

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский авиационный институт
«Национальный исследовательский университет»

О.И. Крахин, А.П. Кузнецов

СПЛАВЫ С ПАМЯТЬЮ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

Под редакцией д.т.н., проф. О.И. Крахина.

Москва 2010

УДК 621.8.669.017

О.И. Крахин, А.П. Кузнецов. Сплавы с памятью и их применение в технике. – М.: МАИ «Национальный исследовательский университет», Янус-К, 2010, - 212 с.

ISBN 978-5-8037-0494-2

Рассматривается один из наиболее перспективных классов материалов – сплавов с памятью. Приведен их химический состав, даны характеристики и свойства, описан механизм получения и параметры эффекта памяти. Подробно рассмотрены и классифицированы детали, механизмы и устройства на основе сплавов с памятью. Приведены характерные конструктивные схемы, решения и конструкции, используемые в различных отраслях промышленности: авиационной, автомобильной, приборостроительной, станкостроительной, машиностроительной, энергомашиностроительной, газовой и других.

В написании подразделов принимали участие: В.А. Зенин - 2.2. и 2.3; В.П. Радченко - 2.2 и 2.5.

Предлагаемая монография может быть полезна студентам, аспирантам, а также инженерам и специалистам, занимающимся вопросами применения перспективных функциональных материалов при создании новой техники.

Составители: д.т.н., проф. О.И.Крахин

к.т.н., А.П.Кузнецов.

© О.И. Крахин, А.П. Кузнецов, 2010

ISBN 978-5-8037-0494-2

Содержание

1. СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ	5
1.1. Мартенситные превращения в сплавах с эффектом памяти.....	8
1.2. Классификация и характеристика эффектов памяти.....	21
1.3. Механизмы накопления и возврата деформации при различных видах эффекта памяти	24
1.4. Параметры и свойства сплавов с эффектом памяти	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ РАЗДЕЛА 1.....	51
2. ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ в технике.....	65
2.1. Анализ специальных свойств сплавов с памятью	65
2.2. Классификация изделий на основе функциональных материалов из сплавов с памятью.....	78
2.2. Конструкции термомеханических двигателей	97
2.2.1. Классификация термомеханических двигателей.....	97
2.2.2. Конструкции активных элементов	102
2.2.3. Термомеханические двигатели одноразового действия	111
2.2.4. Термомеханические двигатели циклического действия.....	115
2.2.5. Термомеханические двигатели непрерывного действия.....	129
2.3. Конструкции термомеханических энергетических установок	133
2.3.1. Классификация термомеханических энергетических установок.....	133
2.3.2. Термомеханические энергетические установки циклического действия	134
2.3.3. Термомеханические энергетические установки непрерывного действия	142
2.4. Конструкции термомеханических соединений.....	154
2.5. Конструкции технических и приборных устройств	171
2.5.1. Классификация технических и приборных устройств.....	171
2.5.2. Устройства одноразового действия	177
2.5.3. Устройства многократного действия	181

2.6. Динамические гасители колебаний	190
2.7. Адаптивные системы	196
2.8. Программируемые конструкции.....	203
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ РАЗДЕЛА 2.....	207

I. СПЛАВЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ

В первоначальном виде под эффектом памяти (ЭП), называемом эффектом запоминания формы (ЭЗФ) понималась способность материала устранять в процессе обратного мартенситного превращения (МП) наведенную в мартенситном состоянии деформацию. Проведенные до настоящего времени теоретические и экспериментальные исследования показали, что ЭП должен рассматриваться в более широком плане, как комплекс эффектов неупругого поведения, связанных со способностью материалов возвращать накопленную в процессе термомеханического или механического воздействия значительную по величине деформацию, что более соответствует термину «термомеханическая память» (ТМП).

В отличие от упругого деформирования в основе таких эффектов лежат фазовые и структурные превращения, сопровождающиеся обратимыми процессами кооперативного движения атомов, при котором возможно сохранение их соседства, несмотря на большую (20-25%) деформацию. К таким фазовым превращениям относятся, прежде всего, МП, сопровождающиеся обратимыми структурными изменениями, связанными с двойникованием и образованием дефектов упаковки. Поэтому необходимой основой для проявления ТМП является наличие в сплаве МП.

Наиболее точно и просто мартенситное превращение можно, по-видимому, определить как превращение решетки посредством деформации сдвига на основе кооперативного движения атомов. При образовании линзообразных или пластинчатых областей в исходной фазе атомы движутся не по отдельности, а как единый комплекс, деформация сдвига осуществляется как бы "ряд за рядом", в результате чего происходит перестройка решетки исходной фазы в решетку мартенсита. При подобном кооперативном движении сохраняется однозначное соответствие между узлами решетки исходной фазы и решеткой мартенсита. Если исходная фаза имеет упорядоченную решетку, то и в мартенситной фазе вследствие соответствия решеток также образуется упорядоченная решетка.

Из приведенного выше определения для мартенситного превращения характерны следующие особенности [4]:

1. Мартенситная фаза является однородным твердым раствором замещения или внедрения.

Превращение является бездиффузионным. Концентрация растворенных атомов, находящихся в твердом растворе в мартенситной фазе такая же, как и в исходной фазе, диффузии атомов на большие расстояния, как, например, при эвтектоидном превращении, не происходит.

Превращение характеризуется деформацией формы постоянной величины соответствующей кристаллографической ориентировке исходной фазы. Указанный факт объясняется классической теорией в связи с механизмом сдвиговой деформации. Изменение формы при мартенситном превращении обуславливает механизм деформации, проявляющийся в эффекте памяти.

Кристаллы мартенсита имеют определенную плоскость габитуса. Плоскостью габитуса называют поверхность раздела между исходной и мартенситной фазами, т.е. плоскость сдвига при превращении. Эту плоскость обычно определяют индексами кристаллографических плоскостей исходной фазы, но часто ее описывают как плоскость с иррациональными индексами.

Между решетками исходной и мартенситной фаз существуют определенные ориентационные соотношения.

В решетке мартенситной фазы всегда существуют дефекты. Учитывая только величину изменения формы, определяемую экспериментально, невозможно объяснить возникновение реальной решетки мартенситной фазы, хотя при этом и принимается во внимание деформация сдвига по плоскости габитуса решетки исходной фазы. Это противоречие устраняется, если учесть, что в дополнение к деформации сдвига, в результате которой решетка исходной фазы превращается в решетку мартенситной фазы, происходит скольжение или двойникование.

Эту дополнительную деформацию называют деформацией с инвариантной решеткой. С помощью электронного микроскопа можно обнаружить следы такой

деформации — дислокации, дефекты упаковки и двойниковые дефекты. Важную роль в механизме эффекта памяти формы играют двойниковые дефекты.

Мартенситное превращение в макроскопическом масштабе происходит в результате псевдосдвиговой деформации кристаллов исходной фазы. Поэтому в обычных металлах и сплавах под воздействием напряжений превращение происходит по одному из двух равновозможных механизмов деформации — деформации скольжением или деформации двойникованием. Однако при мартенситном превращении возможно обратное превращение, что является особенностью, которой нет при деформации скольжением или двойникованием. Поэтому деформационное поведение сплавов, в которых происходит мартенситное превращение, существенно отличается от деформационного поведения обычных металлов и сплавов.

Восстановление формы, обусловленное эффектом памяти, завершается при нагреве. Его движущей силой является разность свободных энергий исходной и мартенситной фаз при обратном превращении. Однако это не означает, что если происходит обратное превращение, то восстанавливается форма любых образцов. Для полного восстановления формы необходимо, чтобы, во-первых, мартенситное превращение являлось кристаллографически обратимым и, во-вторых, процесс деформации осуществлялся без участия скольжения. При этом кристаллографическая обратимость превращения обуславливает восстановление не только кристаллической структуры, зависящей от обратного превращения, но и кристаллографическую ориентировку исходной фазы перед превращением. Таким образом, образец возвращается в состояние исходной фазы, которое было до охлаждения и деформации. Происходит полное восстановление первоначальной формы.

Первое условие связано с особенностями термоупругого мартенситного превращения. Эффект памяти наблюдается в полной форме только в тех сплавах, в которых мартенситное превращение имеет термоупругий характер. Можно отметить, что эти сплавы имеют упорядоченную решетку. Таким образом, термоупругое мартенситное превращение происходит в сплавах с упорядоченной ре-

шеткой, так как кристаллографическая обратимость превращения тесно связана с упорядоченной решеткой.

Второе условие естественно, так как скольжение является необратимым процессом. Следовательно, если в кристаллах происходит скольжение, то даже при нагреве деформация не устраняется.

1.1. Мартенситные превращения в сплавах с эффектом памяти

Возможность реализации довольно больших по величине обратимых деформаций заложена в самой природе МП, как фазового превращения, сопровождающегося собственной деформацией решетки, переводящей решетку исходной фазы в решетку мартенсита, и деформацией с инвариантной решеткой, обеспечивающей сохранение когерентности на границе растущего мартенситного кристалла [3]. Однако для обеспечения полного возврата деформации необходимо, чтобы МП было кристаллографически [2,4,5] и термически [6] обратимо, а все деформационные процессы должны быть механически обратимыми. Последнее предполагает отсутствие дислокационного скольжения, как способа деформации с инвариантной решеткой [2,4,5,7].

Термодинамика и кинетика мартенситных превращений. Существует мнение [2 - 4, 8, 9], что ЭП проявляется только в сплавах с термоупругим МП. В свою очередь, для реализации термоупругого МП необходимо выполнение следующих условий [2, 9]: а) малая движущая сила; б) небольшие объемные изменения; в) упорядоченная структура; г) небольшая сдвиговая деформация при превращении; д) смягчение решетки, отражающееся на температурной зависимости модулей упругости в предмартенситном состоянии.

В табл. 1.1 приведены основные характеристики МП в сплавах соответственно с упорядоченной и неупорядоченной структурой. Анализ данных показывает, что имеется большая группа сплавов с неупорядоченной структурой, для которых большинство вышеуказанных условий не выполняется, но которые проявляют ЭП. По-видимому, наличие термоупругого МП необходимо для полного восстановления формы, но перечисленные выше условия его реализации не являются строго обязательными. Как подчеркивается в работе [7], между термо-

упругим МП и обычным МП не существует непреодолимого различия. Черты термоупругого МП можно обнаружить и в обычных МП, протекающих даже в сплавах на основе железа [12 - 14]. В отдельных случаях и взрывное МП не исключает возможности существования термоупругого равновесия [15, 16].

В общем случае для реализации термоупругого МП необходимо, чтобы величина накапливаемой при росте мартенситного кристалла упругой энергии была достаточна для компенсации химической движущей силы прямого МП, но не настолько велика, чтобы вызвать пластическую релаксацию и нарушить когерентность на межфазной границе [18]. При температурах $>M_H$ роль движущей силы может выполнять механическая движущая сила, которая обусловлена механическим напряжением σ . Изменение M_H под действием σ описывается уравнением Клаузиуса-Клапейрона [2,4] (рис. 1.1).

В интервале прямого МП (M_H-M_K) основную долю в запасенной энергии должна играть упругая энергия межфазной границы исходная фаза - мартенсит, что делает практически безгистерезисным переход от роста мартенситного кристалла при охлаждении к его сокращению при нагреве в интервале температур M_H-M_K . Величина возможного гистерезиса в такой ситуации зависит от подвижности межфазной границы, которая определяется строением габитусной плоскости [3, 7, 19] и необратимыми процессами на межфазной границе [2, 20, 21].

В случае полного завершения прямого МП основную долю в запасенную энергию вносят внутренние напряжения, возникающие в мартенсите из-за наличия аккомодационных двойников, дефектов упаковки и различных кристаллографических вариантов мартенсита, а также поверхностей раздела внутренних дефектов в структуре мартенсита [2, 4, 5, 7]. В силу того, что перечисленные выше дефекты, в отличие от дислокаций, не наследуются при обратном МП [9], накопленная энергия складывается с химической движущей силой обратного МП, в результате чего обратное МП может начаться при температурах $< M_H$. В основном именно этим обусловлено существование двух классов МП, согласно классификации Веймана и Тонга [2, 4]. Для первого класса разность A_H-M_H положительная ($A_H > M_H$), а для второго - отрицательная ($A_H < M_H$). Од-

нако следует отметить, что на соотношение характеристических температур МП оказывают влияние вероятность возникновения концентрационных флуктуаций и структурное состояние исходной фазы [12, 13, 22 - 24].

Предмартенситные состояния и зарождение мартенсита. При прочих равных условиях класс МП и гистерезис определяются соотношением движущей силы МП и изменения свободной энергии нехимического происхождения (упругой и поверхностной) при образовании зародыша мартенсита и его росте. Процесс зарождения облегчается, если вблизи M_H модули упругости и деформация сдвига при МП минимальны. Это может быть обеспечено выполнением двух условий. Во-первых, в предмартенситном состоянии ($T > M_H$) модули упругости должны снижаться с понижением температуры, или как принято говорить - размягчаться. Во-вторых, в исходной фазе должны образовываться промежуточные структуры сдвига (ПСС), характеризующиеся тем, что положение атомов в их решетке отвечает некоторому промежуточному положению между положениями в исходной фазе и мартенсите (рис. 1.2) [2, 25, 26, 28].

Модули сдвига кубического кристалла C_{44} и $C' = 1/2 (C_{11} - C_{12})$ являются мерой сопротивления решетки упругим сдвиговым деформациям типа $\{100\} \langle 010 \rangle$ и $\{110\} \langle 110 \rangle$ соответственно, а параметр упругой анизотропии кристаллической решетки $A = C_{44}/C'$ характеризует степень относительного сопротивления кристалла двум заданным типам сдвиговой деформации [25].

Для сплавов со структурой B2, DO₃ или ОЦК габитусная плоскость и направление макроскопического сдвига мартенситных фаз часто являются близкими к $\{110\} \langle 110 \rangle$ [2, 27]. Поэтому сильное размягчение модуля C' при высокой упругой анизотропии будет определять потерю устойчивости решетки сдвигу в системе $\{110\} \langle 110 \rangle$ и низкие значения накопленной энергии, т.е. облегчать процесс зарождения, как его имеет место в сплавах на основе меди [27]. Сходная картина должна наблюдаться в сплавах титана с β -стабилизаторами, дополнительно легированных алюминием [28], в которых сдвиг по $\{110\} \langle 110 \rangle$ является определяющим при МП низких значениях A , что отражает "смягчение"

Основные характеристики сплавов с памятью.

