергии, адсорбированной термическим слоем, становится достаточно для прохождения многочисленных энергоемких эндотермических физико-химических превращений компонентов ТЗМ. Каждый из процессов характеризуется определенными затратами тепла $q_{\text{фх}}$ (теплота плавления, кипения, сублимация и т. д.), которые не являются постоянными величинами. Они изменяются в зависимости от условий абляции, состава и структуры ТЗМ. По крайней мере, два процесса снижают эффективность абляции полимерных ТЗМ:

1) экзотермические процессы газо- и твердофазного горения ТЗМ при абляции с выделением тепла на поверхности или в пограничном слое;

2) механический унос части ТЗМ ϕ под действием давления и сдвиговых напряжений (расслоение, растрескивание, выкрашивание и т. д.) без фазовых изменений или химических реакций.

Количество тепла, поглощаемое ТЗМ на физико-химические превращения

$$q_{\text{фх}} = \phi m Q_{\text{фх}},$$

где ϕ — доля массы m ТЗМ, в которой произошли физико-химические превращения с тепловыми затратами, равными $Q_{\text{фх}}$ (в зависимости от состава и структуры ТЗМ $\phi = 0,6-1,0$, условно для сублимирующихся ТЗМ; расчетного аппарата для учета механических факторов, приводящих к уносу массы ТЗМ без физико-химических эндотермических превращений компонентов ТЗМ, не предложено).

Газообразные продукты, образующиеся в процессе абляции ТЗМ, диффундируют через высокотемпературный объем аблирующего ТЗМ, адсорбируют тепло, вдуваются в горячий пограничный слой, расширяя его, уменьшая его энтальпию и температуру (эффект вдува).

Количество тепла, поступающего в пограничный слой

$$q_{\text{вд}} = \phi m \beta \Delta i,$$

где $\Delta i = i_0 - i_w$; β — коэффициент вдува, $\beta = N(\text{ММ}_w/\text{ММ}_n)^\alpha$; N — показатель (коэффициент) газовыделения (газификации); ММ_w — молекулярная масса воздуха; ММ_n — молекулярная масса паров; α — коэффициент (показатель) газовыделения (газификации).

Для расширения пограничного слоя более эффективен ламинарный режим вдува, когда конвективный теплообмен между горячими компонентами пограничного слоя с теплосодержанием i_0 и относительно холодными вдуваемыми парами проходит без их перемешивания.

В условиях внешнего обтекания коэффициент вдува для ламинарного пограничного слоя

$$\beta_{\text{л}} = N(29/\text{ММ}_n)^\alpha,$$

где N — коэффициент газификации, равный $0,67 \leq N \leq 0,72$; α — показатель газификации, равный $0,25 \leq \alpha \leq 0,4$; ММ_n — молекулярная масса вдуваемых паров.

Когда ММ_n близок к молекулярной массе воздуха, равной 29, для турбулентного пограничного слоя $\beta_{\text{т}} \approx 0,33 \beta_{\text{л}}$ [33].

Определенная часть тепла, поступающая к абляционному ТЗМ, может им переизлучаться. Количество тепла, переизлучаемого с поверхности и из объема аблирующего ТЗМ, $q_{\text{изл}}$ зависит от температуры, отражательной способности, геометрии защищаемой конструкции, параметров среды:

$$q_{\text{изл}} = \sigma \epsilon T_w^4,$$

где σ — константа Стефана–Больцмана; ϵ — излучательная способность (степень черноты, $\epsilon = 0-1$); T_w — температура поверхности.

Энергия, рассеиваемая переизлучением, определяется свойствами структур, образующихся при абляции (кокс, прозрачность расплавов силикатов, сохраняющихся на поверхности абляции, соответственно до температур сублимации, кипения, наличие «окон» прозрачности в сжатом слое).

Процесс абляции представляет собой направленный одномерный поток тепла q_0 к поверхности абляции, который уравнивается движением тепла и массы m в противоположном направлении

$$q_0 = q_{\tau} + q_{\text{фх}} + q_{\text{вд}} + q_{\text{изл}} = mH_{T_w} + \varphi m Q_{\text{фх}} + \varphi m \beta \Delta i + \sigma \varepsilon T_w^4.$$

Взаимосвязь между скоростью потери массы и тепловым потоком характеризует эффективная теплота абляции (формула Адамса) [33]:

$$H_{\text{эфф}} = \frac{q_0}{m} = \frac{H_{T_w} + \varphi(Q_{\text{фх}} + \beta \Delta i)}{1 - \frac{\sigma \varepsilon T_w^4}{q_0}}.$$

Для многокомпонентных композиций с i -компонентами [2]

$$H_{\text{эфф}} = \frac{q_0}{m} = \frac{\sum_i \int_{T_0}^{T_w} c_{p_i} dT + \varphi(Q_{\text{фх}} + \beta \Delta i)}{1 - \frac{\sigma \varepsilon T_w^4}{q_0}},$$

где q_0 — поверхностная плотность теплового потока, поступающего к ТЗМ до начала абляции при температуре поверхности T_w ; тепловая энергия набегающего газового высокоскоростного потока как результат перехода его кинетической энергии в тепловую в точке торможения; m — масса ТЗМ, разрушенного и унесенного с поверхности в результате абляции; массовая скорость уноса массы ТЗМ при стационарной абляции при воздействии теплового потока q_0 ; c_p — удельная теплоемкость ТЗМ при постоянном давлении (для каждого i -компонента изменяется в интервале температур от начальной T_0 до температуры абляции T_w , зависит от состава ТЗМ, компоненты которого подвергаются при абляции многочисленным физико-химическим превращениям); φ — часть массы ТЗМ, в которой проходят физико-химические превращения компонентов при поглощении тепловой энергии набегающего потока ($1-\varphi$ — часть ТЗМ, в которой не проходят эндотермические физико-химические превращения компонентов, разрушающиеся за счет расслоения, растрескивания и др.); T_w — температура поверхности ТЗМ при абляции при воздействии теплового потока q_0 (зависит от состава ТЗМ, определяется температурой наиболее энергоемкого превращения — кипения, сублимации); $Q_{\text{фх}}$ — удельная теплота фазовых и релаксационных переходов в компонентах ТЗМ; затраты тепла на плавление, кипение, сублимацию, пиролиз, химические процессы взаимодействия компонентов ТЗМ, образовавшихся при абляции; дегидратация; эндотермические переходы кристалл-кристалл и др.); β — коэффициент вдува; количество ТЗМ, образующего при абляции газообразные продукты, осуществляющие эффект вдува, расширяющие сжатый слой, снижающие интенсивность теплообмена, зависит от молекулярной массы «вдуваемых» продуктов и газодинамических параметров потоков, их ламинарности или турбулентности; $\Delta i = i_0 - i_w$, величина, характеризующая разность теплосодержания, удельной энтальпии продуктов набегающего потока i_0 и продуктов вдува, образующихся при абляции ТЗМ, i_w ; $q_{\text{изл}}$ — поверхностная плотность теплового потока, излучаемого ТЗМ; $q_{\text{изл}} = \sigma \varepsilon T_w^4$, где σ — константа Стефана–Больцмана; ε — излучательная способность (степень черноты) аблирующего ТЗМ.

Эффективность абляционных ТЗМ оценивают следующими критериями:

1. Эффективная энтальпия процесса абляции — количество тепла, при поглощении которого в реальных условиях работы ТЗМ разрушается, превращается в другие вещества и удаляется с защищаемой поверхности единица массы (кг) ТЗМ.

$$H_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i \int_{T_1}^{T_2} q(\tau) d\tau}{\sum_i \int_{T_1}^{T_2} \dot{m}(\tau) d\tau},$$

где числитель — подведенное тепло; знаменатель — унесенная масса ТЗМ.

Величина q (подведенное тепло, интеграл от теплового потока в интервале от τ_1 и τ_2) и \dot{m} (унесенная масса, скорость разрушения ТЗМ) изменяются в процессе эксплуатации (при внешнем обтекании зависят от точки на траектории). Управление значениями q и \dot{m} позволяют создать так называемую программированную теплозащиту с максимальным весовым совершенством (каждый слой ТЗМ под конкретный тепловой поток).

2. Термохимическая теплота абляции. Критерий не зависит от скорости нагрева и эффектов излучения

$$H'_{\text{эфф}} = H_{T_w} + \varphi(Q_{\text{фх}} + \beta \Delta i).$$

3. Скорость абляции v_a , линейный унос, мм/с; массовый унос мг/с.

4. Безразмерный параметр скорости уноса массы (часто используется для оценки эффективности теплозащитных углепластиков)

$$\bar{G} = \rho V_a c_p / \alpha \approx 1/H_{\text{эфф}} \quad (\text{при } \alpha = q_0 - \sigma \epsilon T_w^4),$$

α/c_p — коэффициент теплообмена.

5. Защитный индекс — минимальная толщина (или масса) материала, необходимая для сохранения заданной температуры на тыльной стороне слоя материала в конце периода нагрева, или время достижения допустимой температуры на тыльной стороне слоя материала (характеризует время в секундах, в течение которого температура на обратной по отношению к набегающему потоку стороне слоя достигает уровня, определяющего термостойкость конструкционного материала: 150 °С — сплавы алюминия; 300 °С — полиимидные углепластики).

6. Параметр эффективности внутренней теплозащиты L (для оценки материалов РДТТ, некоторых типов ЖРД с абляционной системой ТЗ, критерии $H_{\text{эфф}}$ и G обычно не используются)

$$L = 1/v_a \rho.$$

где V_a — линейная скорость абляции; ρ — плотность ТЗМ

7. Эффективная теплоемкость и весовое совершенство теплозащиты.

Учитывая необходимость доставки конструкции с теплозащитой (масса ТЗМ ВКС 7,2–8 т, масса ТЗ асботекстолитов СКА первого поколения до 2 т, увеличение $H_{\text{эфф}}$ на 100 кДж/кг снижает массу ТЗ на 3–5%), реализуемой только на пассивном участке траектории, на орбиту с требуемыми параметрами, необходимость обеспечения работоспособности ракетоносителей на активном участке траектории, важнейшей задачей является разработка теплозащиты высокого весового совершенства. Эффективны ТЗМ с низкой T_w и высокой теплоемкостью c_p .

При низких температурах поверхности абляции T_w уменьшается толщина и масса теплоизоляции, но сравнительно низкие значения c_p требуют увеличения массы теплозащиты. При высоких значениях T_w необходимо увеличивать толщину и массу теплоизоляции и использовать материалы повышенной плотности с высокой теплоемкостью. В реальных условиях предпочтительна легкая теплозащита, T_w поверхности которой определяется составом и условиями нагрева и легкие теплоизоляционные материалы с высокими теплофизическими свойствами.

Способность ТЗМ локализовать тепловую энергию набегающего потока в тонком поверхностном слое (термический слой δ_t) с последующим перемещением его в течение времени t , определяет толщину слоя ТЗМ

$$\delta_{\text{ТЗМ}} = q_0 \tau / \rho H_{\text{эфф}},$$

где q_0 — скорость нагрева «холодной» стенки, характеристика набегающего потока, нагревающего конструкцию в течение времени τ , разрушающегося при абляции за время τ .

Толщина неразрушающегося слоя ТИМ, обеспечивающего теплоизоляцию

$$\delta_{\text{ТИМ}} = Q / c_p \Delta T_p,$$

где Q — количество тепла, аккумулированное материалом к концу периода нагрева, отнесенное к единице поверхности; ρ — плотность материала; ΔT — допустимое повышение температуры на тыльной, обратной по отношению к потоку, стороне слоя ТИМ. В качестве ТИМ эффективны материалы с низкими показателями a , λ и высокими c_p — газонаполненные полимерные материалы, соото- и сферопласты, эласты.

Масса абляционного слоя $m_{\text{абл}}$ определяется в значительной степени величиной $H_{\text{эфф}}$

$$m_{\text{абл}} = q_0 \tau / H_{\text{эфф}}.$$

Количество $m_{\text{ти}}$, дополнительного к материалу абляционной теплозащитной системы, необходимого для создания теплового и температурного перепада между аблирующим и конструкционным слоем, обеспечения определенных упругопрочностных показателей, надежности, коэффициента запаса, рассчитывают исходя из эффективных теплофизических свойств материалов ТЗ системы и используя опыт эксплуатации «горячих» конструкций ($m_{\text{ти}}$ дополнительная к $m_{\text{абл}}$ составляет для экспозиции в течение 20 с — 40%, 25 с — 25%, 120–300 с — 20%) [1].

Для решения проблемы весового совершенства теплозащитной системы ТЗС используют многослойные конструкции со слоями из легких материалов с оптимальными абляционными и теплоизоляционными свойствами.

$\delta_{\text{ТЗС}} = \delta_{\text{ТЗМ}} + \delta_{\text{ТИМ}}$, характеризуя их критерием эффективной теплоемкости $Q_{\text{эфф}}$ [1, 9]. Для максимально допустимой температуры на тыльной стороне защитных слоев

$$Q_{\text{эфф}} = q_0 / \rho \delta_{\text{ТЗМ}} + \rho \delta_{\text{ТИМ}},$$

где q_0 — суммарный тепловой поток к «холодной» стенке; ρ — плотность материалов; $\delta_{\text{ТЗМ}}$ — толщина теплозащитных (абляционных) слоев; $\delta_{\text{ТИМ}}$ — толщина теплоизоляционных слоев.

Критерий позволяет сравнивать массы теплозащитных систем различных типов.

Конструирование теплозащиты из абляционных ТЗМ требует учета большого количества различных параметров. Выбор конструкции теплозащитных слоев учитывает назначение ТЗ покрытия и функции, которое оно должно выполнять, а выбор типа ТЗМ определяется требуемым уровнем абляционных, теплофизических, конструкционных свойств. В предварительно отобранных ТЗМ определяются параметры, необходимые для дальнейшего конструирования и отбрасываются те композиции, которые не удовлетворяют эксплуатационным, технологическим, экономическим требованиям. Свойства ТЗМ оптимального состава используют для предварительного расчета толщины и массы абляционного слоя [2, 3, 7, 34, 35].

Расчет тепловых и химических составляющих процесса абляции многокомпонентных систем, изменяющих в процессе абляции свой состав и характеристики, с использованием представлений статистической термодинамики неравновесных процессов сложен, требует проведения корректировок с использованием экспериментальных данных.

Для отбора материалов и оценки их поведения при воздействии высокотемпературной среды используют газовые, плазменные горелки, стендовые реактивные двигатели, сверхзвуковые аэродинамические трубы с электродуговым обогревом (плазмотроны), гиперзвуковые тележки (рис. 5.22, 5.23).

Плазмотроны (сверхзвуковые аэродинамические трубы с электродуговым обогревом, ЭДУ) позволяют создавать тепловые потоки мощностью от 100 кВт до 10 МВт с теплоемкостью $i_{00} = 4000\text{--}200\,000$ кДж/кг, что дает возможность проводить испытания ТЗМ в условиях, имитирующих тепловые нагрузки при работе ракетных двигателей, при внешнем обтекании на активном участке траектории (q_0 до 1200 кВт/м², T_w — 500–1200 °С), при баллистическом

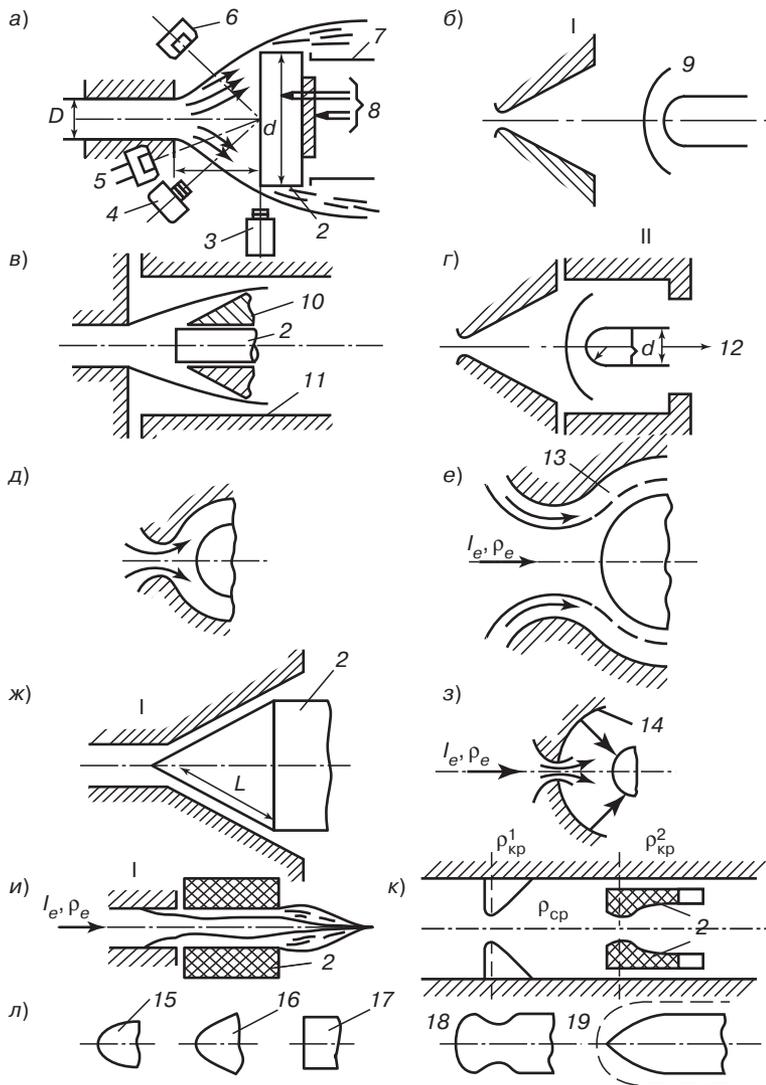


Рис. 5.22. Принципиальные схемы установок для испытаний теплозащитных материалов в потоке нагретого газа [3]:

а — испытания в дозвуковой свободно расширяющейся струе; *б* — разрушение образца в сверхзвуковой свободно истекающей струе; *в* — испытания в дозвуковом потоке закрытого типа; *г* — аэродинамическая труба с электродуговым нагревом газа; *д* — испытания образцов в щелевых каналах (сопле-кожухе); *е* — испытание крупных моделей с поджатием горячего газа к поверхности образца холодным потоком; *ж* — испытание конических моделей с охлаждаемым носиком; *з* — испытания образцов в условиях радиационно-конвективного нагрева; *и* — испытания образца в виде цилиндрического канала; *к* — испытания модели в виде профилированного канала; *л* — формы торцов образцов после испытаний;

1 — сопло; 2 — исследуемый образец; 3, 4 — следящая кинокамера; 5, 6 — пирометры для измерения яркостной и цветовой температуры; 7 — защитный кожух; 8 — термопары; 9 — ударная волна; 10 — охлаждаемый или разрушающийся защитный конус; 11 — кожух; 12 — вывод к вакуумным насосам; 13 — «газовый» кожух; 14 — эллиптическое зеркало; 15 — эллипсоид; 16 — конус с полусферическим затуплением; 17 — плоская поверхность с закругленной фаской; 18 — цилиндрическая поверхность со сферическим сегментом; 19 — форма торца при разрушении в турбулентном пограничном слое

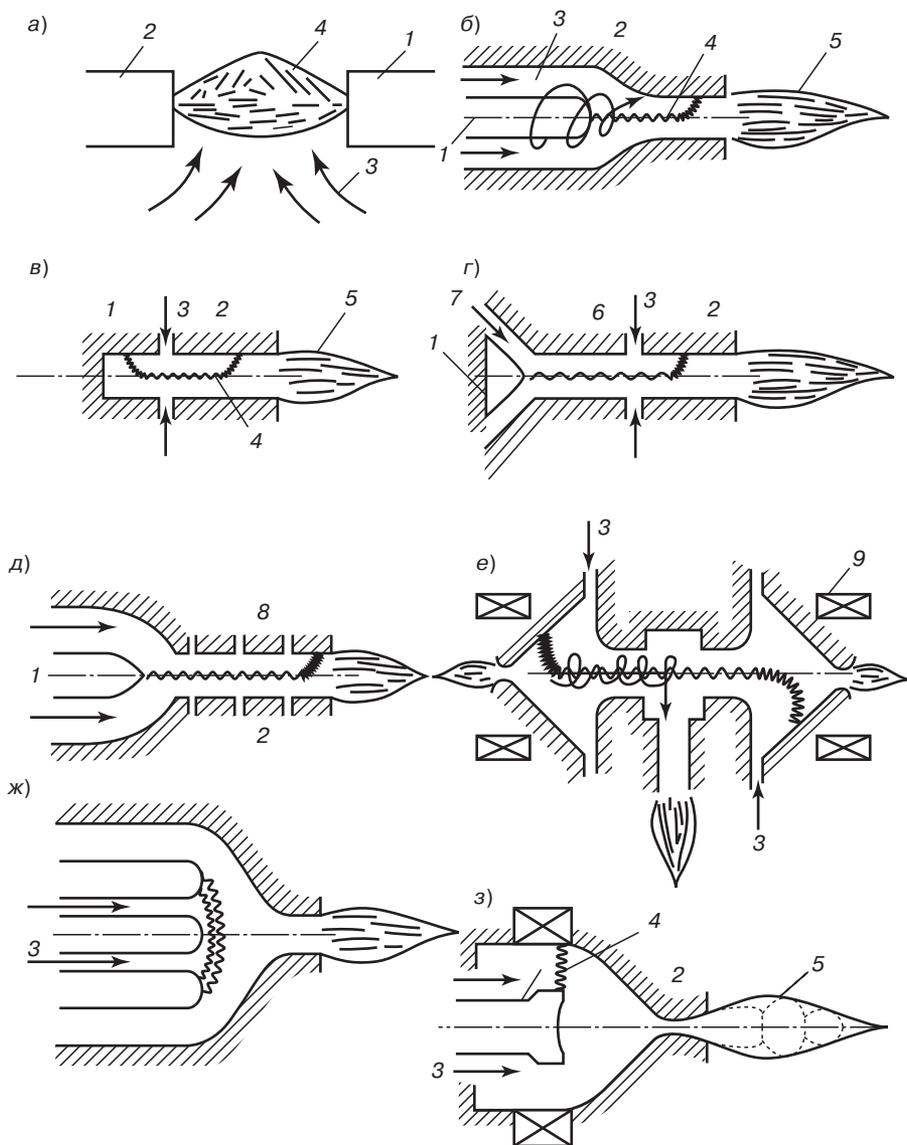


Рис. 5.23. Схемы электродуговых подогревателей газа [3]:

а — свободно горящая дуга; б — подогреватель со стержневым электродом и полым охлаждаемым анодом; в — электродуговой подогреватель линейного типа с вихревой стабилизацией дуги; г — подогреватель с защитой катода инертным газом; д — подогреватель с санкционированными межэлектродными нейтральными вставками; е — подогреватель с боковым выходом струи, работающий без примесей продуктов разрушения электродов; ж — электродуговой подогреватель на переменном токе с тремя электродами; з — коаксиальный плазмотрон высокого давления; 1 — катод; 2 — анод; 3 — вход рабочего газа; 4 — дуга; 5 — струя; 6 — электрически нейтральная вставка; 7 — дополнительный подвод инертного газа; 8 — межэлектродная вставка; 9 — магнитная катушка

спуске ГЧ, СА (суммарный тепловой поток $q_z - 200-400$ МВт/м² в течение 2–10 мин), при полубаллистическом спуске с использованием аэродинамического качества (до 1000 мВт/м² в течение 15–20 мин), при планирующей траектории (до 25 000 мВт/м² в течение 30 мин). При проведении экспериментов на плазматроне (см. рис. 5.22) получают зависимости $H_{эфф}$ от теплосодержания набегающего потока, то есть $H_{эфф} = f(\Delta i)$, рассчитывая величины $H_{эфф}$, используя данные эксперимента

$$H_{эфф.эксп} = \frac{q_0 - \sigma \epsilon T_w^4}{\rho v_a}, \text{ кДж/кг.}$$

Величины подводимых к образцу и регулируемых тепловых потоков q_0 рассчитывают, используя параметры плазматрона, чаще определяют калометрически, используя высокотемпературные калориметры с массообменным охлаждением (графитовая конструкция с охлаждаемыми стенками).

Определяют плотность ρ ТЗМ, температуру поверхности T_w (по яркостному свечению), скорость движения фронта абляции v_a (скоростная киносъемка), излучательную способность ϵ .

Для оценки $q_{изл}$ при абляции важен показатель интегральной излучательной способности ϵ_λ (для систем обнаружения, наведения в ИК-диапазоне используют значения спектральной излучательной способности ϵ_λ).

ϵ_λ определяют радиационным методом, проводя сравнительные измерения радиационным пирометром (содержит чувствительный к лучистой энергии приемник — болометр, последовательно соединенные термопары, градуированные по ЭДС, с помощью которого определяют температуру излучающего объекта) лучистой энергии, испускаемой исследуемым образцом ТЗМ и материалом с известным значением ϵ_λ :

$$\epsilon_\lambda = T_0^4 / T^4,$$

где T_0 — температура модели, измеряемая радиационным пирометром; T — истинная температура исследуемого образца ТЗМ, измеряемая оптическим пирометром.

$H_{эфф}$ зависит от перепада энтальпий Δi , причем участок «А», отсекаемый от оси ординат, характеризует количество тепла, необходимое для разрушения ТЗМ (теплосодержание ТЗМ), а угол наклона α определяет вклад в $H_{эфф}$ эффекта вдува (рис. 5.24):

$$H_{эфф} = A + \alpha \Delta i,$$

где $\alpha = 0,5-0,75$ для ламинарного потока и $\alpha = 0,2-0,3$ для турбулентного потока.

Биномиальные зависимости $H_{эфф} = f(\Delta i)$ конкретных ТЗМ приводятся в справочниках, а их анализ показывает, что практически не существует предела для тепловых нагрузок, при которых эффективно использование полимерных абляционных ТЗМ. Так, при росте Δi с 500 до 2200 кДж/кг $H_{эфф}$ возрастает в 3 раза (абляция фенольного кварцпластика, рис 5.24, 4).

После определения абляционных характеристик в испытательных устройствах проводят отбор конкретных теплозащитных композиций и некоторые предварительные расчеты с использованием критериев теплопроводности Био ($Bi = \alpha \delta / \lambda$), Фурье ($Fo = \alpha \tau / \delta^2$), параметра $b = 3Vi/3 + Vi$ [3, 34, 35].

При предэскизном проектировании массу ТЗМ определяют по формуле $m_{тзм} = \rho V_a S_{абл}$, используя значения линейной скорости абляции (например, для фенольного стеклотекстолита на основе кремнеземных волокон при $2000 \text{ К} \leq T_w \leq 6000 \text{ К}$, $v_a = 1,175 \cdot 10^{-7} - 0,205 \cdot 10^{-3}$ мм/с). Толщина $\delta_{тзм}$ абляционного слоя ($T_w = 2370$ °С, $v_a = 0,3920$ мм/с, $H_{эфф} = 27,9$ МДж/кг) из фенольного (связующее ФН) стеклотекстолита (70 %об. КТ-11, ρ 1430 кг/м³) при воздействии теплового потока $q_0 = 15\,900$ кВт/м² в течение 30 с составляет

$$\delta_{тзм(абл)} = \frac{q_0 \tau}{\rho H_{эфф}} = \frac{15\,900 \cdot 30}{1430 \cdot 27,9} = 0,0119 \text{ м (12 мм)}.$$

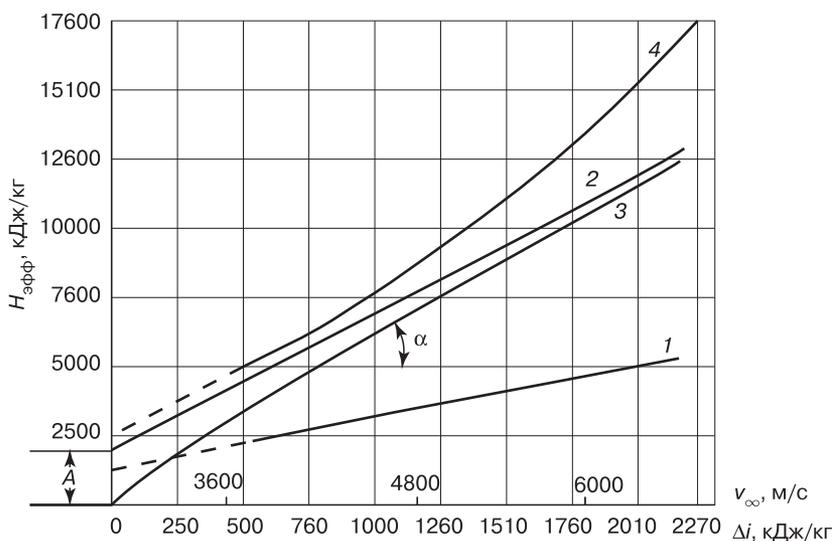


Рис. 5.24. Зависимость эффективной теплоты абляции $H_{эфф}$ полимерных ТЗМ от условий нагрева (Δi — разность теплосодержания компонентов потока i_0 и вдуваемых паров i_w [33]: 1 — фторопласт-4, тефлон (C_2F_4)_n; турбулентный поток; 2 — то же, ламинарный поток без горения; 3 — то же, с горением; 4 — фенолоальдегидный (30 % об.) кварцпластик (30% об. связующего), турбулентный поток

Из отобранных ТЗМ после определения комплексных характеристик (конструкционных, тепло-, электрофизических) изготавливают маломасштабные модели, которые испытывают в условиях, моделирующих реальные условия эксплуатации, и, используя данные испытаний, вносят изменения. Серийные изделия производят после изготовления и испытания с положительными результатами натуральных образцов [1].

На эксплуатационные свойства абляционных полимерных ТЗМ оказывают влияние тепловые, механические и химические факторы, сопровождающие процесс взаимодействия гиперзвуковых высокотемпературных потоков с ТЗМ. Численные значения параметров этих потоков изменяются в широких пределах в зависимости от областей применения защищаемых ТЗМ изделий (различные узлы РДТТ, головные, боковые, задние поверхности гиперзвуковых ЛА).

К тепловым факторам относят способ теплопередачи, тип теплового воздействия, скорость нагрева, суммарная тепловая нагрузка, продолжительность воздействия нагрева, теплосодержание набегающего потока. Если передача тепла к конструкции использует механизм конвекции, то эффективен способ ТЗ, обеспечивающий массопередачу в противоположном направлении, при использовании ТЗМ, образующих при абляции большой объем низкомолекулярных паров и газов (эффект вдува). Если тепло подводится и за счет излучения набегающего заторможенного потока, то эффективны ТЗМ, сохраняющиеся на защищаемой поверхности до высоких температур и переизлучающие тепло (газообразные продукты абляции фенольных материалов не мешают переизлучению фенольного кокса), тогда как отражение излучающего потока за счет эффекта вдува практически не дает результата (большинство продуктов вдува прозрачны для излучения).

Противодействие импульсным тепловым воздействиям оказывают многокомпонентные ТЗМ. При низких скоростях нагрева используют низкотемпературные сублимирующиеся ТЗМ, обеспечивающие низкие T_w , малое количество поступающего внутрь тепла благодаря хорошим теплофизическим свойствам и малой плотности. При высоких скоростях нагрева

из-за высоких линейной и массовой скоростей абляции вместо сублимирующихся ТЗМ используют ТЗМ с высокими абляционными свойствами.

Суммарный тепловой поток и продолжительность его воздействия определяют количество материала, необходимого для тепловой защиты конструкции.

Эффективность абляционных полимерных ТЗМ возрастают с увеличением энтальпии набегающего заторможенного потока и по этому параметру абляционная система теплозащиты не имеет ограничений (рис. 5.24).

Механическое воздействие набегающего потока приводит к уносу части ТЗМ без эндотермических физико-химических превращений. Эта часть аблирующего ТЗМ поддается математическому описанию только качественно, через определяемый экспериментально коэффициент ϕ (см. формулу Адамса); расчетные методы теплофизиков [3, 4, 7, 34, 35] требуют корректировок более значительных, чем при расчетах конструкций с использованием математического аппарата классического сопломата для упругих материалов и модифицированного сопломата для вязкоупругих материалов ПКМ, ВПКМ.

С увеличением давления P набегающего потока $H_{эфф}$ уменьшается, прежде всего, из-за уноса ТЗМ (растрескивание, расслаивание, выкрашивание) без физико-химических превращений, T_w повышается (для политетрафторэтилена $T_w \sim f \log P$), а движение потока приводит к появлению сдвиговых напряжений. Напряжения сдвига сдувают расплавы с поверхности абляции, вызывают эрозию поверхности твердыми частицами, разрушение карбонизованного слоя (кокса, особенно в сопловых блоках РДТТ). К механическим факторам относятся вибрационные и инерционные силы. Последние изменяют движение расплавов при ускорении и замедлении полета носовых конусов ракет, что изменяет их геометрию, радиус затупления (определяющий подвод тепла по механизму конвективного теплообмена) [36].

Химические факторы определяются высокой реакционной способностью набегающего потока, проявляющейся при его взаимодействии с полимерными аблирующими ТЗМ. Химически активные компоненты набегающего потока (диссоциированные, ионизированные, окисляющие компоненты плазмы диффундируют к поверхности абляции, рекомбинируют с выделением больших количеств тепловой энергии), попадая на поверхность абляции, инициируют экзотермические химические реакции (газо- и твердофазное горение, в определенных условиях основная причина разрушения и уноса ТЗМ), увеличивают скорость нагрева (дополнительный подвод тепла), ускоряют унос ТЗМ, снижают его эффективность. С учетом горения [33]

$$H_{эфф} = \frac{\frac{C_p T_w + Q_{Ф.х}}{1 + \frac{0,21Q_r}{\Delta i}} + \beta \Delta i}{1 - \frac{\sigma \epsilon T_w^4}{q_0} \left(1 + \frac{0,21Q_r}{\Delta i} \right)},$$

где Q_r — теплота сгорания на единицу массы кислорода.