Таблица 1.1.

Система	Состав сплава	$M_H, ^\circ C$	$M_H - M_K$ ($A_H - A_K$), $^\circ C$	$A_H - M_H, ^\circ C$	Класс МП	Наименование кристаллической структуры при МП	Размягчение модулей упругости	Тонкое строение мартенсита	Источник информации
$Ti_{50+x}Ni_{50-x}$	$x = 0 - 2 \text{ Ni}$ (ат. %)	80 - 55 -20	~20 0	10 - 12 0	I	$B2 \rightarrow B19'$ $B19' \rightarrow B19''$	ОС -	Дв -	[4, 31, 79]
$Ti_{50-x}Ni_{50+x}$	$x = 0 - 1,5 \text{ Ni}$ (ат. %) B-Fe, Co, Cr	от +35 до -50 от +35 до -180	0 20 - 30	2 - 3 10 - 20	I	$B2 \rightarrow R$ $B2 \rightarrow B19'$ или $R \rightarrow B19'$	ОС ОС	Дв Дв	[29 - 31, 36, 54, 79]
$Ti_50Ni_{50-x}B_x$	$x = 0 - (4 - 8)$ (ат. %) B-Cu	от +35 до -70 от +55 до -180	0 20 - 50	2 - 3 15 - 50	I	$B2 \rightarrow R$ $R \rightarrow B19'$	ОС	Дв Дв	[102, 104, 105]
$Ti_50Ni_{50-x}B_x$	$x = 0 - 0,9$ (ат. %)	50 - 60	20 - 40	5 - 10	I	$B2 \rightarrow B19'$	ОС	Дв	[5, 100, 130]
	$x = 9 - 15$ (ат. %)	67	35	5	II	$B2 \rightarrow B19$	ОС	Нет	[16, 40, 50, 51]
	B-Au, Pt, Pd	53 - 0	40	50	II	$B19 \rightarrow B19'$		Нет	
$Ti_50Ni_{50-x}B_x$	$x = 0 - 5$	35 - 20	0	1 - 2	II	$B2 \rightarrow R$	С	Дв	[19, 40, 42, 102, 134]
	$x = 0$ (7 - 10) (ат. %)	55 - 0 0 - (50 - 100)	20 30 - 40	5 - 20 ~30	II	$B2 \rightarrow B19'$ или $R \rightarrow B19'$	С	Дв + ДУ	
	$x = (7 - 10) -$ (10 - 15)	0 - 190 (50 - 100) -	40 - 60 30 - 50	~40 10 - 30	II II	$B2 \rightarrow B19'$ $B19 \rightarrow B19'$	ОС	- -	
	$x = (10 - 15) -$ 50 (ат. %)	(500 - 900)				$B2 \rightarrow B19$	-	-	
$Ti_{50-x}Ni_{40+x}Cu_{10}$	$x = 0 - 2 \text{ Ni}$	67 - 23	35 - 7	5 - 10	II	$B2 \rightarrow B19$	-	-	[4, 16]
	(ат. %)	от 0 до -100	40 - 120	50 - 80	II	$B19 \rightarrow B19'$	-	-	
Au - Cd	46,5 - 50 Cd (ат. %)	30 - 100	10 - 15	~15	I	$B2 \rightarrow M2H$	ОС	Дв	[2, 4]
Cu - Sn	14,7 - 15,4 Sn (ат. %)	от 0 до -150	~30	60 - 120	I	$DO_3 \rightarrow M2H$ или M18R	С	Дв	[4, 5, 135]

Система	Состав сплава	$M_H, ^\circ C$	$M_H - M_K$ ($A_H - A_K$), $^\circ C$	$A_H - M_H, ^\circ C$	Класс МП	Наименование кристаллической структуры при МП	Размягчение модулей упругости	Тонкое строение мартенсита	Источник информации
Cu - Zn	38,5 - 41,5 Zn (масс. %)	от -10 до -180	~50	~10	II	$B2 \rightarrow 9R$ или M9R	C	ДУ + Дв	[2, 4]
Cu - Al - Ni	14 - 14,5 Al 3 - 4,5 Ni (масс. %)	от -140 до +100	15 - 30	~20	I	$DO_3 \rightarrow 2H$	C	Дв + ДУ	[4, 135]
Cu - Al - Mn	11 - 14 Al 4 - 8 Mn (масс. %)	от +160 до -90	35 - 60	~20	II	$DO_3 \rightarrow 18R$	-	Дв + ДУ	[128, 129, 135]
Cu - Zn - B	15 - 25 Zn B-Si, Sn, Ga до 10 B (масс. %)	от -180 до +100	~50	~10	II	$B2 \rightarrow 9R$ (M9R) или $DO_3 \rightarrow 18R$ (M18R)	-	ДУ + Дв	[4 - 6]
Cu - Zn - Al	15 - 30 Zn 5 - 16 Al (масс. %)	от -180 до +100	~45	~40	II	$B2 \rightarrow 9R$ (M9R) или $DO_3 \rightarrow 18R$ (M18R)	C	ДУ + Дв	[4, 5, 122, 135]

Примечание. Решетки мартенсита: B19' - моноклинная, B19'' - триклинная, R - ромбоэдрическая; ОС - очень сильное, С - сильное, Дв - двойниковое, ДУ - дефекты упаковки, Дс - дислокационное; прочерк - отсутствие экспериментальных данных.

Несколько иная ситуация наблюдается в сплавах на основе TiNi, в которых в предмартенситной области происходит одновременное уменьшение модулей C_{44} и C' при

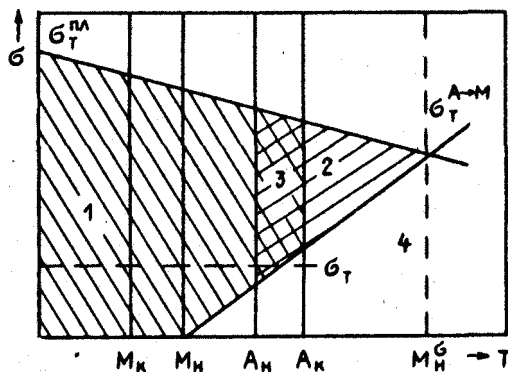


Рис. 1.1. Соотношение характеристических температур МП 1 класса и характерные области реализации ЭП и псевдоупругости [5]: 1 - область накопления деформации для проявления обратимого ЭП; 2 - область проявления сверхупругости; 3 - область проявления ЭП и сверхупругости; 4 - область отсутствия ЭП и сверхупругости; $\sigma_T^{пл}$ - предел текучести, обусловленный пластической деформацией

всей длинноволновой части фонованого спектра и способствует развитию неустойчивости решетки во всех кристаллографических системах сдвига, открывая возможности развития МП по нескольким каналам [29-35]. Аналогичная ситуация наблюдается для титана и его сплавов с β -стабилизаторами [37], в которых возможно развитие $\beta \rightarrow \alpha'(\alpha'')$ и $\beta \rightarrow \omega$ – МП.

В сплавах на основе железа, в частности Fe-Ni также имеет место размягчение упругих модулей C_{44} и C' , но оно выражено в меньшей степени, чем для рассмотренных выше сплавов, при более высоком общем уровне модулей упругости [28, 38], Это создает определенные трудности в накоплении упругой энергии, тем более, что аустенит в этих сплавах имеет низкий предел текучести.

Предмартенситные состояния исходной фазы характеризуются не только размягчением модулей упругости, но и возникновением ближнего порядка смещения (БПС) и уже упомянутых ПСС [25]. В другой терминологии - его

"несоизмеримые" структуры [28]. Смещения атомов локализованы в доменах. Поскольку существуют все кристаллографически эквивалентные варианты доменов, расположенных хаотически, то кристаллическая структура исходной фазы в среднем сохраняет исходную симметрию. БПС и ПСС играют важную роль в зарождении мартенсита "неклассическим путем", являясь центрами, на которых практически безбарьерно может образовываться зародыш [25, 26, 39], т.к. при образовании БПС и ПСС сдвиговая деформация МП минимальна. Зарождение может быть еще более облегчено, если образуется промежуточная фаза. Для сплавов на основе TiNi последовательно формируются БПС и два типа ПСС [19, 29, 31, 32]. Внутренняя структура микродоменов с ПСС I описывается системой плоских волн смещения атомов вида $1/3 \langle 112 \rangle \langle 111 \rangle$ и $1/3 \langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ (с периодом, утроенным по отношению к периоду исходной B2 - фазы в направлениях $\langle 110 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$), а с ПСС II - одной волной $1/2 \langle 110 \rangle \langle 110 \rangle$ (удвоенный период). Общая схема возможных структурных переходов в сплавах на основе никелида титана, включающих два канала МП, может быть представлена в следующем виде [33, 34, 35, 40, 41, 42]:

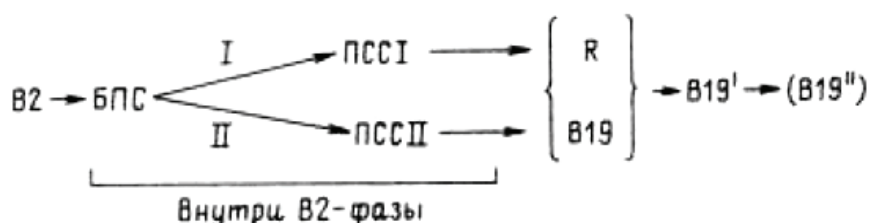


Рис. 1.2 Схема возможных структурных переходов в сплавах на основе никелида титана, включающих два канала МП

В сплавах эквиатомного состава и близких к нему возможно одновременное существование ПСС I и ПСС II и вследствие этого возможен как прямой переход $B2 \rightarrow B19$, так и реализация обоих каналов МП. Первый канал МП реализуется обычно в сплавах с повышенной устойчивостью B2-фазы и высоким уровнем модулей упругости матрицы (системы Ti-Ni-Fe, Ti-Ni-Co и т.п.), а второй - в сплавах с пониженной устойчивостью B2 -фазы и более низким уровнем уп-

ругих свойств (системы Ti-Ni-Cu, Ti-Ni-Au и т.п.). В отдельных случаях возможно образование мартенсита B19' с триклинной решеткой за счет перехода B19' - B19" [43].

Результаты исследования предмартенситных состояний, обобщенные в работах [25, 28, 44], показывают, что в сплавах на основе железа эволюция внутренней структуры исходной фазы заканчивается образованием БПС, в сплавах на основе титана могут формироваться начальные стадии ПСС. В сплавах на основе меди и других благородных металлов происходит формирование как БПС, так и ПСС, а в сплавах на основе никелида титана имеет место весь спектр структурных изменений в исходной фазе.

Здесь необходимо отметить, что в неупорядоченной структуре, вследствие существования флуктуаций концентрации в различных микродоменах БПС и ПСС, можно ожидать возникновения неодинаковых условий для зарождения мартенсита. При высокой упругой энергии и низком пределе текучести это существенно расширяет температурный интервал МП, в котором превращение развивается по атермической кинетике [7, 12, 13]. При наличии в структуре мартенсита обратимых дефектов (двойников, дефектов упаковки) и небольшого энергетического барьера зарождения это может способствовать началу обратного МП при температурах $<M_H$ ($A_H < M_H$), что имеет место в высоко легированных сплавах на основе титана. В противном случае "обратное МП начинается при $A_H > M_H$, что характерно для большинства сплавов на основе железа и низколегированных сплавов на основе титана. Упрочнение исходной фазы, например, дисперсными включениями или растворенными атомами легирующих компонентов может способствовать сохранению когерентности во всем интервале МП, что делает возможным существование термоупругого равновесия даже в сплавах на основе железа [12-14].

Кристаллогеометрия мартенситных превращений и структура мартенсита. В подавляющем большинстве сплавов, проявляющих ЭП, за исключением сплавов на основе железа, марганца и In-Tl, исходная фаза, если не учитывать упорядочения, имеет ОЦК решетку (см. табл. I-1). С учетом упорядочения ис-

ходная фаза может иметь три вида сверхструктур [27]: 1) структуру типа CsCl (B2) со стехиометрическим составом AB; 2) структуру типа FeAl (DO₃) стехиометрического состава A₃B; 3) структуру типа Cu₂MnAl (L2₁) стехиометрического состава A₂BC*. Соответственно рассматриваются и твердые растворы на основе этих структур.

В результате МП формируются мартенситные структуры, которые наследуют упорядочение исходной фазы и имеют более низкую симметрию кристаллической решетки, обычно являющейся подгруппой группы симметрии исходной решетки.

Большинство МП в сплавах с ЭП - его превращения I рода, сопровождающиеся деформацией с инвариантной плоскостью и наличием гистерезиса. Такого рода превращения в сплавах со структурами B2, DO₃, L2₁ и ОЦК можно рассматривать как структурные превращения, обусловленные деформацией самой плоскости (110) и сдвигом в направлении [110] этой плоскости. Окончательное кристаллическое строение мартенсита может быть получено различной последовательностью укладки наиболее плотноупакованных плоскостей. В результате формируются различные политипы мартенсита, в том числе и длиннопериодные структуры [4, 5, 27, 45]. Из B2-структуры образуется мартенсит 2H, 3R и 9R (или M2H, M3R и M9R), а из DO₃ - мартенсит 2H (γ'_1), 6R (a'_1), 18R₁ (β'_1) и 18R2 (β'_1), который также может иметь моноклинное искажение (рис. 1.3), Кристаллография ГЦК→ОЦК (ОЦТ) - и ГЦК→ГП-переходов в сплавах на основе железа рассмотрена в работах [7, 45].

Наиболее часто встречающиеся структуры атермического мартенсита в сплавах с ЭП приведены в табл. 1-1, Однако возможный набор мартенситных структур не ограничивается этим, т.к. после различных видов обработок иногда обнаруживают мартенсит, состоящий из двух типов [27, 45], или при внешнем силовом воздействии происходит переход одного типа мартенсита в другой —

* В литературе чаще всего эти фазы обозначаются как β_2 , β_1 и β_3 . Исключение сделано для сплавов на основе TiNi, для которых исходная фаза обозначается как B2.

мартенсит - мартенситные превращения (ММП) [4, 5, 45].

Кристаллогеометрический анализ МП в рамках феноменологической теории [3] дает полезную информацию не только об ориентационных соотношениях и главных деформациях (ε_i или η_i) при МП, но (что не менее важно для сплавов с ЭП) и о деформации с инвариантной решеткой, механизм которой определяет строение и подвижность габитусной плоскости [4, 5, 27, 29].

Хорошее совпадение экспериментальных результатов с выводами феноменологической теории было получено для AuCd, некоторых сплавов на основе железа и TiNi, а также сплавов системы Cu-Zn-Al [4, 46, 47]. Однако если для AuCd хорошая аккомодация обеспечивается деформацией по одной системе двойникового, то для МП $DO_3 \rightarrow 2H$, $DO_3 \rightarrow 18R$ в сплавах на основе меди [2, 4, 48] и МП $B2 \rightarrow B19'$ в сплавах на основе TiNi [49] для хорошей аккомодации необходимо, чтобы деформация с инвариантной решеткой обеспечивалась двойникованием по нескольким сие темам (табл. I-2).

Для некоторых сплавов систем Ti-Ni-Cu, Ti-Ni-Au, Ti-Ni-Pd и Ti-Ni-Pt габитусная плоскость инвариантна микроскопически, что не требует деформации с инвариантной решеткой и определяет ее высокую подвижность [19, 42, 50, 51]. Качественная характеристика тонкого строения мартенсита приведена в табл. I-1. Более подробная количественная информация может быть почерпнута из литературных источников, указанных в тех же таблицах.

Для уменьшения упругой энергии различные кристаллографические варианты мартенсита образуют самоаккомодированные группы. Достаточно хорошо изучена морфология самаккомодированных групп вариантов мартенсита γ_1' (2 II) в сплавах на основе меди, в которых кристаллы мартенсита в разрезе имеют вид копья [7]. Самоаккомодация при $DO_3 \rightarrow 18R$ – превращении в сплавах Cu-Al-Ni сопровождается образованием структуры типа алмаза [4]. Каждая самоаккомодированная группа в форме алмаза состоит из нескольких вариантов мартенсита, отделенных друг от друга поверхностью раздела, представляющей собой плоскость двойникового. Для 18R - мартенсита сплавов системы Ti-Zn-Al обнаружено два типа межвариантных границ, различающихся атомной кон-

фигурацией и кристаллографией. Один из них является также плоскостью двойникового, а второй образован областями со структурой, близкой к типу 2H [52].

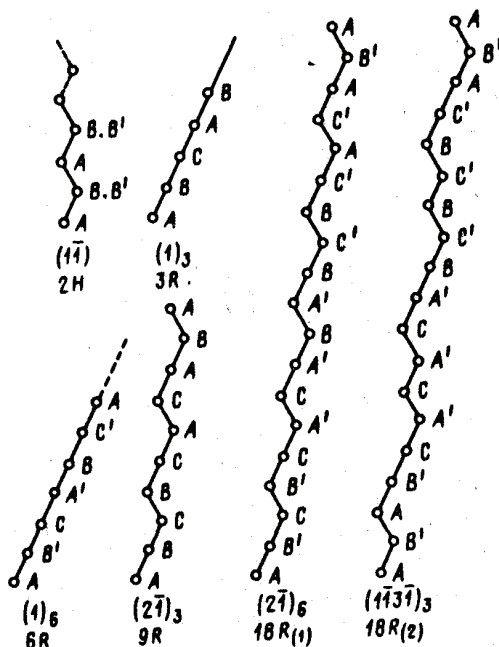


Рис. 1.3. Периодические слоистые структуры мартенсита с различной укладкой плотноупакованных плоскостей (плоскости слоев, обозначенные штриховой линией, соответствуют исходной DO_3 -структуре) [5]

Морфология самоаккомодированных вариантов мартенсита, образовавшихся при $B2 \rightarrow B19'$ -переходе в TiNi, рассмотрена в работе [5]. Между решетками B2 и B19' осуществляет 12 соотношений, что приводит к 24 вариантам мартенсита. Анализ показал, что морфология самоаккомодированных групп мартенсита в разрезе имеет вид треугольника и состоит из 3 или 4 мартенситных вариантов, сгруппированных вокруг одного из трех полюсов $\{001\}$ B2.

Поверхность раздела между каждыми двумя из трех вариантов соответствует плоскости двойникового для направления $\langle 011 \rangle$ B19' (тип I) или плоскости $\{001\}$ B19' (объединенный тип II) [49]. Деформация формы при образовании такой группы минимальна. Всего существует 16 группировок, которые образуют такую морфологию вокруг каждого из полюсов $\{001\}$ B2. Это дает 48 возможных комбинаций для образования самоаккомодированных групп. Такие

самоаккомодированные группы образуются во многих сплавах, в которых реализуется $B2 \rightarrow B19$ -МП [5].

В работе [50] на сплаве $Ti_{49,5}Ni_{40,5}Cu_{10}$ в котором $B2 \rightarrow B19'$ – МП протекает с микроскопически инвариантной плоскостью, проведен анализ процесса самоаккомодации мартенсита. Показано, что самоаккомодация достигается путем комбинации трех вариантов мартенсита вокруг каждой из осей семейства $\langle 111 \rangle$ исходной фазы. Это приводит к морфологии мартенситных кристаллов, которая представляет в разрезе треугольник и сводит на нет деформацию формы соседних кристаллов. Подобную морфологию мартенсита наблюдали также в сплавах $Ti = (39 - 41)$ ат. % $Ni = (9 - 11)$ ат. % $Cu = 15$.

Таблица 1.2.

Сплав	Тип мартенсита	K_1	η_1	K_2	η_2	S
Cu-Al-Ni	γ'	$(\bar{1}2\bar{1})$	$[1\ \bar{0},7954\ \bar{0},5907]$	$(1\ \bar{1},5036\ 0,5036)$	$[\bar{1}\bar{1}1]$	0,261
	(2H)	$(1\ 0\ 1)$	$[\bar{1}0\ 1]$	$(\bar{1}0\ 1)$	$[101]$	0,744
TiNi	B19'	$(1\ 1\ \bar{1})$	$[0,5404\ 0,4596\ 1]$	$(0,2496\ 0,5061\ 1)$	$[21\ \bar{1}]$	0,3096
	(2H)	$(0,7205\ 1\ \bar{1})$	$[011]$	$(0\ 1\ 1)$	$[1\ 0,6358\ \bar{0},6358]$	0,2804

Примечание. K_1 , K_2 и η_1 , η_2 – системы двойникования; S – кристаллографический сдвиг при двойниковании.

Мартенситные превращения особого рода. В сплавах Fe-Pd, In-Tl на основе марганца и TiNi (см. табл. I-1) ГЦК \Leftrightarrow ГЦТ – и $B2 \Leftrightarrow R$ переходы не являются фазовыми превращениями I рода. Они характеризуются практически полным отсутствием двухфазной области и гистерезиса. При превращении также отсутствует габитусная плоскость [2, 17, 53-57].

Из геометрических соображений переходы ГЦК→ГЦК и B2(ОЦК)→R (ромбоэдрическая) представляются как непрерывные когда бесконечно малая деформация в каком-либо кристаллографическом направлении изменяет симметрию кристаллической решетки. ГЦК→ГЦТ – переход происходит путем возникновения тетрагональных искажений за счет деформации в одном из направлений семейства $\langle 100 \rangle$, а B2→R – за счет увеличения расстояния в направлении $\langle 111 \rangle$. При этом деформация решетки увеличивается по мере усиления ее искажения с уменьшением температуры [17, 35, 54]. Безгистерезисность при обратном превращении обеспечивается возвратом к симметрии решетки исходной фазы при той же температуре, при которой она изменилась при охлаждении.

В основе рассмотренных переходов лежат изменения в фононном спектре исходной фазы при понижении температуры, что находит отражение в размягчении определенного модуля упругости. Сильное размягчение модуля C' перед ГЦК→ГЦТ - переходом [17,57] и C_{44} перед B2→R - переходом [29, 31, 41] способствует тетрагональным искажениям в первом случае и ромбоэдрическим во втором [26].

Однако, строго говоря, рассматривать ГЦК⇌ГЦТ - и B2⇌R -переходы как фазовые превращения II рода не совсем верно, так как они характеризуются и некоторыми признаками фазового превращения I рода. В частности, B2⇌R - переход сопровождается небольшим тепловым аффектом [55, 56], а продукты обоих переходов имеют двойниковое строение вследствие образования самоаккомодированных групп [17, 54, 58].

При B2→R - переходе образуются самоаккомодированные группы, состоящие из четырех вариантов обусловленных удлинением оси $\langle 111 \rangle$. Три комбинации (типа) этих вариантов дают нулевую деформацию формы и приводят к крестообразной (скрещенной) морфологии R - фазы. Различные варианты разделены поверхностями раздела, представляющими собой три плоскости двойникования $\{110\}$ и три - $\{100\}$ [54]. При ГЦК→ГЦТ - переходе также наблюдается самоаккомодация. Возникает три типа доменов со взаимно перпенди-

кулярными осями c ($< 100 >$). Поверхностями раздела в этом случае являются плоскости двойникования $\{100\}$ [17; 57].

Рассмотренные особенности превращений $\Gamma\text{ЦК} \rightarrow \Gamma\text{ЦТ}$ и $B2 \rightarrow R$ позволяют сделать заключение, что экспериментально они не отличимы от превращений II рода, хотя, строго говоря, и не являются таковыми. По-видимому, их следует относить к МП особого рода, как это сделано в отношении $\beta \rightarrow \omega$ - превращения в титановых сплавах [3, 28], для которых деформация решетки накапливается непрерывно по мере усиления ее искажений.

1.2. Классификация и характеристика эффектов памяти

Основным параметром, характеризующим ЭП, является обратимая деформация $\varepsilon_{0\delta}$ предельная величина которой определяется деформацией решетки при МП и ММП [2-6, 35, 59]. Текущая величина восстановленной деформации ε_b при восстановлении формы определяется механизмами накопления и возврата деформации и внешними параметрами, какими являются температура T и механическое напряжение σ [9, 35]. В зависимости от того, изменение какого параметра является определяющим в процессе возврата накопленной или исходной деформации ε_u все эффекты, связанные с восстановлением формы, можно разделить на две группы: 1) ЭП, обусловленные термомеханическим возвратом; 2) ЭП, обусловленные механотермическим возвратом. Первая группа эффектов обусловлена в основном изменением T , а σ играет второстепенную роль, а вторая - изменением σ , тогда как T обеспечивает только необходимые термодинамические условия. Естественно, что во всех случаях наведение деформации происходит при приложении напряжения.

Эффекты, обусловленные термомеханическим возвратом. Эта группа эффектов связана с возвратом ε_u в процессе обратного МП при нагреве до температур $> A_K$. В зависимости от способа наведения и механизма накопления деформации можно выделить следующие эффекты.

Односторонний или необратимый ЭП. Классическим вариантом необратимого ЭП является восстановление формы при нагреве после деформации образцов

со структурой атермического мартенсита (температура деформации $T_D < M_K$) или мартенсита напряжения ($A_K > T_D > M_H$) [1, 2]. Вторым вариантом необратимого ЭП является аффект, при котором накопление деформации происходит за счет пластичности МП при охлаждении в интервале $M_H^\sigma - M_K^\sigma$ присутствии внешних напряжений [9, 10, 35].

Рассмотренный ЭП при различных способах наведения деформации необратим в том смысле, что для его повторной реализации необходимо провести повторное нагружение для накопления деформации. Основными характеристиками необратимого ЭЗФ являются уже упомянутые ε_u , ε_B , степень восстановления формы [СП = ($\varepsilon_u/\varepsilon_B$ 100%)], температуры начала и конца восстановления формы (A_H^B и A_K^B). При восстановлении формы в условиях внешнего противодействия определяют также удельную работу A_B или развиваемые реактивные (рабочие) напряжения σ_p [2,9,60]. Внешние условия реализации необратимого ЭП отвечают областям 1 и 3 на рис. 1.1.

В.А. Лихачев [9] относит к необратимым ЭП такие эффекты, как память формы после пластичности обратного МП и эффект реверсивной памяти. Однако эти эффекты реализуются при сложной комбинации σ и T и проявляются не во всех материалах.

Обратимый ЭП. Этот эффект реализуется при многократном термоциклировании через интервал, охватывающий прямое и обратное МП. Существует два способа наведения обратимой при термоциклировании деформации. Первый способ состоит в термоциклировании в условиях действия внешнего напряжения, когда накопленная за счет реализации пластичности прямого МП деформация полностью или частично возвращается в условиях нагрева при действии того же внешнего напряжения [9, 10]. При такой схеме могут быть достигнуты значительная (до 10%) $\varepsilon_{0\sigma}$ величина которой, однако, уменьшается с увеличением числа теплосмен. Во многих случаях после 10-20 теплосмен возможна стабилизация величины $\varepsilon_{0\sigma}$.

Второй способ состоит в предварительном воздействии на материал, в результате которого создаются внутренние ориентированные напряжения, обес-

печивающие реализацию пластичности МП и возврат ε_u при обратном МП. В этом случае $\varepsilon_{0\sigma}$ достигает 4% [9, 61]. Внутренние напряжения могут быть вызваны [2, 4, 9]: а) пластической деформацией материала в мартенситном состоянии или в состоянии исходной фазы, б) однократным нагревом или охлаждением под постоянным напряжением через интервал прямого и обратного МП в) термоциклированием под напряжением через интервал прямого и обратного МП, г) образованием дисперсных выделений в исходной фазе с последующей пластической деформацией.

В литературе встречаются также названия: двухсторонний [2, 4], двунаправленный [4], двухпутевой [62] эффект и многообратимая память формы [9]. Все они относятся к обратимому ЭП. Специфическим видом обратимого ЭП является круговой ЭП [4, 63] и эффект реверсивно-обратимой памяти формы [9].

Эффекты, обусловленные механотермическим возвратом. Эта группа эффектов связана с возвратом накопленной при нагружении в изотермических условиях деформации при уменьшении или изменении знака деформирующего напряжения. Она объединяется одним понятием - псевдоупругость [3, 9]. В зависимости от механизма накопления и возврата деформации, а также соотношения температуры, при которой производится механическое воздействие, с характеристическими температурами МП выделяют следующие основные виды псевдоупругости.

Сверхупругость. Этот эффект обусловлен образованием мартенсита напряжения. Полный возврат накопленной деформации происходит только при условии, что $M_H^{\sigma} < T_d < A_K$ (область 2 на рис. 1). При $A_K > T_d > A_H$ только часть деформации устраняется за счет сверхупругости (область 3 на рис. 1), а при $T_d < A_H$ сверхупругость полностью подавляется (область 1 на рис. 1.1).