Скорость абляции фенольного органотекстолита (ткань из алифатического полиамида Nylon, типа ПА-6) при воздействии воздушной плазмы в 10 раз выше, кислородной плазмы — в 25 раз выше скорости абляции при действии неокисляющей плазмы [33].

Когда поверхность аблирующего ТЗМ защищена сплошной пленкой расплава оксида (абляция ТЗМ с кремнеземными и особенно кварцевыми наполнителями, в меньшей степени смеси оксидов в расплаве асбеста), являющейся каталитически неактивной по отношению к рекомбинациям окисляющих компонентов, присутствие кислорода в набегающем потоке незначительно снижает $H_{эфф}$.

Отсутствие защитной оксидной пленки на поверхности аблирующего углепластика, несмотря на большую эффективность процесса сублимации углерода по сравнению с кипением оксида кремния, в реальных условиях эксплуатации снижает эффективность углепластиков (параметр уноса G для углепластиков 0,2–0,3, для кварцеластиков — 0,5–0,55).

Таблица 5.10. Значения эффективной энтальпии материалов, используемых для тепловой защиты некоторых ракетно-космических конструкций [10]

| Значения $H_{эфф}$, МДж/кг (типы материалов) | Типы защищаемых конструкций |
|---|--|
| 0,2–4 (наполненные эластомеры); 1,4–9 (некоторые типы стеклопластиков, асбопластиков, органо-пластиков, наполненные термопласты) | Внутренняя теплозащита стенок корпуса РДТТ, наружная теплозащита диафрагм, экранов, ферм и других элементов конструкции |
| 6–32 (фенольные, полиимидные, кремнийорганические абляторы с кремнеземными, кварцевыми, углеродными и графитизированными волокнами) | Наружная теплозащита стенок корпуса ГЧ и СА, входящих в плотные слои атмосферы Земли, стенок камер сгорания ЖРД небольшой тяги |
| 0,25–5 (ненаполненные термопласты, сублимирующие без коксообразования; ТТСП) | |
| 40–90 (комбинированные многослойные и модифицированные абляторы) | |
| 25–70 (углерод-углеродный композиционный материал); | Переизлучающая теплозащита ВКС (для сравнения) (см. рис. 5.14) |
| 1–7 (пористый кварцеволоконный керамический композиционный материал) | |
| 0,33–0,65 (алюминиевые сплавы) 0,7–0,86 (стали, титановые сплавы) | Стенки конструкций без ТЗ и ТИ (для сравнения) |

Большой ассортимент абляционных полимерных ТЗМ с широкими интервалами значений $H_{эфф}$ (табл. 5.10) позволяет обеспечить работоспособность одноразовых ракетно-космических конструкций различного назначения.

5.4. Типы полимерных абляционных теплозащитных материалов

Теплозащитные материалы всех типов предназначены для создания теплового и температурного перепада между горячей рабочей средой и стенками конструкций. Но если составы ТЗМ общего назначения предназначены для отражения набегающих тепловых потоков, то ТЗМ специального назначения выполняют еще ряд задач (радиопрозрачные — обеспечение связи и управления, радиопоглощающие — для имитации свободного пространства, ударопрочные, радиационно экранирующие — противодействие факторам ядерного взрыва).

ТЗМ всех типов — это многокомпонентные материалы, при нагреве которых на их поверхности и в объеме проходят многочисленные энергоемкие превращения.

Классифицировать ТЗМ целесообразно в зависимости от процессов, определяющих механизм абляции, физический смысл которых фиксируется различными вариантами формулы Адамса.

5.4.1. Сублимирующиеся ТЗМ

Для ТЗМ, аблирующих с переходом твердого материала в пар, газ, минуя образование жидких фаз, с определенной температурой такого перехода (с температурой сублимации) эффективная теплота абляции

$$H_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i \int_{T_0}^{T_{\text{субл}}} C_{p_i} dT + Q_{\text{субл}} + \beta \Delta i}{1 - \frac{\sigma \varepsilon T_w^4}{q_0}}$$

Параметр газификации ϕ в этом случае принимается равным единице. В реальных условиях эксплуатации все же имеет место быстрое испарение жидких фаз («сублимирующиеся» ТЗМ на основе эпоксидных смол кипят) и механический унос части ТЗМ.

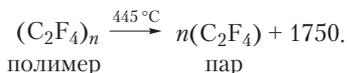
В зависимости от уровня тепловых нагрузок, передаваемых набегающим потоком, абляционные теплозащитные материалы, основным процессом при абляции которых является сублимация, образуют 2 разновидности: низкотемпературные низкоэнтальпийные (сублиматоры) и высокотемпературные высокоэнтальпийные (абляторы).

5.4.1.1. Низкотемпературные низкоэнтальпийные сублимирующиеся полимерные ТЗМ

На активном начальном участке траектории КА с работающими ракетными двигателями (и в некоторых рабочих их зонах) тепловые нагрузки q_0 не превышают 1000 кВт/м^2 , а равновесные температуры T_w находятся в интервале $750\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (перегрев ГЧ до $1200 \text{ }^\circ\text{C}$).

Относительно небольшие тепловые потоки (2-я космическая скорость) эффективно отражают легкие ТЗМ с невысокими значениями теплот физико-химических превращений, основной вклад в $H_{\text{эфф}}$ которых обеспечивается вдувом продуктов сублимации в пограничный слой; а сами сублимирующиеся ТЗМ имеют низкие тепло- и температуропроводность и высокую теплоемкость. Основой сублимирующих композиций являются полимеры, не образующие при деструкции жидкой фазы (низкая вязкость их расплавов не позволяет реализовать $Q_{\text{кин}}$, они легко сдуваются с поверхности) и твердых остатков (кокса), разлагающихся с образованием веществ с минимальной молекулярной массой. В качестве компонентов сублимирующихся покрытий используют термопласты, некоторые реактопласты (в виде растворов, порошков, волокон, тканей), деструктурирующиеся при относительно низких температурах с образованием большого объема низкомолекулярных веществ (водород, мономеры) и наполнители, позволяющие в достаточной широких пределах регулировать теплозащитные свойства — порошки термопластов, древесная мука, соли (NH_4HCO_3 , оксалаты, NH_4Cl), пробка (природный пенопласт, в 1 см^3 $3,28 \cdot 10^9$ ячеек диаметром $0,025 \text{ мм}$ с 14 непроницаемыми стенками, $\rho = 140\text{--}180 \text{ кг/м}^3$, $T_{\text{дестр}} = 290 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 0,031\text{--}0,04 \text{ }^\circ\text{C ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$, $^\circ\text{C}$, эффективна до воздействия 5000 кДж/кг), пылые микросферы стеклянные (внутренняя теплоизоляция и теплозащита, $T_{\text{раб}}$ до $3600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$), из отвержденного фенолоальдегидного реактопласта (для внешней теплозащиты, $T_{\text{раб}} = 500\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$).

Расчеты $H_{\text{эфф}}$ для однофазных сублимирующихся ТЗМ сравнительно просты [33]. Например, основным процессом при абляции политетрафторэтилена (фторлон-4, тефлон-4) при $445 \text{ }^\circ\text{C}$ является его деполимеризация при поглощении 1750 кДж/кг ($Q_{\text{дестр}}$)



Без учета переизлучения (низкая температура, $\varepsilon = 0,3$, большая молекулярная масса паров, равная 100, то есть в паре не только мономер)

$$H_{\text{эфф}} = C_p T_w + Q_{\text{дест}} + \beta \Delta i.$$

так как $C_p T_w = 0,25 \cdot 445 = 111$ ккал/кг = 466 кДж/кг, для турбулентного потока $\beta = 0,14$, для ламинарного потока $\beta = 2/3(29/100)^{0,25} = 0,49$

$$H_{\text{эфф}} = 2216 + 0,49 \Delta i, \text{ кДж/кг.}$$

При горении $C_2F_{4\text{нар}} + O_2 \rightarrow 2COF + Q_r$ выделяется 23 300 кДж/кг, что снижает $H_{\text{эфф}}$ и требует корректировки толщины и массы ТЗ. Температура T_w при турбулентном нагреве может быть примерно на 30% выше температуры при ламинарном нагреве.

Сублимирующиеся покрытия на крупногабаритные, негерметичные, тонкостенные, мало жесткие оболочки, поверхности обтекателей, приборных отсеков, турбонасосных агрегатов, приводов рулевых машин, боковые, задние поверхности РН (50–60% поверхности конструкций) наносят различными технологическими способами: напылением (пульверизацией), приклеиванием заранее сформированных полуфабрикатов, намоткой, центробежным формованием, экструзией (защита некоторых зон РД), шприцеванием (в полости, ячейки сот).

При нанесении низкотемпературных низкоэнгальпийных тонкослойных сублимирующихся покрытий Авкоут, Термолаг, Дина-Терм ($T_{\text{субл}}$ 100–950 °С, США), ТСП, ТТПС, ТПП (Россия) напылением (пульверизацией) используют жидкие композиции или растворы на основе сублимирующихся реактопластов (эпоксидные композиции), модифицированных термопластов, низкомолекулярных («жидких») каучуков с компонентами, позволяющими в достаточно широких пределах изменять как технологические, так и абляционные свойства (возможность создания многослойных тонкослойных «программированных» ТЗМ, составы которых в каждом слое обеспечивают оптимальные абляционные свойства, требуемые T_w для оптической защиты и ИК-обнаружения и т. д.).

Теплозащитные напыляемые композиции разработаны на основе:

1. Хлорсульфированного (сульфохлорированного) полиэтилена (из ПЭНП–ХСПЭ, ПЭВП–ПХС–Россия; Хайполон, США). После термообработки при 70–75 °С хлором и SO_2 полиэтилена (3–4 %-ный раствор в CCl_4) при снижении молекулярной массы до 20 000 г/моль модифицированный полиэтилен содержит 25–45% хлора (один атом Cl на 7–8 атомов углерода) и 0,8–2,2% серы (одна группа SO_2Cl на 90 атомов углерода). 15 %-ный раствор ХСПЭ в толуоле, ксилоле имеет вязкость 9 Па·с (3 %-ный раствор натурального каучука – 190 Па·с) используется для приготовления композиций, наносимых пульверизацией (см. табл. 5.11);

Таблица 5.11. Составы и свойства тонкослойных сублимирующихся теплозащитных покрытий (ТСП)

| Составы ТСП | Свойства ТСП | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| | ρ , г/см ³ | λ , Вт/м·К | C_p , кДж/кг·К | σ^+ , МПа | ε^+ | $H_{\text{эфф}}$, кДж/кг |
| 1. Кремнийорганическая резина + слюда | 1,2 | 0,2 | 1,2 | 20 | 0,5 | 50 |
| 2. Хлорсульфированный полиэтилен (ХСПЭ) + древесная мука + порошок ПММА (ТТПС-15) | 0,8 | 0,12 | 1,5 | 6 | 10 | 125 |
| 3. ХСПЭ + микросферы из отвержденной фенолформальдегидной смолы (МФ) + порошок полипропилена (ТТП-ФС) | 0,4 | 0,05 | 1,5 | 5 | 5 | 200 |

Окончание табл. 5.11

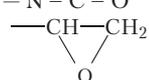
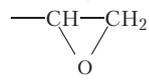
| Составы ТСП | Свойства ТСП | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| | ρ , г/см ³ | λ , Вт/м·К | C_p , кДж/кг·К | σ^+ , МПа | ε^+ | $H_{эфф}$, кДж/кг |
| 4. Латекс бутадиенстирольного каучука СКБС-Л+МФ | 0,5 | 0,08 | 0,45 | 15 | 150 | 210 |
| 5. СКБС-Л + САЖА | 1,0 | 0,2 | 0,4 | 50 | 130 | 300 |
| 6. ХСПЭ + древесная мука + порошок оксидов РЗЭ | 1,5 | 0,15 | 0,25 | 10 | 7 | 100 |

2. На основе жидких эпоксидных смол ЭД холодного отверждения (отвердитель — ПЭПА); СТП-ЭД (ЭД-22, ПЭПА, тиоколовый каучук НВТ-2), СТП-ЭДО (с оксалатом аммония), КТС.

(с многослойной капроновой тканью); покрытия эффективны ($H_{эфф}$ до 1900 кДж/кг) при воздействии тепловых потоков до 1000 кДж/м²;

3. На основе олигомерных («жидких») каучуков.

Каучуки со средней молекулярной массой (среднезвенные «плейнамеры») производятся модификацией всех традиционных типов высокомолекулярных каучуков [46]:

| Тип каучука | Марка каучука | Тип концевых активных групп в олигомерах, (используются для вулканизации) |
|---------------------------------|---|--|
| Сополимеры изопрена и бутадиена | 10–1000, ПДИ-ЗА, ЗАК, | $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$  |
| Бутадиеновый | ПДИ-ЧАК | $-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$ |
| | СКД-ОЭ |  |
| Бутадиеннитрильный | СКД-ГТР, Ж | $-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$ |
| | СКД-КТР, -1А | $-\text{OH}$ |
| | СКД-ГТРА | $-\text{COOH}$ |
| Бутадиеннитрильный | СКН-26-1А | |
| | СКН-28-1А | $-\text{COOH}$ |
| | СКН-3, -10, -30 | |
| Бутадиенстирольный | СКС-30 РПЖ, диенол С | $-\text{COOH}$ |
| Уретановый | СКУ-ПФЛ, -6, -7Л, -7П, ДФ-2 | $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ |
| Тиоколовый | НВБ, У-30 МСБ | $-\text{SH}$ |
| Диметилсилоксановый | СКТМ-1, -А, -БСП, СДС-4/2,5, -9/2,5, -9/10 | $-\text{OH}$ |
| Фторсилоксановый | СКФ | $-\text{COOH}$ |

Используются напыляемые композиции на основе изопренбутадиеновых (ТПП-ЭФ, каучук ПДИ-ЗАК, ЭД-20, полые фенольные микросферы), бутадиеновых (ТПП-БС, каучук СКБ с СООН-концевыми группами, водная дисперсия ZnO, полые фенольные микросферы), бутадиенинитрильных СКН-26,-40 (БК-31 с древесной мукой, ФК-36-65 со стеклотканью, теплозащита РДТТ-РД-18, Р-161 с СКН-26,40); на основе полиуретанов (СТП-ПГУ, -УР, $H_{эфф} = 3600$ кДж/кг). Эластичные листовые полуфабрикаты для теплозащиты обтекателя модуля «Квант» позволяют снизить массу конструкции до 760 кг (масса теплозащиты ТПП-ФС 825 кг). ТЗП «Савинит» (латекс СКН-3, фенольные микросферы БВ-01) приклеивают клеем ВК-3 к 3-слойной силовой оболочке модуля (стеклопластик АФ-10ВО, стеклосоты ССП-1, высота 40 мм, углепластик КМУ-4Л, клей ВК-3). Перед сбросом обтекателя с полета на высоте 80 км (T_w цилиндрической части 1700 °С) температура силовой оболочки не превышает 120 °С.

4. Особую группу ТТСП образуют термопластичные органотекстолиты. Несмотря на определенную эффективность фторлона-4 (тефлон-4), из-за коробления и срыва слоев пластины Ф-4 заменяют на ткани на основе волокон из Ф-42 ($T_{дестр} 360$ °С, заготовки из ткани фторлон-42 прессуют при 170 °С и 0,5 МПа, приклеивают или напрессовывают слои ткани на нижележащие слои теплозащиты (основной, специальной). Абляция при q_0 до 4200 МВт/м² проходит с равномерным уносом, а теплозащита на 20% легче асботекстолитовой. Для других условий нагрева используют оболочки, отформованные из тканей на основе волокон из полипропилена, ПЭТ, капрона (один из ранних вариантов реализации волоконной технологии).

5.4.1.2. Высокотемпературные высокоэнтальпийные сублимирующиеся ТЗМ

Необходимость обеспечения работоспособности конструкций ракетно-космической техники при воздействии на них тепловых потоков плотностью 40 и выше МВт/м² с удельной энтальпией 40–60 МДж/кг (теплозащита передних поверхностей — лобовые экраны, передние кромки элементов управления — 20–40 МВт/м², законечники ГЧ — 6–17 МВт/м²), равновесных температур 3000–3500 °С (сопловые блоки РДТТ), 4000–6000 °С (возвращаемые с орбит КА, рис. 5.5, табл. 5.2, 5.9) стимулировала разработку и использование высокотемпературных высокоэнтальпийных сублимирующихся ТЗМ. Их основой являются углеродные материалы — графиты, пироуглерод, стеклоуглерод и особенно углеродные композиционные материалы — углерод-углеродные, УУКМ, углеродкерамические УУКМ и их модификации, сочетающие высокие и регулируемые упругопрочностные свойства, термоустойчивость (при 20 °С — 340 МПа, при 2200 °С — 240 МПа, данные для КУП-ВМ) и абляционные свойства (реализация теплоты сублимации углерода, в УУКМ-теплот сублимации углерода из графитизированных волокон и углеродных, пироуглеродных, силицированных углеродных матриц).

Материалы на основе SiC/C, Si₃N₄, керамические КМ типа SiC/C, Si₃N₄/Si₃N₄, Si₃N₄/SiC реализуют эффект дуды благодаря парам, образующихся при кипении расплавов.

До температур около 1650 °С и q_0 до $2,5 \cdot 10^5$ Вт/м² углеродные материалы, УУКМ используются в качестве переизлучающих материалов многоразовой радиационной системы теплозащиты (табл. 5.9, рис. 5.14; (УУКМ при воздействии потока с теплосодержанием не более 20 000 кДж/кг в теплозащите ВКС и маневрирующих ГЧ практически не аблирует).

Если набегаящие потоки имеют гиперзвуковые параметры и температуры в точке торможения T_w достаточна для реализации перехода $C_{тв} \rightarrow C_{пар}$, то при 3000–3700 °С (в зависимости от структуры углеродных компонентов в УУКМ) проходит процесс сублимации

$$C_{тв} \rightarrow C_{пар} + Q_{субл} \text{ (теплота сублимации углерода).}$$

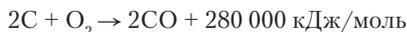
Эффективная теплота абляции:

$$H_{эфф} = 80\,000 + 5,2 \cdot \Delta i, \text{ кДж/кг}$$

(УУКМ в 35–40 раз эффективнее ТЗ на основе фторлона-4), линейный унос $v_a = 0,25\text{--}0,3$ мм/с в сопле РДТТ при 3300 °С (0,036–0,04 мм/с — в раструбе), безразмерный параметр уноса $G = 0,2$.

Высокие (регулируемые ориентацией углеродных наполнителей) значения тепло- (для УУКМ структуры 3Д λ при 500 °С — 80, 1500 °С — 46, 2000 °С — 37 Вт/м·К), температуропроводности ($a = 55\text{--}60 \cdot 10^{-6}$ м²/с) и T_w требуют использования теплоизоляции (λ в 300 раз больше λ стеклопластиков), что снижает показатели весового совершенства, несмотря на то что плотность УУКМ не выше 2 г/см³, а плотность кварцешластиков — 2,5 г/см³.

$H_{\text{эфф}}$ существенно снижается из-за твердо- и газофазного горения аблирующих углеродных материалов



и практическое использование углеродных материалов, УУКМ целесообразно при защите УУКМ от окисления и горения.

Для такой защиты используют:

1) газофазное осаждение пироуглерода (пироуплотнение, УПВ-углеродный, пиролитический, вакуумный УУКМ), карбида кремния, бориды гафния;

2) пропитка пористых полуфабрикатов:

а) металлами с последующей карбонизацией или оксидированием;

б) окислосоединяющими элементами (кремнием — силицирование, силицированные графиты СГ-М, -Т, -П, БСТ-30, ГАК, на основе коксо-пековых УУКМ по жидкофазной технологии ПРОТ 2400, ПГ 50, ГМЗ 2600, МГ-1, МПГ-6, ВО-ПГ, В-1), цирконием (цирконирование);

в) элементоорганическими связующими (карбосиланы, силазаны, карбораны);

3) пропитка фосфоорганическими соединениями;

4) обработка заготовок из УУКМ парами хлора, фреонов;

5) использование УУКМ с содержанием примесей не более 10⁻⁵ %ат (очистка вакуумированием).

При получении УУКМ используют различные полуфабрикаты из углеродных и графитизированных нитей в виде лент, тканей, в том числе объемной текстуры, каркасов, в которых нити ориентируются в различных направлениях (2Д, 3Д, 4Д, 5Д, 7Д, 11Д)¹, которые пропитываются (2–3, до 5–6 пропиток с последующим уплотнением) связующими с высоким содержанием твердого остатка после гидролиза (фенолоальдегидные, фенолокремний органические, карборансодержащие, пековые) и термообработываются (карбонизация при 850–900 °С, термовакуумная обработка при 450–500 °С и 100 мм рт. ст., графитизация при 2100–2200 °С, поверхностные уплотненные пироуглеродом при 1500 °С и 10 мм рт. ст. или силицирование) [15, 22, 37–45].

Наряду с ручной сборкой каркасов (рис. 5.25, 5.29) с использованием жестких стержней (пропитка нитей 15 %-ным водным раствором поливинилового спирта) освоено механизированное производство (рис. 5.26, 5.27) из углеродных нитей (например, УКН-5000) объемных заготовок: ЦОО (цельнотканая объемноармированная оболочка на круглоткацких станках), ЦТМЗ (цельнотканая многослойная заготовка на плоскоткацких станках), ТВП (каркас тканевый выкладочный прошивной), КИМФ (структура 3Д), ЗТП (3-мерная ткань прошивная), прошивные (ПУМ-2, -3, ЗТР) и вязальнопрошивные (УВПМ) материалы. Для структуры 2Д (слоистые УУКМ) используют многослойные углеродные ткани (в основном в абляционных углепластиках) УУТ2/ n , где $n = 4\text{--}10$, Урал ТМ/4-22 и другие.

Свойства УУКМ определяются типом волокон, матриц и ориентацией волокон в пироуглеродных, пековых, фенольных матрицах. Так, в УУКМ КУП-ВМ-ПУ (композиционный углеродный пиролитический высокомодульный с пироуглеродной матрицей, σ^+ нитей ВМН

¹ Эфффективность ориентации волокон в структурах 2Д-11Д стимулировала разработку мультиаксиальных (моноаксиальных-однонаправленных, биаксиальных-двунаправленных, триаксиальных-ориентация в трех направлениях, квадроаксиальных — четыре угла ориентации волокон) многослойных нетканых материалов «Армадон» (нити из Е-стекла), армирующих материалов фирмы METUX-TELATEX (нити углеродные, арамидные, стеклянные) с ориентацией нитей в направлениях 0°, 90°, +45°, -45° (от ±20° до ±90°) [68].

сохраняется на 8–10%) $\sigma^+_{\text{квп-вм}} = 30$ МПа, с пековой матрицей прочность нитей сохраняется на 80% и $\sigma^+_{\text{квп-вм}} = 120$ МПа. Линейный унос УУКМ с пироуглеродной матрицей 4,5 мм/с, с пековой — 3,2 мм/с, с фенольной матрицей (не графитизируется) — до 6 мм/с.

Свойства и применение некоторых типов УУКМ приведены в табл. 5.12–5.15 и на рис. 5.28–5.32.

Таблица 5.12. Сравнительные свойства УУКМ с различным составом матриц и наполнителей [37, 38, 41]

| Тип УУКМ | Свойство УУКМ | | | | | |
|--|----------------------------|------------------|------------------|-------------|--------------------|--|
| | ρ , г/см ³ | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | E^+ , ГПа | λ , Вт/м·К | $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹ |
| Структура 3D, матрица пироуглеродная, высокомодульные волокна | 1,75 | 75 | 200 | 30 | 6–8 | 2–3 |
| Слоистый 2D, матрица — пиролизованная фенольная, углеродная ткань | 1,50 | 80 | 185 | 23 | 5 | 6 |
| Слоистый 2D, матрица пиролизованная фенольная, высокомодульные волокна | 1,70 | 91 | 99 | 31 | 3,8 | 2,6 |
| Плетеная структура 4D из высокомодульных волокон, матрица — пироуглеродная | 1,8 | 100 | 200 | 42 | 10 | 4 |
| Графит ЦМ-Р (для сравнения) | 1,96 | 13 | 75 | 53 | 120 | 3,4 |

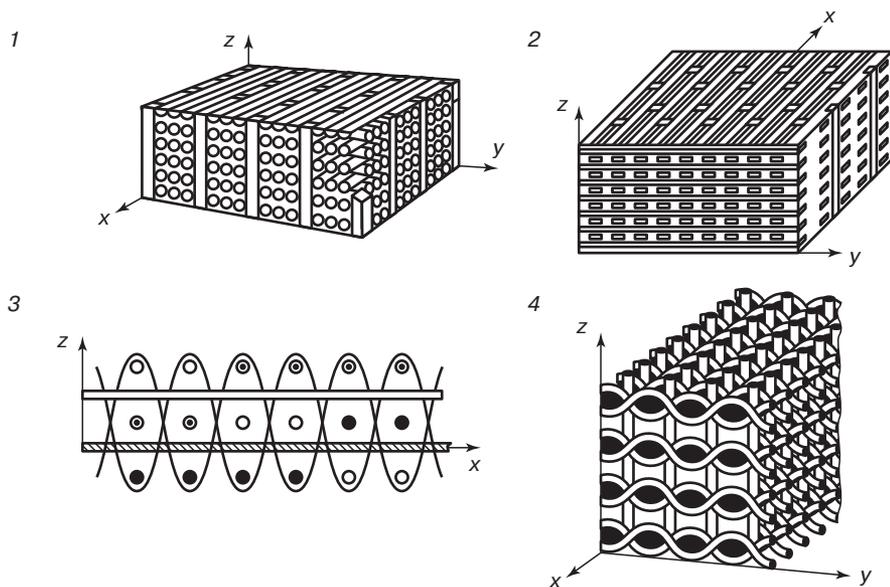


Рис. 5.25. Заготовки объемных текстур, образованные системой трех нитей, для последующей пропитки, карбонизации и графитизации [38, 39, 41]:

1 — текстура с неизогнутыми нитями, равномерно распределенными в объеме по направлению x , y , z (тип 1); 2 — то же, тип 2; 3 — текстура с неизогнутыми нитями по направлениям x , y , с изогнутыми — по направлению z ; 4 — текстура с оптимальным (в соответствии с расчетом) количеством неизогнутых нитей по направлениям x , y , z

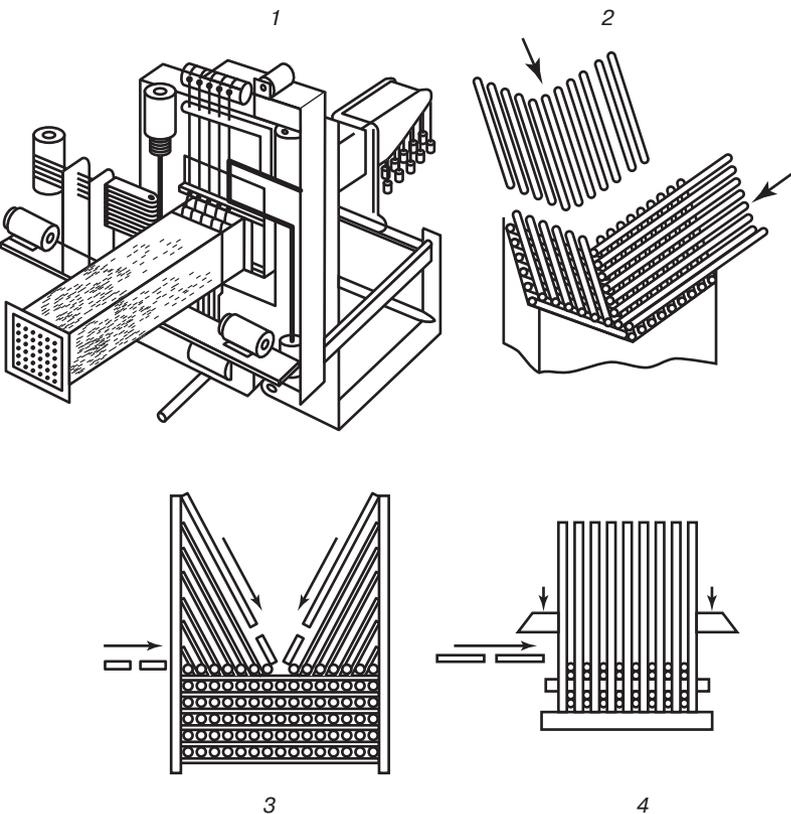


Рис. 5.26. Схемы получения прямолинейных пространственно-ориентированных структур [38, 39, 41]:

1 — методом плетения 3D; 2 — непрерывным способом (3D); 3 — на перфорированной плите (4D-Л); 4 — непрерывным способом (4D-Л)

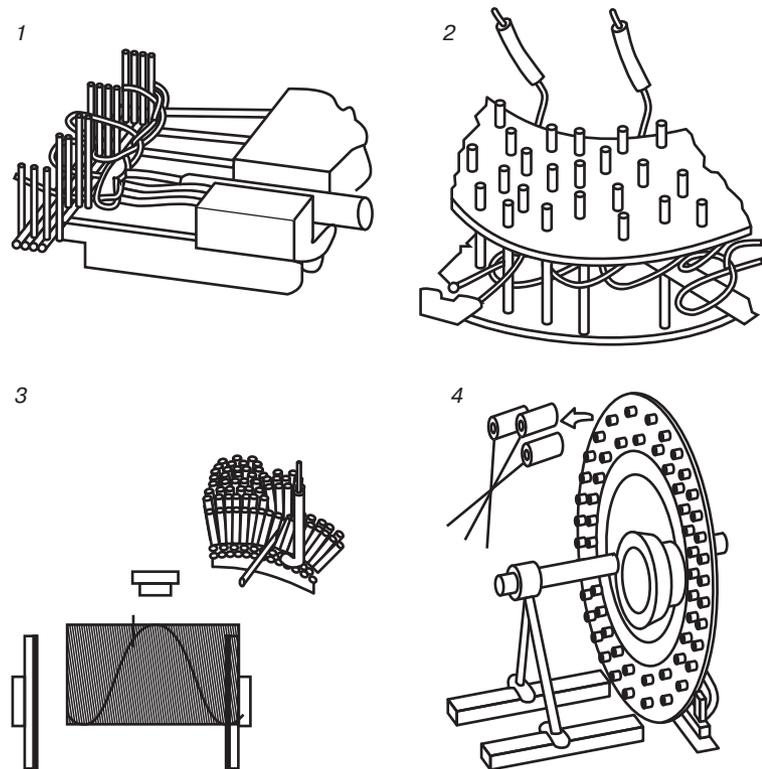


Рис. 5.27. Схемы получения криволинейных пространственно-ориентированных структур (ПАС) [38, 39, 41]:

1 — аксиально-радиально-оcкpужных (намотка между аксиальными стержнями); 2 — аксиально-спиральных (то же); 3 — радиально-спиральных (намотка радиальными элементами ПАС); 4 — радиально-аксиально-спиральных (укладка между радиальными ЭПАС)

Таблица 5.13. Сравнительные свойства конструкционных материалов при 20 °С

| Материалы | Свойства | | | | |
|----------------------------|----------------------------|------------------|-------------|--|-------------------------------------|
| | ρ , г/см ³ | σ^+ , МПа | E^+ , ГПа | σ^+/ρ , МПа·м ³ /кг | E^+/ρ , ГПа·м ³ /кг |
| Стеклоуглерод | 1,4 | 124 | 32 | 0,09 | 22,8 |
| Поликристаллический графит | 1,9 | 42 | 12 | 0,02 | 6,42 |
| УУКМ 2Д | 1,45 | 1350 | 175 | 0,93 | 120 |
| УУКМ 3Д | 1,85 | 250 | 90 | 0,14 | 48,5 |
| Эпоксидный углепластик 2Д | 1,56 | 1400 | 130 | 0,9 | 83 |
| Сталь ¹ | 7,8 | 1100 | 210 | 0,14 | 27 |
| Алюминиевые сплавы | 2,8 | 420 | 77 | 0,15 | 23,3 |

¹ Дисковые тормоза из УУКМ (для Boeing 747-400) на 40% легче стальных и выдерживают до 5000 посадок (стальные дисковые тормоза максимально — 1500).