Псевдоупругость мартенсит-мартенситных превращений. Это эффект не имеет специального названия, хотя по своей природе – это сверхупругость, и для его обозначения целесообразно использовать термин сверхупругость ММП. Его суть состоит в том, что при нагружении в мартенситном состоянии возможно накопление деформации за счет политипизма мартенситных плотноупако-

ванных структур, выражающегося в переходах одной мартенситной структуры в другую путем изменения последовательности укладки плотноупакованных плоскостей, и ее возврат при разгрузке (рис. 1.3) [4-6, 45]. Реализуется в любой области $\sigma - T$ – диаграммы, кроме области 4 (см. рис. 1.1).

Разновидностями псевдоупругости являются также ферроупругость и резиноподобное поведение, которые проявляются при нагружении в мартенситном состоянии [2, 3].

Все виды псевдоупругости МП характеризуются накопленной и восстановленной деформациями, а также напряжениями начала (σ_H^H) и конца (σ_K^H) накопления деформации при нагружении и напряжениями начала (σ_H^B) и конца (σ_K^B) возврата деформации при разгрузке. Разности $\sigma_H^H - \sigma_H^B$ и $\sigma_K^H - \sigma_K^B$ характеризуют гистерезис, а площадь петли гистерезиса – величину рассеянной материалом энергии [5].

1.3. Механизмы накопления и возврата деформации при различных видах эффекта памяти

При МП в отсутствие напряжений локальная деформация формы при образовании отдельного кристалла (домена) мартенсита вследствие самоаккомодации различных кристаллографических вариантов взаимно компенсируется, в результате чего изменение формы в макромасштабе отсутствует. Деформация формы отдельного кристалла определяется деформацией решетки и деформацией с инвариантной решеткой. Поэтому при оптимальных условиях механического и термического воздействия максимальная величина ε_H (максимальное изменение формы всего образца) определяется деформацией решетки при МП [4, 59], которая представляет собой максимально возможную кристаллографически обратимую деформацию ε_{00}^K . Максимальная величина и знак ε_{00}^K МП зависит от ориентировки, что для $B2 \rightarrow B19'$ МП [5] в TiNi проиллюстрировано на рис. 1.4. Информация для других МП в различных сплавах может быть почерпнута из работ [4, 5, 54].

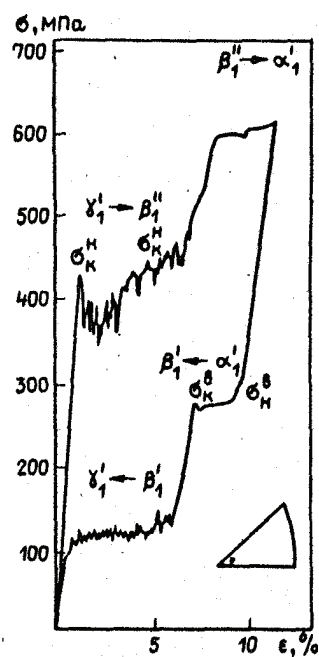


Рис. 1.3. Кривые напряжение–деформация монокристаллов сплава Cu-Al-Ni с исходной структурой γ' мартенсита [4]

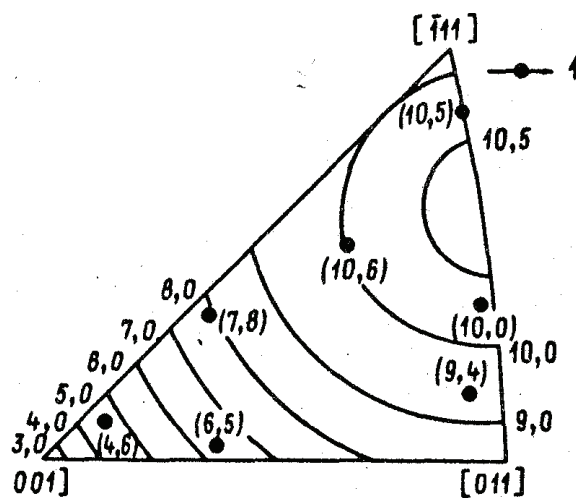


Рис. 1.4. Ориентационная зависимость максимально возможной кристаллографически обратимой деформации при $B2 \leftrightarrow B19'$ (МП в TiNi [5]:
1 - экспериментальные значения

Для монокристаллов и особенно поликристаллов достижение максимальных значений ε_H и ε_B возможно только в том случае, если в результате нагружения образуется монодомен наиболее благоприятной ориентировки, а сам процесс накопления и возврата будет осуществляться только обратимыми носителями

деформации при полной кристаллографической обратимости МП [4, 5, 9, 10]. В реальных материалах обеспечить такие условия не удастся и величина наиболее важных для практики параметров ε_H и ε_B определяется тем, какой из возможных механизмов реализуется.

Механизмы накопления деформации. Считается, что накопление деформации в сплавах с МП при термомеханическом воздействии может осуществляться по следующим механизмам [2, 4, 5, 7, 9, 11, 54, 59]:

1. Зарождение и рост кристаллов мартенсита, благоприятно ориентированных по отношению к приложенному напряжению.

Ориентирующее действие напряжений заключается в том, что из возможных вариантов мартенсита образуются только те кристаллы, которые благоприятно ориентированы по отношению к этому напряжению. В так их условиях самоаккомодации не происходит и ε_H равна деформации формы превращенного объема. Например, для TiNi она составляет $\sim 6\%$ [59].

Если кристаллогеометрия МП обеспечивав г инвариантность габитусной плоскости на микроуровне или создаются такие условия нагружения, что не требуется деформация с инвариантной решеткой, то ε_H может достигать значений $\varepsilon_{0\sigma}^K$.

Если ориентирующее действие напряжений особенно сильно сказывается на стадии зарождения, то рассмотренный механизм накопления деформации является наиболее эффективным. Он действует при различных способах наведения деформации для реализации необратимого и обратимого ЭП, а также сверхупругости.

Механизм ориентированного зарождения и роста мартенсита является единственным при накоплении деформации для реализации обратимого ЭП за счет ориентированных микронапряжений [9]. Из-за неоднородности распределения микронапряжений при пластической деформации их ориентирующее действие на МП не столь значительно, как внешних [4, 9, 61, 62]. Более эффективно влияют микронапряжения, возникающие на границе дисперсных когерентных выделений, полученных старением под напряжением [4, 63, 65]. В этом случае

накапливаемая при охлаждении через интервал МП деформация столь велика, что лист, согнутый в цилиндр, разворачивается на 360° , образуя новый цилиндр. Поэтому такой ЭП был назван круговым.

2. Изменение симметрии решетки исходной фазы и усиление степени искажения новой решетки с понижением температуры.

Этот механизм характерен для МП особого рода ($B2 \rightarrow R$, $ГЦК \rightarrow ГЦТ$). При увеличении степени ромбоэдричности (R) или тетрагональности ($ГЦТ$) решетки с понижением температуры происходит накопление до 1% деформации [17, 35, 56, 61]. Во избежание самоаккомодации охлаждение проводят в условиях действия внешних или внутренних напряжений. Такой механизм лежит в основе обоих видов ЭП, хотя имеются сообщения [5, 61, 64], что он может реализовываться при различных видах псевдоупругости.

3. Переориентировка кристаллов мартенсита под действием приложенного напряжения.

Это наиболее распространенный механизм накопления деформации, Переориентировка осуществляется перемещением двойниковых границ в самоаккомодированных группах и границ между группами. В результате такого роста благоприятно ориентированных кристаллов за счет кристаллов, имеющих неблагоприятную ориентировку, образец в целом становится состоящим из одного домена. Монодоменизация мартенсита без нарушения внутреннего двойникового строения обеспечивает накопление деформации, равной в предельном случае деформации формы.

В поликристаллах обычно полной монодоменизации не происходит, а формируется текстура с наибольшей долей благоприятных ориентировок [9, 66],. Причем тип возникающей при переориентировке мартенсита текстуры совпадает с типом текстуры, формирующейся при ориентированном росте. Механизм переориентировки действует и при нагружении в изотермических условиях сплавов со структурой R [54, 63] - или $ГЦТ$ [17, 53] -мартенсита.

Рассмотренный механизм лежит в основе накопления деформации для реализации необратимого ЭП. Способ наведения деформации, при котором реализу-

ется механизм переориентировки, менее аффективен, чем при реализации механизма ориентированного роста [10]. Особенно его сказывается в сплавах с неупорядоченной структурой [67 - 69].

4. Изменение двойниковой структуры мартенсита, образовавшейся в результате деформации с инвариантной решеткой при МП [2, 11, 59].

Этот механизм может осуществляться раздвойникованием, междвойниковым ростом и передвойникованием. В первом случае приложенные напряжения вызывают полное устранение двойников превращения, в результате чего накапливается деформация, равная разности деформации решетки и деформации формы. (Например, для TiNi она составляет $\sim 5\%$ [59]). Этот механизм обычно действует вслед за механизмами 1 и 3 при повышении деформирующей нагрузки. Его реализация сопряжено с возможностью дислокационного скольжения, что во многих случаях не позволяет полностью реализовать максимальные значения ε_H .

5. Превращение мартенсита в другой мартенсит под действием напряжения - ММП.

Этот механизм действует в сплавах с плотноупакованными структурами. В общем случае ММП осуществляется дополнительным однородным сдвигом в базисной плоскости путем движения частичных дислокаций. Считают, что ММП происходят с инвариантной плоскостью путем образования и роста зародышей [4 - 6, 45].

Термодинамические и термомеханические характеристики некоторых ММП, происходящих в монокристаллах сплавов Cu-Al-Ni, в сравнении с характеристиками обычных МП показаны в табл. I-3 [70]. Как видно, для начала МП требуется большая движущая сила, чем для ориентированного зарождения и роста мартенсита из исходной фазы. При этом изменение энтальпии ΔH при прямом ММП положительное.

Последовательность ММП, показанная на рис. 3, не является единственно возможной. Известны и другие последовательности переходов для сплавов системы Cu-Al-Ni, которые определяются химическим составом, исходной струк-

турой и температурой испытания и позволяют накапливать до 20% деформации [5, 45, 70, 71]. Накопление обратимой деформации при ММП наблюдали для сплавов Cu-Zn-Al [72] и Au-Cd [73].

Для TiNi ММП экспериментально не установлены из-за преждевременного разрушения образцов. Однако расчеты показывают [59], что при реализации различных ММП образцы из TiNi могли бы накапливать от 6 до 17% обратимой деформации.

Механизмы возврата деформации. В основе любого механизма возврата накопленной деформации лежит обратное МП и ММП.

Для возврата накопленной деформации при обратном МП необходимо, чтобы полностью восстановилась кристаллографическая ориентировка превращенного объема исходной фазы (кристаллографическая обратимость) и чтобы дефекты, накопленные мартенситом, не наследовались высокотемпературной фазой (механическая обратимость) [2, 4, 9]. Существует мнение, что устранение при превращении аккомодационных дефектов прямого МП, которые не наследуются при обратном МП, обеспечивает ему полную, кристаллографическую обратимость [9, 48]. Можно выделить несколько условий, выполнение которых способствует полной кристаллографической обратимости МП и полному возврату накопленной деформации:

1. Упорядоченная структура [2, 4 - 6]. Роль упорядочения в обеспечении кристалло-графической обратимости состоит в том, что решетка исходной фазы может быть восстановлена движением атомов при обратном МП по единственному пути, полностью повторяющему путь при прямом МП [4, 5].

2. Более низкая симметрия кристаллической решетки мартенсита, чем исходной фазы, что уменьшает количество вариантов обратного МП по сравнению с прямым [2, 10, 40]. В отсутствие упорядочения его может играть важную роль в полноте восстановления формы, что и наблюдается в подавляющем большинстве сплавов с неупорядоченной структурой.

3. Способность восстанавливать исходное энергетическое состояние, обусловленное дефектами кристаллического строения, характерное для высоко-

температурной фазы перед прямым МП. Анализ, проведенный в работе [9], показал, что при обратном МП возможно наследование полных дислокаций, если унаследованная дислокация может легко преобразовываться в дислокацию, характерную для новой структуры. Значительно затрудняется процесс наследования частичных дислокаций, дефектов упаковки и двойников. В последнем случае вообще может наступить полный энергетический запрет на любые пути обратного МП, кроме единственного, адекватного кристаллографическому пути при прямом МП. При этом аккомодационные двойники, обеспечивая протекание МП по принципу "точно назад", сами исчезают. Из этого следует, что наличие в структуре мартенсита частичных дислокаций, дефектов упаковки и особенно двойников должно способствовать кристаллографической обратимости МП и благоприятно влиять на полноту восстановления формы. При неупорядоченной структуре этот фактор, по-видимому, является определяющим для реализации ЭЗФ и сверхупругости (см. табл. I-1). Точно так же наличие в структуре полных дислокаций, наследуемых при МП, должно способствовать реализации обратимого ЭП.

Таблица 1.3.

МП или ММП	$\sigma_H^H - \sigma_K^H$, МПа	$\sigma_H^B - \sigma_K^B$, МПа	$\Delta\sigma$, МПа	ΔS , Дж (моль. К)	ΔH , Дж/моль	ΔG , Дж/моль	$\partial\sigma/\partial T$, МПа/К	$\varepsilon_H - \varepsilon_B$, %
$\beta_1 \Leftrightarrow \beta'_1$	200	192	8	1,1	2,12	-2,5	2,0	8
$\beta_1 \Leftrightarrow \gamma'_1$	225	125	100	1,3	320	-21	3,4	5
$\gamma_1 \Leftrightarrow \beta'_1$	380	100	280	0,05	110	-55	-0,16	5
$\beta'_1 \Leftrightarrow \alpha'_1$	315	155	160	0,06	217	-67	-0,13	11

4. Обратимость степени искажения кристаллической решетки мартенсита при повышении температуры для МП особого рода. Зависимость степени ромбоэдричности R -фазы или тетрагональности ГЦТ-фазы только от изменения температуры обеспечивает стабильный и безгистерезисный возврат накопленной при охлаждении деформации с полным восстановлением формы при восстановлении симметрии исходной фазы [17, 35, 56, 61].

Касаясь требований, необходимых для полной кристаллографической обратимости МП, следует отметить, что ни одно из условий самостоятельно ее не обеспечивает. Необходимо их сочетание, в котором обязательно должно выполняться условие 3. Выполнение первых трех условий обеспечивает обратимость деформации для любых видов ЭЗФ с полным восстановлением формы в сплавах с упорядоченной структурой (см. табл. I-1). Для сплавов с неупорядоченной структурой выполнение условий 2 и 3 во многих случаях дает почти полное восстановление формы, если мартенсит имеет двойниковое строение, как, например, в сплавах In-Tl и сплавах на основе титана, или неполное, как в сплавах Fe-Ni-Si, в которых обратное МП обеспечивается движением частичных дислокаций [5, 69]. Обратимое движение частичных дислокаций при нагружении и снятии нагрузки обеспечивает возврат деформации при обратных ММП [4].

Недостаточно ясны в настоящее время причины частичного восстановления формы при $OЦК \rightleftharpoons ГЦТ$ - переходе в сплавах Fe-Ni и полного при $OЦТ \rightarrow ГЦК$ - переходе в состаренных сплавах Fe-Ni-Co-Ti (см. табл.1.2). Существует мнение о решающей роли в этом процессе механизма наследования дефектов кристаллического строения [9] и внутренних напряжений, создаваемых когерентными частицами второй фазы [5, 74].

Выполнение условия полной кристаллографической обратимости МП обуславливает возможность генерирования при обратном МП реактивных напряжений и совершения полезной работы [10]. При этом выполнение всех необходимых условий Кристаллографической обратимости МП в сплавах с упорядоченной структурой, при условии высокого истинного предела текучести (например, в TiNi), обеспечивает высокие значения σ_p и A_B .

1.4. Параметры и свойства сплавов с эффектом памяти

На сегодня известно достаточно большое количество композиций сплавов, обладающих эффектом памяти (табл. 1.4). Из этой таблицы, в частности, видно, что, используя различные исходные элементы и варьируя процентным содержанием состава, можно получать диапазоны температур превращений в достаточно широких пределах. Однако на практике широкое распространение получили никель-титановые сплавы и сплавы на основе меди.

Таблица 1.4.

№ п/п	Материал	Состав ат.%	M _н	M _к	A _н	A _к (°C)
1	Ti		860			
2	Ti-Ni	50 Ni	65	40	95	105
3	— “ —	50,5 Ni	20	-5	25	55
4	— “ —	51 Ni	-65	-95	-30	-10
5	Ti-Ni-Co	45,5 Ni 4,5 Co	-50			
6	Ti-Ni-Ft	45,3 Ni 4,7 Fe	-196			
7	Cu-Sn	25 Sn	-100	-70	0	90
8	Cu-Zn	38,8 Zn (по массе)	-22	-78	-62	-7
9	— “ —	39,8 Zn (по массе)	-125	-15		
10	Cu-Zn-Sn	33,1 Zn 4,5 Sn	-30	-100	-40	80
11	Cu-Zn-Al	12-21Zn 6-18Al	-90- 50			
12	Cu-Zn-Si	33,4 Zn 2,1 Si	15	-5	15	
13	— “ —	33,4 Zn 2,2 Si	10	-10	10	
14	— “ —	35,9 Zn 1,4 Si	-55	-60	-70	
15	— “ —	33,6 Zn 0,62 Si	10	-60	-4	
16	Cu-Al	12-25 Al	300- 350		400	
17	Cu-Al-Ni	14-14,5Al 4 Ni (по массе)	-75	-11	-95	-40
18	— “ —	12,2Al 4,3 Ni (по массе)	-18	-31	2	20
19	— “ —	14-15 Al 3 Ni (по массе)	3-6	-11	15	20
20	Cu-Mn-Al	14-15 Mn 8-10 Al	150-160 -20	-196	165-185	130-135
21	Cu-Au-Zn	23-28Au 45-47 Zn	90-150			
22	Mn-Cu	10-25 Cu	120-190	50-100		
23	Mn-Ni	14-17 Ni	25-100 60-90		25-100	
24	Mn-Ge	10-15 Ge	525		60-90	
25	Mn-Ca	24 Ca	350		680	703
26	Fe-Ni	9,5 Ni	210	477	625	650
27	— “ —	14,5 Ni	7	230	570	604

№ п/п	Материал	Состав ат. %	M _H	M _K	A _H	A _K (°C)
28	— “ —	19 Ni	-30	103	425	526
29	— “ —	28 Ni	-42	-100	390	442
30	— “ —	29,3 Ni	-72	-196	365	435
31	— “ —	29,7 Ni	-95	-196	335	420
32	— “ —	30,7 Ni	-95	-196	380	430
33	— “ —	30 Ni	100-150	-196	580	730
34	Fe-Ni-Ti	30 Ni 3 Ti	80		190	240
35	Fe-Mn	18 Mn	-20			
			-40		180	
36	— “ —	20-24 Mn	-80		-110	100
37	Fe-Pt	22,3 Pt	-60	-150	-125	45
38	— “ —	23 Pt	865	-135	-115	65
39	Fe-Pt	24 Pt	400	-140	60	240
40	— “ —	25,7 Pt		-120		
41	Zr	—			490-500	
42	Co	—			290	
			180-100			
43	Co-Ni	19-30 Ni	-63		280	
			-74			
44	Ni-Al	35-38 Al	-87		-69	
			-120		-80	-40
45	Ag-Cd,	44,8 Cd	-147	-84	-97	
46	— “ —	45,0 Cd	-160	-98	-124	
47	— “ —	45,8 Cd	60	-114	-147	
48	— “ —	46,8 Cd				-137
49	— “ —	47,8 Cd		-133	-170	-150
50	Ag-Cn	38 Zn		-154	68	78
51	Au-Cd	47,5 Cd	71	-180	-100	2
52	Ge	—	60	50	-100	
53	Ge-Nd	2-12 Nd	60-100		-200	
					68	73
54	Zn-Tl	20,7 Tl			55	95
55	— “ —	21 Tl		67	55-90	60-110
56	— “ —	17-23 Tl		50-90		

В той или иной степени ЭП проявляется в большинстве сплавов, в которых МП имеет черты термоупругости. Однако в практическом плане наибольший интерес представляют сплавы на основе меди, титана, железа, марганца и особенно сплавы на основе TiNi.

Никель-титановые сплавы нашли широкое применение потому, что наряду с уникальным свойством запоминать форму, они немагнитны, имеют высокие деформирующие свойства, низкую плотность, коррозионную стойкость и стойки во всех климатических условиях.

Сплавы на основе никелида титана. В TiNi и сплавах на его основе высокотемпературная фаза имеет B2 - структуру. Область гомогенности B2 - фазы простирается от 49,5 ат. % Ni при 1025 °C до, 55 - 57 ат. % Ni при 1100 °C, но резко сужается с понижением температуры, особенно со стороны сплавов, богатых никелем [5, 36]. Большинство исследований показывает [75 - 78], что < 650°C эвтектоидный или поритектоидный распад B2 - фазы отсутствует и вблизи эквиатомного состава должна наблюдаться узкая область гомогенности (49,5 - 50,4 ат. % Ni), наличие которой в свое время предполагал И.И. Корнилов с сотрудниками [1].

На рис. 1.5 приведена анаграмма последовательности МП в TiNi вблизи эквиатомного состава для отожженных при 800 °C сплавов [79]. На анаграмме можно выделить четыре концентрационных интервала (А,Б,В,Г), в которых имеет место различная последовательность МП при охлаждении к нагреву. Во многих более поздних работах [40, 54 - 56] была подтверждена такая последовательность МП. Однако в работах [36, 80] делается вывод о том, что температура $B2 \rightleftharpoons R$ - перехода (T_R) всегда должна лежать в интервале прямого $B2 \rightarrow B19'$ - МП независимо от концентрации никеля.

Полнота проявления ЭП и псевдоупругости в TiNi определяются целым рядом металлургических и технологических факторов, однако при прочих равных условиях величины ε_H и ε_B зависят от последовательности МП. При многостадийном МП $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ они на 1,0 - 1,5% выше, чем при одностадийном $B2 \rightleftharpoons B19$ [23, 35, 56, 61]. Кроме того, при реализации одностороннего ЭП ха-

рактеристики восстановления формы выше, если накопление деформации происходило за счет образования мартенсита напряжения, а не за счет переориентировки атермического мартенсита [4, 5, 66].

По восприимчивости к термической и термомеханической обработкам все сплавы на основе TiNi можно разделить на две группы: 1) сплавы, содержащие $< 50,6$ ат. % Ni, в которых не происходит диффузионного распада B2 - фазы (49,5 - 50,4 ат. % Ni) и 2) сплавы, содержащие $> 50,6$ ат.% Ni, в которых B2 - фаза может претерпевать многостадийный диффузионный распад с выделением в конечном итоге частиц $TiNi_3$ [5].

Фазовый состав сплавов первой группы не чувствителен к термической обработке. Поэтому единственным способом управления характеристиками восстановления формы для этих сплавов является изменение структурного состояния B2 - фазы путем термомеханической [23, 81 - 84] или термоциклической [4, 9, 85] обработки. Сочетание пластической деформации с термической обработкой позволяет получить необходимую для проявления различных видов ЭП дислокационную структуру.

При высокой плотности дислокаций после холодной пластической деформации сильно расширяется интервал МП и снижается величина ε_H и ε_B . При степени обжатия $> 25 - 35\%$ ЭП вообще полностью подавляется [23, 81].

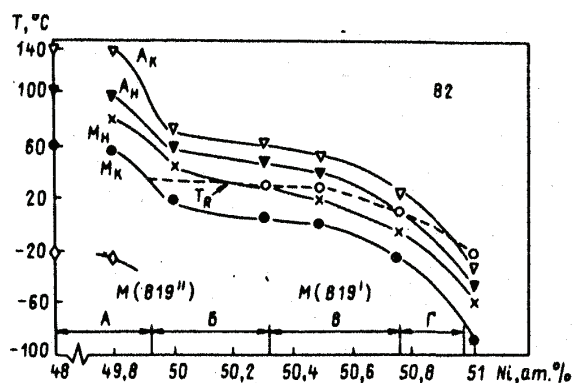


Рис. 1.5. Диаграмма МП в сплавах системы Ti-Ni (предварительный отжиг при 800 °C). T_R - температура $B2 \rightleftharpoons R$ перехода [79]

Температура начала рекристаллизации составляет ~ 600 °С [23, 81, 83], а в интервале 250 - 550 °С развивается полигонизация, при которой формируется субструктура. Последняя может быть также сформирована в результате фазового наклепа при термоциклировании в интервале M_K - A_K [85].

Изменение дислокационной структуры способствует переходу от одностадийного МП $B2 \rightleftharpoons B19'$ при рекристаллизованной структуре к двухстадийному $B2 \rightleftharpoons R \rightarrow B19'$ (рис. 1.6) [23]. Для некоторых сплавов двухстадийное МП может быть реализовано и при нагреве, если структура $B2$ - фазы была сформирована в нижней части температурной области полигонизации [82]. Такой же эффект может быть достигнут при циклировании, которое вызывает уменьшение M_H в то время как T_R с ростом числа циклов не изменяется [85, 86]. Эффективность термоциклирования может быть сведена к нулю, если $B2$ - фаза уже имела развитую субструктуру [85].

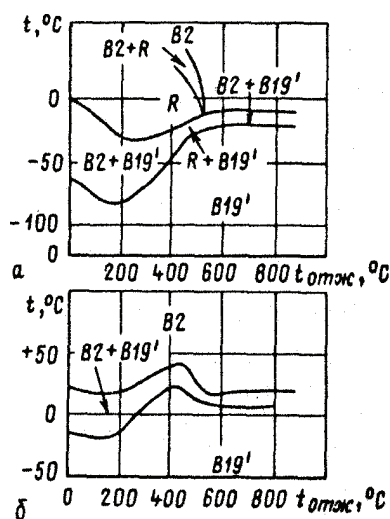


Рис. 1.6. Влияние температуры отжига $t_{отж}$ после тепловой деформации на последовательность МП при охлаждении (а) и нагреве (б) в сплаве $Ti = 48,3$ ат. % Ni [23]

Хотя детали тонкой структуры $B2$ - фазы еще недостаточно полно изучены, уже сейчас можно сделать заключение, что ее изменение сочетанием холодной пластической деформации и температуры полигонизационного отжига позволяет управлять характеристиками ЭП и псевдоупругости. В частности, накоп-

ление и возврат деформации при восстановлении формы в свободном состоянии происходят легко и наиболее полно при структуре В2 - фазы, полученной в верхней части температурного интервала полигонизации (500 - 600 °С) [23, 83, 87, 88]. При этом важной особенностью является возможность сохранить благоприятную текстуру деформации В2 - фазы, что необходимо для получения наибольших значений ε_H и ε_B [9, 66].

При восстановлении формы с внешним противодействием существенную роль играет пластическая релаксация, которая минимальна при высоком пределе текучести В2-фазы. Поэтому при необходимости генерирования высоких реактивных напряжений наиболее благоприятна структура, сформировавшаяся в нижней части температурного интервала полигонизации (300 -400 °С) [9]. Такая же обработка позволяет стабилизировать характеристики эффекта сверхупругости по сравнению с рекристаллизованным состоянием при циклическом нагружении [5, 6, 84].

Для обеспечения наибольшей работоспособности при восстановлении формы с внешним противодействием наиболее благоприятной является структура, полученная в средней температурной области полигонизации (400 - 500 °С) [9, 23, 83], хотя в отдельных случаях хорошие характеристики обеспечивает и структура верхней области полигонизации [87]. Сочетание высокого предела текучести и большой величины ε_H в результате двухстадийности МП особенно благоприятно сказывается на работоспособности при обратимом ЭП, реализуемом при циклировании под постоянной нагрузкой [9, 56, 81]. При этом увеличиваются не только ε_H и ε_B , но и количество циклов до полной потери способности восстановления формы.

Фазовый состав второй группы сплавов с содержанием никеля > 50,4 ат. % чувствителен к термической обработке из-за существенной температурной зависимости границы фазовых областей TiNi/(TiNi + TiNi₃). Даже уменьшение скорости охлаждения (охлаждение с печью) от температур области гомогенности В2 - фазы приводит к диффузионному распаду [77]. Во многом именно его породило упомянутые выше противоречия между результатами

различных исследований последовательности МП в сплавах системы Ti-Ni.

Наличие и интенсивность распада при изотермическом отжиге ($t_0 \geq 600$ °C) или старении ($250 < t_c < 600$ °C) зависят от содержания никеля. Первые признаки распада при старении наблюдаются уже при содержании 50,5 ат. % Ni [5, 85]. В сплаве Ti = 51 ат. % Ni распад при старении интенсифицируется. На начальных стадиях образуются концентрационные неоднородности или модулированные структуры [36] с последующим выделением частиц состава $Ti_{11}Ni_{14}$ [63, 65, 76].