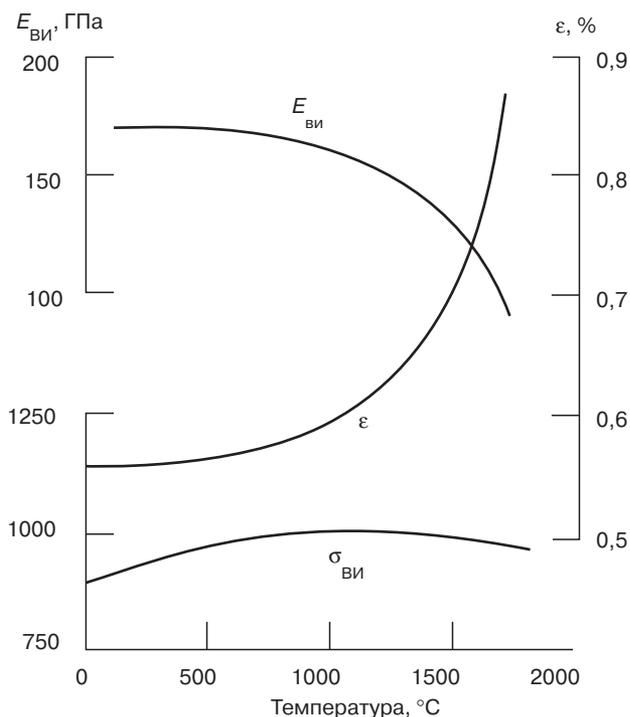


Рис. 5.28. Зависимость упругопрочных свойств типичных УУКМ от температуры

Таблица 5.14. УУКМ для конструкций предсупловых блоков РДТТ [37]

| Тип конструкции | | Тип УУКМ | σ^+ , МПа | σ^- , МПа | ρ , г/см ³ | λ , Вт/м·К | $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹ |
|--------------------------------|---------------------------|--|------------------|------------------|----------------------------|--------------------|--|
| Моноблок | КИМФ-МБ, Россия | УУКМ на основе 3D и пироуглеродной матрицы. Каркас изготовлен методом плетения высокомодульного жгута УКХН-5000 | 50 | 160 | 1,85 | 5–15 | — |
| Моноблок | <i>Sepcarb-570</i> , США | УУКМ на основе каркаса 3D из углеродных стержней. Многоцикловое уплотнение с использованием нефтяного пека, графитизация | 51 | 160 | 2,01 | 5–15 | — |
| Вкладыш критического сочинения | УПА-3, Россия | Вязаный углеродный каркас, насыщенный пироуглеродом | 5,6 | 22 | 1,97 | 11,5 | 5 |
| То же | Десна, Россия | Плетеный каркас 3D с матрицей из графитизированного пекового кокса, многократная пропитка под давлением, графитизация | 40,0–50,0 | 160 | 1,95 | 3–4 | 2,5 |
| — " — | <i>Pyracarb-903</i> , США | Стержневый каркас 3D с матрицей из графитизированного пекового кокса, многократная пропитка, графитизация | 25 | 155 | 1,95 | — | — |

Таблица 5.15. УУКМ для раструбов РДТТ [37]

| Тип УУКМ, структура тип наполнителя и матрицы | | | | Свойства | |
|---|--|---|---|----------------------------|------------------|
| | | | | ρ , г/см ³ | σ^- , МПа |
| КУП-ВМ-ПУ | Намоточная | Нить ВМН | Кокс фенолформальдегидной смолы, пироуплотнение | 1,4 | 120 |
| Заря | Каркас изготавливается на круглоткацкой машине | Основа-нить Урал-24. Уток-нить УКН-5000 | Пироуплотнение | 1,4 | 58 |
| ТВП-КМ | Тканевыкладочная прошивная | Ткань Урал-ТМ-4-22 | Кокс фенолформальдегидной смолы, пироуплотнение | 1,4 | 70 |
| ТВП | То же | То же | Пироуплотнение | 1,4 | 60 |
| Луч | Тканевыкладочная прошивная | Ткань УТ-900 | То же | 1,5–1,5 | 90 |
| Луч КМ | То же | То же | Кокс фенолформальдегидной смолы, пироуплотнение | 1,5–1,6 | 130 |

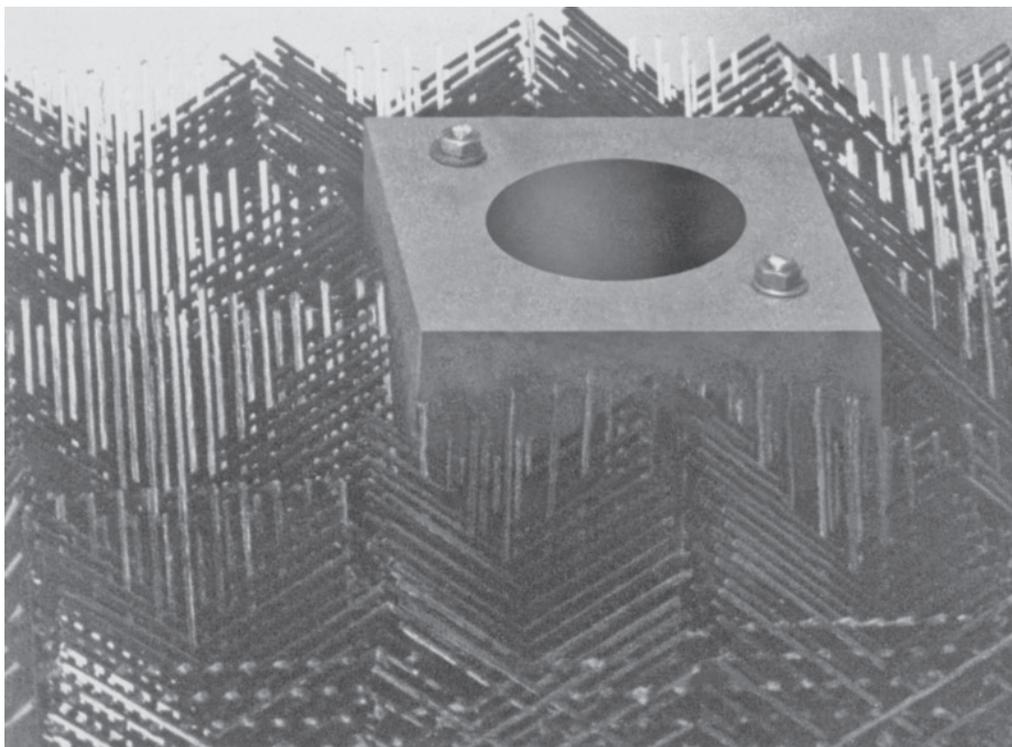


Рис. 5.29. Каркас структуры 4D из углеродных стержней (наполнитель в УУКМ *Sepcarb-200*) [14]

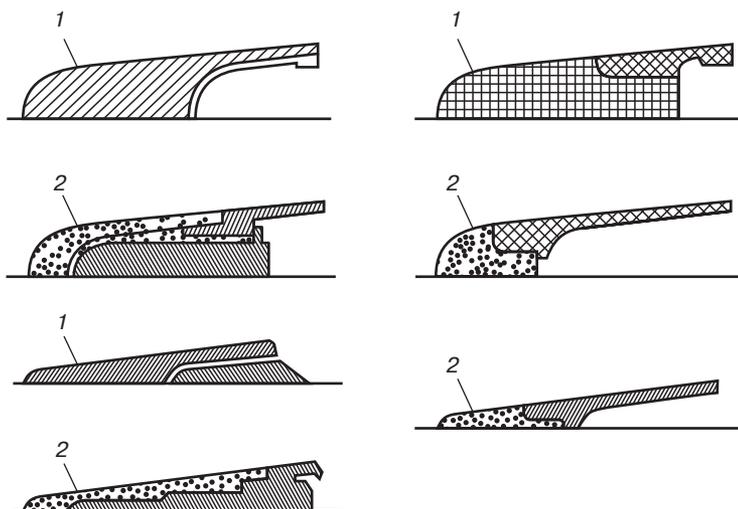


Рис. 5.30. Типичные формы наконечников головных частей баллистических ракет из углепластиков (1) и УУКМ (2) [11]



Рис. 5.31. Полуфабрикат (каркас из углеродных нитей) — наполнитель для изготовления раструба из УУКМ [14]

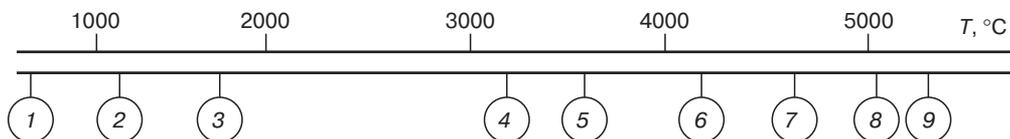


Рис. 5.32. Области применения УУКМ:

1 — фрикционные диски узлов торможения самолетов СУ-30М, ТУ-154, ТУ-160, ИЛ-96; 2 — неохлаждаемые сопла ЖРД; 3 — внешняя переизлучающая многоразовая теплозащита — ВКС и МАКС; 4 — сопла РДТТ установок залпового огня систем «Ураган», «Град»; 5 — сопла РДТТ зенитных комплексов «Игла», С-300, С-400 «Триумф»; 6 — сопла РДТТ СС-20, СС-24, СС-25, «Тополь»; 7 — первая стенка «Токамака»; 8 — Перспективные РДТТ; 9 — ГЧ БРДД, детали двигательных установок ядерных РД

5.4.2. Теплозащитные материалы, аблирующие через стадию плавления

С образованием расплавов аблируют керамические материалы, используемые для изготовления объемных изделий ракетно-космической техники (обтекатели головных частей, радио-прозрачные элементы конструкций, обеспечивающие связь, управление, наведение), и ТЗМ, разрушающие по смещенному механизму, в состав которых входят минеральные наполнители (кремнезем, кварц, асбест), теплозащитные стекло-, кварце-, асбопластики. Параметры процессов плавления и последующего испарения (кипения) расплавов в обоих случаях подчиняются общим закономерностям, но в случае абляции пластиков (см. раздел 5.4.3) имеют место дополнительные эффекты, определяемые особенностями абляции многокомпонентных материалов (изменение вязкости расплавов и их оптических характеристик, химические процессы между компонентами, конвективный теплообмен с участием газообразных продуктов абляции полимерной составляющей ТЗМ и др.).

Для ТЗМ, абляция которых проходит с образованием жидкой фазы,

$$H_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i \int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{пл}}} c_{p_i} \cdot dT + Q_{\text{пл}} + \frac{V_{\text{исп}}}{V_{\text{пл}}} (Q_{\text{исп}} + \beta \cdot \Delta i)}{1 - \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot T_w^4}{q_0}}$$

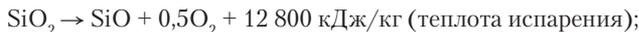
Параметр газификация ϕ в этом случае определяются соотношением скорости испарения $V_{\text{исп}}$ (кипения, $V_{\text{кпн}}$) и скорости плавления $V_{\text{пл}}$.

При оценке тепловых затрат на плавление ($\Delta Q_{\text{пл}} = K_1 \cdot T_{\text{пл}}$, $K_1 = 10$ кДж/г·атом·К и на испарение $\Delta Q_{\text{исп}} = K_2 \cdot T_{\text{исп}}$, $T_{\text{исп}} \approx 2T_{\text{пл}}$, $K_2 = 80-90$ кДж/моль·К) очевидно, что эффективность ТЗМ этого типа определяется способностью расплава сохраняться на поверхности абляции вплоть до реализации наиболее энергоемкого процесса — кипения расплава.

Основными типами ТЗМ, абляция которых приходит через стадию плавления, является кварцевая, алюмооксидная керамика, ситаллы, материалы, из которых изготавливают «сухим», «полусухим» прессованием, шликерным литьем, электрофоретическим формированием (головные обтекатели, радиопрозрачные ГЧ, эксплуатируемые длительно при умеренных температурах обтекатели ракет на наружной подвеске, затем кратковременно в окислительной среде при $T > 1000$ К (табл. 5.7, 5.16, рис. 5.33).

Использование оксида кремния (кремнезем, кварц) эффективнее использования оксидов алюминия, магния и др.

Основной режим уноса кварца при абляции — испарение и взаимодействие с кислородом



$$H_{\text{эфф}} = 3500 + \kappa \Delta i, \text{ кДж/кг,}$$

где

$$\kappa = 1,28(i_0/R \cdot T_0)^{1,54} (p_0/p)^{-0,14},$$

где $i_0/R \cdot T_0$ — характеризует энтальпию торможения, энтальпию набегающего потока; тепло затрачивается на испарение; p_0/p — характеризует эффекты за счет давления торможения, вдув паров в сжатый слой.

При близких значениях $T_{\text{пл}}$ и плотность кипения тепловые затраты на абляцию SiO_2 в 2–3 раза выше (молекулярная масса поров SiO_2 40–50 г/моль, при расчетах используются тепловые затраты на абляцию кг материала; $Q_{\text{моль}} = Q_{\text{кг}}/\text{MM}_{\text{пар}}$), чем при абляции других оксидов.

Наименее эффективны материалы, которые быстро плавятся, а затем медленно испаряются (кипят). Повышение температуры приводит к снижению вязкости расплава, который уносится с поверхности абляции в жидком состоянии без реализации затрат тепла на энергоемкие

Таблица 5.16. Свойства различных марок кварцевой керамики [48]

| Свойства | Марки керамики | | | | |
|---|------------------------------------|----------------|--------------|-----------------|-----------|
| | ВИО ² Korn- ing 7941 | НИАСИТ- 8ПП | ТСМ-107, 108 | Поликера- мы | ТСМ 983 |
| ρ , г/см ³ | 1,7–2,0 | 1,9–2,1 | 1,9–2,2 | 1,96–2,1 | 1,87–2,1 |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа, 290 К | 30–50 | 30–80 | 15–63 | 50–80 | 30–80 |
| $\sigma_{\text{вн}}$, МПа, 130 0К | 30–50 | 90–110 | 31–78 | 80–100 | 90–110 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹ , 300–1200 К | 0,56 | 0,5–0,6 | 5,1–6,0 | 0,5–0,7 | 0,5–0,7 |
| E^* , ГПа | 20–70 | 27–55 | 15–62 | 30–55 | 24–50 |
| α_k , кДж/м ² | 1–3 | 0,8–1,5 | 0,8–1,1 | 1,0–1,5 | 0,8–1,2 |
| λ , Вт/м·К | 0,7–1,3 | 1,1 | 0,6–1,5 | 1,1 | 1,15–1,50 |
| C_p , кДж/кг·К при 300–1100 К | 0,7–1,3 | 1,3 | 0,43–1,55 | 0,7–1,3 | 1,13–1,20 |
| μ | 0,17 | 0,15–0,16 | 0,17 | — | 0,17 |
| ϵ_p , 600–1100 К | 0,5–0,6 | 0,5–0,6 | 0,85 | 0,5–0,6 | 0,95–0,99 |
| ϵ , 10 ¹⁰ , Гц ¹ | 2,7–2,9 | 3,1–3,4 | 3,38–3,70 | 3,4–3,5 | 3,3–3,55 |

Примечание:

¹ Для всех типов $\text{tg } \delta_\epsilon$ при 10¹⁰, Гц равно 0,010.

² Все марки ВИО-12, -12М, -18М, -15, -18, -21, -27, ТСМ (кроме *Korning* 7941) – Россия.

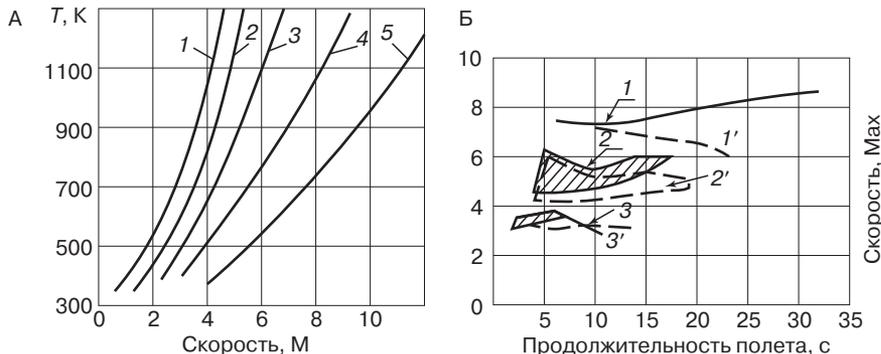


Рис. 5.33. Температура поверхности ГЧ в зависимости от высоты (1–10, 2–15, 3–30, 4–45, 5–60 км) и скорости полета (А) и соотношения скорость-продолжительность полета ГЧ без разрушения конструкции (Б) обтекателя из кварцевой керамики (1, 1') ситалла (пирокерам 9606, 2, 2') и алюмооксидной керамики (3, 3') [48]:

1, 2, 3 – угол пуска 20°; 1', 2', 3' – угол пуска 80°

процессы испарения и кипения. Это сопровождается снижением количества паров (осуществляющих конвективный теплообмен) и коэффициента вдува β .

Скорость испарения $V_{\text{исп}}$ пропорциональна упругости паров P_i над поверхностью расплава, $V_{\text{исп}} = f(P_i)$. Скорость плавления $V_{\text{пл}} = f(1/\eta)$ коррелируется с вязкостью расплава η , определяющая скорость движения слоя расплава.

В зависимости от температуры вязкость расплава кварца [9, 33] $\eta = 0,495 \exp(4837/T, \text{К})^{264}$ Па·с и при температуре плавления (выше 1720 °С) составляет $0,1 \cdot 10^{7.5}$ Па·с. В интервале $T_{\text{пл}}$ (1720 °С)– $T_{\text{кип}}$ (2300 °С) расплав испаряется, при $T > 2200$ °С – кипит (вязкость $0,1 \cdot 10^5$ Па·с).

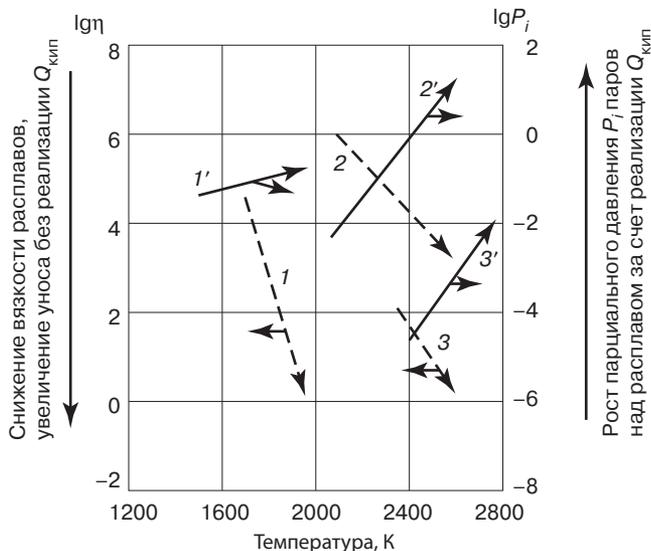


Рис. 5.34. Зависимость вязкости расплавов ($\lg \eta$, 1, 2, 3) и парциального давления паров над ними ($\lg P_i$, 1', 2', 3') от температуры для смесей оксидов (асбест 1, 1'), кварца (2, 2') и Al_2O_3 (3, 3')

Парциальное давление паров P_i над расплавом [9, 33] $P_i = 10\,332 \exp(18,48 - 5780/T, \text{K})$, кг/м² зависит от температуры и определяет скорость испарения $V_{\text{исп}}$ (рис. 5.34).

Эффективность ТЗМ, образующих при абляции расплавы, определяется согласованием скоростей плавления $V_{\text{пл}}$ и испарения (кипения) $V_{\text{исп}}$ расплавов. При сравнительно низкой температуре плавления вязкость расплава смеси оксидов в составе асбеста резко снижается (при абляции фенольных асбопластиков расплавы асбеста «загущаются» продуктами пиролиза фенольного реактопласта), большая часть его сдувается с поверхностями абляции (парциальные давления поров около 10^{-1}) при 1800 °С.

При 2200–2600 °С из-за низкой вязкости расплава Al_2O_3 и низкому парциальному давлению паров над ним расплав Al_2O_3 сдувается с поверхности практически без кипения.

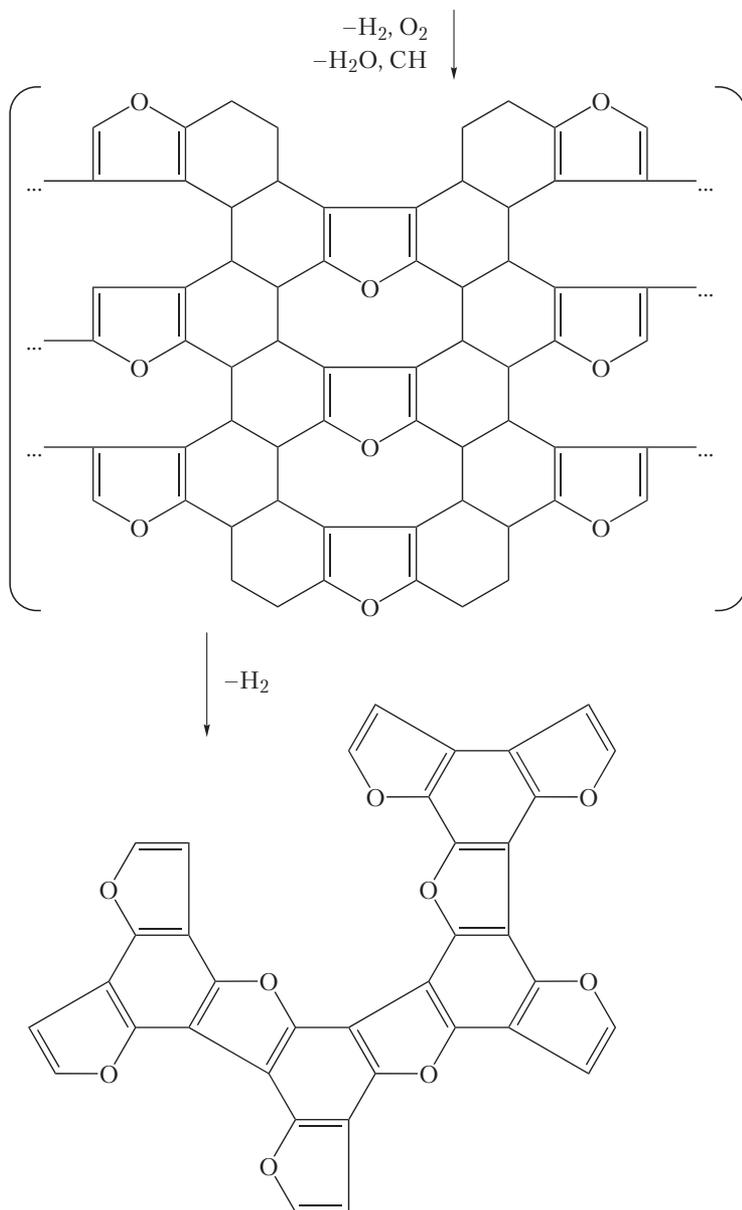
При 2600–2800 °С вязкость расплава кварца достаточна велика и, аккумулируя подводимое тепло, он интенсивно кипит (рис. 5.34; зависимость 2).

Согласование протекания процессов плавления и кипения керамик с высоким содержанием SiO_2 (кремнезем, кварц) предопределило их широкое использование в различных типах ТЗМ.

5.4.3. Теплозащитные материалы, аблирующие по смешанному механизму

Для ТЗМ, аблирующих по смешанному механизму без определенной температуры, меняющейся в зависимости от состава, к которым относится ПКМ с минеральными (кремнезем, кварц, асбест), углеродными и графитизированными, органическими наполнителями в виде порошков, волокон, тканей различной текстуры, в том числе многослойных, объемной текстуры

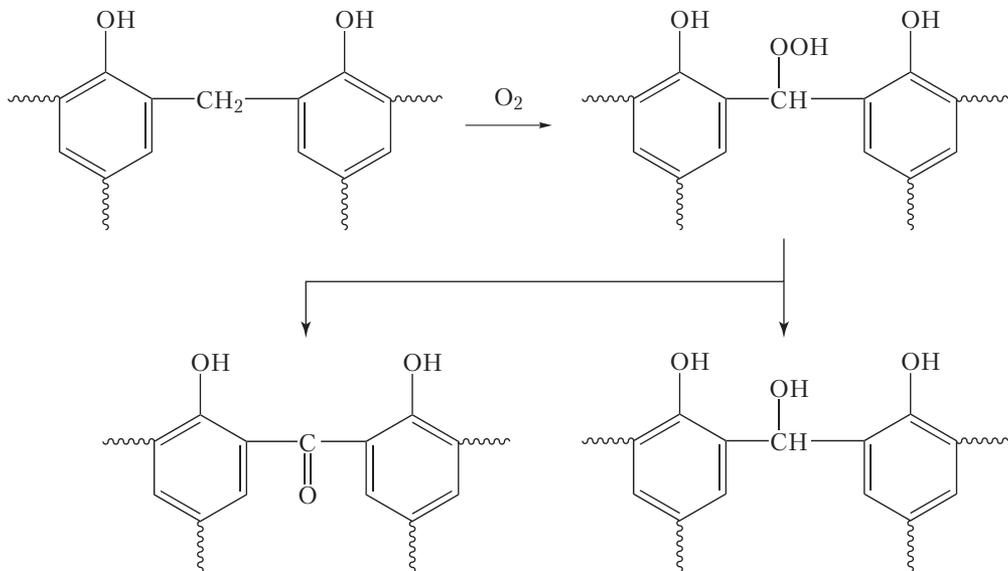
$$H_{\text{эфф}} = \frac{\sum_i \int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{фх}}} \cdot dT + Q_{\text{пл}} + \frac{\dot{m}_{\text{исп}}}{m_{\Sigma}} (Q_{\text{исп. субл}} + \beta \cdot \Delta i)}{1 - \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot T_w^4}{q_0}}$$



Среди реактопластов фенольные связующие занимают ведущие позиции в производстве высокотемпературных абляционных ТЗМ, что связано с их доступностью, сравнительно простыми условиями переработки и способностью образовывать при деструкции в зависимости от состава 40–60 % масс. прочного кокса. Стабилизация структуры благодаря рекомбинации начальных продуктов деструкции в термически устойчивые используются как в контролируемых процессах получения пиролитических материалов типа УУКМ, так и в саморегулирующимся

процессе абляции. При нагреве с начальными продуктами синтеза фенольных полимеров пространственного строения происходят следующие превращения [8, 50–53]:

1. При 150–180 °С происходит образование полимера сетчатого (густосетчатого, пространственного) строения (отверждение смеси олигомеров) реакцией метилольных групп (в резолах) с образованием структур со связями Сар-Сал (в CH_2), бензофеноновыми, гидроперекисными



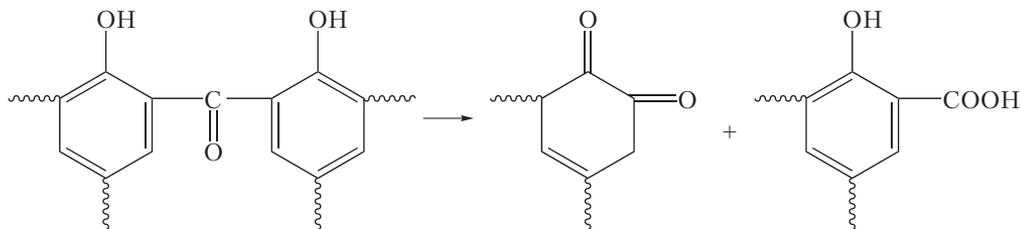
При 180 °С с выделением CH_2O фенольные циклы соединяются метиленовыми группами (ИКС фиксируют структуры с 4-замещенными бензольными циклами). При отверждении новолачных смол, в которых отсутствуют метилольные группы, при нагревании до 300 °С число заместителей в бензольных циклах не изменяется (при 300 °С основными летучими продуктами является ацетон, пропилен, пропанол, бутанол, до 400 °С — вода и CH_2O). Отвержденный фенолоальдегидный реактопласт — полимер пространственного строения с плотной сеткой Сар-Сал-связей и связей Сар-О-Сар (за счет конденсации фенольных гидроксильных групп).

2. При 420–440 °С деструкция начинается по связям Сар-Сал, с отрывом групп OH, независимо от соотношения алифатической и ароматической частей в структуре отвержденного реактопласта (резкое увеличение потерь массы при 420–440 °С при разрыве связей Сар-Сал имеет место и при деструкции полиэтиленов), с образованием свободных фенильных и бензильных радикалов.

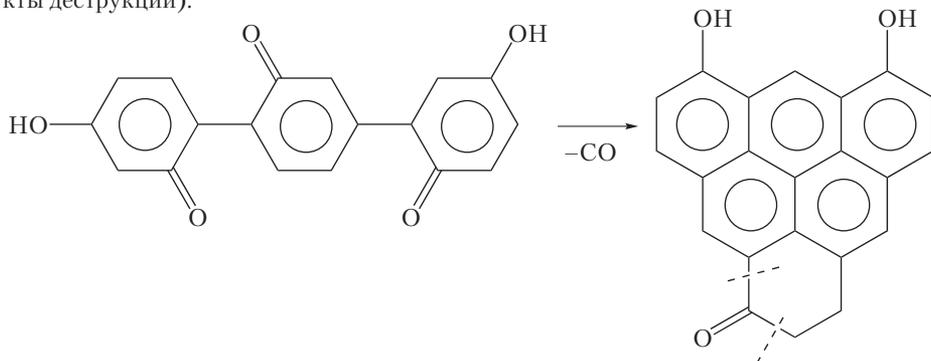
За исключением CH_2O , выделяющегося при отверждении (160–200 °С), и водорода (при $T > 600$ °С) основная масса летучих продуктов деструкции образуется при 400–600 °С. Термоокислительные процессы приводят к образованию CO и CO_2 , бенальдегида, бензола, толуола. Радикалы, образовавшиеся при разрыве Сал-Сар-связей, отнимая водород у соседних циклов при 450 °С, образуют фенолы, крезолы, ксиленолы. Образование ароматических соединений является результатом отрыва групп OH.

3. При температурах больше 500 °С протекают реакции вторичного окисления, приводящие к образованию структур хиноидного типа и карбоксилосодержащих структур.

В интервале 400–600 °С выделяется основная масса (около 40%) летучих продуктов деструкции.

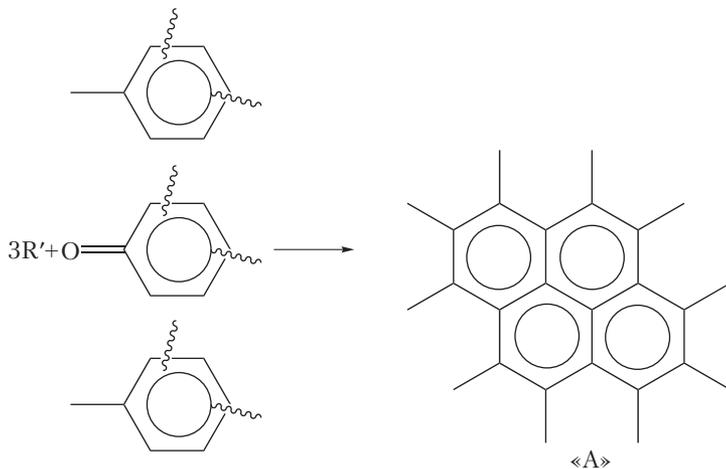


4. Выше 600 °С хиноидные структуры разлагаются с выделением СО и образованием полициклов, отличающихся повышенной термостойкостью (до 700 °С есть еще жидкие продукты деструкции).



Количество летучих при 400, 600 и 880 °С составляет 10,7; 37,7; 49,4 %масс; их средняя удельная теплоемкость соответственно 47, 46 и 52 ккал/кг·К, средняя молекулярная масса 26,2; 26,0; 15,4 г/моль [53].

5. В интервале температур 800–1200 °С тепловая энергия «затрачивается» не на разрушение термически устойчивых циклов, а на рекомбинацию активных радикалов с образованием карбонизованных полициклических структур (кокса, «А», с выделением около 4 %масс. летучих).



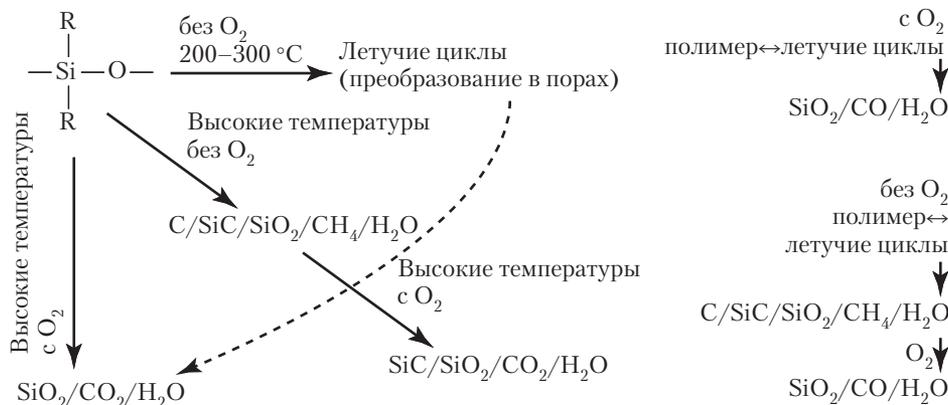
Соотношение С, Н и О в твердых остатках в зависимости от температуры пиролиза составляет:

| Температура пиролиза, °С | Количество кокса, %масс. | Содержание, %масс. | | |
|---|-----------------------------|--------------------|-----|------|
| | | С | Н | О |
| Отвержденный феноль- ный реактопласт | — | 77,0 | 6,1 | 16,9 |
| 500 | 69,7 | 87,6 | 4,6 | 7,8 |
| 800 | 54,4 | 96,0 | 1,7 | 2,3 |
| 1200 | 51,6 | 99,2 | 0,3 | 0,5 |

В кокс переходит до 70–76% углерода из групп $-\text{CH}_2-$ (анализ с использованием C^{14}), он при 1200 °С состоит на 99% из углерода, причем 89% углерода переходят в кокс из ароматических структур отвержденного реактопласта, 11% — из групп CH_2 , а сам кокс представляет собой полициклическую структуру «А», до 11 ароматических циклов).

Пиролиз кремнийорганических полимеров проходит за счет разрыва связей Si–C в линейных полимерах при температуре 300–400 °С, в сетчатых — при 450 °С; связи Si–O устойчивы до 550 °С.

При 200–300 °С происходит перегруппировка с выделением летучих циклов.



При 500 °С выделяется 6 %масс. летучих (72% — бензол, 6,3% — CH_4), при 1200 °С — 13 %масс. летучих (51% — бензол, 18,4 — водород, 14,7% — CH_4).

В нейтральных и восстановительных средах механизмы деструкции существенно отличаются от процессов, проходящих при воздействии окислительных газовых потоков, когда на поверхности абляции образуются низковязкие быстроиспаряющиеся расплавы.

Термическая стойкость кремнийорганических соединений зависит от соотношения органических радикалов и атомов кремния, и величина твердых остатков совпадает в основном с содержанием в полимере SiO_2 . Модифицирование полиметилфенилсилоксановой смолы (ПМФС) органическими смолами приводит к уменьшению величины твердого остатка (для ПМФС — 82,8%, для ПМФС, модифицированной эпоксидной смолой — 50,7%, для ПМФС, модифицированной феноло-формальдегидной смолой — 62,0%). В то же время при модифицировании ПМФС кремнийорганическим продуктом МР-1 существенного изменения величины твердого остатка не наблюдается (табл. 5.17). Особенно эффективна модификация полисилоксанов карборановыми структурами [23].

Основными летучими продуктами термической деструкции линейных полиимидов являются CO_2 , CO , H_2O , H_2 .

Таблица 5.17. Твердые остатки отвержденных реактопластов после их выдержки в инертной среде при 850 °С в течение 5 мин (коковские числа по ГОСТ 9521–50)

| Тип связующего | Формула | Количество твердого остатка, %масс. |
|--|--|-------------------------------------|
| Полиметилсилоксановое К101 | $\{[\text{CH}_3\cdot\text{Si}]_{1,5}\}_n$ | 88,4 |
| | $\{[\text{CH}_3\cdot\text{SiO}]_{1,5}[\text{SiO}_2]_{0,1}\}_n$ | 89,5–90 |
| | $\{[\text{CH}_3\cdot\text{SiO}]_{1,5}[(\text{CH}_3)_2\cdot\text{SiO}]\}_n$ | 66,9 |
| Полиметилсилоксановое К-9 | $\{[\text{C}_6\text{H}_5\cdot\text{SiO}]_2[\text{CH}_3\text{SiO}][(\text{CH}_3)_2\cdot\text{SiO}]\}_n$ | 73,9 |
| | $\{[(\text{C}_6\text{H}_5)_2\cdot\text{SiO}]_{1,5}[\text{CH}_3\text{SiO}]_{1,5}[(\text{CH}_3)_2\cdot\text{SiO}]_{0,5}\}_n$ | 76,6–85 |
| Полиметилсилоксановое, модифицированное продуктом К9МР МР-1 (метилдиэтоксирезорциноксисилан) | | 67,0–82,5 |
| Полиметилвинилсилоксановое | $\{[\text{CH}_3\text{SiO}]_{1,5}[(\text{CH}_3)_2\cdot\text{SiO}][\text{CH}_2=\text{CH}\cdot\text{SiO}]_{0,5}\}_n$ | 80,3 |
| Полиметилфенилсилоксановое | $\{\text{CH}_3(\text{C}_6\text{H}_5)_2\cdot(\text{SiO}_{1,5})_3\}_n$ | 82,8 |
| Полиметилфенилсилоксановое, модифицированное | | |
| – феноло-формальдегидной смолой | К-9Ф (К-9 50%, ФФ-50%) | 62,0 |
| – эпоксидной смолой | К-9Э (50% Э-40) | 50,7 |
| Полиэфирное 911 | | 1,5 |
| Феноло-формальдегидное | Бакелит А | 55 |
| Феноло-формальдегид-фурфурольные | ФН | 54,5–58,3 ¹ |
| Эпоксидное | Э 40 | 8,1 |
| Эпоксидное | ЭДТ 10 | 17,5 |
| Эпоксифенольные | ЭФ32-301 | 19,9 |

¹ В зависимости от температуры отверждения (160 °С – 58,3%, 100 °С – 54,5%).

При термоокислительной деструкции состав выделяющихся продуктов примерно такой же, как и при термической, но скорость их образования в десятки раз больше. Сходство составов продуктов деструкции дало основание высказать предположение, что первичный акт термической и термоокислительной деструкции один и тот же — гомологический разрыв химической связи в основной цепи. Кислород же принимает участие лишь в последующих стадиях процесса, окисляя продукты термического распада.

При термической деструкции полипиромеллитимида типа *Vespel CO* образуется в результате гомолитического распада имидного цикла и отщепления карбонильных групп. Дальнейшие деструктивные превращения остатка имидного цикла могут привести к образованию амидной группировки или конденсированной лестничной структуры, а также к разрыву макроцепи с образованием концевых изоцианатных групп.

Источником CO_2 могут быть имидные циклы, карбонильные группы незациклизовавшихся амидокислотных звеньев, концевые изоциантные группы, образовавшиеся в результате гидролиза амидной связи, концевые изоциантные группы.

При термическом распаде полиимида наиболее уязвимым элементом цепи является гетероцикл, о чем свидетельствует тот факт, что в составе летучих продуктов преобладают оксиды углерода — продукты распада имидного цикла. Продукты, связанные с превращением ароматических ядер, метан и водород, в значительных количествах начинают выделяться при более высоких температурах, чем CO и CO_2 .

При термоокислительной деструкции полиимидов кислород катализирует отрыв атома водорода от бензольного ядра, а образовавшийся макрорадикал подвергается атаке другой молекулы кислорода, образуя пероксидный радикал. Химические превращения диаминного фрагмента в цепи полиимида при термоокислительной деструкции проходят быстрее, чем диангидридного. Коксовые числа полиимидов в зависимости от строения составляют 50–55 % масс (азотосодержащий кокс с пониженной теплопроводностью и меньшей, чем фенольный кокс, прочностью).

Полимеры с высокой концентрацией карбо- и гетероциклов при пиролизе образуют значительные количества кокса, например, полифениленоксиды 25–35 % масс., полисульфоны 40–45 % масс., полиарилсульфоны, ПЭЭК 44–50 % масс., ароматические полиэфир и полиамиды — 40 % масс. (в зависимости от типа «шарнирных» атомов и групп).

Существенно выше коксовые числа полигетероариленов (табл. 5.18 и 5.19). Коксовые числа промышленных отвержденных реактопластов приведены в табл. 5.20.

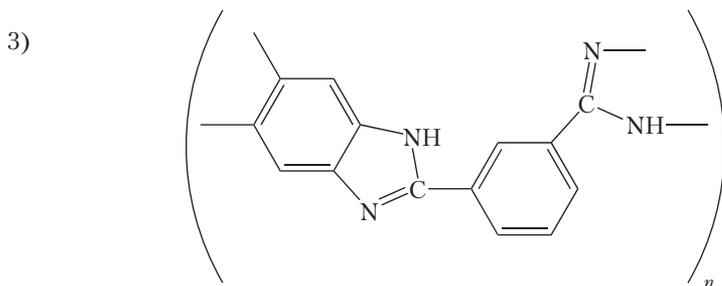
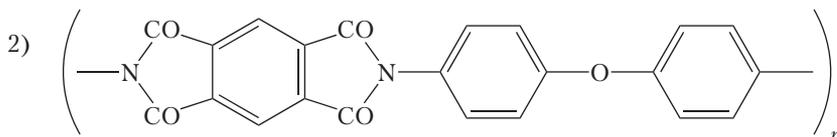
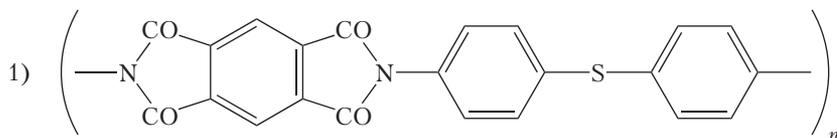
Табл. 5.18. Параметры деструкции полигетероариленов

| Тип полигетероарилена | Температура начала деструкции T_0 , °С | Коксовое число при 800 °С, %масс. | Состав летучих продуктов |
|---|--|-----------------------------------|---|
| 1. Полиимиды | 550–600 | 60–70 | 32% мол. H_2 (450–550 °С) |
| 2. Полибензимидазолы | 500–550 | 80 | — |
| 3. Полибензтиазолы | 625 | 75 | — |
| 4. Полибензоксазолы | 550 | 80 | — |
| 5. Полиимидоазопирролоны (Пирроны) | 650–700 | 87–92 | При 720 °С 40% CO ; 31,5% H_2 ; 11,7% H_2O ; 7,3% CO_2 |
| 6. Полихиноксаины и полифенилхиноксаины | 650 (в N_2) | 85 | — |

Таблица 5.19. Твердые остатки (кокс), образующиеся при термической деструкции линейных полигетероариленов в интервале температур 300–900 °С (данные ДТА, азот, скорость нагрева 150 °С/ч)

| Тип полигетероарилена | Масса остатка, %масс., после достижения температуры, °С | | | | | | |
|-------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| 1. Полиимид | 100 | 99 | 98 | 68 | 62 | 60 | 58 |
| 2. Полиимид | 100 | 99 | 97 | 68 | 63 | 60 | 59 |
| 3. Полибензимидазол | 100 | 98 | 97 | 95 | 87 | 81 | 77 |
| 4. Полибензоксазол | 100 | 100 | 100 | 95 | 78 | 76 | 74 |
| 5. Полибензтриазол | 100 | 100 | 100 | 98 | 96 | 93 | 90 |
| 6. Полиимидоазопирролон | 100 | 98 | 97 | 95 | 87 | 81 | 77 |
| 7. Политриазол | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 91 |

Структурные формулы полигетероариленов:



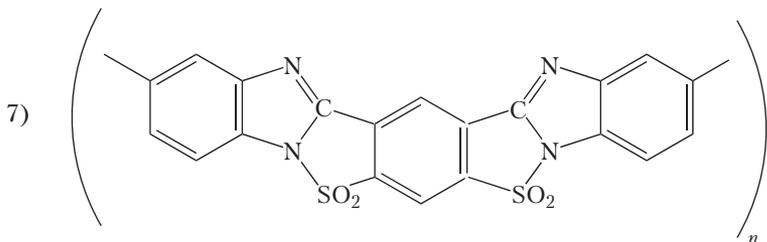
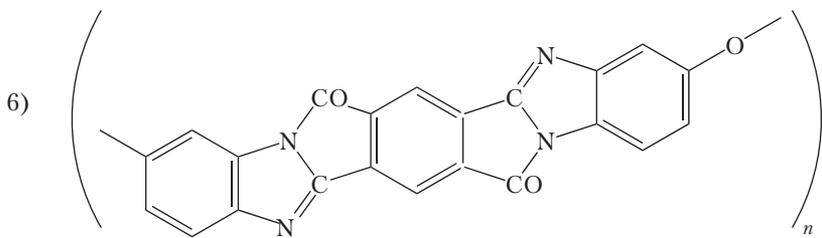
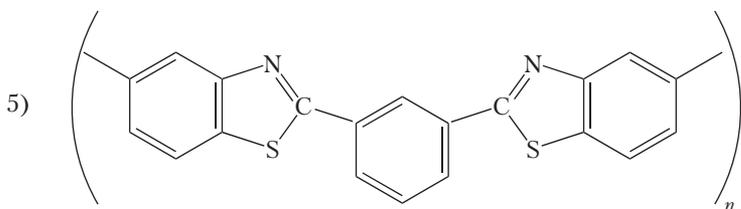
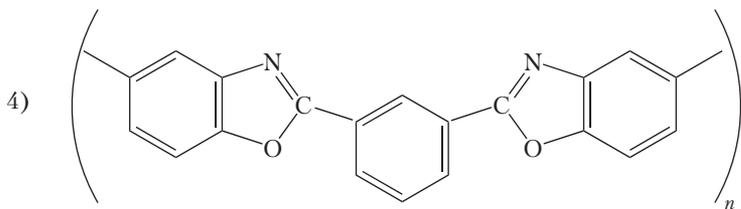


Таблица 5.20. Коксовые числа некоторых типов полимерных связующих

| Тип связующего | Название | Основные компоненты, м.ч. (массовые части) | Режим отверждения | Твердый остаток, %масс. | Количество летучих продуктов, %масс. |
|---|---------------|---|---|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Полиэфирное | № 911 | Диметакрилатбистриэтиленгликольортофталат — 47,5 м.ч. Тетраметаакрилатбисглицеринфталат — 47,4 м.ч. Мономер стирола — 5 м.ч. Перекись бензоила — 1 м.ч. | Ступенчатый подъем от 40–50 °С со скоростью 10 °С в сутки | 1,5 | 98,5 |
| Эпоксидное | Э-40 | Эпоксидная смола Э — 40–70 м.ч. Малеиновый ангидрид — 30 м.ч. | Ступенчатый нагрев от 40–50 °С до 150 °С со скоростью 10 °С в сутки | 8,1 | 91,9 |
| Эпоксидное | ЭДТ-10 | Эпоксидная смола ЭД — 5–80 м.ч. Эпоксидная смола на основе диэтиленгликоля — 10 м.ч. Триэтаноламинтитанат — 10 м.ч. | Ступенчатый нагрев и выдержка при: 100 °С в теч. 4 час; 120 °С в теч. 2 час; 140 °С в теч. 2 час; 160 °С в теч. 1 час | 17,5 | 82,5 |
| Эпоксифенольное | ЭФ-32-301 | Эпоксидная смола Э — 40–75 м.ч. Бакелитовый спиртовой лак — 25 м.ч. | Ступенчатый нагрев до 150 °С со скоростью 10 °С в сутки | 19,9 | 80,1 |
| Эпоксикремнийорганическое | ЭМП-1 | Эпоксидная смола Э — 40–75 м.ч., Метилдиэтоксирезорциноксисилан — 25 м.ч. | — | 16,7 | 83,3 |
| Фенолоформальдегидное | Пulвербакелит | Феноло-формальдегидная смола — 90% Гексаметилентетрамин — 10% | Прессование при 160 °С в течении 8 ч. Давление создавалось только за счет смыкания плит пресса | 55 | 45 |
| Феноло-фурфурольно-формальдегидное | ФН | Новолачная смола — 42,5% Фурфурол — 50% Гексаметилентетрамин — 1,5% | Ступенчатый подъем от 40–50 °С до 150 °С со скоростью 10 °С в сутки | 55–58 | 45–42 |
| Феноло-формальдегидное, модифицированное поливинилформальэтилатем | ВФТ | Феноло-формальдегидная смола — 50%, поливинилформальэтилаталь — 45% Эфир ортокремниевой кислоты — 5% | Вакуумирование раствора смолы 720 мм рт. ст. при 20–50 °С, прессование порошка смолы, выдержка 14 ч при 160 °С | 18,1 | 81,9 |

| | | | | | |
|---|-------------------|--|--|-------|---------|
| Феноло-формальдегидное модифицированное поливинилбутиральфурфуралем | ФПФ | Феноло-формальдегидная смола — 90% Поливинилбутиральфурфураль — 10% | Термообработка раствора связующего ФПФ при 160 °С, доведение веса раствора до веса сухого остатка смолы | 46,7 | 53,3 |
| Бутварно-фенольное | БФ-2 | Бутвар — 50 м.ч. Фенолоформальдегидная смола — 50 м.ч. | Вакуумирование раствора смолы при 70 мм рт. ст. в течение 6 ч. Отверждение смолы в течение 2 ч при 160 °С и термообработка при 160 °С в течение 2-х ч | 18,7 | 81,3 |
| Фенолоформальдегидное | Капроно-текстолит | Капроновая ткань-55%, феноло-формальдегидная смола-45% | — | 19 | 81 |
| Кремнийорганическое | К-9 | Смола К-9 — 99% Уксуснокислый калий-1% | Термообработка порошка смолы в течение 5 ч при 200 °С | 82-85 | 18-16,5 |
| Феноло-кремний-органическая смола | К-9Ф | Смола К-9 — 50% Фенолоформальдегидная смола — 50% | Вакуумирование смолы при 720 мм рт. ст. при 30–40 °С в течение 6 ч. Термообработка в течение 6 ч. при 160 °С | 62,0 | 38,0 |
| Эпоксикремнийорганическое | К-9Э | Смола К-9 — 50% Эпоксидная смола Э — 40–50% | Отверждение при 200 °С в течение 10 ч. | 50,7 | 49,3 |
| Кремнийорганическое | К9МР | Смола К — 9–75% Метилдиэтоксирезоцин оксисилан — 25% | Выдержка смолы при 200 °С в течение 10 ч, прессование при 250–270 °С и давление 12 МПа, выдержка 10 мин/мм толщины | 82,5 | 17,5 |
| Кремнийорганическое | ЖКС-2 | Смола ЖКС — 2–100% | Ступенчатый подъем от 40–50 °С до 200 °С со скоростью 10 °С в сутки | 73,9 | 26,1 |
| Кремнийорганическое | ЖКС-1 | Смола ЖКС — 1–90% Метилдиэтоксирезоциносилан — 10% | Ступенчатый подъем от 40–50 °С до 200 °С со скоростью 10 °С в сутки | 76,6 | 23,4 |
| Кремнийорганическое | К-101 | Полиметилсилоксановая смола К — 1–01 | Подъем температуры до 100 °С в течение 2 час, выдержка 1 ч, подъем до 150 °С в течение 2 час, выдержка 1 ч, подъем до 200 °С в течение 2 час, выдержка 1,5 ч | 89,5 | 10,5 |

Задержка тепла в термическом слое приводит к быстрому возрастанию температуры, началу физико-химических превращений компонентов ТЗМ с выделением летучих продуктов, поступающих в пограничный слой, снижающих его энтальпию, подвергающихся дальнейшим термохимическим превращениям, и когда отщепление боковых групп полимерной цепи превалирует над разрывом цепей определенное количество первоначальных полимерных структур преобразуются в новые более термически устойчивые структуры — кокс, оксиды.

Карбонизированные структуры, образующиеся при абляции ТЗМ на основе фенолоальдегидных связующих, имеют наиболее ценный комплекс свойств, обеспечивающих высокую эффективность тепловой защиты. Тенденции развития ТЗМ связывают с использованием блок-лестничных и лестничных полимеров, представляющих собой структуры с ароматическими и гетероциклами, образующие при пиролизе графитоподобные структуры. Высокая стоимость, сложность переработки, несмотря на образование при пиролизе больших количеств кокса, не позволяет рассматривать их в качестве альтернативы фенолоальдегидными, фенолофурфурольными составами. Другое направление связано с использованием элементоорганических полимеров. Кремний образует с кислородом устойчивый к дальнейшему окислению оксид, способный эндотермически реагировать с углеродом с образованием карбида кремния, обладающего повышенной отражательной способностью.

Образование карбонизированных поверхностных слоев кокса приводит к определенной изоляции полимера начального состава от высокотемпературного воздействия, к поглощению тепла на эндотермические вторичные реакции образующихся газообразных продуктов, продуктов разложения наполнителей.

Высокая температура карбонизированного слоя способствует рассеиванию значительной доли поступающего теплового потока вследствие поверхностного отражения и переизлучения.

Образующийся карбонизированный (пиролизированный) слой остается некоторое время связанным с исходным ТЗМ, а затем, в зависимости от состава и качества, покидает поверхность или в результате механического воздействия набегающего потока (растрескивание, выкрашивание, расплавление), или в результате физико-химических процессов (сублимация, вторичные реакции, твердофазные окисление, горение).

Зона деструкции распространяется глубже и следующие слои ТЗМ подвергаются нагреву и физико-химическим превращениям.

Карбонизированная (пиролизированная) поверхность ТЗМ в процессе абляции удаляется вследствие химической и механической эрозии. Химическое разрушение твердых продуктов абляции (кокса) может происходить под действием окисления (твердофазного поверхностного горения) или сублимации, механическое — результат абразивного действия твердых частиц, газодинамического сдвига, внешнего давления газов, акустических нагрузок.

Растрескивание пиролизированных слоев вызывается внутренним давлением газообразных продуктов пиролиза компонентов ТЗМ, термическими и динамическими структурными напряжениями. Механическая эрозия может привести к неравномерному уносу материала, изменению геометрии поверхности и переходу ламинарного процесса обтекания на турбулентный.

Количество и качество (прочность, пористость и др.) твердых остатков, кокса, образующегося при деструкции полимеров, оказывает существенное (и определяющее) влияние на течение процесса абляции. Кокс, способный упрочняться при нагреве, на второй стадии продолжает выполнять роль связующего, обеспечивая прохождение физико-химических превращений наполнителей. Наполнители подвергаются абляции в соответствии с термохимическими процессами, определяемыми их составом и структурой (плавление, кипение, сублимация, пиролиз и т. д.), которые могут существенно отличаться от процессов, проходящих при абляции связующих. Это и предопределяет смешанный механизм абляции и возможность только качественной оценки коэффициента газификации, как отношения массы ТЗМ, в которой прошли физико-химические процессы, к массе ТЗМ, удаленной с поверхности абляции при тепловом и механическом (ударном, сдвиговом) воздействии набегающего потока.

ТЗМ на основе термо- и реактопластов с низкой термостойкостью (эпоксидных, на основе ненасыщенных олигоэфиров) термически разлагаются без образования или с образованием незначительного твердого остатка (кокса). Их использование связано с образованием при абляции значительного объема низкомолекулярных паров и газов, осуществляющих эффект вдува.

Абляция ТЗМ на основе фенолоальдегидных, фенолофурановых, карбо- и гетероциклических, кремнийорганических полимеров проходит по смешанному механизму, когда полимерная фаза теплозащитного композиционного материала образует твердый остаток, продолжающий в большей или меньшей степени выполнять роль связующего, а процесс абляции наполнителя определяется его составом, что предопределяет различия при абляции ТЗМ с плавящимися (пластики с минеральными наполнителями — кремнезем, кварц, асбест), сублимирующимися (углепластики), полимерными (органопластики) наполнителями (рис. 5.35).

Например, различия в механизме абляции теплозащитных композиционных материалов на основе отвержденного фенолоальдегидного связующего, связаны, в основном, с типом наполнителя, который выбирается в зависимости от параметров набегающего потока, обеспечивающих наиболее полную реализацию возможных физико-химических превращений компонентов стекло-, асбо-, угле-, органопластиков теплозащитного назначения.

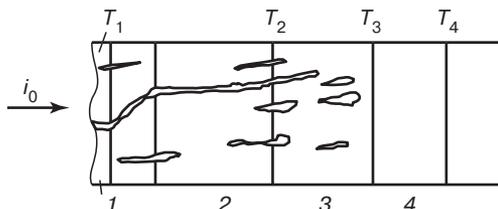


Рис. 5.35. Температуры на поверхности (T_1) и в объеме (T_2, T_3, T_4) теплозащитных фенольных материалов различного состава при их абляции при воздействии теплового потока с теплосодержанием $i_0 = 22$ МДж/кг [4, 9, 11]:

1) поверхностный слой (состав и механизм зависит от состава ТЗМ):

а) при абляции пластиков с кремнеземными, кварцевыми, асбестовыми наполнителями — расплавы оксидов различной вязкости (защита ТЗМ от окисления и горения, прозрачны для переизлучения, гетерофазные реакции $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiC} + \text{CO}_2$) с различной упругостью паров при кипении (см. рис. 5.34);

б) при абляции углепластиков — кокс, упрочненный графитизированными волокнами, сублимация углерода кокса и волокон, интенсивное переизлучение (T_w до 2800 °С), но высокая теплопроводность и горение;

в) при абляции органопластиков — вдув в сжатый слой большого объема низкомолекулярных «холодных» паров;

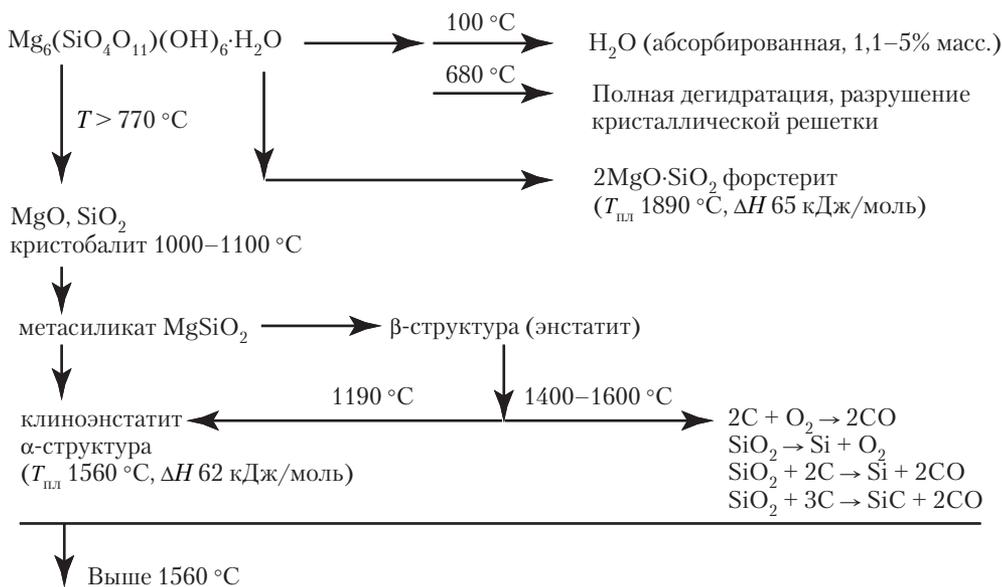
2) слой плотного (осаждение в порах пироуглерода при крекинге продуктов деструкции в зоне 3) переизлучающего кокса;

3) слой пористых продуктов карбонизации, образование кокса, выделение паров и газов с последующим их крекингом и вдувом в сжатый слой;

4) исходный ТЗМ.

| Тип фенольного ТЗМ (65 %об. тканевого наполнителя) | Температура по зонам, °С | | | |
|--|--------------------------|-----------|---------|---------|
| | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 |
| Стеклотекстолит (кремнеземная ткань КТ-11) | 1800–2200 | 1300–1650 | 500–600 | 200–425 |
| Углетекстолит | 2800 | 900 | 700 | 320 |
| Органотекстолит (капроновая ткань) | 2480 | 600 | 315 | 200 |

На начальном этапе развития ракетно-космической техники в качестве высокотемпературных абляционных ТЗМ использовали **асбопластики** (передние поверхности спускаемых КА, ГЧ, масса ТЗ до 2000 кг, при массе СА 4500 кг). Наполнитель в асботекстолитах (ткань АТ-1) хризотиласбест (водный силикат магния), образует редкий тип трубчатых кристаллов, стенки которых состоят обычно из 9-ти двухслойных пачек со слоями $(\text{SiO})_y$ и $(\text{MgO})_x$. При плотности 2,3–2,6 г/см³, $T_{\text{пл}}$ 1520 °С, диаметре филаментов 0,026 мкм имеет низкую теплопроводность 0,05–0,21 Вт/м·К и высокую термостойкость. Абляция фенольного асботекстолита проходит через стадии дегидратации асбеста, при 200–800 °С — деструкцию связующего ($Q_{\text{дестр}}$ 670–720 кДж/кг) и многостадийные энергоемкие превращения структуры асбеста:



Появление жидкой фазы и ее быстрое испарение ($T_{\text{кип}}$ 2600 °С) при 1400–1500 °С (полное испарение при 1600–1800 °С) возможна реакция $\text{MgO} + \text{C} \rightarrow \text{Mg}_r + \text{CO}$.

Для асботекстолита с фенолоальдегидным связующим (35 %масс.)

$$H_{\text{эфф}} = 800 + 0,4 \cdot \Delta i, \text{ кДж/кг.}$$

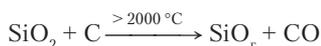
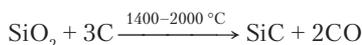
Эффективность использования асбопластиков определяется хорошими теплоизоляционными свойствами, затратами тепла на абляцию связующего и образование расплава оксидов на поверхности абляции, частично защищающего ТЗМ от горения. Наиболее энергозатратный процесс — кипение расплава — реализуется только частично из-за плохого соотношения скорости плавления $V_{\text{пл}}$ асбеста к скорости испарения $V_{\text{исп}}$ его расплава (хотя и имеет место задушение расплава частицами кокса из аблирующего связующего, рис. 5.34).

Разработка кремнеземных и особенно кварцевых наполнителей позволила повысить $H_{\text{эфф}}$ соответствующих ТЗМ в 2–3 раза по сравнению с $H_{\text{эфф}}$ асбопластиков.

Абляция **стеклопластиков** включает такие же стадии физико-химических превращений, как и абляция асбопластиков, но проходит более эффективно.

При абляции фенолоальдегидного стеклопластика после поглощения тепла термическим слоем проходит пиролиз отвержденного связующего с образованием многочисленных газообразных продуктов (проникают в соседний нагретый пограничный слой, снижая энтальпию набегающего потока, расширяют сжатый слой, уменьшают скорость теплопередачи к поверхности, осуществляют эффект вдува) и твердого остатка (кокса, пористого углерода).

Одновременно с образованием кокса область первичного пиролиза фенольного полимера перемещается от поверхности материала к слоям, лежащим под коксом, защищая их некоторое время от воздействия набегающего потока. Образовавшиеся газообразные продукты, проходя через пористый кокс, подвергаются крекингу и образуют на стенках пор покрытие из пироуглерода. Когда температура в аблирующем слое достигает температуры плавления минерального наполнителя (кремнезема, кварца), образовавшийся расплав растекается на поверхности в виде капель, тонкой пленки. Расплав прозрачен и не мешает переизлучению тепла коксом и пиролизуемым материалом. Вязкость расплавов кремнезема, кварца (рис. 5.34) достаточно велика (имеет место загущение расплава частицами кокса) и сохраняющийся на поверхности абляции расплав эффективно защищает углеродосодержащие компоненты от окисления и горения, одновременно взаимодействуя с ними [53, 54]:



При достижении температуры кипения (выше 2600 °С) расплав испаряется, реализуется $Q_{\text{кип}} \text{SiO}_2$, которая в 2–3 раза больше теплоты плавления $Q_{\text{пл}} \text{SiO}_2$.

Расчетные значения $H_{\text{эфф}}$ из-за сложности абляции композиций из деструктурирующегося отвержденного фенольного реактопласта и минерального плавящегося наполнителя, проходящей в интервале температур 400–2500 °С с изменением состава компонентов (молекулярной массы, теплоемкости и т. д.), с межфазными реакциями, физико-химическими структурными изменениями (β -кварц $\xrightarrow{570\text{ }^\circ\text{C}}$ α -кварц $\xrightarrow{870\text{ }^\circ\text{C}}$ α -тридолит $\xrightarrow{1470\text{ }^\circ\text{C}}$ α -кристобалит $\xrightarrow{1700\text{ }^\circ\text{C}}$ расплав), реакциями окисления, горения, достаточно приближительны.

Для фенольных кремнеземных и кварцестеклопластиков [1, 9, 33, 36, численные значения в ккал/кг]:

$$H_{\text{эфф}} = \sum_i C_{p_i} \cdot T_{w,i} + \frac{m_{\text{исп}}}{m_\Sigma} (Q_{\text{исп}} + \beta \cdot \Delta i) = 167 \left(\frac{P_{00}}{P} \right)^{13} \cdot \left(\frac{i_{00}}{RT_0} \right)^{0,2} + 0,3(415 + 0,49 \cdot \Delta i) =$$

$$= 167K_1 + 125 + 2,7 \cdot K_2.$$

где K_1 и K_2 — функции давления P , температуры T и теплосодержания i набегающего потока. В соответствии с экспериментальными данными $H_{\text{эфф}} = 1450 + 0,29\Delta i$, кДж/кг.

Безразмерный параметр уноса $G = 0,3$, линейная скорость абляции V_a при T_w 2500 °С составляет 1,0–1,5 мм/с, что существенно больше, чем при абляции кварцевой керамики (толщина слоя ТЗ из кварцестеклопластика в 3 раза больше, но он технологичнее керамики).

Расплавы стекол с содержанием SiO_2 менее 95% с низкой вязкостью сдуваются с поверхности абляции под действием давления и сдвиговых сил набегающего потока. $H_{\text{эфф}}$ фенольных стеклотекстолитов (T_w 1300 °С) в 2–3 раза ниже $H_{\text{эфф}}$ кварцестеклопластиков (T_w до 2500 °С, до 110 МДж/кг).

Кремнеземные и кварцевые порошки, волокна, ткани (основные наполнители ТЗМ) в сочетании с различными связующими (фенолоальдегидными, эпоксидными, кремнийорганическими) позволили создать большой ассортимент абляционных материалов.

Наполнителями в текстолитах теплозащитного назначения являются однослойные ткани (КТ-11, -11-13, -11-Т0, -11-С8) из кремнеземных волокон К11С6 и однослойные ткани ТС-8/3-К, -К-Т0 из кварцевых нитей КС 11-17 [55].

Существенно повышает теплозащитные характеристики (повышение коэффициента ϕ , уменьшение уноса ТЗМ из-за расслаивания) использование в качестве наполнителей многослойных тканей (основной способ совмещения со связующими — пропитка под давлением, необходимость использования полимеризующихся жидких связующих, связующих

в «активных» растворителях, типа ФН) из кремнеземных (4-, 5-, 7-слойные МКТ-2,5; 3,0; 4,2; 5,0; 5,25) и кварцевых (7-слойные МКВТ-5,1, -5, -39) волокон, в том числе капиллярных (МКТ-П, МКВТ-П).

Эффективность **углепластиков** как ТЗМ определяется их способностью образовывать при абляции структуры, состоящие из пористого упрочненного углеродными волокнами кокса (рис. 5.35), достаточно плотного, ударопрочного, сохраняющегося на поверхности абляции вплоть до сублимации (при абляции углепластиков после первой стадии деструкции полимерной фазы и абляции УУКМ реализуются достаточно близкие процессы).