При содержании 52 ат. % Ni распад B2 - фазы при старении также начинается с выделения частиц $Ti_{11}Ni_{14}$ [75, 89], которые с увеличением времени выдержки или температуры обедняются до состава Ti_2Ni_3 [77, 78]. При $t_0 > 600$ °C выделения могут сразу иметь состав Ti_2Ni_3 или даже $TiNi_3$. Сообщается также о возможности выделения частиц состава Ti_3Ni_4 [90-92] и X - фазы с ГЦК - решеткой [93]. Диаграмма изотермического распада B2 - фазы в сплаве Ti -52 ат. % Ni по данным работы [78] приведена на рис. 1.7.

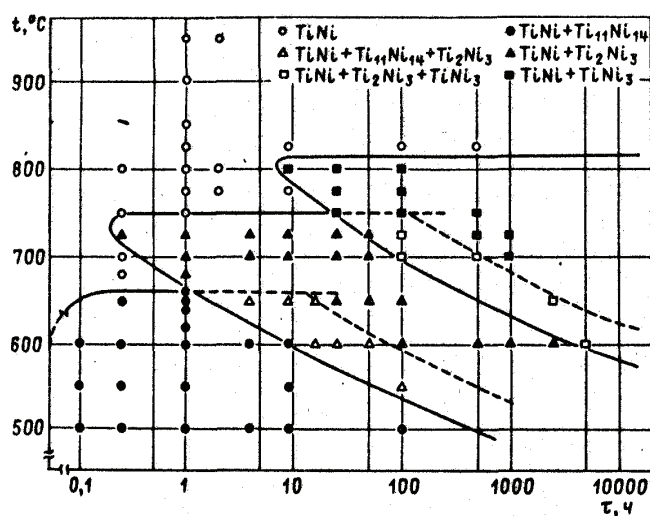


Рис. 1.7. Диаграмма изотермических превращений в сплаве
Ti=52 ат. % Ni [78]

Изменение характеристических температур и последовательности МП при увеличении длительности старения носит довольно сложный характер и не отличается единообразием. Однако общая тенденция такова, что старение вызывает рост T_R и M_H , расширяя температурный интервал существования как од-

нофазной (R), так и двухфазной (R + B19') области [36, 76, 85, 94, 95]. Влияния фазового состава и структуры, сформировавшихся на разных стадиях старения, на весь комплекс ЭП и псевдоупругости в настоящее время не установлено. Однако известно, что небольшое количество упрочняющей фазы благоприятно влияет на стабильность характеристик сверхупругости при циклическом нагружении [5, 84] и обеспечивает проявление обратимого ЭП [5, 9], который после старения под нагрузкой трансформируется в полной круговой ЭП [5, 63, 65].

В сплавах рассматриваемой группы из-за термической нестабильности B2 - фазы возможно получение в основном рекристаллизованной структуры, т.к. процессы полигонизации проходят одновременно с распадом, что затрудняет формирование субструктуры. Однако именно такая структура обеспечивает наилучшие свойства при малоцикловой усталости, в то время как для получения высокого предела выносливости лучше иметь однофазную рекристаллизованную структуру [5].

Примеси (C, O, N), содержание которых зависит от ряда металлургических и технологических факторов, оказывают существенное влияние на фазовый состав, структуру и свойства сплавов на основе TiNi. Кислород и углерод, образуя соединения TiC и Ti₄Ni₂O, обедняют матрицу титаном, что равнозначно увеличению в B2 - фазе содержания никеля [4]. Этот эффект в сочетании с дисперсными частицами второй фазы определяем поведение сплавов при ЭП и псевдоупругости, основные закономерности проявления которых рассмотрены выше.

Никилид титана плохо абсорбирует водород и наводороживается, причем обратимо, только при комнатной температуре. Водород стабилизирует мартенсит и тем самым повышает M_H [96]. При одностороннем наводороживании листовых образцов он может вызывать проявление обратимого ЭП [97]. Собственно говоря, водород в TiNi можно рассматривать не как примесь, а как временный легирующий элемент.

Наиболее эффективным способом изменения характеристических температур и последовательности МП, а также величины ε_{00}^K , является легирование. При

атом возможны три варианта замещения титана или никеля третьим компонентом (В) в соответствии с основными разрезами трехкомпонентной диаграммы:

1) замещение титана и никеля при сохранении их эквиатомного соотношения ($\text{Ti}_{50-x}\text{Ni}_{50-x}\text{B}_{2x}$); 2) замещение титана ($\text{Ti}_{50-x}\text{Ni}_{50}\text{B}_x$); 3) замещение никеля ($\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{B}_x$).

При легировании по разрезу 1 в основном сохраняется последовательность МП, характерная для сплавов, близких по составу к эквиатомному, но в зависимости от влияния третьего компонента на M_H , МП может быть как одностадийным ($B2 \rightarrow B19'$), так и двухстадийным ($B2 \rightleftharpoons R \rightleftharpoons B19'$). Такие элементы, как цирконий, гафний, тантал, ванадий и ниобий, мало влияют на M_H , сохраняя одностадийное МП [24, 98, 99]. При легировании ванадием, хромом, железом, кобальтом [4, 24], молибденом [99], алюминием [4] и медью [100] M_H резко снижается и МП носит двухстадийный характер.

Легирование по разрезу 2 обычно приводит к стабилизации В2 - фазы и резкому понижению M_H . Особенно эффективно понижают M_H хром [99], ниобий, молибден, марганец [98, 101]. Тантал менее интенсивно снижает M_H сохраняя одностадийное $B2 \rightleftharpoons B19'$ - МП [99]. Аналоги титана цирконий и гафний практически не оказывают влияния на МП в TiNi [98, 101], а ванадий, понижая M_H , способствует реализации двухстадийного МП [4].

Наиболее широко применяется легирование по разрезу 3. Именно на базе этого разреза созданы нашедшие практическое применение сплавы $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{47}\text{Fe}_3$ [9] и $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{40}\text{Cu}_{10}$ [4, 61], а также хотя и дорогостоящие, но обладающие рядом уникальных свойств сплавы $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{B}_x$, где В - Au, Pd, Pt [61, 102]. Здесь можно выделить две группы легирующих элементов, которые по разному влияют на стабильность В2 - фазы и способствуют развитию различных каналов МП.

Элементы первой группы (Fe, Co, Cr) повышают устойчивость В2 - фазы и способствуют развитию двухстадийного $B2 \rightleftharpoons R \rightleftharpoons B19'$ МП [33, 61, 103 - 105]. Поскольку M_H понижается значительно более интенсивно, чем T_R , то вклад $B2 \rightleftharpoons R$ в величину ε_B и ε_H возрастает с повышением степени легирования. Это позволяет увеличить ε_B при необратимом ЭП до 11 - 12%, а при обратимом - до

3 - 4% [35, 61]. При восстановлении формы в условиях жесткого противодействия развиваются реактивные напряжения во 600 МПа [9].

Легирующие элементы второй группы характеризуются тем, что слабо влияю на стабильность В2 - фазы при небольших концентрациях ($x < 10\%$), но интенсивно понижают ее стабильность при больших концентрациях, вызывая тем самым увеличение M_H (см. табл. I-1). Для сплавов с медью при $x > 28$ ат.% В2 - фаза диффузионно распадается на ряд фаз [40]. Соответственно, в первой области концентраций легирование не способствует улучшению характеристик ЭП и псевдоупругости. Наиболее эффективно легирование в интервале концентраций 7 - 12 ат. %, когда наблюдается наибольшая обратимая деформация и минимальные напряжения, вызывающие накопление этой деформации (рис. 1.8). Это обусловлено, с одной стороны, непрерывным развитием двухстадийного $B2 \rightleftharpoons R \rightleftharpoons B19'$ МП, при котором суммарная деформация решетки может достигать 14 - 16%, а с другой - возможностью полностью реализовать ее благодаря наличию микроскопически инвариантной габитусной плоскости [40 42, 61]. Низкие значения модулей упругости и высокая подвижность межфазных границ при отсутствии необходимости аккомодации за счет деформации с инвариантной решеткой обеспечивают этим сплавам высокие характеристики всех видов ЭП и сверхупругости [5, 61, 102]. Сплавы, легированные золотом, палладием и платиной $> 10 - 15$ ат. %, не имеют необходимых кристаллографических и структурных особенностей для такого высокого уровня характеристик восстановления формы (см. рис. 1.8) и из-за своей высокой стоимости вряд ли найдут широкое применение. Однако возможность реализации высокотемпературных ЭП (100 - 800 °С) открывает некоторые перспективы использования этих сплавов в специфических условиях.

Наиболее перспективным из данной группы сплавов являются сплавы с медью на основе композиции $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$. Сплав имеет высокие характеристики восстановления формы не только при всех видах ЭП [16, 61], но и при псевдоупругости [5]. Например, он проявляет полную сверхупругость ($\varepsilon_H = \varepsilon_B \approx 6\%$ при растяжении) при $\sigma_H^H = 600 \text{ МПа}$ и гистерезисе всего в 100 МПа. Его структура чув-

ствительна к термической обработке, что позволяет управлять характеристиками восстановления формы в довольно широких пределах [16]. Характеристические температуры МП могут быть понижены по сравнению с базовым составом путем легирования никелем вместо титана, при некотором ухудшении характеристики восстановления формы [4, 5, 16].

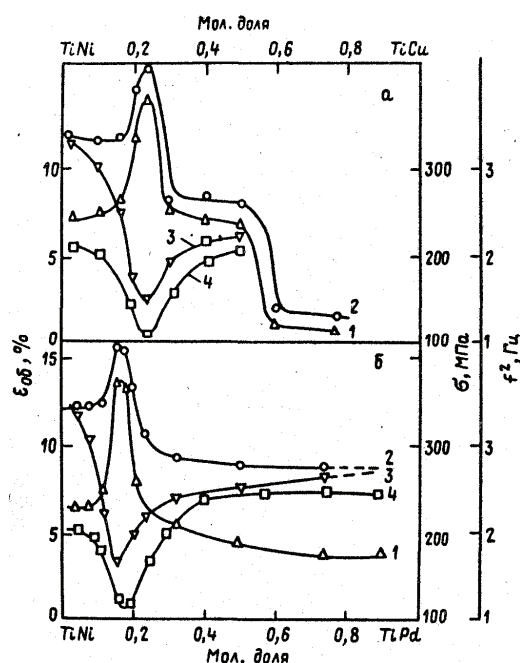


Рис. 1.8. Изменение величины обратимой деформации $\varepsilon_{об}$ при одностороннем ЭП; напряжения, обеспечивающие накопление деформации при реализации пластичности МП, и частота свободных колебаний f при M_H в системах TiNi-TiCu (а) и TiNi-TiPd (б) [61]: 1 - $\varepsilon_{об}$ при $\sigma = 100 \text{ МПа}$; 2 - $\varepsilon_{об}$ при σ согласно кривой 3; 3 - σ ; 4 - f

Сплавы на основе титана. В титане и сплавах на его основе высокотемпературная β - фаза с неупорядоченной ОЦК - структурой может претерпевать при закалке три МП [37]: $\beta \Rightarrow \alpha'$ (ГП)-структура, $\beta \Rightarrow \omega$ (гексагональная) и $\beta \Rightarrow \alpha''$ (ромбическая), из которых только последняя удовлетворяет почти всем требованиям (кроме упорядочения) для проявления ЭП и псевдоупругости. Несмотря на отсутствие упорядочения, внутреннее двойниковое строение мартенсита, по-видимому, обеспечивает полную кристаллографическую обратимость, $\alpha'' \Rightarrow \beta$ -

МП при нагреве, но из-за низкой термической стабильности мартенсита и β - фазы [37, 68, 106] обратное МП может быть реализовано только при высоких скоростях нагрева [8]. Поэтому большинство сплавов на основе титана, в которых обнаружены ЭП и псевдоупругость, содержат довольно большое суммарное количество β - стабилизаторов (V, Mo, Fe, Cr), что уменьшает критическую скорость нагрева. Это позволяет обеспечить протекание МП при отрицательных или не очень высоких, по сравнению с комнатной, температурах. Необходимый фазовый состав и химический состав фаз обычно достигается подбором температуры нагрева под закалку или химического состава сплава [67, 68].

Из-за низкой термической стабильности фаз и широкого температурного интервала МП накопление деформации обычно не проводят в условиях изотермического нагружения. Наиболее аффективным механизмом накопления деформации является ориентированный рост мартенсита в β - фазе при температурах, близких к M_H хотя возможен и механизм переориентировки атермического мартенсита [67, 68, 106, 107]. Вследствие неупорядоченной структуры β - фазы накопление деформации происходит в условиях все возрастающего напряжения ($\sigma_H^H - \sigma_K^H = 200 - 400$ МПа), что не позволяет достичь значений $\varepsilon_{\sigma\sigma}^K$ без заметного дислокационного скольжения. Этим обусловлен тот факт, что максимальная величина ε_B при ЭП обычно не превышает - 3%, хотя оценки показывают, что $\varepsilon_{\sigma\sigma}^K$ может составлять 4 - 6 % [67, 68].

Для сплавов с широким интервалом МП (100 - 150 °С), какими являются сплавы на основе титана, существенно ограничены возможности изменения температуры нагружения для накопления деформации. Чаще всего нагружение проводят при комнатной температуре, -добиваясь необходимых условий подбором химического состава β - фазы, например, закалкой от оптимальной температуры [68, 108]. Но даже при обеспечении оптимальных термодинамических условий полностью реализовать сверхупругость в титановых сплавах не удастся, хотя ее доля в ε_B отдельных случаях может быть достаточно велика [67].

Основная часть ε_H устраняется при нагреве за счет реализации ЭП.

Как свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1.5., наибольшая степень восстановления (СВ = 90 - 96% при $\varepsilon_H = 3\%$) наблюдается, когда ЭП реализуется за счет мартенсита напряжения.

Таблица 1.5.

Химический состав сплавов, масс. %	Фазовый состав	σ_T , МПа	ε_H , %	$\sigma_B - \sigma_T$, МПа	СВФ, % ($\varepsilon_H = 3,0\%$)
Ti - 3Al - 10V	α'	850	0,0	50	0
Ti - 3Al - 12V	α''	720	3,2	400	44
Ti - 3Al - 14V	$\alpha'' + \beta_M$	320	3,1	510	51
Ti - 3Al - 15V	$\alpha'' + \beta_M$	310	3,4	540	90
Ti - 3Al - 16V	β_M	230	3,5	475	96
Ti - 3Al - 18V	β_M	460	2,5	140	52
Ti - 3Al - 20V	β_M	650	0,0	40	0

Примечание. Температура деформации 20 °С; β_M - метастабильная β - фаза.