Углеродные, графитизированные волокна остаются в карбонизованном слое в процессе пиролиза, мало подвергаются воздействию высоких температур, придают этому слою высокую прочность и обеспечивают непрерывность материала (карбонизируемый, пиролизуемый и исходный слой ТЗМ соединены волокнами, тканями вплоть до температуры сублимации углерода из кокса и волокон при 3000 К, $Q_{\text{субл}} 8400$ кДж/кг). Это обеспечивает реализацию максимально возможных равновесных температур поверхности абляции, эффективное переизлучение тепла, максимальное поглощение тепла газообразными продуктами, образовавшимися как при пиролизе фенольного связующего, так и последующей сублимации углерода из кокса и волокон, и реализующие эффект вдува.

Разработан большой ассортимент углеродных тканей, используемых в качестве наполнителей теплозащитных углепластиков. На первых этапах в ТЗ использовались ткани и сшивки из углеродных нитей ТГ-1,2; ТГМ-2М, ТГН, УУТ-2, многослойные УУТ 2/4-2/12, затем ткани и ленты Урал Т, ТР, ТР-3/2-15, -22, прошивные материалы ПУМ-2, 3, ЗТР, вязально-прошивной УВПП, в ряде случаев углеродные структуры типа ЗД (из нитей УКН-5000, Ц00, ЦТМЗ, ТВП, ЗТП, КИМФ), используемые, в основном, в производстве УУКМ.

Несмотря на высокую теплопроводность (регулируемую ориентацией наполнителей по отношению к потоку, введением минеральных волокон с низкой теплопроводностью) и низкую устойчивость к окислению и горению (нанесение защитных покрытий) оптимизированные составы углепластиков в 1,3–1,5 раза эффективнее кварцпластиков, предназначены для отражения предельных тепловых потоков, а по экономическим и технологическим показателям они заменяют УУКМ в конструкциях скоростных, высокоточных головных частей, сопловых блоков и раструбов РДТТ.

Эффективность использования **органопластиков** в теплозащите связана с особенностями их абляции:

- 1) низкая температура T_w ;
- 2) низкая теплопроводность (в 2–3 раза ниже теплопроводности стеклопластиков) и высокая теплоемкость полностью полимерных материалов;
- 3) образование при абляции (в 2–3 раза больше, чем при абляции кварцпластиков) большого объема «холодных» низкомолекулярных паров (при абляции нейлона, ПА-6 — в парах до 50% водорода).

При абляции органопластиков волокна из алифатических полиамидов (в ТЗМ называемым «фенольным нейлоном») плавятся и испаряются в температурном интервале деструкции связующего. Из-за образования пустот в местах первоначального нахождения волокон образуется высокопористый кокс с высокой чувствительностью к механической эрозии.

При прохождении через слой кокса продукты пиролиза полимерных волокон восстанавливаются до низкомолекулярных веществ и отлагаются в виде пирографита.

Некоторые полимерные волокна при абляции образуют карбонизованный остаток, что упрочняет кокс.

Для арамидных волокон характерно сочетание высокого выхода кокса (энергия активации деструкции 260–270 кДж/моль, $T_{\text{дестр}} \sim 500$ °С, коксовое число СВМ 53–59%, терлона 37%) с большим объемом низкомолекулярных (водород, газы со средней молекулярной массой 15,6) газообразных продуктов деструкции. При использовании органопластиков в абляционной теплозащите формируется единый коксовый слой, состоящий из коксовых структур арамидного

волокон, скрепленных между собой коксовым остатком матрицы, с низкими внутренним давлением газообразных продуктов и скоростью разрушения коксового слоя. При оптимальных режимах абляции органопластика скорость уноса массы в 4–6 раз меньше, теплопередача от набегающего потока в 2 раза меньше, масса конструкции на 30% легче по сравнению со стеклопластиком на основе кремнеземных и кварцевых волокон.

5.5. Взаимосвязь состава и структуры ТЗМ с их абляционными свойствами

Параметры, характеризующие абляционные свойства и входящие в уравнение теплового баланса, зависят от состава и структуры ТЗМ, а $H_{эфф}$ является функцией теплосодержания ТЗМ (H_{T_w} – функция состояния твердого тела, его термодинамическая энтальпия, которая характеризует количество тепла, которое нужно передать телу, чтобы передать ему энергию, превышающую прочность первичных и вторичных связей, то есть нагреть до $T_{пл}$, $T_{кип}$, $T_{субл}$, $T_{дисс}$).

Для абляции i -многокомпонентных материалов

$$H_{T_w} = H_{293} + \sum_i \int_{293}^{T_{плав}} C'_{P_i} \cdot dT + \sum_i Q_{плав} + \text{нагрев до плавления} + \\ + \sum_i \int_{T_{пл}}^{T_{кип(субл)}} C''_{P_i} \cdot dT + \sum_i Q_{кип(субл)} + \text{нагрев до кипения (сублимации)} + \\ + \sum_i \int_{T_{кип(субл)}}^{T_{дисс}} C'''_{P_i} \cdot dT + \sum_i Q_{дисс} + \text{нагрев до диссоциации (далее возможен перегрев)}.$$

При этом $\sum_i Q_{пл}$ составляет 20%, сумма $\sum_i Q_{кип(субл)} + \sum_i Q_{дисс} = 70\%$ тепловых затрат на реализацию физико-химических превращений компонентов ТЗМ. При разработке ТЗ-композиции необходимо:

1) использовать компоненты, физико-химические процессы в которых проходят с максимальными тепловыми затратами (теплоты кипения, сублимации);

2) знать значения фазовых и релаксационных переходов, тепловых эффектов химических реакций (расчет очень сложен, т.к. изменяется состав и масса);

3) знать температуры, при которых происходят эти процессы (энтальпийные диаграммы позволяют выбрать компоненты, в которых проходят энергоемкие процессы в требуемом интервале тепловых нагрузок и температур; так, фторлон-4 разрушается при T около 450–500 °С с поглощением 1890 кДж/кг, при абляции кварцпластика $Q_{исп} \text{ SiO}_2$, равная 5000 кДж/кг, реализуется, когда температура достигает 2800 К, до этого материал работает как теплоизолятор, реализуя $Q_{пл} \text{ SiO}_2 = 420$ кДж/кг);

4) знать молекулярную массу летучих продуктов, вдуваемых в пограничный слой (расчеты, исходя из кинетики реакций, констант реакций, энергии активации, с использованием экспериментальных данных);

5) учитывать особенности передачи тепла излучением (определение спектральных интервалов, окон прозрачности, где интенсивности излучения и поглощения пограничного слоя и вдуваемых паров оптимальны).

Ряд параметров ТЗМ непосредственно не входит в уравнение теплового баланса, но оказывает существенное влияние на $H_{эфф}$.

Для уменьшения уноса ТЗМ без физико-химических превращений нужно, чтобы скорость линейного уноса V_a была больше скорости прогрева $V_{п}$ ТЗМ. Когда $V_a < V_{п}$ унос мал, накапли-

вается прококсованный материал с малой прочностью, что увеличивает механический унос (снижение ϕ). Наиболее приемлем режим абляции, когда $V_a > V_{п'}$, что требует оптимизации теплофизических параметров ТЗМ и использования эффективной теплоизоляции (дисперсные наполнители, многослойные стенки, соты, пористость, ориентация наполнителей, специальные текстуры — прерывистое плетение, полые наполнители — микросферы, капиллярные волокна, пробка и т. д.).

ТЗМ должен быть подготовлен к воздействию термоциклических нагрузок, термоударам, одностороннему нагреву и оптимизирован с точки зрения значений линейных и объемных коэффициентов теплового расширения (сжатия) и усадок (особые режимы отверждения, см. табл. 5.20; предварительная термообработка, прокаливание наполнителей и другие способы).

На абляционные свойства ТЗМ оказывает влияние плотность материалов (регулируемая давлением при формовании изделий), особенно объемная равномерность, наличие пустот, трещин, примесей, зон с повышенным или пониженным содержанием компонентов, непроклен, расслоения. В зонах с малой плотностью (и меньшей теплопроводностью) аккумулируется тепло, что приводит к ускорению абляции с образованием раковин, кратеров, шероховатостей на поверхности абляции (выкрашивание, увеличение механического износа, газодинамический скачек, перевод режима обтекания с ламинарного на турбулентный). ТЗМ проходят тщательный контроль сплошности неразрушающими методами: томография, акустические (ультразвуковые, импедансные, метод свободных колебаний), радиометрические (рентген, γ -метрия, электронография), радиоволновые (микро-, СВЧ-, терагерцевые, амплитудные, фазовые, поляризационные), тепловые (метод тепловых полей), методы коронного, искрового разряда.

При разработке абляционных ТЗМ их составы и структура должны обеспечивать численные значения [1, 9, 33]:

- высокие (эффективная теплота абляции, упругопрочностные свойства, трещиностойкость, теплоемкость, эндотермические фазовые и релаксационные переходы);
- низкие (тепло- и температуропроводность, плотность, молекулярная масса продуктов вдува, поверхностное натяжение расплавов, способность к расслаиванию, выкрашиванию, эрозия поверхности, горючесть);
- близкие к единице (излучательная способность, выход летучих, доля ТЗМ, в которой проходят эндотермические физико-химические превращения);
- переменные (температура абляции, вязкость расплавов, согласованная с парциальным давлением паров при кипении).

Параметрами, определяющими эффективность абляционных полимерных, ТЗМ, являются:

- элементарный состав, структура, молекулярная масса, температуры стеклования, плавления, деструкции, теплота деструкции, теплофизические, термодинамические свойства полимеров в составе ТЗМ;
- элементарный состав, форма частиц, ориентация по отношению к потоку, температуры и теплоты фазовых и релаксационных переходов, теплофизические, термодинамические свойства наполнителей в составе ТЗМ;
- соотношение и распределение компонентов в ТЗМ, наличие дефектов, пористость;
- количество, элементарный состав, упругопрочностные, тепло- и электрофизические свойства, пористость и распределение пор, твердый остаток, образующийся в процессе абляции;
- количество, элементарный состав, удельная теплота образования, диффузионные свойства, продолжительность нахождения в ТЗМ газообразных продуктов, образующихся при абляции.

Абляционные характеристики ТЗМ различных типов, состава и структуры приведены в табл. 5.21–5.26.

Для оптимизации абляционных свойств ТЗМ, предназначенных для отражения и поглощения теплового потока, в их состав, наряду с наполнителями, повышающими упругопрочностные

Таблица 5.21. Абляционные характеристики фенолоальдегидных текстолитов² [1, 2]

| Поверхностная плотность теплового потока, q_0 , кВт/м ² | Продолжительность нагрева, с | Температура ¹ T_w , °С | Линейная скорость абляции ¹ V_a , мм/с·10 ⁻³ | $H_{эфф}$ ¹ МДж/кг |
|--|------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| 1360 | 120 | 1630/1540/1540/1710 | 4,15/1,07/0,8/2,29 | 18,8/75,8/105,5/48,4 |
| 4600 | 60 | 1950/1950/1975/2000 | 9,45/9,1/2,82/4,85 | 28,2/29,3/110,5/75,8 |
| 9200 | 60 | 2140/2110/2090/2390 | 19,3/14,8/12,9/8,6 | 27,7/36,3/50,5/86 |
| 15900 | 30 | 2320/2320/2370/- | 32,3/25,4/39,2/- | 28,9/37,3/27,9/- |

¹ Соответственно данные для стеклотекстолитов, асботекстолитов (наполнитель – асбогат), стеклотекстолитов на основе кремнеземных волокон, органотекстолитов с тканями из волокон алифатических полиамидов типа *Naylon* 6, ПА-6, капрон).

² Содержание связующего 33 %об., волокна перпендикулярны потоку.

Таблица 5.22. Сравнительные свойства ТЗМ различного состава [11]

| Типы ТЗМ | Свойства ТЗМ | | |
|---|----------------------------|---|---|
| | ρ , г/см ³ | $H_{эфф}$, МДж/кг при q_0 19-22 МДж/кг | Защитный индекс (время достижения 150 °С на обратной стенке ТЗМ), с |
| 1. Фенольный углетекстолит (65 %об. ткани) | 1,39 | 160 | 30 |
| 2. Фенольный кварцетекстолит (65 %об. ткани) | 1,55 | 27 | 65 |
| 3. Отвержденное фенолоальдегидное связующее, наполненное порошком ПА-6 (50 %об.) и фенольными полыми микросферами (20 %об.) | 0,59 | 35 | 258 |

Таблица 5.23. Зависимость абляционных характеристик ТЗМ на основе фенолоальдегидного связующего и различного объемного содержания графитизированных и стеклотканей, асбестовых матов (войлока) [1, 2]

| Тип наполнителя | Содержание наполнителя, %об. | Абляционные характеристики | |
|--|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| | | Линейная скорость абляции V_a мм/с | Защитный индекс ¹⁾ с |
| Ткань из графитизированных углеродных волокон (тип ТГ) | 60 | 0,0305 | 37 |
| | 60 ²⁾ | 0,0406 | 22,3 |
| Асбестовый мат | 56 ²⁾ | 0,0534 | 95,0 |

¹⁾ Время достижения 200 °С на обратной стороне образца толщиной 6,35 мм.

²⁾ Фенолоальдегидное связующее (типа ФА), эластифицированное полиамидом (типа ПО-300).

Окончание табл. 5.23

| Тип наполнителя | Содержание наполнителя, %об. | Абляционные характеристики | |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| | | Линейная скорость абляции V_a мм/с | Защитный индекс ¹⁾ с |
| Асбестовый войлок Стеклоткань | 60 ²⁾ | 0,0685 | 83,1 |
| | 56 | 0,0685 | 48,5 |
| | 49 | 0,0812 | 54,3 |
| | 53 | 0,1076 | 45,0 |
| | 55 | 0,1119 | 48,0 |
| | 70 | 0,1270 | 32 |

Таблица 5.24. Зависимость $H_{эфф}$ абляционных фенольных ТЗМ от типа и содержания наполнителей¹⁾ [1]

| Тип наполнителя | Содержание в текстолите, %об. ³⁾ | $H_{эфф}$, МДж/кг ²⁾ |
|--|---|----------------------------------|
| Ткань из волокон типа капрон, <i>Nylon 6</i> | 40 | 167 |
| | 55 | 177 |
| | 70 | 148 |
| Асбестовый мат, ткань типа АТ-1 | 40 | 130 |
| | 55 | 128 |
| Стекланная ткань (из выщелоченных волокон типа Е-стекла) | 40 | 139 |
| | 55 | 135 |
| | 70 | 114 |
| Ткань из кремнеземных волокон ⁴⁾ | 40 | 163 |
| | 55 | 181 |
| | 70 | 184 |

¹⁾ Волокна тканей расположены перпендикулярно направлению газовых потоков (струя аргонной плазмы).

²⁾ Тепловой поток 8500 кВт/м² в течение 10 с.

³⁾ Оптимальное соотношение компонентов в абляционной композиции нельзя определить расчетным путем, необходимы систематические экспериментальные исследования.

⁴⁾ В ТЗМ с наполнителями объемной текстуры распределение волокон в трех направлениях решает проблему расслаивания от абляции при сдвиговых напряжениях, заметно повышая долю ТЗМ, в которой происходят энергоемкие эндотермические процессы (коэффициент ϕ возрастает с 0,6 до 0,85). Они имеют меньшую анизотропию механических свойств. Так, σ^+ эпоксидных стекло-текстолитов с тканями объемного плетения составляет от 780–250 до 550–250 МПа (соответственно текстуры 1×1×3 и 3×1×1) [56].

Таблица 5.25. Зависимость абляционных свойств кварце- и углетекстолитов от типа связующих в их составе (содержание наполнителей 34–35 %об.) [9]

| Тип связующего, плотность угле- текстолита, кварцетекстолита, г/см ³ | Абляционные свойства углетекстолита/ кварцетекстолита | | |
|---|--|-------------------------|---------------------------------------|
| | T_w , °С | $H_{эфф}$, МДж/кг | Защитный ин- декс, с ¹⁾ |
| Фенолоальдегидное 1,42/1,59 | 3460/2750 | 686/266 | 20/35,9 |
| Эпоксिनволачное 1,37/1,76 | 3410/2550 | 628/227 | 19/47,7 |
| Эпоксикремнийорганическое 1,30/1,59 | 3420/2360 | 858/180 | 30/29,1 |
| Полиимидное (типа <i>Skybond</i>) 1,30/1,60 | 3450/2500 | 1213 ²⁾ /320 | 31,4/37,5 |

Примечания:

¹⁾ Волокна ткани перпендикулярны потоку 11,6 МВт/м², нагрев в течение 30 с образца толщиной 19,05 мм воздухом с теплосодержанием 21,5 МДж/кг.

²⁾ $H_{эфф}$ углетекстолитов на основе карбоциклических циклоцепных полимеров (полифенилен, полифениленфенол) до 2000 МДж/кг.

Таблица 5.26. Составы и свойства теплозащитных пластиков П-5¹⁾ [57]

| Тип П-5 ²⁾ | Наполнитель в П-5 | Плотность пластика, г/см ³ | σ^+ , МПа | V_a , мм/с | Конструкция | Технология |
|--------------------------------|---|---|----------------------------------|-----------------|-------------------|---|
| П-5-2 | Рубленые волокна из тканей КТ-11,-11к | 1,8 | 125– 150 ($\sigma_{ви}$) | | Заднее днище | Прессова- ние (140 °С, 30±5 МПа, 20–30 мин, т.о. 160 °С ⁶⁾) |
| П-5-8 | Ткань КТ-11-ТО | | | | Заднее днище | Прессование |
| П-5-7 ЛДП ⁵⁾ | Лента КЛШ-11, ЛДП ³⁾ | 1,6–1,7 | 740 | 0,35 | Сопловое днище | Прессование |
| П-5-5 | Рубленые волокна К 11 С 6 | | | | Сопловое днище | Прессование |
| П-5-12 ⁶⁾ | Углеродные волокна или лента ТГМ-2 М | 1,45–1,5 | 370 | 0,1 | Днище | Прессование |
| П-5-13Н, -13П ⁷⁾ | Нити ВМН-3,4 или ткань УУТ-2 ⁴⁾ | 1,3–1,55 | | | | Прессование, намotka |
| П-5-15 | КТ-11-ТО КТ-11-ТСА с N80 | 1,6–1,7 | 700 | 0,3 | Раструб | Намотка |

¹⁾ Для предсопловых блоков и раструбов РДТТ.

²⁾ Связующее ЛБС-А (50–60% р-р), -Б (60–70% р-р); коксовое число (1200 °С) — 55%, σ^+ кокса 40 МПа.

³⁾ КЛ-11-5,0; КЛ-11-8,2; КЛ-11-9,4 или ткани КТ-11, КТ-11-ТОА.

⁴⁾ Для П-5-13П ткани УУТ-2 СГ, -2С.

⁵⁾ $\lambda_{100-300}$ 0,43–0,5 Вт/м·°С, $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С⁻¹ 19–33, КЛТР·10⁻⁶ 0,3–5,7·°С⁻¹.

⁶⁾ σ^+ при 20 °С 33 МПа, при 500 °С — 10 МПа, λ 0,52–0,58 Вт/м·К.

⁷⁾ σ^+ при 20 °С 140 МПа, при 500 °С — 85 МПа, λ 0,45–0,64 Вт/м·К.

свойства, вводят порошки, дисперсные волокна, микросферы, хлопья из веществ различного состава, в которых при абляции проходят эндотермические превращения. При определенных температурах с образованием газообразных продуктов с определенной молекулярной массой и теплоудержанием при нагреве дисперсных компонентов реализуются затраты тепла на плавление, испарение, кипение, а твердые частицы повышают вязкость расплавов, способствуя согласованному прохождению процессов плавления и испарения (сохранение на поверхности абляции выкипающего, а не сдуваемого без кипения расплава).

Дисперсные компоненты влияют и на излучательную способность (ϵ расплава кремнезема повышается с 0,1 до 0,5 в присутствии оксида кобальта, графитовый порошок, частицы кокса аналогично повышают ϵ расплава асбеста, одновременно загущая его и обеспечивая эффективное кипение наполненного углеродом расплава асбеста). Порошки карбидов упрочняют карбонизированные слои, боридов — увеличивают огнестойкость, порошки полимеров (ПЭ, ПА, ПММА) обеспечивают образование больших объектов низкомолекулярных газообразных продуктов, повышающих эффект вдува (табл. 5.27).

Ориентацией наполнителей (вклад связующего в численные значения $H_{эфф}$ около 5%) в структуре ТЗМ оптимизируют конструкционные и абляционные свойства. Коэффициент теплопроводности волоконитов с ориентацией волокон относительно потока под углом α :

$$\lambda_a = \lambda_{\parallel} - \alpha \cdot (\lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}) / 90.$$

КЛТР ($\alpha \cdot 10^{-6}$, мм/мм) фенольного кварцестекловолокнита *Refrasil* с расположением слоев параллельно, перпендикулярно, под углом 20° и хаотически относительно теплового потока составляет 11,3; 4,46; 17,8; 14,4; λ , Вт/м·К — соответственно 0,288 ($H_{эфф}$ 16 000 кДж/кг); 0,864 ($H_{эфф}$ 22 000 кДж/кг); 0,418; 0,288.

При расположении волокон параллельно поверхности ТЗМ в плоскости ориентации имеют высокие значения упругопрочностные свойства и минимальную теплопроводность.

Однако при абляции создаются условия для расслаивания ТЗМ слоистой структуры, образования поверхностных трещин (из-за давления газообразных продуктов, выделяющихся в нижележащих карбонизируемых слоях), что приводит к неравномерной абляции, уменьшению доли ϕ ТЗМ, в которой проходят физико-химические превращения, к увеличению шероховатости поверхности, стимулирующей переход с ламинарного к турбулентному режиму обтекания.

При ориентации волокон перпендикулярно поверхности ТЗМ имеет высокую устойчивость к воздействию сдвиговых напряжений от газового потока, но низкие упругопрочностные свойства, что приводит к расслоению и механическому уносу части ТЗМ с образованием де-

Таблица 5.27. Свойства абляционных материалов низкой плотности [9]

| Свойства ТЗМ | Состав ТЗМ | | |
|---|--|--|--|
| | Фенолоформальдегидное связующее (25%), фенольные микросферы (25%), порошок полиамида типа ПА-6 (50%) | Эпоксисоволачное связующее (38%), фенольные микросферы (44%) Кварцевые (9%) и кремнеземные (9%) дискретные волокна | Кремнийорганическое связующее (66%), фенольные микросферы (16%), кварцевые дискретные волокна (7%) и порошок (1%), стеклянные микросферы (10%) |
| ρ , г/см ³ | 0,59 | 0,38 | 0,67 |
| σ^+ , МПа | 703 | 450 | 120 |
| ϵ^+ , % | 0,9 | 2,0 | 5,0 |
| E^+ , ГПа | 8,8 | 2,8 | 0,35 |
| C_p , кДж/кг·К | 1,596 | 1,93 | 1,55 |
| λ , Вт/м·К | 1,16 | 0,696 | 1,16 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С ⁻¹ | 55,0 | 30,5 | 79,9 |

фектов. ТЗМ с такой ориентацией волокон имеют высокую теплопроводность, а подвод тепла в объем материала ускоряется из-за излучения вдоль волокон.

Наиболее эффективны промежуточные схемы ориентации волокон («кровельная» укладка, углы ориентации волокон 20–90° от направления теплового потока, рис. 5.36). Теплозащитные детали сложной формы обычно изготавливают из композиций с дискретными волокнами

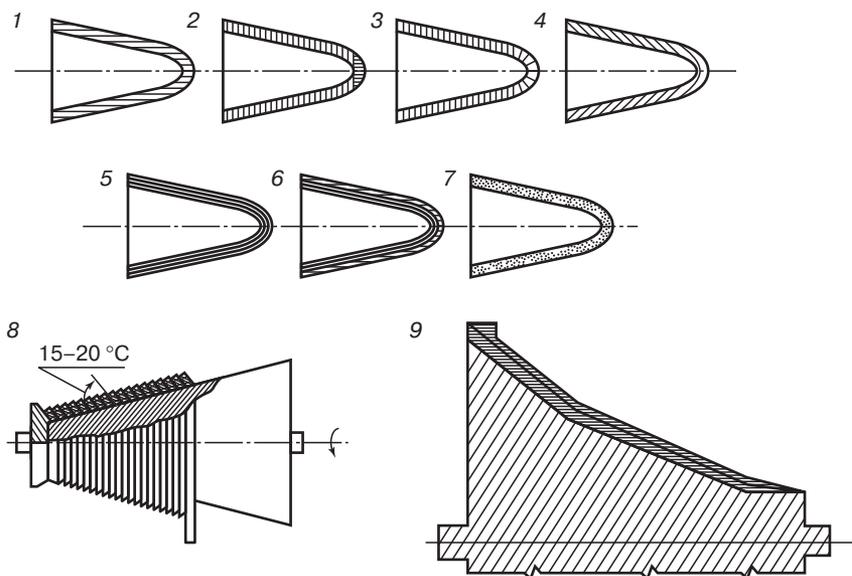


Рис. 5.36. Схемы ориентации наполнителей в теплозащитных материалах с использованием различных технологических приемов [10, 11, 37]:

1 — намотка внахлест; 2 — выкладка слоевых препрегов; 3 — краевая намотка; 4 — наклонная намотка; 5 — послынная укладка; 6 — комбинированная укладка; 7 — структуры с хаотичным расположением волокон (типа АГ-4В); 8, 9 — различные технологии кровельной намотки

Таблица 5.28. Влияние ориентации кварцевой ткани относительно защищаемой поверхности на упругопрочностные, теплофизические и абляционные свойства фенолкремнийорганических текстолитов [1]

| Свойства | Показатели свойств кварцетекстолитов с различной ориентацией слоев ткани к поверхности | | |
|---|--|-----------------|---------------|
| | Параллельно | Перпендикулярно | Под углом 20° |
| σ^+ , МПа | 164 | 10,5 | 31,5 |
| σ^- , МПа | 260 | 420 | 54,4 |
| $\sigma_{\text{ви}}$, МПа | 345 | 3,6 | 51 |
| $E_{\text{ви}}$, ГПа | 16 | 4,9 | 7,87 |
| λ , Вт/м·К | 0,09 | 0,266 | 0,1278 |
| $\alpha \cdot 10^{-6}$, °C ⁻¹ | 6,26 | 25,9 | 9,91 |
| Скорость абляции | Высокая | Низкая | Низкая |
| Поверхность после нагрева | Шероховатая | С дефектами | Гладкая |

различной длины (например, типа АГ-4В), сочетающие промежуточные упругопрочностные и хорошие теплофизические и абляционные свойства (табл. 5.28).

При производстве конструкции РДТТ часть входного (предсоплового) и выходного конусов изготавливают намоткой, обеспечивая расположение слоев наполнителя перпендикулярно или под углом к оси блока с последующей параллельной укладкой слоев материала.

В предсопловой блоке при любом варианте ориентации слоев к потоку будет иметь место расслоение, растрескивание и обычно используют пластики с хаотическим расположением волокон.

Для конструкций, работающих в условиях динамического нагружения, при воздействии ударных, знакопеременных, термоциклических нагрузок, в условиях вибраций, необходимы материалы с повышенной трещиностойкостью.

Значительная часть теплозащитных материалов используют в качестве связующих пластифицированные и более эффективные эластифицированные композиции (табл. 5.20). Хотя введение пластификаторов и эластификаторов (полиацетали — поливинилбутираль, бутвар и др.; гибкоцепные и жесткостные термопласты с высокими показателями энергетического G_c и силового K_c критерия трещиностойкости; каучуки, прежде всего низкомолекулярные (см. раздел 5.4.1.1), обычно снижает количество кокса, на практике часто достаточно оправданно использование ТЗМ с повышенной трещиностойкостью, обеспечивающих при абляции снижение доли материала, в котором не проходят физико-химические эндотермические процессы. Прежде всего, подобные ТЗМ используют для тепловой защиты внутренних поверхностей конструкций корпусов крупногабаритных РДТТ, а сами корпуса изготавливают из конструкционных ВПКМ (стекло-, угле-, органико-, поливолоконистые пластинки) на основе эластифицированных связующих.

Основными материалами теплозащиты камер сгорания РДТТ являются эластичные материалы — эластики, резины на основе высокомолекулярных и «жидких» каучуков, эласто-термопластов (материалы «бронирования» топливных зарядов). Покрытия из них (в сложных условиях динамического нагружения при горении каучукового топлива) и конструкционные оболочки деформируются согласованно (деформации покрытия «следуют» за деформирующейся оболочкой), покрытия не растрескиваются и не отслаиваются от конструкционной стенки, защищая ее от теплового разрушения («прожога»). Теплозащитные свойства регулируются введением в каучуки различных типов (бутадиен-нитрильные, тиоколовые, кремнийорганические) волокон, полых микросфер, компонентов из веществ различного химического состава (углерод, кварц и др.) [1, 9, 10, 12, 37, 58].

Для нанесения с последующей вулканизацией теплозащитных покрытий (РФТЭ — на основе эпоксирезорцинового связующего, пластифицированного тиоколом НВБ, ПКМ, ФКМ, МКФН — на основе ЛБС, пластифицированного поливинилацетатами; БКМ-75 — каландрованные листы из фенолкаучуковой резиновой смеси (каучук СКН); СКЭПТ — рулонный материал; БК-31 — фенолкаучуковая композиция с бакелитовой мукой; фенолкаучуковые (СКН-40, СКН-26) композиции ТП-3, РД-18, Р-161) используют:

- выкладку или намотку невулканизированных листов или лент из резиновых смесей;
- литые под давлением жидких композиций, шприцевание в форму, щелевой зазор с использованием оснастки;
- свободную заливку, нанесение шпателем, напыление, центробежное формование жидких эластичных композиций.

Особую группу теплозащитных абляционных материалов представляют радиопоглощающие ТЗМ **специального назначения**, которые не только защищают объекты РКТ от тепловых нагрузок, но и выполняют дополнительные задачи по обеспечению радиосвязи, радио- и оптической маскировки (регулирование температуры абляции; программированное изменение химического состава спутного следа), экранизации в заданных пределах от поражающих факторов ядерного взрыва (ударного импульса, корпускулярного и волнового ионизирующего излучения), противоточения комплексу факторов (РПОЗУП — многофункциональные радиопоглощающие оптически защищенные ударопрочные покрытия). Использование комбиниро-

ванных ТЗП позволяет объектам РКТ эффективно преодолевать ПВО, ПРО, ПКО, затрудняя их своевременное обнаружение, опознавание, перехват и уничтожение.

Задача *радиопрозрачных* ТЗМ (см. главу 2) — уменьшение эффективной площади рассеивания $\sigma_{\text{д}}$, определяющей дальность обнаружения объекта R_0 (достаточно 5% отраженной энергии для обнаружения объекта на расстояниях в тысячи км):

$$R_0 = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{рлс}} G_{\text{рлс}} A_r \sigma_{\text{д}} L_c}{(4 \cdot \pi)^2 P_{\text{мин}}}}$$

где $P_{\text{рлс}}$ — мощность передатчика; $G_{\text{рлс}}$ — коэффициент усиления передающей антенны; A_r — эффективная площадь приемной антенны; L_c — коэффициент, учитывающий потери сигнала при его распространении; $P_{\text{мин}}$ — чувствительность приемника.

Радиопрозрачные ТЗМ используют для защиты от аэродинамического нагрева антенно-фидерных устройств (АФУ). Радиопрозрачные конструкции, оболочки, размещаемые перед раскрытием антенн с минимальным влиянием на характер излучения антенны, изготавливают из материалов со стабильными диэлектрическими свойствами (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3-5$, тангенс угла диэлектрических потерь $0,001-0,005$) в широком диапазоне длин волн и температур. Радиопрозрачные окна устанавливаются на не затемняющих их головных частях (с q_0 до $420 \cdot 10^6$ кВт/м²), стыкуются с основным ТЗМ, но их материалы не должны при абляции образовывать поглощающие радиоволны компоненты.

В качестве радиопрозрачных ТЗМ используют:

- керамические материалы (см. раздел 5.4.2);
- материалы на основе неорганических связующих и кремнеземных, кварцевых тканей (перед совмещением с алюмофосфатными, алюмохромомолибденовыми связующими АФС-1, АХМ ткани для защиты от ортофосфорной кислоты H_3PO_4 пропитывают кремнийорганическим лаком) [60, 67];
- отверждение АФС, АХМ (жизнеспособность при формовании изделий при 20 °С 3 ч, алюмохромомолибденовые — 24 ч) проходит при 270 °С в течение 40 часов, проходит по схеме:



прочность при сжатии σ -текстолитов с 60 %об. тканей КТ-11-Э-01 сохраняется на уровне 60–70 МПа при 1370 °С несколько минут; абляция при 800–1500 °С по схеме:

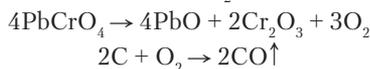


проходит с образованием продуктов, обеспечивающих радиопрозрачность;

- полимерные пластики на основе кремнеземных и кварцевых наполнителей.

Для радиопрозрачных окон, аблирующих при низких значениях T_w и q_0 используют термопласты (фторопласт Ф-4Д с КТ-11 сохраняет радиопрозрачность до 1200 °С), аблирующих при $T_w > 1500$ °С — материалы на основе органосиликатных (суспензии измельченных силикатов и оксидов в толуольном растворе полиорганосилоксана, В-58Э) и кремнийорганических связующих.

Использование кремнийорганических полимеров связано с образованием ими при абляции устойчивых к окислению структур с низким содержанием углерода. При абляции 1 кг полидиметилсилоксана образуется всего 2–4% углеродосодержащих соединений, но они при 2500 °С агрегируются в виде тонкого слоя в 1–2 мм от поверхностного расплава SiO_2 экранируя пропускание радиоволон. Для уменьшения содержания углерода в состав связующих вводят окислители, переводящие углерод в CO , CO_2



В процессе абляции кремнийорганические полимеры размягчаются, деструктурируют с образованием жидких и газообразных продуктов, вспучиваются, а выход твердого остатка определяется соотношением углерод-кремний и плотностью сетки. Наиболее эффективна модификация структурами, содержащими связи бор-углерод (карбораны) [23].

Для снижения механического уноса в качестве наполнителей используют многослойные прошивные и трикотажные объемного прядения кремнеземные полотна, а для повышения диэлектрических свойств — наполнители на основе капиллярных волокон (ϵ 3,6; $\text{tg } \delta_\epsilon$ 0,0015, со сплошными волокнами соответственно 6 и 0,0018).

В процессе абляции радиопрозрачность иногда снижается в 5–7 раз, но восстанавливается до 80% от первоначального уровня после прекращения уноса.

При ядерных взрывах на конструкции воздействует ударный импульс и ионизирующее (нейтроны, γ - и рентгеновское) излучение.

Для сохранения работоспособности конструкций от воздействия громадного ударного импульса (адиабатический взрыв, сопровождаемый ростом температур до сотен тысяч градусов и давлений до сотен тысяч атмосфер) используют *демпферную защиту*, изменяющую параметры ударного импульса за счет поглощения энергии на разрушение высокопрочного материала отнесенного экрана (например, углепластика) и демпфирование слоя (демпфирующий слой из пенопласта, объемных, сетчатых структур), обеспечивающего отнесение экрана от слоя основной теплозащиты и конструкционного слоя.

Защита конструкций от ионизирующих излучений имеет особенности: необходимость использования радиационно-стойких материалов и материалов, ослабляющих, экранирующих электромагнитные излучения (*экранные материалы и конструкции*).

Под действием ионизирующих излучений с разрывом макромолекул проходит радиационная деструкция полимеров, характеризуемая радиационно-химическим выходом G_d — числом разрывов цепей, вызываемых поглощением 100 эВ энергии излучения (для целлюлозы $G_d > 10$, полиэтилена 1,0–1,5; полистирола 0,01). У некоторых полимеров радиационная деструкция перекрывается радиационным «сшиванием» (G_c полиэтилена около 4, для полипропилена $G_d = G_c = 0,8$).

Радиационную стойкость, способность полимеров противостоять воздействию ионизирующих излучений количественно характеризуют предельными значениями дозы или ее мощности, при которых полимерный материал утрачивает свои эксплуатационные свойства (упругопрочностные, электрические и т. д.).

Повышает радиационную стойкость полимерных материалов использование антирадов и полимеров с высокой концентрацией циклов [61–66].

При разработке различных систем, способов экранирования и поглощения ионизирующих (корпускулярных и волновых) излучений используют теоретические представления об их взаимодействии с веществами, в том числе с полимерными различного состава и строения.

Комплексный подход, обеспечивающий эксплуатационную эффективность, предполагает проведение анализа физических явлений в материалах при действии на них ионизирующих излучений, обеспечивающих экранирующую способность. Механизмами, ослабляющими электромагнитное излучение, являются: фотоэффект, комптоновское рассеивание, эффект образования электрон-позитронных пар (ЭОП), фотоядерные процессы. Величины энергий проявления эффектов, обеспечивающих ослабление излучения, для различных атомов различны. Например, для свинца фотоэффект проявляется в области энергий менее 0,1 МэВ, эффект Комптона 0,5–5 МэВ, релеевское рассеивание менее 0,1 МэВ, ЭОП более 5 МэВ.

Сложно экранировать нейтронное излучение (малая масса, отсутствие заряда) из-за необходимости реализации упругого или неупругого рассеивания нейтронов при реакции с ядрами. При упругом рассеянии потери энергии являются функцией атомного номера элемента и энергии. Чем меньше энергия нейтрона, тем вероятнее его взаимодействие с ядром элемента экрана (повышается сечение рассеивания $\sigma_{\text{расс}}$). Неупругое рассеяние характеризуют сечением захвата электрона $\sigma_{\text{захв}}$, определяемое скоростью нейтрона и сопровождающееся появлением радиоактивных изотопов и γ -излучения.

В качестве экранной защиты от нейтронов используют композиции из тяжелых элементов (РЗЭ) с большими значениями $\sigma_{\text{расс}}$, способные поглощать γ -излучения (из-за образования радиоактивных изотопов требуется защита, необходимо равномерное распределение тяжелых элементов предельно малых размеров; наноразмер, ионы; распределение контролируется рентгенометрией) и *легких* элементов с высокими значениями $\sigma_{\text{захв}}$ и $\sigma_{\text{расс}}$ (полиэтилен, вода, материалы с высоким содержанием водорода).

Радиационное тепловыделение (2400 кДж/мм^2 за 10^{-6} – 10^{-9} с) и ударный импульс вызывают абляцию материала экрана и его механическое разрушение. Более устойчивы экраны с равномерным распределением большого количества тяжелых элементов с высокими значениями $\sigma_{\text{захв}}$ с наноразмерами и эффективной энтальпией.

Оптическую защиту обеспечивают ТЗМ, аблирующие при низких температурах ($T_{\text{вр}}$ 1000–1300 °С, эпоксидные связующие с наполнителями в виде тканей из волокон ПЭТ, ПП и др., текстолиты из таких тканей).

Многофункциональные (радиопоглощающие, оптически защищенные радиационно-экранирующие, ударопрочные, РПОЗУП) теплозащитные материалы используют в конструкциях из чередующихся слоев: основная теплозащита, демпфирующий слой, высокопрочный экраный слой, слой оптической защиты (например, пористый фторопласт), слой с тяжелыми элементами (поперечное сечение радиационного захвата $\sigma_{\text{захв}}$ не менее нескольких тысяч барн), радиопоглощающий слой (с ферритами).

5.6. Применение ТЗМ

Абляционная система тепловой защиты дает возможность преодолеть «тепловой барьер» при гиперзвуковых полетах в атмосферах различного состава и решить проблему защиты конструкций двигательных установок, работающих на химическом топливе. Если абляционная теплозащита используется в ЖРД только некоторых типов (с многократным запуском при небольшом расходе топлива, защита камер сгорания и сопловых блоков вспомогательных ЖРД с тягой не более 9000 кг), то доля абляционных ТЗМ в РДТТ составляет 20–40 % масс. конструкций, которые на 60–100% изготавливаются из ПКМ, ВПКМ (конструкции камер сгорания, теплозащита переднего днища, сопловые блоки, наружная теплозащита, элементы крепления топливного заряда, корпуса запальных устройств, газовые рули (рис. 5.37).

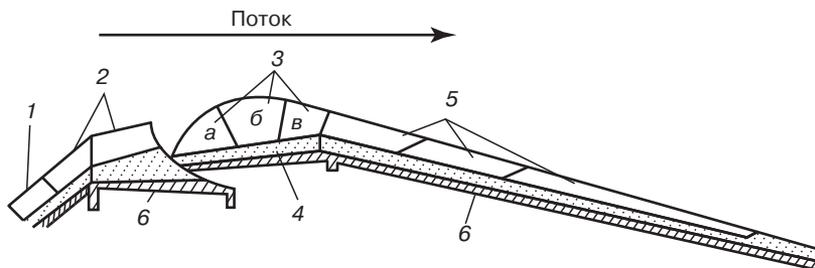


Рис. 5.37. Материалы конструкции соплового блока РДТТ [9]:

1 — внутренняя теплозащита камеры сгорания (наполненные резины на основе каучуков различных типов — СКН, СКБ, СКТ и других); 2 — теплозащита предсоплового блока (входного конуса, входного «воротника», фенольные угле-, кварцелластики изотропные); 3 — теплозащита критического сечения соплового блока (б), входной (а) и выходной (в) части горловины (УУКМ, фенольный углепластик, углеродные (стекло-, пироуглерод), графитизированные материалы, керамические покрытия и композиционные материалы на основе SiC и другие, силицированные УУКМ, углеродкерамические КМ); 4 — теплоизоляционные материалы (фенольные стекло-, кремнеземо-, асбластики); 5 — теплозащита раструбы (УУКМ, фенольные угле- и кварцелластики); 6 — конструкция раструбы силовая (металлическая, из ВПКМ, изготавливаемая намоткой, УУКМ)

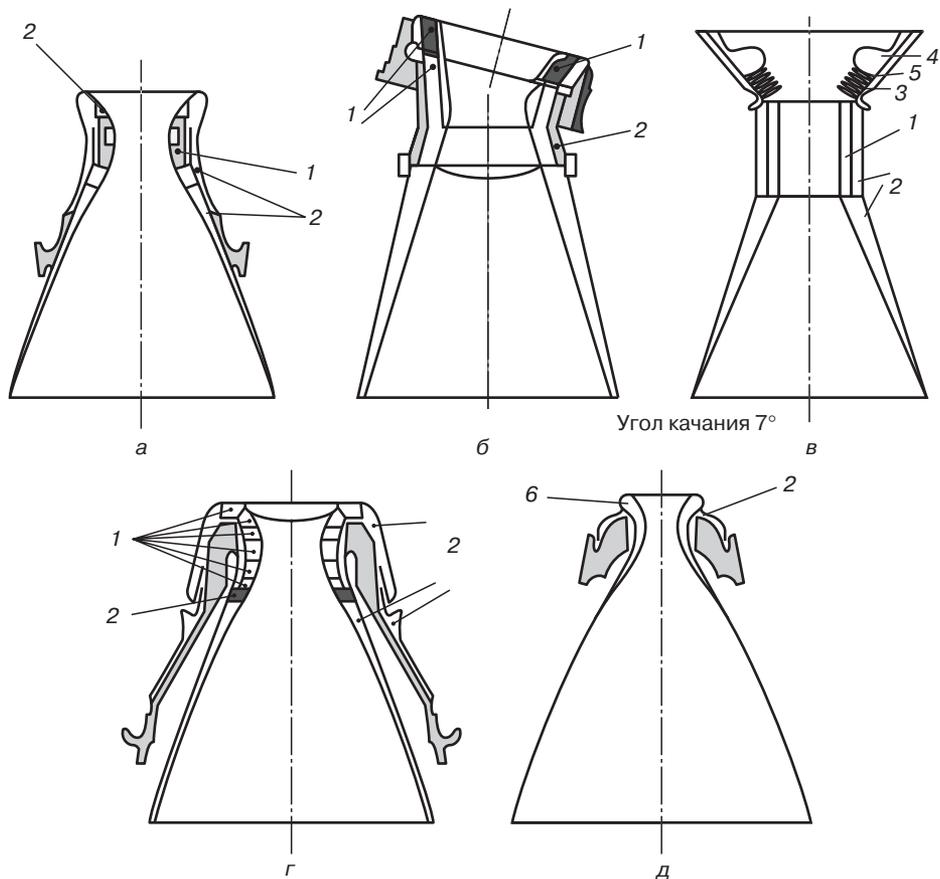


Рис. 5.38. Конструкции и материалы сопловых блоков РДТТ:

типы сопловых блоков: а— неподвижное сопло с поддувом газа; б— поворотное сопло; в— качающееся сопло; г— сопло с гибким упором; д— перспективная конструкция.

ТЗМ: 1 — УККМ (например «Десна»); 2 — фенольный углеволокнит (намотка П-5); 3 — ворсовая конструкция (высота ворса из нитей Урал-Н24 40мм обеспечивает $\lambda = 0,1$ Вт/м·К); 4 — эластичная ТЗ («воротник»); 5 — высокоэластичный материал (из резины на основе каучука СКД) поворотного сопла (защищено ворсом); 6 — углерод-керамические КМ, КМ SiC/C, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$

В критических сечениях сопловых блоков некоторых РДТТ, УУКМ заменены на фенольные углепластики (рис. 5.38).

Абляционные ТЗМ используют в средствах защиты стартовых площадок ракет, ракетных пусковых устройствах (кабели, шланги, разъемы стартового и бортового оборудования, системы трубопроводов, электронное оборудование), палуб авианосцев, защищающих конструкции от разрушения в процессе одноразового запуска.

Полимерные абляционные ТЗМ обеспечивают надежную тепловую защиту гиперзвуковых ЛА (возвращаемые орбитальные капсулы, ИСЗ, ЛА, предназначенные для исследования других планет, боеголовки (ББ), ложные цепи, преодолевающие системы ПРО).

Абляционная теплозащита космических беспилотных ЛА, двигателей обычно состоит из полимерного материала заданной толщины (массы), приклеенного к нижележащим конструкционным элементам из металлов или ВПКМ. Для повышения надежности пилотируемых КА используют многослойные конструкции, включающие абляционные, теплоизоляционные, силовые слои, в том числе, сотовые, интегральные.

Использование абляционных ТЗМ позволяет эксплуатировать гиперзвуковые ЛА при высоких скоростях полета даже на небольших высотах. В зависимости от назначения таких ЛА изменяется геометрия их конструкции и тип используемых ТЗМ (рис. 5.39).

Тепловая защита ГЧ оживальной или полусферической формы, возвращаемых ИСЗ с большим радиусом затупления (уменьшение тепловых нагрузок из-за отскока от поверхности конструкции сжатого слоя) эффективно решается использованием асботекстолитов (ТЗ первых возвращаемых ИСЗ, в том числе, пилотируемых), стеклопластиков (использующих текстильные формы наполнителей из кремнеземных или кварцевых волокон), углепластиков на основе графитизированных наполнителей.

Совершенствование тепловой защиты возвращаемых КА привело к использованию вместо ТЗМ высокой плотности ($1,75 \text{ г/см}^3$ для фенольного стеклопластика) ТЗМ малой плотности – многослойной теплозащиты с сотовыми слоями, ячейки в которых заполнены пенопластами и дисперсными частицами (дискретные волокна, порошки, полые микросферы), позволяющие оптимизировать теплозащитные свойства (рис. 5.40). Увеличение скорости входа в атмосферу ГЧ БРДД с малым радиусом затупления привело к необходимости использования ТЗМ с предельно высокими значениями эффективной энтальпии (наконечники из УУКМ), так же как и при тепловой защите сопловых блоков и раструбов высокоимпульсных РДТТ.

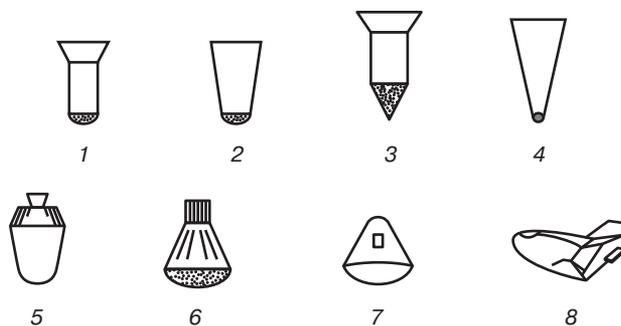


Рис. 5.39. Типы ТЗМ гиперзвуковых ЛА различного назначения [9]:

1 — фенолоальдегидные асбо-, кварце- или органопластики; 2 — фенолоальдегидные кварце-, кремнеземо- и органопласты; 3 — эпоксифенольные кварцелластики; 4 — фенольные кварцелластики (наконечник — фенольные углепластики или УУКМ); 5 — фенольные органопластики; 6 — фенольные кварце-, кремнеземоластики; 7 — эпоксиноволачные ПКМ; 8 — углеродные, углерод-керамические, керамические композиционные материалы (в первоисточнике — кремний-органические материалы низкой плотности)

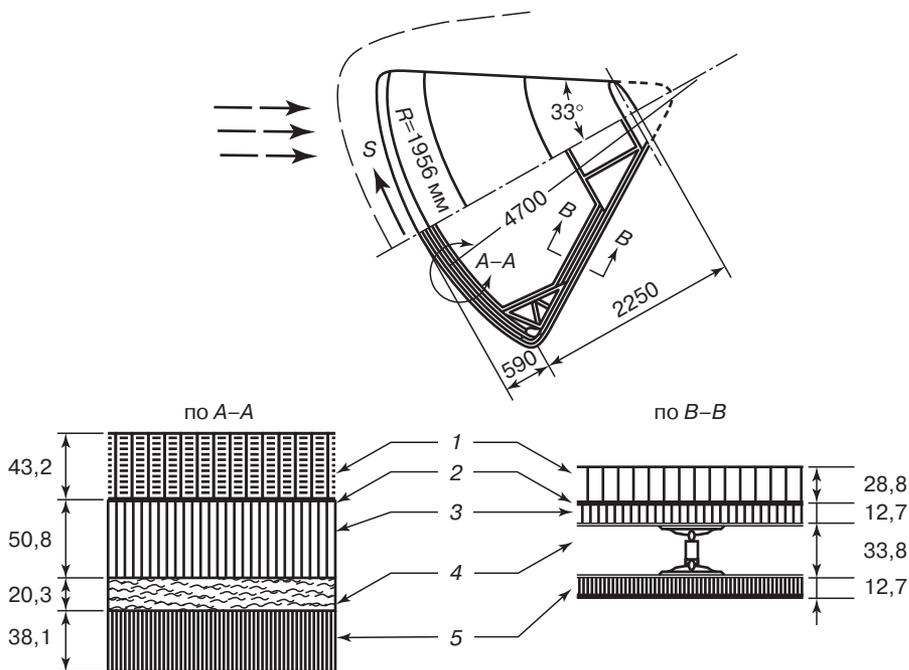


Рис. 5.40. Конструкция отсека экипажа КА «Apollo» (выполняет функцию входа в атмосферу и посадки на Землю после полетов к Луне) и его теплозащиты [59]:

1 — абляционный ТЗМ переменной толщины (ячейки сот из фенольного органосотопласта заполнены композицией Avcoat 5026-39 HC/G, фирма Avco на основе эпоксифенольного новоласа, наполненного кварцевыми волокнами и фенольными пыльными микросферами); 2 — пленочные клеи НТ – 424 ($T_{\text{раб}}$ до 315 °С); 3 — внешняя силовая оболочка из спаянных листов нержавеющей стали РН-15 – 7Мо (крепится к внутренней оболочке из алюминия 24 стрингерами, Т-образными секциями из стеклотекстолита); 4 — слои из стекловолнистого мата (теплоизоляция); 5 — конструктивная сотовая внутренняя оболочка из алюминиевых сплавов 2014 – Т6, 5052 – Н39

Литература

1. Шмидт Д.Л. Абляция. В кн.: Конструкционные свойства пластмасс (физико-химические основы применения); под ред. Э. Бэра. — М.: Химия, 1967. — С. 401–456.
2. Рогайлин М.И. Абляция. В кн.: Энциклопедия полимеров. — М.: Сов. Энциклопедия, 1972. — Т. 1. — С. 14, 15.
3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976. — 392 с.
4. Панкратов Б.М. Спускаемые аппараты. — М.: Машиностроение, 1984. — 232 с.
5. Авдеевский В.С. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. — М.: Машиностроение, 1975. — 624 с.
6. Исаханов Г.В. Прочность неметаллических материалов при неравномерном нагреве. — К.: Наукова Думка, 1971. — 178 с.
7. Душин Ю.А. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках. — Л.: Химия, 1968. — 210 с.
8. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. — М.: Мир, 1967. — 180 с.

9. Шмидт Д.Л. // Вопросы ракетной техники.— 1970. — № 6. — С. 9–36.
10. Калинин В.А. Технология теплозащиты и теплоизоляции изделий: Конспект лекций. — М.: МГТУ, 1991. Часть 1, 36, 1994. Часть 2. — 61 с.
11. Neuse E.W. *Materials Science and Engineering*, 1973, v. 11, N3, p. 121–130; Вопросы ракетной техники, 1974, № 8, с. 83–98.
12. Попов В.Г. В кн.: Теоретические основы авиа- и ракетностроения: учебное пособие для вузов. А.С. Чумадин и др. — М.: Дрофа, 2005. — С. 284–341.
13. Chaumette D., *Materiaux et Techniques*, 1985, N10–11, p. 541–546; 1988, N2, p. 120–125.
14. Delmonte J. *Technology of Carbon and Graphite fiber Composites. Van Nostrand Reinhold Company, N.-Y.-London*, 1981, 452 p.
15. Фиалков А.Е. Углерод. Межслоевые соединения и композиты на его основе. — М.: Аспект пресс, 1997. — 718 с.
16. *Materials Design*, 1988, v. 9, p. 247.
17. Kayten G.G. at all., *AIAA Paper*, 1984, N2445, p. 1–13
18. Гушперт А. // Вопросы ракетной техники.— 1959.— № 7.— С. 15–20
19. Ганеев А.А. НК. XXXIV Гагаринские чтения. М., 1–5 апреля 2008 г.
20. Проспект Фирмы *Sintec Keramik GmbH*, 1990.
21. Елисеев Ю., Токаев Ю. Авиапанорама, 2000, март–апрель, с. 16, 17.
22. Елисеев Ю.С. и др. Неметаллические КМ в элементах конструкций и производстве авиационных ГТД. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 368 с.
23. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. — СПб.: Профессия, 2006. — 624 с.
24. *Refractory Journal*, 1982, v. 57, N1, p. 18–20.
25. *Flight Internation*, 1982, v.12, N3803, p. 744.
26. *Sample Journal*, 1983, v. 19, N5, p.50
27. *Ceramic Bulletin*, 1981, v. 60, N11, p. 1235, 1985, v.64, N8, p. 1105; 1986, v. 65, N1, p. 54.
28. Сенозацкий В.Н. ПАКТ.— 1993.— № 1.— С. 33, 34.
29. *Popular Mechanics*, 2005, №7, p. 46, 49–51.
30. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник.; под ред. А.Е. Шейндлина. — М.: Энергия, 1984. — С. 79–92.
31. Гурьевич М.М. и др. Оптические свойства лакокрасочных покрытий. — Л.: Химия, 194. — С. 79–92.
32. *Space Aeronautics*, 1963, v. 39, N4, p. 81
33. Adams M.L., *ARS Journal*, 1959, v. 29, N9, p. 625–632, *BPT*, 1960, №4, с. 16–35.
34. Дюнзе М.Ф., Жимолохин В.Г. РДТТ для космических систем. — М.: Машиностроение, 1982. — С. 143–147.
35. Баженов В.Н. и др. Моделирование основных характеристик и процессов функционирования КА. — М.: Машиностроение, 1985. — 260 с.
36. Adams E., *J. Aerospace Science*, 1960, v. 27, № 8, p. 620–630; *Aircraft and Missiles*, 1960, v. 3, № 2, p. 40–45.
37. Буланов Н.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. — М.: МГТУ, 1998. — 516 с.
38. Композиционные материалы: справочник; под общ. ред. В.В. Васильева, О.М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
39. Молчанов Б.И. и др. Углепластики. — М.: Химия, 1985. — 208 с.
40. Костиков В.И. и др. Композиционные материалы на основе углерода. — М.: Metallurgia, 1978. — 320 с.
41. Бушуев Ю.Г. и др. Углерод-углеродные композиционные материалы. — М.: Metallurgia, 1994. — 128 с.
42. Колесников С.А. В кн.: Термоустойчивость пластиков конструкционного назначения. — М.: Химия, 1980. — С. 213–240.

43. Костиков В.И., Варенков А.Н. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы. — М.: Интермет инжиниринг, 2003. — 560 с.
44. Колесников С.А. // Композитный мир. — 2006. — № 6. — С. 16–19.
45. Колесников С.А. // Технология машиностроения. — 2006. — № 8. — С. 11–18.
46. Справочник резинщика. Материалы резинового производства. — М.: Химия, 1971. — 640 с.
47. Термоэластопласты; под ред. В.В. Моисеева. — М.: Химия, 1985. — 184 с.
48. Ромашин А.Г., Русин М.Ю. Основы технологии производства ЛА; учебное пособие. — М.: Наука и технологии, 2005. — С. 139–170.
49. *Thermal characterization of Polymeric Materials*, Ed. E.A. Turi, N.-Y., 1997, 2200 p.
50. Коварская В.М. и др. Термическая стабильность гетероцепных полимеров. — М.: Химия, 1977. — 264 с.
51. Брык М.Т. Деструкция наполненных полимеров. — М.: Химия, 1989. — 240 с.
52. *Lausevic Z., Carbon*, 1986, v. 24, №5, p. 575–580.
53. Ладаки Р. и др. // Ракетная техника и астронавтика. — 1966. — № 10. — С. 37–45.
54. Розенсвейг Р.Е., Бичер Н. Ракетная техника и космонавтика. — 1963. — № 8. — С. 55–63.
55. Тюкаев В.Н. в кн.: Армированные пластики; под ред. Г.С. Головкина. — М.: Изд-во МАИ, 1997. — С. 125–245.
56. *Materials Engineering*, 1983, v. 97, № 1, p. 27–31.
57. Назаров А.А. и др. Конструкционные пластмассы. Справочник. — М.: Машиностроение, 1973. — 240 с.
58. Донской А.А. Зарубежные теплозащитные материалы на основе кремнийорганических эластомеров. — ВИАМ, 1992. — 59 с.
59. *Strouhal G., et al., AIAA Symp.*, 1966, p. 184–200 (Вопросы ракетной техники, 1967, № 4. — С. 25–45).
60. Сычев М.М. Неорганические клеи. — Л.: Химия, 1974. — 160 с.
61. Чарлзби А. Ядерные излучения и полимеры. Пер. с англ. — М.: Химия, 1962. — 310 с.
62. Энциклопедия полимеров. — М.: Сов. Энциклопедия, 1977. — Т. 3. — С. 247–270
63. Радиационная стойкость материалов. Справочник; под ред. В.Д. Дубровского. — М., 1973.
64. Князев В.К. и др. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций. Справочник. — М., 1976.
65. Болт Р., Дж. Кэрролл. Действие радиации на органические материалы; пер. с англ. — М., 1965.
66. Милинчук В.К. и др. Радиационная стойкость органических материалов. — М.: Энергоиздат, 1986. — 205 с.
67. Колганова В.А. и др. // Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы. — 1983. — № 9. — С. 4, 5.
68. Хилаждинов К.В. // Композитный мир. — 2008. — № 5. — С. 10–19.

Приложение 1.

Характеристики пьезокерамических материалов

Таблица 1. Сравнительные характеристики пьезокерамических материалов

| Свойства | Тип материала, технология изготовления, показатели свойств | | | |
|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| | ТВ-3 ОТ | ТВ-3 ГП | ТНВ-1 ОТ | ТНВ-1 ГП |
| Плотность, г/см ³ | 7,55 | 7,8 | 7,6 | 7,85 |
| Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_{33} T / \epsilon_0$ | 160 | 180 | 115 | 115 |
| Пьезоконстанты: | | | | |
| d_{33} , пКл/Н | | | | |
| d_v (объемный пьезомодуль), пКл/Н | 14–16 | 18–20 | 8–12 | 13–14 |
| Диапазон рабочих температур, °С | –254÷60 | | –254÷700 | |
| Обратимые изменения d_{33} в рабочем диапазоне температур, % | 15–20 | 10–12 | 8 | 10 |
| ρ_v при T_{max} , Ом·см | 4·10 ⁴ | 8·10 ³ | 1·10 ³ | 1·10 ³ |

Примечания. ОТ – традиционная технология спекания; ГП – горячее прессование.

Состав ТВ-3: 0,95Bi₄Ti₃O₁₂ + 0,05WO₃ + 1 %масс. Nb₂O₅

ТНВ-1: Bi₃TiNbO₉ + 0,3 %масс. Cr₂O₃

Таблица 2. Параметры и характеристики пьезопреобразователей компрессионного типа

| Свойства | Тип пьезоматериала, показатели свойств | | |
|---|--|-------------------|-------------------|
| | ПМ-1 ЦТС-83Г | ПМ-2 ТВ-3 | ПМ-3 ТНВ-1 |
| Электрическая емкость, Пф | 5000±100 | 600±20 | 70±5 |
| Чувствительность, пКл/Н | 1200±100 | 70±5 | 25±3 |
| Рабочий диапазон температур, °С | 25–300 | 25–500 | 25–700 |
| Изменение чувствительности в рабочем диапазоне температур, % | 10–15 | 12–15 | 12–15 |
| Сопротивление изоляции при максимальной температуре рабочего диапазона температур, Ом | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁵ | 1·10 ⁴ |

Таблица 3. Характеристики пьезоэлектрических материалов

| Свойства | Типы материалов и показатели свойств | | | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|
| | ЦТС-83Г | ТВ-2 | ТВ-3 | ТНВ-1 | ЦТС-52 | МНП-1 |
| Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_{33}T/\epsilon_0$ | 1200 | 160 | 160 | 120 | 1000 | 35–40 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } \delta$ | 0,025 | 0,03 | 0,02 | 0,9 | – | 0,015 |
| Пьезомодуль, $d_{33} \cdot 10^{12}$, Кл/Н | 200 | 15 | 18 | 12 | 270 | 10 |
| Максимальная рабочая температура, °С | 300 | 500 | 600 | 700 | – | 900 |
| Максимальное статическое давление, МПа | – | 150 | 150 | 150 | – | 150 |
| Относительное изменение d_{33} от: | | | | | | |
| температуры, °С ⁻¹ ; | 15·10 ⁻⁴ | 8·10 ⁻⁴ | 5·10 ⁻⁴ | 3·10 ⁻⁴ | – | 5·10 ⁻⁴ |
| давления, см ² /кгс при температуре 25±10 °С; | – | 1·10 ⁻⁴ | 7·10 ⁻⁴ | 7·10 ⁻⁴ | – | 8·10 ⁻⁴ |
| давления, см ² /кгс при максимальной рабочей температуре | – | 3·10 ⁻⁴ | 2·10 ⁻⁴ | 1·10 ⁻⁴ | – | 2·10 ⁻⁴ |
| Температура точки Кюри, °С | 360 | 650 | 645 | 930 | 285 | 1200 |
| Механическая добротность Q_M | – | – | – | – | 800 | – |
| Коэффициент электромеханической связи K_p | – | – | – | – | 0,5 | – |

Примечания. d_{33} — пьезомодуль, характеризует степень поляризованности.

Определение — оптический интерферометр.

Состав ЦТС-83Г: $\text{Pb}_{0,97}\text{Ba}_{0,01}\text{Cu}_{0,01}\text{Sr}_{0,05}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,46}\text{O}_3 + 1,4\% \text{масс. } \text{B}_2\text{O}_3 + 0,3\% \text{масс } \text{GeO})$.

Таблица 4. Характеристики пьезокерамических материалов

| Свойства | Типы материалов, технология изготовления (см. табл. 1), показатели свойств | | | |
|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| | ЦТС-83Г ОТ | ЦТС-83Г ХТ | ЦТС-83Г ГП | ПКП-50 – |
| Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_{33}T/\epsilon_0$ | 1400±100 | 1650±50 | 1850±50 | 900±100 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } \delta$ | 1,8 | 1,9 | 1,7 | 2,0 |
| Пьезоконстанты: | | | | |
| d_{33} , пКл/Н | 180–260 | 320–340 | 360–390 | 150–180 |
| d_{31} , пКл/Н | 90–120 | 150–170 | 180–190 | 80–110 |
| Верхняя граница рабочего диапазона температур, °С | 300 | 300 | 300 | 350 |
| Обратимые изменения d_{33} в рабочем диапазоне температур, % | 15 | 10–12 | 10–12 | 30–40 |
| Удельное объемное сопротивление при максимальной рабочей температуре ρ_r , Ом·см | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁶ | 5·10 ⁶ | 1·10 ⁵ |

Примечания. ХТ — химическое соосаждение.

Состав ПКП 50: $\text{Pb}_{0,97}(\text{Zr}_{0,50}\text{Ti}_{0,50})\text{O}_3 + 0,5\% \text{масс. } \text{Bi}_2\text{O}_3$.

Таблица 5. Технические характеристики пьезопреобразователей

| | | | |
|--|-----------|-----------|---------------|
| Габаритные размеры преобразователя, мм | 24×24×1 | 17×3×1,2 | 18×4×1 |
| Режимы работы | По заряду | По заряду | По напряжению |
| Электрическая емкость, ПФ | 22–27 | 9,3–10,5 | 3–3,5 |
| Основная пьезочувствительность, пКл/Н | 650±30 | 110±5 | 28±2 |
| Рабочий диапазон температур, °С | 25–300 | 25–300 | 25–250 |
| Обратимые изменения коэффициента преобразования в рабочем диапазоне температур, не более | 12 | 12 | 20 |

Литература

Коптев Ю.Н. // Успехи современной радиоэлектроники. — 1991. — № 9. — С. 3–96.

Приложение 2.

Магнитодиэлектрики (дефиниции)

1. Магнетизм (*magnetis*, греч. — магнит) — раздел физики, изучающий взаимодействие движущихся электрически заряженных частиц (тел) или частиц (тел) с магнитным моментом, осуществляемое магнитным полем и общее наименование проявлений этих взаимодействий. В магнитных взаимодействиях участвуют элементарные частицы (электроны, протоны и др.), электрические токи и намагниченные тела, обладающие магнитным моментом. У элементарных частиц магнитный момент может быть спиновым и орбитальным. Магнетизм атомов, молекул и макроскопических тел определяется магнетизмом элементарных частиц. В зависимости от характера взаимодействия частиц-носителей магнитного момента у веществ может наблюдаться ферромагнетизм, антиферромагнетизм, парамагнетизм и диамагнетизм.

2. Магнетик — вещество, обладающее магнитными свойствами. Различают ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики, парамагнетики, диамагнетики.