Такие же результаты получены на закаленном из β - области промышленном сплаве Ti - 10V - 2Fe - 3Al [106, 110]. Для промышленных конструкционных сплавов ВТ16 [109] и ВТ23 [68, 109] СВФ при $\varepsilon_H = 3\%$ не превышает 75% из-за наличия в структуре 15% α - фазы. Ее присутствие в таких количествах ухудшает характеристики восстановления формы в свободном состоянии, но на 100 - 120 МПа увеличивает реактивные напряжения. ЭЗФ может проявляться и в титановых сплавах со структурой атермического мартенсита. Однако здесь возникают две проблемы. Во-первых, необходимо, чтобы мартенсит имел только двойниковое строение, что достигается снижением M_K почти до комнатной температуры путем изменения степени легирования. Во-вторых, необходимо предотвратить диффузионный распад мартенсита путем увеличения скорости нагрева. Выполнение этих требований позволяет обеспечить СВФ = 50 - 60 % ($\varepsilon_H = 3\%$) при $A_H = 150 - 280$ и $A_K = 300 - 580$ °С [68].

Принципы легирования титановых сплавов для получения оптимальных характеристик ЭЗФ и псевдоупругости в настоящее время не разработаны. Это связано с тем, что ЭЗФ прежде всего был обнаружен на уже существующих конструкционных промышленных сплавах и улучшение его характеристик шло по пути оптимизации технологии термической обработки [100, 110, 107]. При создании новых сплавов с ЭЗФ необходимо решить проблемы повышения термической стабильности, сужения температурного интервала МП и увеличения максимальных значений $\varepsilon_{об}^K$, ε_H и ε_B .

Сплавы на основе меди. Базовыми системами для создания сплавов с ЭП являются двойные системы Cu - Al, Cu - Sn, Cu - Zn. Однако из-за невысокой термической стабильности (системы Cu - Al и Cu - Sn) или очень низкой температуры реализации МП (система Cu - Zn) большинство сплавов на основе меди представляют собой трехкомпонентные или более сложные композиции (см. табл. 1.1.). Сплавы этой группы проявляют все виды ЭП и псевдоупругости, однако уровень характеристик и их стабильность определяются химическим составом и структурой. Из большого количества сплавов на основе меди практический интерес представляют сплавы Cu - Al - Ni и Cu - Zn - Al, а также сложнолегированные сплавы на их основе [4 - 6].

Область составов сплавов Cu - Al - Ni, проявляющих ЭП, располагается в основном вблизи эвтектоидного состава. Добавки 3 - 4,5 масс. % Ni снижают диффузионную подвижность атомов меди и алюминия, предотвращая тем самым эвтектоидный распад высокотемпературной β - фазы при закалке, в процессе которой при температурах $>M_H$ происходит упорядочение (при температуре ~ 500 °C). Упорядоченная β_1 - фаза (DO_3) при дальнейшем охлаждении претерпевают МП с образованием γ'_1 (2H) -мартенсита [4, 54]. С увеличением содержания алюминия характеристические температуры МП интенсивно понижаются (рис. 1.9.), влияние никеля менее существенно, хотя тенденция к их снижению наблюдается.

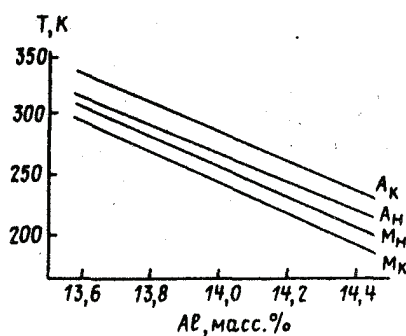


Рис. 1.9. Влияние содержания Al на характеристические температуры МП в сплавах Ti - xAl 4 масс. % Ni (закалка от 1000 °С в ледяной воде, после получения β - твердого раствора) [5]

Переменная растворимость легирующих элементов β - фазе, эвтектоидное превращение и существенная зависимость характеристических температур МП от степени легирования β - фазы позволяют, с одной стороны, изменять температурный интервал реализации ЭП с помощью термической обработки, а с другой — требуют жесткого контроля ее режимов, подбор которых необходимо осуществлять для каждого конкретного состава [4, 5, 111 - 116]. Общая тенденция для рассматриваемых составов такова, что понижение температуры нагрева под закалку или скорости охлаждения при закалке, увеличение температуры или длительности старения приводит к повышению M_H и A_H вследствие выделения промежуточных и равновесных фаз. Однако следует контролировать степень распада при старении, поскольку на поздних стадиях может произойти ухудшение характеристик восстановления формы или даже полная потеря способности проявлять ЭП [4]. По этой причине максимальная рабочая температура сплавов Cu - Al - Ni ограничена 100 °С [4, 117].

Мартенсит γ'_1 не является единственным атермическим мартенситом. Имеются сообщения [114, 116], что в сплавах с повышенным содержанием алюминия в зависимости от режимов предшествующей термической обработки может образовываться атермический мартенсит β'_1 (18 R) или смесь γ'_1 и β'_1 - фаз. Мартенсит β'_1 образуется также в процессе нагружения при $T_d > A_K$, обеспечивая для монокристаллов Cu - Al - Ni проявление сверхупругости при которой практиче-

ски не наблюдается гистерезис [4].

Максимальная величина ε_H при полном восстановлении формы как при необратимом ЭП, так и при сверхупругости достигается на монокристаллах и составляет $\sim 5\%$ для γ'_1 и $\sim 7\%$ для β'_1 - мартенсита [4, 70, 116]. При переходе к поликристаллам величина ε_H уменьшается в 2 - 3 раза. Одновременно в 2 раза (с 600 до 300 МПа) уменьшаются напряжения, при которых происходит разрушение образца. Поэтому и величина реактивных напряжений для сплавов Cu - Al - Ni не превышает 200 МПа [4, 9].

Для поликристаллических сплавов системы Cu - Al - Ni проблема низкой трещиностойкости как при термической обработке, так и при циклическом деформировании является основной в плане практического использования этих сплавов [4, 5]. Зарождение трещин и разрушение происходит по границам зерен. Попытки избежать межзеренного разрушения уменьшением размера зерна путем микролегирования и оптимизацией технологии получения к обработки сплавов хотя и позволили несколько улучшить свойства, но не настолько, чтобы открыть этим сплавам широкую перспективу применения [4, 5, 118 - 121]. В этом отношении значительно больший интерес представляют монокристаллы сплавов Cu - Al - Ni, а также сплавы системы Cu - Zn - Al.

Состав сплавов системы Cu - Zn - Al, в которых проявляется ЭП, охватывают довольно широкую область концентрации компонентов (см. табл. 1.1). Высоко-температурная β - фаза с неупорядоченной ОЦК - решеткой при закалке переходит в упорядоченную B2- фазу, которая является основной в этой системе. Однако при увеличении содержания алюминия может происходить переход $B2 \rightleftharpoons DO_{19}$ [4, 5]. Этим обусловлено, что в сплавах системы Cu - Zn - Al может образовываться мартенсит как 9R (M9R), так и 18R (M18R) [4, 52].

Характеристические температуры МП сплавов системы Cu - Zn - Al существенно зависят от соотношения компонентов в сплаве и могут меняться от -180 до + 100 °C (рис. 1.9). Заданные температуры обычно получают путем оптимизации химического состава сплава [5, 122, 123]. Термическая обработка также оказывает влияние на температурный интервал проявления ЭП, особенно это

касается старения, которое протекает многостадийно и сопровождается выделением промежуточных фаз [124], а для некоторых составов и $B2 \rightleftharpoons DO_3$ - переходом или разупорядочением [4]. Характеристические температуры МП сложным образом изменяются при увеличении температуры и времени старения, хотя в конечном итоге имеет место тенденция к их снижению.

Поликристаллы Cu - Zn - Al более склонны к пластической деформации путем скольжения при нагружении и термоциклировании, чем Cu - Al - Ni. Поэтому циклирование в интервале $M_K - A_K$ приводит к появлению большого числа дислокаций и стабилизации мартенсита [4, 125, 126]. При циклическом нагружении даже при температурах $> A_K$ сверхупругость полностью не реализуется из-за легкости дислокационного скольжения. Однако по этой же причине разрушение поликристаллов Cu - Zn - Al при многократном циклировании происходит в основном по типу зерна, что определяет меньшую зависимость всех свойств от размера зерна, чем для сплавов Cu - Al - Ni [5].

Характеристики ЭП сплавов Cu - Zn - Al в значительно большей степени определяются химическим составом сплава, чем структурой. Так, в работе [122] показано, что даже в литом состоянии на сплавах, содержащих 14 - 22 масс. % Zn и 4,8 - 7,2 масс. % Al, можно получить полное восстановление формы в свободном состоянии при $\varepsilon_H \approx 6\%$, а величина σ_p может достигать 350 МПа. Применение микролегирования и термомеханической обработки, обеспечивающих измельчение зерна, приводит к увеличению ε_B при одностороннем ЭП и сверхупругости на $\sim 1\%$ по сравнению с крупнозернистыми образцами [4].

Сплавы Cu - Zn - Al проявляют обратимый ЭП [62, 127]. Наиболее полно и стабильно он проявляется при циклировании в нагруженном состоянии в интервале $M_K^\sigma - A_K^\sigma$. Однако низкая термическая стабильность сплавов ограничивает величину нагрузки. т.к. при температурах $> 100^\circ\text{C}$ начинается диффузионный распад и сплавы теряют способность проявлять ЭП.

Сплавы на основе железа и марганца. В сплавах на основе железа и марганца высокотемпературная γ - фаза имеет неупорядоченную ГЦК - структуру, что предопределяет целый ряд особенностей МП и связанных с ними ЭП. В

сплавах Fe - Pd [57], а также марганца с Cu, Ni, Ge, Pd или Ag протекает ГЦК→ПЛГ МП особого рода, при котором в продольном случае деформация решетки может достигать 2 -3 % [53]. В реальных условиях ε_H значительно меньше и во многом определяется условиями накопления деформации и видом ЭЗФ. Наиболее стабильные характеристики наблюдаются при обратимом ЭЗФ. В сплавах на основе марганца обратимая при большом числе циклов деформация составляет $\sim 0,5\%$ [17, 53]. Эффекты псевдоупругости в этих сплавах не обнаружены.

В сплавах на основе железа, кроме того, реализуются МП $\gamma \Rightarrow \alpha$ (ГЦК \Rightarrow ОЦК) и $\gamma \Rightarrow \varepsilon$ (ГЦК \Rightarrow ГП). Первое - в системе Fe - Ni, второе - в системе Fe - Mn. По понятным причинам восстановление формы в сплавах этих систем неполное, а величина ε_B не превышает 0,7% [12, 130]. Однако на базе именно этих систем происходил поиск технологии обработки, способной обеспечить практически значимую величину ε_B , для существующих сплавов, или поиск новых составов. В основу положены следующие принципы [5, 12]: а) повышение предела текучести или снижение модуля упругости γ - фазы; б) уменьшение объемного эффекта и сдвиговой деформации МП; в) увеличение степени тетрагональности решетки мартенсита; г) снижение температуры M_H для облегчения процесса двойникования при аккомодации.

Наиболее перспективными оказались сплавы систем Fe - Ni - Nb [12, 132], Fe - Ni - Ti - Co [5, 13, 14, 74] и Fe - Mn - Si [5, 69, 131]. В сплавах Fe - Ni - Nb степень тетрагональности решетки мартенсита невысока, но выделяются дисперсные частицы Ni_3Nb и Fe_3Nb , что благоприятно влияет на проявление ЭП. Однако величина $\varepsilon_B > 1\%$ при СВФ - 100 % может быть достигнута только при предварительной циклической обработке по схеме деформация - восстановление формы. Температуры A_H^B, A_K^B могут быть изменены путем подбора химического состава [12, 132].

Сплавы системы Fe - Ni - Co - Ti проявляют ЭП наиболее полно после старения при температурах 500 - 700 °С [5, 13, 14]. Химический состав сплавов мо-

жет колебаться от 23 до 33 масс. % Ni, что позволяет изменять температуры M_H и A_H от положительных до отрицательных значений. Добавки титана вызывают образование при старении дисперсных частиц Ni_3Ti , сильно упрочняющих матрицу. Кобальт повышает температуру Кюри, что снижает объемный эффект МП и модуль упругости γ - фазы [5]. Сплав состава Fe - 31Ni - 10Co - 3Ti (масс. %) после деформации на 2,8 % при температурах вблизи $M_H = -80$ °C полностью восстанавливает форму при нагреве $> A_K = 235$ °C. Возможно наведение деформации и при комнатной температуре, но и в этом случае несколько понижается ЭП [74].

В сплавах Fe - Mn - Si полное восстановление формы обычно не происходит, но максимальная величина ε_B может достигать 3 %. Температуры A_H^B и A_K^B могут быть изменены подбором химического состава сплава. Сплавы достаточно термически стабильны до 300 °C, что позволяет использовать их для работы в режиме термоциклирования [5, 69, 131, 133]. Как и в других сплавах на основе железа, в сплавах Fe - Mn - Si эффекты псевдоупругости не наблюдаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ РАЗДЕЛА 1

1. Корнилов И. И., Белоусов О. К. Качур Е. В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом "памяти", - М.: Наука, 1977. - 180 с. (РЖМет, 1977, 7И12К).
2. Эффект памяти формы в сплавах: Пер. с англ. / Ред. Займовский В. А. - М.: Металлургия, 1979., - 472 с. (РЖМет, 1980, 2И9К),
3. Физическое металловедение. Т. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами: Пер. с англ. / Ред. Кан Р. У. Хаазен - П. - М.: Металлургия, 1987. - 624 с.
4. Сплавы с эффектом памяти формы: Пер. с яп. / Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю., Сэкигути Ю. Тадаки Ц., Хомма Т., Миядзаки С. - М.: Металлургия, 1990. - 221 с. (РЖМет, 1990, 6И27К).
5. Miyazaki S. Otsuka K. Development of shape memory alloys // ISIJ International. - 1989. - 29, № 5. - Р. 353 - 377 (РЖМет. 1990, 4И153).
6. Otsuka K., Shimizu K., pseudoelasticity and shape memory effects in alloys // Int. Metals. Rew. - 1986. - 31, № 3 - Р. 93 - 114 (РЖМет, 1086, 11И472).
7. Винтайкин Е. 3. Мартенситные превращения.// Итоги науки и техн. ВИНИТИ. Сер. Металловед. и терм. обраб. - 1983. - 17. - С. 3 - 63. (РЖМет, 1983. 10И164).
8. Гриднев В. Н. Истоки развития и современное состояние представлений об обратимости мартенситных превращений / Препр. // Ин-т металлофизики АН УССР. - 1986. - № 111. Р. - 36 с. (РЖМет, 1986, 11И20).
9. Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П. Эффект памяти формы. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. - 216 с. (РЖМет, 1987, 7И32К).
10. Хачин В. Н. Память формы. - М.: Знание, 1984. - 64 с.
11. Берштейн А. М. Феноменология в механизм эффекта запоминания формы в сплавах со структурой β -фазы // Новые цветные сплавы. - М., 1990. - С. 127 - 135.
12. Коваль Ю.Н. Управление характеристиками мартенситных превращений в металлах и сплавах // Структура реальных металлов. - Киев, 1988. - С. 132 - 158 (РЖМет, 1988, 12И299).
13. Кокорин В. В. Мартенситные превращения в неоднородных твердых растворах. - Киев: Наук. думка, 1987. - 168 с.