3. Магнетосопротивление (магниторезистивный эффект) — изменение электрического сопротивления проводника под действием магнитного поля. Обусловлено искривлением в магнитном поле траекторий носителей тока. В обычных металлах при 20 °С сопротивление может меняться на десятые доли процента (при низких температурах сильнее), в ферромагнетиках на единицы % (в поле напряженностью $H \sim 10$ кЭ, то есть $\sim 10^5$ А/м). В полупроводниках — значительно больше и резко зависит от концентрации примесей и температуры.

4. Магнетрон — электровакуумный прибор, мощный генератор электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Принцип действия основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях (используется в радиолокации).

5. Магнитная анизотропия — зависимость магнитных свойств монокристаллов ферро-, ферри- и антиферромагнетиков от направления в кристалле; обусловлена различием энергии взаимодействия атомных магнитных моментов от их взаимной ориентации. Количественно характеризуется энергией, выражаемой через константы магнитной анизотропии вещества.

6. Магнитная антенна — антенна с сердечником из магнитных материалов — магнитодиэлектриков или ферритов.

7. Магнитная восприимчивость вещества или среды (χ) характеризует связь между магнитным моментом (намагниченностью) вещества J и напряженностью магнитного поля H в этом веществе, $\chi = J/H$ (в единицах СГС); $\chi = J/\mu_0 H$ (в единицах СИ), где μ_0 — магнитная постоянная.

8. Магнитная индукция (B), среднее результирующее магнитное поле в веществе $B = H + 4\pi J$ (СГС), $B = \mu_0 H + \mu_0 J$ (СИ), где H — напряженность магнитного поля, J — намагниченность вещества.

9. Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м = $1,256 \cdot 10^{-6}$ Г/м (магнитная проницаемость физического вакуума, Гн/метр). Скорость света в вакууме $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$. Индукция магнитного поля $B = \mu_0 H$, H — напряженность магнитного поля.

- Генри, Гн, единица индуктивности и взаимной индуктивности $\text{Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} = 1 \text{ Вб} / \text{А} = 10^9 \text{ см}^2$ (ед. СГСМ) = $1,11 \cdot 10^{-12}$ (ед. СГСЭ). Гн/м, единица СИ абсолютной магнитной проницаемости; $1 \text{ Г} / \text{м} = 1 \text{ Т} \cdot \text{м} / \text{А} = 1 \text{ Вб} / \text{А} \cdot \text{м}$; Гн(Н — за рубежом).

- Вебер, Вб, единица магнитного потока (СИ), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 10^8 \text{ Мкс}$.
- Максвелл, единица магнитного потока (СГС), $\text{Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}$.
- Тесла, Тл , единица магнитной индукции (СИ), $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб}/\text{м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{А} \cdot \text{м} = 10^4 \text{ Гс}$.

Тесламетр — прибор для измерения индукции или напряженности магнитного поля в неферромагнитной среде.

10. Магнитная проницаемость, μ , характеризует связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H , $\mu = B/H$ (СГС) = $B/\mu_0 H$ (СИ), μ_0 — магнитная постоянная.

Магнетон Бора $\mu_B = eh/4\pi m_e = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж}/\text{Тл}$.

Ядерный магнетон $\mu_N = eh/4\pi m_p = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж}/\text{Тл}$;

$\mu_e = 9,28 \cdot 10^{-24} \text{ Дж}/\text{Тл}$; $\mu_p = 1,41 \cdot 10^{-26} \text{ Дж}/\text{Тл}$.

Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью $\mu = 1 + 4\pi \chi$ (СГС), $\mu = 1 + \chi$ (СИ).

11. Магнитная структура атомная, периодически пространственное расположение и ориентация атомных магнитных моментов в магнитоупорядоченных монокристаллах, проявляется в существовании магнитных подрешеток.

12. Магнитное насыщение, достижение максимального возможного для данного вещества значения намагнитченности J_∞ . В ферромагнетиках магнитное насыщение считается достигнутым, если магнитный момент достигает значения, равного спонтанной намагнитченности J_s ферромагнитных доменов при данной температуре.

13. Магнитное поле, одна из форм электромагнитного поля. Оно создается движущимися электрическими зарядами и спиновыми магнитными моментами атомных носителей магнетизма (электронов, протонов и др.).

14. Магнитное сопротивление, характеристика магнитной цепи, отношение магнитодвижущей силы в цепи к созданному в ней магнитному потоку.

15. Магнитно-мягкие материалы намагнитчиваются до насыщения и перемагнитчиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $\sim 8\text{--}800 \text{ А}/\text{м}$. Характеризуются высокой магнитной проницаемостью, низкой коэрцитивной силой, магнитными потерями на гистерезис и вихревые токи. Подразделяются на материалы для техники слабых токов (пермаллой, пермендюр, смешанные ферриты, ферриты-гранаты) и электротехнические стали. К ним относятся термомагнитные сплавы и магнитострикционные материалы.

16. Магнитно-твердые (жесткие) материалы намагнитчиваются до насыщения и перемагнитчиваются в относительно сильных магнитных полях напряженностью в тысячи и десятки тысяч $\text{А}/\text{м}$. Характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукцией, магнитной энергии на участке размагничивания («спинка» петли гистерезиса). Используют сплавы типа Fe–Al–Ni–Co, Fe–Co–Mo, Fe–Co–V, Pt–Co, некоторые ферриты, соединения редкоземельных элементов с кобальтом, изготавливают постоянные магниты.

17. Пермаллой — сплав Ni с Fe с высокой μ ; низконикелевые (40–50% Ni), высоконикелевые (70–83% Ni), супермаллой (79% Ni, 16% Fe, 5% Mo) для слабых токов.

18. Пермендюр — сплав Fe с 48–50% Co, до 2% V для полюсных наконечников электромагнитов, мембраны телефонов.

19. Магнитный момент — векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Макроскопический магнитный момент создают замкнутые электрические токи и упорядоченные ориентированные магнитные моменты атомных частиц.

20. Магнитострикция — изменение размеров и формы кристаллического тела при намагнитывании. Вызывается изменением энергетического состояния кристаллической решетки в магнитном поле, расстояний между узлами решетки. Наибольших значений достигает в ферро- и ферримагнетиках, в которых магнитные взаимодействия особенно велики.

21. Парамагнетизм — свойство вещества намагнитываться во внешнем магнитном поле в направлении поля. Обладают вещества (парамагнетики), атомы (ионы) которых имеют магнитный момент, но в которых отсутствует самопроизвольная намагнитченность.

При намагничивании атомные магнитные моменты выстраиваются по направлению поля (в отсутствие поля они дезориентированы тепловым движением). Магнитная восприимчивость парамагнитных веществ $\chi > 0$. У многих веществ она не зависит от поля, но сильно зависит от температуры (закон Кюри). При $T >$ точки Кюри ферро- и антиферромагнетики парамагнитны.

22. Парамагнетик — вещество, обладающее положительной магнитной восприимчивостью (10^{-3} – 10^{-6}): щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные металлы; ряд солей Fe, Co, Ni и редкоземельных элементов; кислород. Парамагнетизм обусловлен спиновыми и орбитальными магнитными моментами электронов.

23. Диамагнетизм — намагничивание в направлении, противоположном направлению внешнего магнитного поля (диамагнитная восприимчивость $\chi_d < 0$). Прецессионный диамагнетизм обусловлен тем, что под действием магнитного поля внутриатомные электроны приобретают добавочную угловую скорость (силы Лоренца), благодаря чему в каждом атоме или ионе возникает добавочный магнитный момент, направленный против создающего его внешнего магнитного поля. Диамагнетизм присущ всем веществам.

24. Диамагнетик — вещество, обладающее отрицательной магнитной восприимчивостью (10^{-6} – 10^{-5}), к ним относятся Cu, Bi, Ag, Au, Pb, инертные газы, многие органические вещества. Сверхпроводники имеют аномально высокую диамагнитную восприимчивость ($1/4\pi \sim -0,1$).

25. Магнитодиэлектрики — композиции из диэлектрических (полимеры) и ферромагнитных компонентов. Имеют большие значения удельного электрического сопротивления и малые потери на вихревые токи.

26. Ферриты — неметаллические твердые магнитные материалы (ферритмагнетики) — химические соединения оксидов (окислов) главным образом переходных металлов с оксидом (окисью) железа. Применяют ферриты со структурой шпинели (так называемые феррошпинели) и со структурой граната (феррогранаты), а также гексаферриты и ортоферриты. По магнитным свойствам аналогичны ферромагнетикам (низкая электропроводность и потери на вихревые токи).

27. Феррогранаты — ферриты иттрия и лантаноидов с общей формулой $R_3Fe_5O_{12}$, R_3 — Y, Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Eu, Sm.

28. Ферромагнетизм — магнитоупорядоченное состояние макроскопических объемов вещества (ферромагнетика), в котором магнитные моменты атомов (ионов) параллельны и одинаково ориентированы. Эти объемы (домены) обладают магнитным моментом J_s или M (самопроизвольной намагниченностью) даже при отсутствии внешнего намагничивающего поля. Для ферромагнетиков во внешнем магнитном поле характерны: нелинейность кривой намагничивания и магнитный гистерезис при перемагничивании. Магнитный момент J_s с повышением T уменьшается и равен нулю в точке Кюри.

29. Ферромагнетики — Fe, Co, Ni, Cd, Tb, Dy, Ho, Er, их сплавы и соединения, сплавы и соединения Ст и Mn с неферромагнитными элементами.

30. Ферромагнитный резонанс — избирательное поглощение энергии электромагнитного поля при частотах радиодиапазона, совпадающих с собственной частотой прецессии Лармора магнитного момента ферромагнетика. На основе ферромагнитного резонанса созданы генераторы и усилители СВЧ диапазона, преобразователи частоты, резонансные радиопоглощающие материалы, покрытия и конструкции (10^{11} — СВЧ, 10^{12} — ТГц, доли мм; $>10^{12}$ — ИК).

31. Прецессия Лармора — дополнительное вращение как целого («прецессия») системы одинаково заряженных частиц, например, электронов в атоме, возникающее под действием постоянного, однородного магнитного поля, направление которого и служит осью вращения.

32. Ферромагнетизм — магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором магнитные моменты существующих в кристалле магнитных подрешеток взаимно не скомпенсированы и создают спонтанный магнитный момент $J_s \neq 0$. Во внешнем магнитном поле ферритмагнетик намагничивается подобно ферромагнетику. У некоторых ферритмагнетиков существует

температурная точка компенсации, когда $J_s = 0$. При температуре выше точки Нееля ферри-магнетизм исчезает.

33. Ферримагнетики — ряд упорядоченных металлических сплавов, различные окислы и их смеси (ферриты).

34. Ферримагнитный резонанс — избирательное поглощение энергии электромагнитного излучения в диапазоне радиочастот и в ИК-диапазоне, связан с прецессией векторов намагниченности магнитных подрешеток ферримагнетика во внешнем магнитном поле.

35. Подрешетки магнитных ферро- и ферримагнетиков — система одинаково ориентированных атомных магнитных моментов, образующих в кристалле пространственную подрешетку, период которой обычно в целое число раз больше периода кристаллической решетки. Если в кристалле имеются две подрешетки с равными и антипараллельными суммарными магнитными моментами, то кристалл антиферромагнитен; если магнитные моменты подрешеток взаимно не скомпенсированы, то кристалл ферримагнитен.

36. Точка Нееля — температура, выше которой исчезает спонтанная намагниченность антиферромагнетиков, и они становятся парамагнетиками.

37. Точка Кюри — температура θ , выше которой исчезает самопроизвольная намагниченность доменов ферромагнетиков и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

38. Антиферромагнетизм — магнитоупорядоченное состояние кристаллического вещества, в котором магнитные моменты атомов (ионов) в соседних узлах кристаллической решетки ориентированы антипараллельно и поэтому намагниченность вещества в целом очень мала. Под действием внешнего магнитного поля антиферромагнетики приобретают слабую намагниченность. Повышение температуры до точки Нееля приводит к потере намагниченности и переходу в парамагнитное состояние.

Литература

Магнетизм и магнитные материалы. Терминологический справочник; под ред. Ф.В. Лисовского и Л.Н. Антонова. — М.: Вагриус. — 1997. — 240 с.

Приложение 3.

Методики определения диэлектрических свойств

Для оценки диэлектрических свойств материалов используют следующие критерии (определение при нормальных условиях по *DIN 50014-23/50*, 23 °С, 50 %-ная относительная влажность по *ISO 2911*):

1. Удельное объемное сопротивление (*Volume resistivity; Spezifischer Durchgangswiderstand*), (ρ_v) Ом·см (по *IEC 93*, образец 60×60×1 мм или 80×80×1 мм); *ГОСТ 6433.4-71, DIN 53482; VDE 0303/3*.

2. Удельное поверхностное сопротивление (*Surface resistivity; Spezifischer Oberflächenwiderstand*), (ρ_s) Ом (по *IEC 93*, образец 60×60×1 мм или 80×80×1 мм); *DIN 53482; VDE 0303/3*.

3. Пробивное напряжение, электрическая прочность (*Dielectric strength; Durchschlagfestigkeit*), кВ/мм (*IEC 93*, часть 1, образец 60×60×1 мм) *DIN 53482; VDE 0303/2*.

4. а) Диэлектрическая проницаемость (*Relative permittivity; Dielektrizitätszahl*) при 100 Гц и 1 МГц, (ϵ_r) по *IEC 250, DIN VDE0303* часть 4, (образец 60×60×1 мм или 80×80×1 мм);

б) Диэлектрическая проницаемость при 1 кГц и 1 МГц (ϵ_k) по *ASTM D150*.

5. а) Коэффициент (тангенс угла) диэлектрических потерь (*Dissipation factor; Dielekr. Verlustfaktor*) при 100 Гц и 1 МГц, ($\tan \delta_e$) по *IEC 250, DIN VDE0303* часть 4 (образец 60×60×1 мм или 80×80×1 мм); *ГОСТ 6433.4-71*;

б) коэффициент (тангенс угла) диэлектрических потерь при 1 ГГц по *ASTM D150, DIN 53482, VDE0303/4*.

6. Образование путей утечки (*Tracking index; Kriechwegbildung*) *CTI, CTIM* по *IEC 112-DIN VDE 0303*, часть 2, образец 20×20×4 мм (по *ISO 3167*).

Сравнительный анализ трекинговостойкости по *ASTM UL746A, D3636*.

7. Дугостойкость (*Arc resistance; Lichtbogenfestigkeit*) по *ASTM D495*, секунды; *DIN 53484, VDE0303/5*, образец 120×120×10 мм.

8. Электролитическое коррозионное действие по отношению к алюминию по *IEC 462*, образцы 30×10×4 мм (по *ISO 3167*).

3.1. Методика определения удельного объемного электрического сопротивления полимеров

Литература: Практикум по полимерному материаловедению; под ред. П.Г. Бабаевского. — М.: Химия, 1980.

Испытания проводятся в соответствии с *ГОСТ 64332-71*.

Образцы для испытаний

Для испытания применяются плоские (круглые или квадратные) образцы размером (диаметром круга или стороной квадрата) от 25 до 150 мм. Образцы не должны иметь видимых

невооруженным глазом короблений, препятствующих плотному прилеганию электродов, а также дефектов и загрязнений. Плоскости образцов должны быть строго параллельными.

Электроды могут быть металлическими нажимными или притертыми с помощью тонкого слоя смазки, напыленными в вакууме, из токопроводящей резины, ртутными и т. п. Схема расположения соединения электродов приведена на рис. 1. Размеры электродов приведены ниже:

| | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Диаметр измерительного электрода, мм | $10 \pm 0,2$ | $25 \pm 0,2$ | $50 \pm 0,2$ | $75 \pm 0,2$ | $100 \pm 0,2$ |
| Диаметр высоковольтного электрода, мм, не менее | 20 | 40 | 75 | 100 | 125 |
| Ширина охранного электрода (не менее двойной толщины образца), мм, не менее | 2 | 5 | 10 | 10 | 10 |

При испытаниях при повышенных температурах использовать металлические нажимные или напыленные в вакууме электроды.

Зазор между измерительным и охранным электродами должен составлять $2 \pm 0,2$ мм.

Испытательная аппаратура

Испытания проводятся на тераомметре ЕК-6-11. Порядок работы приведен в инструкции к прибору. Схема термокамеры для испытания в интервале температур $20-200$ °С показана на рис. 2.

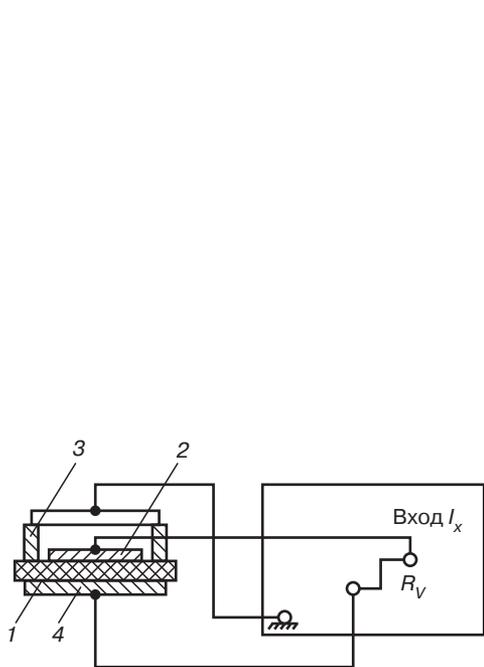


Рис. 1. Схема расположения и соединения электродов при оценке электрических свойств полимерных материалов: 1 — образец; 2 — измерительный электрод; 3 — охранный электрод; 4 — высоковольтный электрод

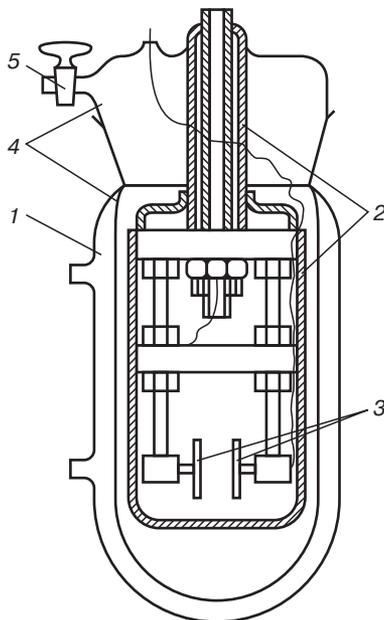


Рис. 2. Схема термокамеры для испытания электрических свойств полимеров в интервале температур $20-200$ °С: 1 — термостатирующая рубашка; 2 — электростатическая защита; 3 — плоские электроды с пружинным прижимом; 4 — колба и пробка со шлифом; 5 — кран для откачки воздуха

Проведение эксперимента

Образцы подвергнуть кондиционированию при заданных температурах и влажности в соответствии с ГОСТ 64331–71.

Поместить образец в термокамеру и термостатировать при соответствующей температуре не менее 20 мин. Наложить на образец электроды или контакты и замкнуть их перед подачей напряжения не менее чем на 1 мин. Подать измерительное напряжение (50, 100, 250, 500 и 1000 В) и выдержать до установления стабильных показателей. Если показатели не стабилизируются, их можно начинать отсчитывать с 60-й секунды.

Обработка результатов

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_V рассчитать по формуле

$$\rho_V = \pi \frac{D_0^2 R_V}{4h},$$

где R_V — измеренное сопротивление образца; $D_0 = (d_1 + d_2)/2$ (d_1 — диаметр измерительного электрода; d_2 — внутренний диаметр охранного электрода; h — толщина образца).

Результаты, полученные при нескольких температурах, выразить графически в координатах $\lg \rho_V - 1/T$ и по тангенсу угла наклона прямой $\operatorname{tg} \alpha$ рассчитать энергию активации проводимости ΔE_p :

$$\Delta E_p = 2,303R \operatorname{tg} \alpha,$$

где R — газовая постоянная.

3.2. Методика определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частотах от 50 до 10^8 Гц

(резонансный метод с использованием измерителей добротности).

Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ 6433.4–71.

Образцы для испытаний

Для испытания применяются те же образцы, что и в предыдущей методике.

Электроды — фольговые (притертые с помощью тонкого слоя смазки, припрессованные при нагревании в соответствии с ГОСТ 10405–63, прижатые давлением 100 г/см^2 через резину) из токопроводящей резины, токопроводящих покрытий, нанесенных вакуумным напылением серебра, золота, меди или алюминия. Размеры электродов, их расположение и зазоры между ними аналогичны принятым в предыдущей методике. Сопротивление электродного слоя не должно превышать 100 Ом при расстоянии между точками измерения 1 см. Вывод измерительного электрода и место соединения с измерительным прибором должны быть экранированы — защищены заземленной металлической оболочкой.

Диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ измеряли резонансным методом с использованием измерителя добротности на выбранных частотах. Параметры образцов определяли по приращению емкости и потерь держателя образца (конденсатора) при помещении между его электродами испытуемого образца при сохранении расстояния между электродами. В качестве держателя образца использовали микрометрическую ячейку.

Метод заключается в трехкратной настройке измерительного контура на резонанс: при отключенной микрометрической ячейке, при подключенной к зажимам «емкость» микрометрической ячейке с образцом и с подключенной микрометрической ячейкой без образца при расстоянии между электродами, равным толщине образца. При этом с помощью куметра измеряли емкости при резонансе C , C_1 и C_2 соответственно.

Испытательная аппаратура

Испытания проводятся при помощи цифрового автоматического моста переменного тока Р-589 для частоты 10^3 Гц, измерителей добротности Е-9-4 (для частот 10^4 – 10^6 Гц), Е-9-5 (для частот $1,5 \cdot 10^7$ – $2,5 \cdot 10^8$ Гц).

Порядок работы приведен в инструкции к приборам.

Схема устройства термокамеры показана на рис. 2

Проведение эксперимента

Образцы подвергнуть кондиционированию при заданных условиях в соответствии с ГОСТ 6433.1–71. При испытании при повышенных температурах использовать электроды, напыленные в вакууме.

Поместить образец в термокамеру и термостабилизировать при соответствующей температуре в течение 30 мин. Приложить к электродам контакты и измерительное напряжение (по стандарту рекомендуется 100 В). Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ определять непосредственно по шкале прибора (мост Р-589) или вычислять по формуле для измерительной добротности (с учетом значений добротности измерительного контура при второй Q_1 и третьей настройке Q_2):

$$\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \frac{C(Q_1 - Q_2)}{C_x Q_1 Q_2}.$$

Расчет C_x см. ниже или по формуле с учетом размеров образца и его диэлектрической проницаемости ϵ , $C_x = \epsilon C_d$, $C_d = 0,0885 S/d$, где S — площадь электрода, см^2 ; d — расстояние между электродами, см.

В качестве характеристики диэлектрических потерь (часть энергии внешнего электромагнитного поля, необратимо рассеиваемая в диэлектрике) используется угол δ между вектором силы тока, возникающего в диэлектрике и вектором напряженности приложенного поля.

$$\operatorname{tg} \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'.$$

Величину ϵ рассчитывают по формуле:

$$\epsilon = (C_1 - C_2)/C_d + 1,$$

где C_d — вакуумная емкость между электродами, пФ, или по формуле (для измерителей добротности):

$$\epsilon' = 14,4 C_x h/d_1^2,$$

где C — резонансная емкость контура без измерительного конденсатора; Q_1 , Q_2 — добротность контура без образца и с образцом соответственно; $C_x = (C_1 - C_2) + 0,0695 (d_1 + Bg)^2/h$ [h — толщина образца; d_1 — диаметр измерительного электрода; g — зазор между измерительным и охранном электродом; C_1 , C_2 — резонансная емкость контура без образца и с образцом соответственно; B — поправочный коэффициент, равный $B = 1 - 2,932h/g \lg (sh 0,7854g/h)$ при $a \ll h$; $B = 1$ при $a \geq h$ (a — толщина электрода)].

Коэффициент B можно определить по графику в координатах $B-g/h$ (см. ГОСТ 6433.4–71).

3.3. Определение диэлектрической проницаемости ϵ , тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta_\epsilon$ и проводимости γ методом волноводных линий

Литература:

Блинов А.А., Дмитриенко О.А. Применение электропроводящих ПМ для защиты от электромагнитных излучений. Обзорная информация НИИТЭХим. — Серия «Производство и переработка пластмасс и синтетических смол». — М., 1988. — 25 с.

На рис. 3 представлена схема волноводного моста. Половина электромагнитной энергии проходит через плечо моста, в котором находится исследуемый образец, заполняющий все сечение волновода, вентили, а также развязывающий аттенуатор, необходимый для плавного снижения мощности электромагнитной энергии и устранения взаимного влияния отдельных трактов волноводной линии.

При прохождении электромагнитной энергии через образец происходит ее частичное поглощение (переход в тепловую энергию), а также изменение фазы электромагнитной волны. Для выравнивания фазы волны в другом плече моста имеется калиброванный фазовращатель. Присоединение ко входу и выходу мостовой схемы осуществляется через двойные тройники — гибридные Т-образные схемы. Методика измерения электрофизических параметров электропроводных полимерных композиций в этом случае заключается в основном установлении нулевого баланса в системе сначала для образца толщиной b , а затем $b + \Delta b$ с использованием детекторной секции и нуль-индикатора.

По данной методике определяют затухание α электромагнитной энергии и сдвиг фаз φ , вызванные исследуемым образцом:

$$\alpha = \frac{\Delta\alpha}{8,686 \cdot \Delta b}, \text{ Непер/м};$$

$$\beta = \frac{\Delta\varphi}{57,296 \cdot \Delta b}, \text{ рад/м}.$$

Уравнения могут быть использованы для измерения электрофизических параметров полимерных композиций в условиях, когда наличием стоячей волны в образце можно пренебречь: при перпендикулярности граничных поверхностей образца и согласованной нагрузки,

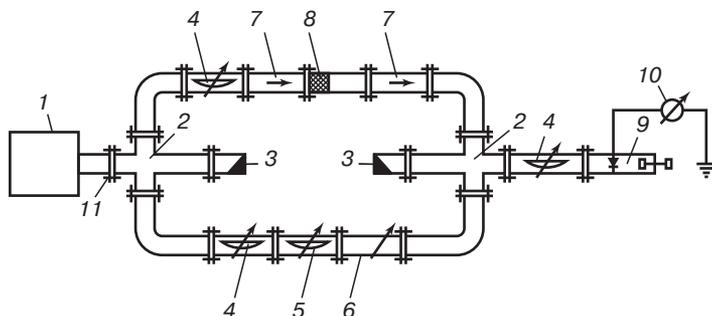


Рис. 3. Схема волноводного моста для измерения электрофизических параметров электропроводных полимерных материалов и резин:

1 — генератор электромагнитной энергии; 2 — двойной тройник; 3 — согласованная нагрузка; 4 — развязывающий аттенуатор; 5 — измерительный аттенуатор; 6 — калиброванный аттенуатор; 7 — вентиль; 8 — исследуемый образец; 9 — детекторная секция; 10 — нуль-индикатор; 11 — фланцевое соединение волноводов

определенной по начальной толщине исследуемого образца, если расстояние до образца при увеличении его толщины остается постоянным.

Известно, что для электромагнитной волны, бегущей в положительном направлении оси X , значения α и β определяются следующими уравнениями:

$$\alpha^2 = 4\pi^2 f^2 \epsilon \mu_0 \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4\pi^2 f^2 \epsilon^2}} \right), \text{ (Непер/м)}^2;$$

$$\beta^2 = 4\pi^2 f^2 \epsilon \mu_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4\pi^2 f^2 \epsilon^2}} \right), \text{ (рад/м)}^2.$$

Уравнение для расчета тангенса угла диэлектрических потерь материала:

$$\text{tg } \delta_\epsilon = \frac{2\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2}.$$

При решении системы уравнений относительно диэлектрической проницаемости и проводимости получим следующие формулы для их расчета:

$$\epsilon = \frac{\beta^2 - \alpha^2}{4\pi^2 f^2 \mu_0}, \text{ Ф/м};$$

$$\gamma = \frac{\alpha\beta}{\pi f \mu_0}, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}.$$

Формулы могут быть использованы при расчете электрофизических параметров материалов только для свободного пространства или коаксиальных линий с волной типа ТЕМ (поперечное электромагнитное поле). В случае же волноводных линий наблюдается электромагнитные волны типа ТЕ (поперечное электрическое поле), то есть такое поле, в котором проекция вектора магнитной составляющей, определяемой уравнением Максвелла, на направление распространения волны не равна нулю, а вектор электрической составляющей поля расположен в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны

$$E = E_{\text{пад}} \cdot \exp(-jkx) \exp(-j\omega t);$$

$$H = \frac{E_{\text{пад}}}{Z} \cdot \exp(-jkx) \exp(-j\omega t),$$

где $(-k = \beta - j\alpha)$ — комплексный фазовый множитель.

В данном случае $\text{tg } \delta_\epsilon$ рассчитывают по формуле:

$$\text{tg } \delta_\epsilon = \frac{2\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2 + \frac{4\pi^2}{\lambda_{\text{кр}}^2}},$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ — критическая длина волны в свободном пространстве, м.

Аналогично, с учетом критической волны в волноводе вычисляют ϵ

$$\epsilon = \lambda_0^2 \epsilon_0 \left(\frac{\beta^2 - \alpha^2}{4\pi^2} + \frac{1}{\lambda_{\text{кр}}^2} \right), \text{ Ф/м},$$

где λ_0 — длина электромагнитной волны в свободном пространстве, м; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Проводимость полимерных композиций рассчитывают по следующему выражению:

$$\gamma = 2\pi f \epsilon' \text{tg } \delta, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}.$$

Погрешность измерения электрофизических параметров электропроводных полимерных материалов с помощью волноводного моста определяется погрешностью измерительного аттенюатора, фазовращателя и составляет не более 2,5%.

Недостатком метода волноводного моста является ограниченная возможность его применения: только для материалов с $\gamma > 0,5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

3.4. Определение ϵ' , ϵ'' и γ методом «тонкого стержня»

Литература:

Блинов А.А., Дмитриенко О.А. Применение электропроводящих ПМ для защиты от электромагнитных излучений. Обзорная информация НИИТЭХим. — Серия «Производство и переработка пластмасс и синтетических смол». — М., 1988. — 25 с.

Для материалов с меньшей проводимостью пригоден метод «тонкого стержня» (рис. 4).

Метод «тонкого стержня» сводится к определению в прямоугольном волноводе эквивалентной нормированной проводимости цилиндрического стержня из исследуемого электропроводного полимерного материала или резины. Стержень помещается в центре широкой стенки волновода параллельно вектору напряженности электрического поля волны, распространяющейся в волноводе.

Поскольку исследуемый образец обладает комплексной диэлектрической проницаемостью, значения ϵ' и ϵ'' , зависящие от параметров волноводной линии, размеров образца и экспериментально измеренных активной G и реактивной B составляющих проводимости, рассчитывают по формулам:

$$\epsilon' = 1 + \left[2 \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \frac{U}{U^2 + V^2};$$

$$\epsilon'' = \left[2 \left(\frac{\lambda_0}{\pi d} \right)^2 + 0,5 \right] \frac{V}{U^2 + V^2};$$

$$U = 2\Sigma - 1,75 + \ln \frac{4a}{\pi d} + \frac{2\lambda_B}{a} \cdot \frac{B}{B^2 + G^2};$$

$$V = \frac{2\lambda_B}{a} \cdot \frac{B}{B^2 + G^2};$$

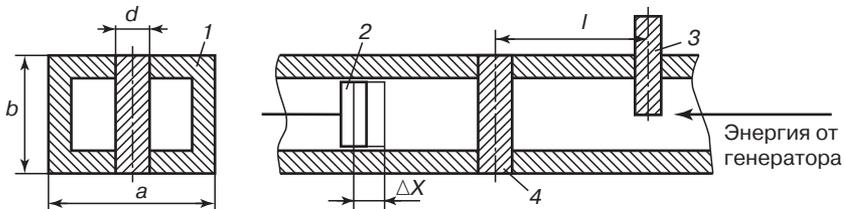


Рис. 4. Схема для измерения электрофизических параметров электропроводных полимерных материалов и резин методом «тонкого стержня»:

1 — волновод; 2 — поршень; 3 — зонд; 4 — исследуемый образец

$$\Sigma = \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2 - \left(\frac{2a}{\lambda_0}\right)^2}} - \frac{1}{n} \right),$$

где λ_B — длина волны в волноводе, м; a — размер широкой стенки волновода, м; d — диаметр стержня, м.

Активную G и реактивную B составляющие проводимости полимерной композиции измеряют с помощью короткозамыкающего поршня при фиксированном положении индикаторного зонда, установленного на расстоянии $l = 0,25 \lambda_B (2R + 1)$ от стержня.

Реактивную составляющую проводимости определяют по сдвигу поршня ΔX (см. рис. 4) при измерении минимума волноводной линии без образца и с образцом:

$$B = \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda_B} \cdot \Delta X.$$

Величину активной составляющей проводимости рассчитывают по формуле

$$G = \frac{1}{\sqrt{\frac{J_{\max}}{J_{\min}} - 1}},$$

где J_{\max} и J_{\min} — сила тока, измеренная соответственно в максимуме и минимуме волноводной линии с образцом при квадратичной характеристике детектора.

3.5. Измерение контактных сопротивлений в системе электропроводный полимерный материал–металл

Литература:

Блинов А.А., Дмитриенко О.А. Применение электропроводящих ПМ для защиты от электромагнитных излучений. Обзорная информация НИИТЭХим. — Серия «Производство и переработка пластмасс и синтетических смол». — М., 1988. — 25 с.

Метод состоит в последовательном измерении электрического сопротивления R_{1-n} участков исследуемого образца между 1–2, 1–3 и т. д. электродами.

Исходя из эквивалентной схемы электрическое сопротивление между двумя любыми электродами R_{1-n} можно представить как сумму собственного объемного электросопротивления r образца и двух контактных сопротивлений R'_n :

$$R_{1-2} = R'_1 + r_{1-2} + R'_2;$$

$$R_{1-3} = R'_1 + r_{1-2} + r_{2-3} + R'_3;$$

$$R_{1-4} = R'_1 + r_{1-2} + r_{2-3} + R_{3-4} + R'_4 \text{ и т. д.}$$

В приведенных уравнениях значения R'_n равны между собой, поскольку все электроды имеют одинаковые размеры и условия контакта с поверхностью исследуемого образца электропроводного полимерного материала. Следовательно, величина R_{1-n} любого участка будет определяться только значением r , которое, согласно закону Ома, линейно зависит от длины образца или в данном случае от расстояния l между электродами. Откладывая на координатах $R_{1-n} - l$ величины R_{1-2} , R_{1-3} , R_{1-4} и т. д. и экстраполируя прямые к началу координат

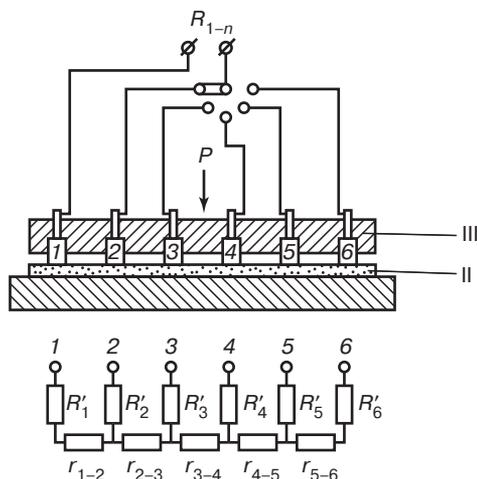


Рис. 5. Эквивалентная электрическая схема измерения R_k : I — фторопластовое основание электродов; II — исследуемый образец; III — съемное плато со сменными металлическими электродами 1–6; R'_1 – R'_6 — контактные сопротивления; r_{1-2} , r_{2-3} и т. д. — объемное электрическое сопротивление образца; P — давление

(полагая, что $l \rightarrow 0$) на оси ординат получаем значения контактного сопротивления пары электродов в выбранной системе электропроводный полимер–металл. Поскольку площадь контакта электродов с поверхностью образца известна, можно определить удельное контактное сопротивление $R_{удк}$ системы.

Приложение 4.

Методики определения магнитных свойств

4.1. Магнитная проницаемость (μ , баллистический метод)

Магнитную проницаемость измеряют баллистическим методом, обладающим относительной простотой аппаратного оформления в сочетании с достаточно высокой чувствительностью при напряженности магнитного поля 300 А/м. Для измерений используют кольцевые образцы (тороиды), у которых размагничивающий фактор равен нулю, что упрощает обработку экспериментальных данных. Баллистический метод определения магнитной проницаемости образцов в виде тороидов заключается в измерении количества электричества, которое возникает в обмотке, охватывающей образец, в результате быстрого изменения потока магнитной индукции через сечение этой обмотки.

На образец, представляющий собой кольцо, толщина которого мала по сравнению с диаметром, наматываются две обмотки. Первичная обмотка состоит из 50 витков медной изолированной проволоки диаметром 0,1 мм и соединяется с источником постоянного тока. Схема первичной цепи позволяет устанавливать заданное значение силы тока, а также быстро изменять его направление. Вторичная обмотка, состоящая из такого же числа витков той же проволоки, что и первичная обмотка, подсоединяется к микровольтампервеберметру Ф-18. Зная число витков в первичной обмотке, размеры катушки и силу тока, можно рассчитать напряженность магнитного поля H по формуле:

$$H = (N_1 / 2\pi R_{cp}) J.$$

где N_1 — число витков первичной обмотки; J — сила тока в первичной обмотке, А; R_{cp} — средний радиус тороида, м.

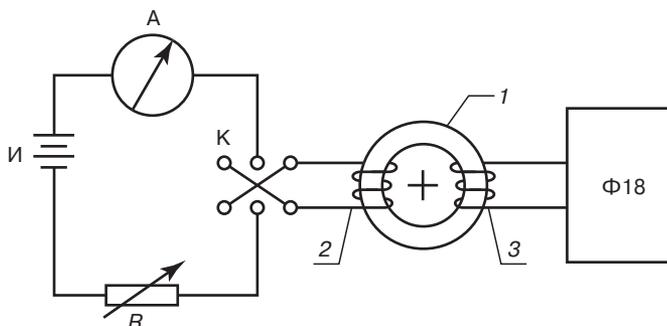


Рис. 6. Схема установки для баллистических измерений:

1 — образец; 2 — первичная (намагничивающая) обмотка; 3 — вторичная (измерительная) обмотка; И — источник постоянного тока; А — миллиамперметр; К — переключатель; R — переменное сопротивление; Ф-18 — микровольтампервеберметр

При резком изменении напряженности магнитного поля H вследствие изменения направления тока изменяется индукция в образце. Это приводит к появлению ЭДС во вторичной обмотке, вызывающей отклонение баллистического гальванометра. «Отброс» баллистического гальванометра пропорционален величине индукции B , которую рассчитывают по формуле:

$$B = (\beta/2N_2 S_{\text{обр}}) \cdot 10^6, \text{ Тл},$$

где β — показания прибора Ф-18, мкВб; N_2 — число витков во вторичной обмотке; $S_{\text{обр}}$ — площадь поперечного сечения образца, м².

Магнитную проницаемость образца рассчитывают по формуле:

$$\mu = B/\mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $12,57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м (Гн — Генри).

4.2. Магнитная восприимчивость (метод магнитных весов)

Магнитную восприимчивость χ измеряют методом маятниковых весов (рис. 7).

Метод основан на измерении механической силы, которая действует на образец, помещенный в неоднородное магнитное поле. Эта сила в направлении оси x равна:

$$F_x = M \cdot dH/dx,$$

где M — магнитный момент образца; H — напряженность магнитного поля.

Магнитный момент образца прямо пропорционален его магнитной восприимчивости χ :

$$M = m \cdot \chi \cdot H,$$

где m — масса образца.

Установка позволяет проводить исследования в интервале температур от 77 до 1800 К. Чувствительность установки позволяет измерять восприимчивость до $1 \cdot 10^{-7}$ при массе образца 30–50 мг. Магнитную восприимчивость измеряют нулевым методом. Для этого используют метод механической компенсации в гравитационном поле. При этом методе кварцевый стержень 2 с образцом 1 возвращается в первоначальное положение при помощи каретки с микрометрическим винтом 5 с точностью до 0,01 мм. Для регистрации нулевого положения служит оптическая система, состоящая из источника света 7, зеркала 3 и экрана 8.

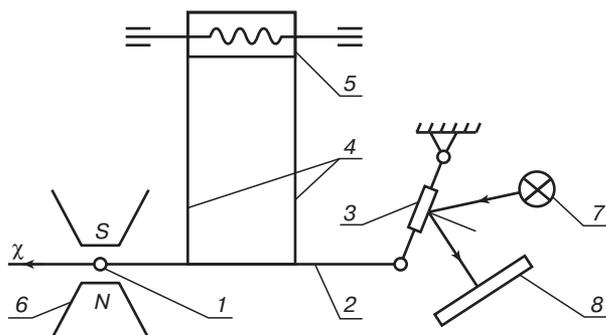


Рис. 7. Схема маятниковых весов с компенсацией в гравитационном поле:

1 — образец; 2 — легкий кварцевый стержень; 3 — зеркало; 4 — тонкие шелковые нити; 5 — подвижная каретка с микрометрическим винтом; 6 — электромагнит; 7 — источник света; 8 — экран

Для градуировки установки в качестве эталона использовали образец гольмия массой 1,8 мг и магнитной восприимчивостью $70 \cdot 10^{-6}$. Исследуемые и эталонные образцы помещали в одну и ту же область поля с заданным значением $H \cdot dH/dx$ с помощью каретки 5. Напряженность магнитного поля, создаваемая электромагнитом 6 в этой области, была равна 596,8 кА/м (7,5 кЭ). Магнитную восприимчивость исследуемого образца χ рассчитывали по формуле:

$$\chi = \chi_0 m_0/m [(d - d_t)/(d_0 - d_t)],$$

где χ_0 — магнитная восприимчивость эталонного образца; m_0 и m — массы эталонного и исследуемого образцов; d_0, d, d_t — величины смещения точки подвеса эталонного, исследуемого образцов, кварцевого стержня без образца.

4.3. Индукция насыщения. Метод вибрационного магнитометра

Литература: Кусков Г.С. и др. Измерение намагниченности насыщения СВЧ-материалов вибрационными магнитометрами. / Обзоры по электронной технике. 1970.— Вып. 4, . — 29 с.

Индукцию насыщения определяют с помощью вибрационного магнитометра (рис. 8).

В основу работы вибрационного магнитометра положен индукционный метод измерения магнитного потока исследуемого образца. Размагниченному образцу из ферромагнитного материала сообщают колебательные движения, что приводит к появлению переменного электромагнитного поля вокруг него. Это поле преобразуется в электрический сигнал при помощи воспринимающих катушек, расположенных в непосредственной близости от образца.

Образец 1 массой 22,35 мг приблизительно равноосной формы помещают на конце кварцевого стержня 2, который жестко соединен с источником колебаний — динамиком 3. Намагничивание образца до насыщения осуществляют с помощью электромагнита 4. Максимальная напряженность магнитного поля была равна 557 А/м (7 кЭ). Точность измерений 3%. Частота колебаний динамика, равная 89 Гц, задается с помощью генератора ГЗ-33. Ам-

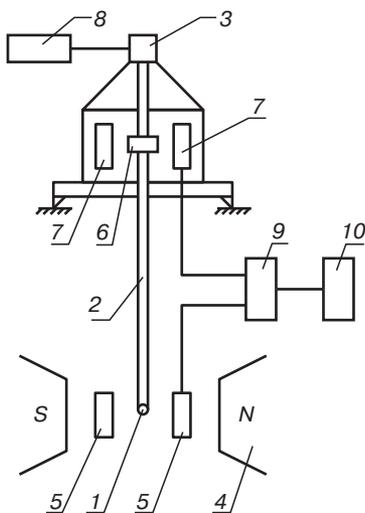


Рис. 8. Схема вибрационного магнитометра:

1 — образец; 2 — кварцевый стержень; 3 — динамик; 4 — электромагнит; 5 — измерительные катушки; 6 — постоянный магнит; 7 — компенсирующие катушки; 8 — генератор ГЗ-33; 9 — цепь усиления и сравнения сигналов; 10 — двухкоординатный самописец

плитуда колебаний — 0,3 мм. При колебаниях образца 1 и постоянного магнита 6 с заданной частотой в катушках 5 и 6 возбуждалась ЭДС. После усиления эти сигналы сравниваются и их разность подается на управление координатой y двухкоординатного самописца 10. Координата x управляется сигналом от электромагнита 4. Магнитометр градуирован с помощью образца-эталона из никеля массой 6 мг, удельная намагниченность насыщения которого при 20 °С составляет 54,39 ед. СГСЭ/г. Удельную намагниченность насыщения образцов рассчитывают по формуле

$$\sigma_s = \sigma_{s0} m_0 / m \cdot d / d_0,$$

где σ_{s0} — удельная намагниченность насыщения никеля; m_0 и m — массы эталона и исследуемого образца; d_0 и d — максимальные значения ординат для кривых намагничивания эталона и исследуемого образца.

4.4. Комплексная магнитная проницаемость в переменном магнитном поле (метод одного витка)

Литература: Грохольский А.Л. Измерители добротности — куметры. — Новосибирск: Наука, 1966. — 259 с.; Измерители параметров ферромагнитных материалов на высоких частотах при помощи куметров. — Киев: Наука, 1972. — 24 с.

Комплексную магнитную проницаемость в переменном магнитном поле измеряют методом одного витка. Метод основан на измерении активной и реактивной составляющих полного сопротивления витка проводника, по которому течет переменный ток, и витка образца при помещении в магнитное поле. В качестве витка проводника используют прямоугольную рамку из толстой медной проволоки.

Образец в виде тороида (рис. 9) с размерами 16×7×3 мм располагают коаксиально одной из сторон рамки в ее середине, чтобы исключить действие магнитных полей смежных сторон рамки. Рамку подсоединяли к куметру Е9-5. Рамка позволяет определять μ в пределах 1–200

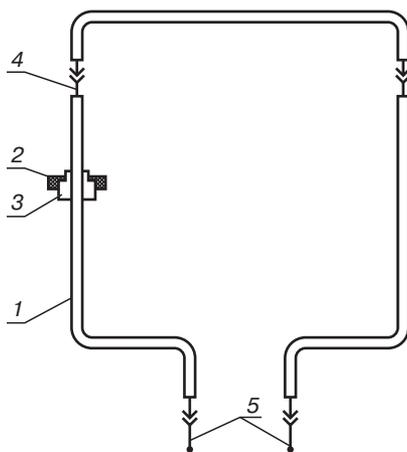


Рис. 9. Схема устройства для измерения магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь с помощью куметра:

1 — рамка; 2 — образец; 3 — центрирующая втулка из полистирола; 4 — разъем; 5 — зажимы «индуктивность» куметра

и $\operatorname{tg} \delta_{\mu}$ от 0,5 до 0,0005 на частотах 5–50 МГц. Погрешность определения средних значений магнитной проницаемости 5–20 и тангенсов углов потерь 0,1–0,01 составляет, соответственно, 2–5 и 3–10%.

Измерения проводят путем двукратной настройки измерительного контура куметра в резонанс на частотах 15 и 30 МГц. Первую настройку на резонанс производят с рамкой без образца; при этом отсчитывают значения емкости C_1 и добротности Q_1 . Вторую настройку производят с образцом и отсчитывают значения C_2 и Q_2 . Величину магнитной проницаемости μ рассчитывают по формуле

$$\mu - 1 = \frac{10^9}{2\omega^2 h \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right),$$

где ω — круговая частота; h — толщина образца, см; R и r — наружный и внутренний радиусы тороида (образца), см; C_1 и C_2 — емкости при резонансе.

Величину $\operatorname{tg} \delta_{\mu}$ определяют по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}.$$

Литература

1. Черников В.И. Магнитные измерения. — М.: Изд-во МГУ, 1969. — 387 с.
2. Грохольский А.Л. Измерители параметров ферромагнитных материалов при высоких частотах. — Киев: Наука, 1972. — 24 с.

Приложение 5.

Радиотехнические характеристики магнитодиэлектриков

5.1. Коэффициент отражения R магнитодиэлектриков

Литература: Блинов А.А., Дмитренко О.А. Обзорная информация НИИТэхим. — Серия «Производство и переработка пластмасс и синтетических смол». — М., 1998. — 25 с.

5.1.1. Метод замещения в свободном пространстве

Коэффициент отражения определяют сравнением уровня сигнала, отраженного материалом с металлической подложкой с уровнем сигнала, отраженного от одной металлической подложки (без радиопоглощающего материала). Обычно при этом пользуются две рупорных антенны (рис. 10), расположенные на суппортах (суппорты можно перемещать в вертикальной плоскости по дуге полуокружности). Путем регулировки угла излучения рупорной антенны передатчика по отношению к рупорной антенне приемника измеряется коэффициент отражения материала под разными углами для горизонтально и вертикально поляризованного излучения. Коэффициент отражения определяется по формуле $R = P_1/P_2$, где P_1 — уровень мощности колебаний, отраженных материалом; P_2 — уровень мощности колебаний отраженных металлическим листом; R — коэффициент отражения. Наиболее сложно производить эти измерения при нулевых углах излучения, так как энергия излучения в этом случае передается непосредственно между двумя антеннами. Если сравниваются напряженности поля E_A и E_R электромагнитных волн, отраженных соответственно от РПМ и от плоского металлического зеркала, имеющего размеры покрытия и установленного на том же месте $R = E_A/E_R$.

Образцы — пластины с размерами 150×150 мм. При измерениях образцы плотно прижимают к рупору. К противоположной стороне образца прикладывают металлическую пластину.

Излучающий и принимающий рупоры расположены на суппортах, которые можно перемещать в вертикальной плоскости вдоль дуги полуокружности. В центре дуги располагают испытываемый лист поглощающего материала. Поляризацию меняют, поворачивая рупоры

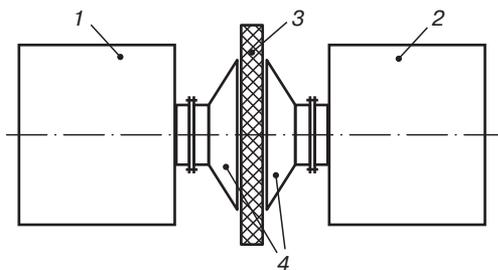


Рис. 10. Схема измерения экранирующей способности электропроводных полимерных материалов методом замещения в свободном пространстве (толщина образцов 0,006 м, длина волны 0,1 м): 1 — генератор электромагнитной энергии; 2 — приемник электромагнитной энергии (измеритель мощности); 3 — исследуемый объект; 4 — передающая и приемная антенны

вокруг оси. Передающий рупор излучает колебания сверхвысоких частот, модулированные прямоугольными импульсами, которые проходят через градуированный аттенуатор. Приемный рупор нагружен на полупроводниковый детектор, который связан кабелем с усилителем, настроенным на частоту модуляции.

Расположив рупоры так, чтобы получить нужные углы падения и поляризацию, в центре дуги помещают металлический лист. Затем устанавливают аттенуатор в такое положение, при котором получается достаточно высокое показание на выходе усилителя. Далее металлический лист заменяют испытуемым поглощающим материалом, а затухание, вносимое аттенуатором, уменьшают до тех пор, пока не получат прежнее показание на выходе усилителя. Разность двух отсчетов аттенуатора дает величину коэффициента отражения по мощности

$$R = 10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ},$$

где P_1 — уровень мощности колебаний, отраженных материалом; P_2 — уровень мощности колебаний, отраженных металлическим листом.

Диапазон частот измерений определяется свойством рупоров и параметрами высокочастотного генератора. При более низких частотах появляются большие ошибки из-за увеличения размеров рупоров и поверхностей испытуемых материалов по сравнению с расстоянием между ними. В этом случае коэффициент отражения можно определить по коэффициенту стоячей волны (КСВ). Установка включает в себя рупор, согласованный со свободным пространством. Размеры рупора выбираются так, чтобы угол раствора выходящего луча не превышал 12° . Лист покрытия помещается перед рупором так, чтобы получить необходимый угол облучения.

Зависимость, связывающая коэффициент отражения и КСВ, имеет вид

$$R^2 = \frac{1 - \frac{V_{\min}}{V_{\max}}}{1 + \frac{V_{\min}}{V_{\max}}},$$

где R — коэффициент отражения; V_{\min} — минимальное значение КСВ; V_{\max} — максимальное значение КСВ.

Метод замещения в свободном пространстве — антенный метод — не позволяет точно определить экранирующую способность на образцах вследствие влияния поля, дифрагировавшего на кромках исследуемого экрана из электропроводного полимерного материала. Причем это искажение тем больше, чем большим коэффициентом затухания обладает исследуемый образец.

5.1.2. Метод замещения в волноводных линиях

Ослабление СВЧ энергии определяется по разнице показаний калиброванного измерительного аттенуатора при наличии образцов линии и без него (рис. 11).

Потери на отражение измерялись косвенно, через коэффициент стоячей волны (КСВ), получаемый за счет отражения электромагнитной энергии от образца

$$\text{КСВ} = \frac{1 + r_{E\varepsilon}}{1 - r_{E\varepsilon}},$$

где $r_{E\varepsilon}$ — модуль амплитудного коэффициента отражения; $r_{E\varepsilon}$ — функция модуля энергетического коэффициента отражения от границы раздела двух сред (см. раздел 1.4.2).

Коэффициент отражения $R = 10 \lg \frac{1}{1 - (r_{E\varepsilon})^2}$ и, следовательно $R = 10 \lg \frac{(\text{КСВ} + 1)^2}{4 \text{КСВ}}$, дБ.

При конструировании широкодиапазонных многослойных радиопоглощающих материалов используются следующие подходы.

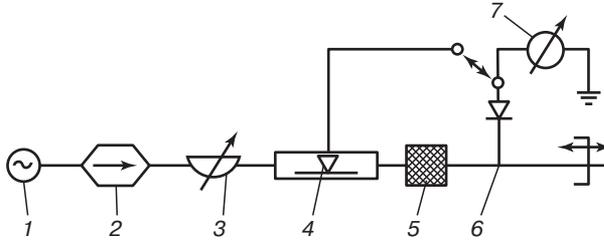


Рис. 11. Схема измерения ослабления СВЧ-энергии, создаваемого электропроводными полимерными материалами, методом замещения в волноводных линиях:

1 — генератор; 2 — вентиль; 3 — измерительный аттенюатор; 4 — измерительная линия; 5 — исследуемый образец; 6 — детекторная секция; 7 — нуль-индикатор

Для поглощения ЭМЭ в широком диапазоне частот РПМ должен удовлетворять соотношению $\sqrt{\varepsilon \cdot \mu} = \text{const} \cdot \lambda_0^x$, где x — коэффициент коррекции, учитывающий отклонения при условии минимального отражения волны с длиной λ_0 в свободном пространстве. Толщина РПМ определяется по формуле

$$h = \frac{(2n-1)\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}, \quad n - \text{целое число.}$$

Поскольку толщина h постоянна, $\varepsilon \cdot \mu$ пропорционально квадрату длины волны. При изменении величины $\varepsilon \cdot \mu$ в зависимости от длины волны изменяется и величина потерь. РПМ с минимальным отражением ЭМЭ радиодиапазона должен состоять, по меньшей мере, из двух слоев, каждый из которых имеет определенные значения ε и μ и такую толщину, чтобы в широком диапазоне частот удовлетворять формуле

$$\text{tg } \delta_\varepsilon f(\lambda) + \text{tg } \delta_\mu \cdot f(\lambda) = \frac{\pi}{4} \text{ctg } h^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot f(\lambda)}{\mu \cdot f(\lambda)}},$$

где $f(\lambda)$ — функция длины волны.

Показатели ε , μ , $\text{tg } \delta_\varepsilon$, $\text{tg } \delta_\mu$ в слоях должны возрастать по направлению к отражающей поверхности.

5.2. Экспериментальное исследование ЭПР целей ($\sigma_{\text{ц}}$)

Литература: Степанов Ю.Г. Противорадиолокационная маскировка. — М.: Сов. радио, 1968. — 144 с.

Основным методом исследования ЭПР реальных объектов является эксперимент. Преимуществом экспериментального метода исследования является то, что он позволяет получить детальную диаграмму отражения в угломестной и азимутальной плоскостях и выявить флуктуационные и поляризационные характеристики отраженного сигнала. Точность экспериментального метода достаточна для создания ложной цели, имитирующей действительную цель с большой степенью достоверности. Полученные таким образом данные могут использоваться и для решения обратной задачи: распознавания сигнала от реального объекта на фоне сигналов от ложных целей.

Одним из наиболее очевидных способов измерения $\sigma_{\text{ц}}$ является исследование отражающих свойств объекта в натуральных условиях. Из уравнения дальности радиолокации

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{изл}}} = \frac{G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 R^4}$$

видно, что если радиолокатор калиброван, то значение $\sigma_{\text{ц}}$ можно рассчитать, измерив излученную и отраженную мощности $P_{\text{изл}}$ и $P_{\text{пр}}$.

Проведение таких измерений в реальной обстановке связано с большими организационными и техническими трудностями и требует значительных материальных затрат. Отражающие свойства объектов исследуют в лабораторных условиях или на специальных полигонах. При этом могут использоваться как сами объекты или их макеты, выполненные в натуральную величину, так и модели исследуемых целей. Применение макетов и моделей дает возможность не только детально исследовать диаграмму вторичного излучения объекта, но и определить влияние отдельных элементов его конструкции на суммарную величину ЭПР и структуру отраженного сигнала. Исследования заключаются в том, что с модели последовательно снимают изучаемые элементы, измеряют их отражающие свойства и сравнивают полученные результаты с величиной отраженного сигнала, полученного от модели всего объекта.

Модель, отличающуюся от оригинала масштабом $n = 1/z$, помещают в поле электромагнитного излучения, длина волны которого должна быть в n раз короче, чем при облучении действительной цели. В соответствии с требованиями эксперимента модель вращается в той или иной плоскости. Поле ее вторичного излучения воздействует на приемник соответствующего диапазона, преобразуется в электрический сигнал определенного уровня, который затем фиксируется. Полученные таким образом круговые диаграммы позволяют выяснить зависимость уровня отраженного сигнала от углового положения модели.

Система с непрерывным излучением

Используется для работы с небольшими моделями, когда измерения проводятся в безэховых камерах, на расстояниях от модели до 15 м. Блок-схема измерительной системы непрерывного излучения изображена на рис. 12.

Система состоит из передатчика и приемника (1, 7), присоединенных к соответствующим плечам двойного Т-образного волноводного моста — гибридного тройника 5. К одному из плеч моста подсоединяются блоки настройки 4 и согласованная нагрузка 3, а к другому — рупорная антенна 9, которая служит одновременно для передачи и для приема. При использовании такого моста следует учитывать, что половина принятой (и излученной) энергии поступает к приемнику, а половина теряется на нагрузке. Полноводный тройник должен быть выполнен со строго симметрированными плечами. Только в этом случае будет существовать полная развязка между передатчиком и приемником, а принятый отраженный сигнал разделится поровну между согласованной нагрузкой и приемником.

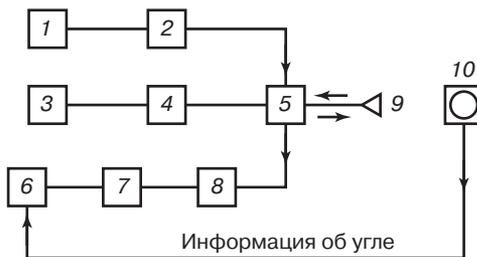


Рис. 12. Блок-схема системы непрерывного излучения для измерения ЭПР:

- 1 — стабилизированный генератор; 2 — развязывающее устройство; 3 — согласованная нагрузка;
- 4 — ВЧ блоки настройки; 5 — гибридный тройник; 6 — самописец; 7 — приемник; 8 — смеситель;
- 9 — рупорная приемно-передающая антенна; 10 — опора для модели

Так как частота излучаемого сигнала изменяется со скоростью df/dt Гц/с, тогда частота принятого сигнала будет

$$f = f_0 + \frac{2R}{c} \frac{df}{dt}.$$

Если небольшую часть энергии колебаний с частотой f_0 использовать в качестве сигнала гетеродина и смешать ее с принятым сигналом, то получим разностную частоту:

$$f_p = f - f_0 = \frac{2R}{c} \frac{df}{dt}.$$

Сигналы, отраженные от объектов, расположенных на расстояниях, отличных от R , дадут другие значения f_p . От этих сигналов помех можно избавиться с помощью резонансных усилителей и фильтров с высокой избирательностью. Величина ЭПР цели будет пропорциональна амплитуде принятого сигнала.

Импульсная система

Импульсная система представляет собой упрощенный радиолокатор, приспособленный для работы с моделями, устанавливаемыми на сравнительно малых расстояниях (рис. 13).

Импульсный метод позволяет получить большую мощность излучения и дает возможность отстраиваться от мешающих сигналов путем применения специальных схем селекции. В аппаратуре имеются импульсы от 0,1 до 1,0 мкс при частотах повторения от 500 до 25 кГц. Промежуточные частоты супергетеродинного приемника составляют от 30 до 60 МГц при ширине полосы до 10 МГц. При указанных длительностях импульса антенные переключатели не используют, а применяют отдельные антенны на передачу и прием. Это вызвано тем, что сравнительно большое время переключения и восстановления антенных переключателей (газовых разрядников) препятствует нормальной работе на одну антенну при малых (до 50 м) расстояниях до исследуемой модели. Ограничения, связанные с выбором минимального расстояния, практически отпадают, если в аппаратуре использовать импульсы наносекундной и субнаносекундной длительности. Существуют импульсные системы с длительностью

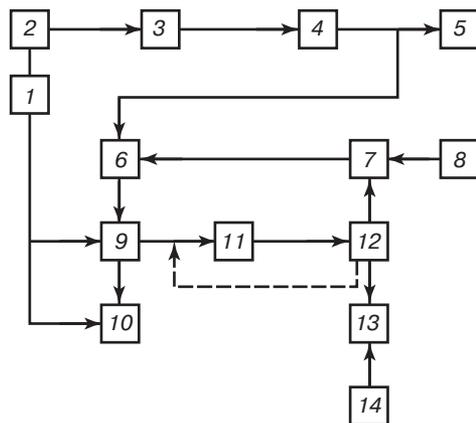


Рис. 13. Блок-схема импульсной системы для измерения ЭПР:

1 — генератор импульсов и временной развертки; 2 — усилитель пусковых импульсов; 3 — модулятор; 4 — магнетрон; 5 — передающая антенна; 6 — приемник и система АПЧ; 7 — волноводный аттенюатор; 8 — приемная антенна; 9 — стробируемый усилитель; 10 — осциллограф; 11 — сервоусилитель; 12 — серводвигатель привода пера самописца и волноводного аттенюатора; 13 — самописец; 14 — источник информации об угле поворота опоры модели

импульсов 1 нс и короче, что позволяет получить разрешающую способность 15 см и меньше. Естественно, что такие узкие импульсы требуют очень широкой полосы по промежуточной частоте.

Допплеровские измерительные системы

Принцип измерения в таких системах состоит в следующем.

Отражающий объект с помощью механической системы перемещается относительно наблюдателя с определенной скоростью v_r . Движущийся объект облучают электромагнитным полем (с длиной волны λ). Отраженный от него сигнал будет иметь уже другую частоту, отличающуюся от частоты f на величину Δf (частоту Допплера):

$$\Delta f = \frac{2V_r}{\lambda}.$$

Сигнал частоты Δf выделяется в приемной аппаратуре путем сравнения частоты отраженного сигнала с частотой сигнала передатчика. Амплитуда сигнала частоты Δf будет пропорциональна ЭПР движущегося объекта. На рис. 14 изображена блок-схема одного из вариантов такой измерительной системы.

Исследуемый объект устанавливают на вращающемся кронштейне и облучают рупорной антенной. Для калибровки уровня отраженного сигнала используется эталонный отражатель, устанавливаемый на месте модели на том же радиальном расстоянии от центра вращения. Положение передающей антенны выбирают так, чтобы облучался только один объект. Таким образом, при вращении кронштейна исследуемая модель и эталон попеременно попадают в облучающее поле. Отраженный сигнал от движущегося тела поступает в приемное плечо волноводного тройника и смешивается там с опорным сигналом от генератора. В результате такого смешения выделяется сигнал разностной частоты Δf , который затем усиливается и

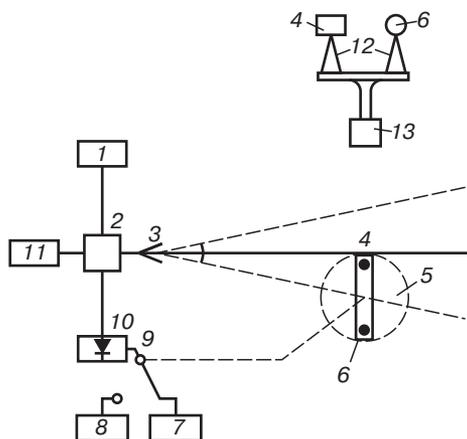


Рис. 14. Измерительная установка с вращением модели и эталона, основанная на использовании эффекта Допплера:

1 — генератор непрерывных колебаний; 2 — волноводный тройник; 3 — антенна; 4 — модель; 5 — вращающийся кронштейн; 6 — эталон; 7, 8 — аппаратура, принимающая и записывающая сигнал, отраженный от эталона; 9 — переключатель; 10 — смеситель; 11 — нагрузка; 12 — стойки для крепления модели и эталона; 13 — привод вращения с переключателем

поступает на запись. Если объекты расположены на расстоянии r от центра вращения и скорость их вращения составляет q об/мин, то максимальное значение доплеровской частоты составляет

$$\Delta f = \frac{nrq}{15\lambda}.$$

На оси вращения имеется переключатель каналов записи модели и эталона, что позволяет проводить запись обоих каналов в одинаковых условиях и затем, путем их сравнения, вычислять ЭПР исследуемой цели. В аппаратуре предусмотрена механическая система, позволяющая одновременно с быстрыми колебаниями объекта относительно антенны медленно вращать его вокруг своей оси, что дает возможность снимать его круговую диаграмму отражения (ДОР).

Для измерения ЭПР используются и открытые полигоны.

Михайлин Юрий Александрович

Специальные полимерные композиционные материалы

ISBN 978-5-91703-011-1



Редактор *А.Н. Аввакумов*
Верстка и обработка иллюстраций *С.О. Киселев*
Дизайн обложки *Р.В. Бабкиной*
Корректор *О.Д. Камнева*

Издательство «Научные основы и технологии»
197342, Санкт-Петербург,
Красногвардейский пер. д.23
Тел./факс: (812) 655-0837, URL: ft-publishing.ru,
e-mail: mail@ft-publishing.ru

Подписано в печать 12.08.09. Формат 70×100^{1/16}. Усл. п. л. 54,18
Тираж 1000 экз. (1 завод – 500 экз.) Заказ №

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП «Типография «Наука»»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12