14. Maki T., Kobayashi K., Minato M., Tamura I. Thermoelastic martensite in an aged Fe-Ni-Ti-Co alloy // Scr. met. - 1984. - 18, № 10. - P. 1105 - 1109 (РЖМет, 1985, 3И276).
15. Ерофеев В. Я., Паскаль Ю. Н. Кинетические и морфологические закономерности мартенситных превращений в сплавах Ti(Ni-Cu) // Докл. АН СССР. - 1986. - 286. № 4. - С. 879 - 882. (РЖМет, 1986, 6И183).
16. Токарев В. Н., Дударев Е. Ф. Мартенситные превращения и эффекты памяти формы в сплавах $Ti_{50-x}Ni_{40+x}Cu_{10}$ // Физ. мет. и металловед. - 1987. - 64. № 2. - С. 358 - 362. (РЖМет, 1988, 1И187).
17. Маторин В. И., Винтайкин Е. З., Удовенко В. А. Новые Проблемы мартенситных превращений // Металлургия: пробл. поиски, решения. - М., 1989, - С. 156 - 165 (РЖМет, 1989, 5И135).
18. Курдюмов Г. В., Хандрос Л. Г. О "термоупругом" равновесии при мартенситных превращениях. // Докл. АН СССР. - 1949. - 66, № 2. - С. 211 - 214.
19. Золотухин Ю. С., Сивоха В. П., Хачин В. Н. Особенности мартенситных превращений и неупругого поведения некоторых В2 -сплавов на основе титана // Физ. мет. и металловед. - 1988. - 66, № 5. - С. 896 - 902 (РЖМет, 1989, 4И136).
20. Пасько А. Ю., Коваль Ю. Н. Динамика межфазных границ при мартенситных превращениях // Металлофизика. 1989. - 11, № 3. - С. 38 - 45 (РЖМет, 1989, 9И145).
21. Коваль Ю. Н., Лихачев А. А. Особенности гистерезиса при мартенситных превращениях в модели со случайными неоднородностями // Металлофизика. - 1988. - 10. № 5. - С. 28 - 34 (РЖМет, 1989. 1И186).
22. Кокорин В. В. Стареющие сплавы // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Металловед, и терм. обраб. - 1989. - 24. - С. 3 - 42.
23. Лихачев В. А., Помыткин С. П., Шимановский С. Р. Влияние термомеханической обработки на последовательность фазовых превращений в сплавах на основе Ti-1 // Металловед, и терм. обраб. мет. - 1989. - № 8. - С. 11 - 17 (РЖМет, 1989, 11И296).
24. Башанова. Н. Н., Жебынева Н. Ф., Федотов С. Г., Чернов Д. Б. Эффект памяти формы и мартенситное превращение в легированном никелиде титана //

Металловед. и терм. - обр. мет. - 1986. - № 7. - С. 22 - 24 (РЖМет, 1986, 12И202).

25.Кондратьев В. В., Пушин В. Г. Предмартенситные состояния в металлах, их сплавах к соединениях: экспериментальные результаты, модели структуры, классификация // Физ. мет. и материаловед. - 1985. - 60, № 4. - С. 629 - 650 (РЖМет, 1986, 3И254).

26.Кондратьев В. В., Муслов С. А., Пушин В. Г., Хачин В. Н. Структура и свойства В2-соединений титана. II. Предмартенситная неустойчивость ОЦК (В2) - решетки // Физ. мет. и материаловед. - 1988. - 66, № 2. - С. 359 - 369 (РЖМет, 1989, 9И152).

27.Варлимонт Х., Дилей Л. Мартенситные превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота: Пер. с англ. - М.: Наука, 1980. - 250 с. (РЖМет, 1980, 6И18К).

28.Тяпкин Ю. Д., Лясоцкий И. В. Внутрифазовые превращения // Итоги науки и техн. Сер. Металловед, и терм. обраб. - 1981. - 15. - С. 47 - 110 (РЖМет, 1982, 4И156).

29.Муслов С. А., Хачин В. Н., Сивоха В. П., Пушин В. Г. Предмартенситные аномалии упругих свойств и внутреннее трение в моно- и поликристаллах TiNi// Металлофизика. -1987. - 9, № 1. - С. 29 - 32 (РЖМет, 1987, 6И351).

30.Кузнецов А. В., Муслов С. А., Лотков А. И., Хачин В. Н., Гришков В. Н., Пушин В. Г. Упругие постоянные TiNi вблизи мартенситных превращений // Изв. вузов Физ. - 1987. - 30, № 7. - С. 98-99 (РЖМет, 1987, 12И429).

31.Лотков А. И., Кузнецов А. В. Упругие свойства монокристаллов Ti-Ni перед мартенситными превращениями $B2 \Rightarrow B19'$ и $B2 \Rightarrow R \Rightarrow B19'$ // Физ. мет. и материаловед. - 1988. - 66. № 5. - С. 903 - 909 (РЖМет, 1989, 3И578).

32.Пушин В. Г., Кондратьев В. В., Хачин В. Н. Предпереходные явления и мартенситные превращения в сплавах на основе никелида титана // Изв. вузов. Физ. - 1985. - 27, № 5, С. 5 - 20 (РЖМет, 1985, 11И230).

33.Пушин В. Г., Хачин В. Н., Саввинов А. С., Кондратьев В.В. Структурные, фазовые превращения и свойства сплавов NiTi и NiTiFe // Докл. АН СССР. Физика. - 1984. - 277. ч № 6. - С. 1388-1391 (РЖМет, 1984, 11И200).

- 34.Пушин В. Г., Муслов С. А., Хачин В. Н. Рентгенографическое и электронно-микроскопическое исследование В2 - соединений на основе TiNi // Физ. мет. и металловед. - 1987. - 61, № 4. - С. 802 - 808 (РЖМет, 1988, 3И118).
- 35.Хачин В. Н. Мартенситная неупругость сплавов // Изв. вузов. Физ. - 1985. - 27, № 5. - С. 88 -103 (РЖМет, 1985. 12И316).
- 36.Лотков А. И., Гришков В. Н. Никелид титана. Кристаллическая структура и фазовые превращения // Изв. вузов. Физ. - 1985. - 27. № 5. - С. 68 - 87 (РЖМет, 1985, 8И147).
- 37.Коллингз Е. В. Физическое металловедение титановых сплавов: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1988. - 224 с. (РЖМет, 1989, 1И49К).
- 38.Пушин В. Г., Юрченко Л. И., Павлова С. П., Турхан Ю. Э. Исследование динамики решетки и тонкой структуры ГЦК - сплавов системы железо-никель // Физ. мет. и металловед. - 1988. - 66. № 4. - С. 777 - 787 (РЖМет, 1988, 8И691Т).
- 39.Barsh G. R., Krumhansl I. A., Tanner I. E., Wuttig M. A new view on martensitic transformations // Scr. met. - 1987. - 21, № 9. - P. 1257 - 1262 (РЖМет. 1988, 5И240).
- 40.Хачин В. Н., Пушин В. Г., Сивоха В. П., Кондратьев В. В., Муслов С. А., Воронин В. П., Золотухин Ю. С., Юрченко Л. И. Структура и свойства В2 - соединения титана III. Мартенситные превращения. // Физ. мет. и металловед. - 1989. - 67, № 4. - С. 756 - 766 (РЖМет. 1989, 9И152).
- 41.Пушин В. Г., Хачин В. Н., Кондратьев В. В., Муслов С.А., Павлова С. П., Юрченко Д. И., Структура и свойства В2 - соединений титана. I. Предмартенситные явления // Физ. мет. и металловед. - 1988. - 66, № 2. -С. 350 - 358 (РЖМет, 1989, 1И188).
- 42.Сивоха В. П., Хачин В. Н. Мартенситные превращения и эффект памяти формы в сплавах системы TiNi-TiAu // Физ. мет. и металловед. - 1986. - 62. № 3. -С. 534-540 (РЖМет, 1986, 1И173).
- 43.Монасевич Л.Л., Паскаль Ю. И. Превращение "мартенсит-мартенсит" в никелиде титана // Физ. мет. и металловед. - 1980. - 49. № 4. - С. 813 - 817 (РЖМет, 1980, 9И235).

44. Nagasawa A. Premartensitic phenomena and the martensitic phase transformation in the beta phase alloys // Proc. Int. Conf. Martensit. Transform. (ICOMAT-86), Nara, Aug. 26 - 30, 1986. - Sendai, 1987. - P. 95 - 102 (РЖМет. 1Я88, 7И229).
45. Николин Б. И. Политипизм в металлических сплавах. // Структура реальных металлов. Киев, 1988. - С. 101 - 132 (РЖМет, 1988, 12И307).
46. Matsumoto O., Miyazaki S., Otsuka K., Tamura H. Crystallography of martensitic transformation in Ti-Ni single crystals // Acta met. - 1978. - 35, № 8. - P. 2137 - 2144 (РЖМет, 1988, 11И183).
47. Wie-Juangzhu, Wei-Ye Chen, Hsu T. V. Group theory and crystallography of the martensitic transformation on Cu-Zn-Al shape memory alloy // Acta met. - 1985. - 33, № 11. - P. 2075-2082 (РЖМет. 1986, 2И305),.
48. Титов П. В. Мартенситное превращение $\beta_1 \leftrightarrow \gamma'$ в нагруженном сплаве Cu-Al-Ni // Физ. мет. и металловед. - 1988. - № 3. - С. 551 - 558 (РЖМет, 1989, 2И177).
49. Knowles K. M., Smith D. A. The crystallography of the martensitic transformation in equiatomic nickel-titanium // Acta met. - 1981. - 29, № 1 - P. 101-110 (РЖМет. 1981, 5И?42).
50. Saburi T., Watanabe Y., Nenno S. Morphological characteristics of the orthorhombic martensite in a shape memory Ti-Ni-Cu alloy // ISIJ International. - 1989. - № 5 - P. 405 - 411 (РЖМет, 1988, 11И291).
51. Saburi T., Komatsu T., Nenno S., Watanabe Y. Electron microscope observation of the early stages of thermoelastic martensitic transformation in a Ti-Ni-Cu alloy // J. Less-Common Metals. - 1986. - 118, № 2. - P. 217 - 226 (РЖМет, 1986, 10И145).
52. Adachi K., Perkins J. Lattice image studies on the invariant boundary structure and substructure of Cu-Zn-Al 18R martensite // Met. Trans. A. - 1985. - A16, № 7 - 12. - P. 1551 - 1566 (РЖМет. 1987, 2И227).
53. Винтайкин Е. З., Удовенко В. А., Литвин Д. Ф., Макушев С. Ю., Дмитриев В. Б. Эффект памяти формы в антиферромагнитных сплавах γ - марганца // Изв. вузов. Физ. - 1985. - 27, № 3. - С. 104 - 117 (РЖМет, 1985, 11И220).
54. Miyazaki S., Wayman C. M. The R-phase transition and associated shape memory mechanism in Ti-Ni single crystals // Acta met. - 1988. - 36, № 1. - P. 181 - 192 (РЖМет. 1988, 1И503).

55. Goo E., Sinclair R. The B2 to R transformation in $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{47}\text{Fe}_3$ and $\text{Ti}_{49.5}\text{Ni}_{50.5}$ alloys // *Acta met.* - 1985. - 33, № 9. - P. 1717 - 1723 (РЖМет, 1985, 1И154).
56. Stachowiak G.B., McCormick P. G. Shape memory behaviour associated with the R and martensitic transformations in a TiNi alloy // *Acta met.* - 1988. - 36 № 2. - P. 291 - 297 (РЖМет. 1988. 6И1167).
57. Sugiyama Masaaki, Oshima Rynichiro. Fujita Francisco, Eiichi. Mechanism of FCC-FCT thermoelastic martensite transformation in Fe-Pd alloys // *Trans. Jap. Inst. Metals.* - 1986. - 27. № 10. - P. 719 - 730 (РЖМет, 1986. 3И154).
58. Miyazaki S., Otsuka K., Wayman C. M. Morphological changes associated with the R—phase and martensitic transformations in Ti-Ni single crystals // *ISIJ International.* - 1989. - 29, № 5. - P. 423 - 429.
59. Борисова С. Д., Монасевич Л. А., Паскаль Ю. И. Кристаллографический расчет обратимой деформации при эффектах памяти формы никелида титана // *Металлофизика.* - 1983. - 5, № 2. - С. 66 - 70, (РЖМет, 1983. 7И621).
60. Тихонов А. С., Герасимов А. П., Прохорова И.И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении - М.: Машиностроение, 1981. - 80 с. (РЖМет, 1981, 7И465).
61. Хачин В. Н., Сивоха В. П., Пушин В. Г., Кондратьев В. В, Структура и свойства В2 -соединений титана. Неупругое поведение // *Физ. мет. и металловед.* - 1989. - 68, № 4. - С. 715 - 722 (РЖМет, 1989. 9И152).
62. Reyhani M. M., McCormick P. G. Two-way shape memory in a CuZnAl alloy // *Proc. Int. Conf. Martensit. Transform. (ICOMAT-86) Nara. Aug. 26 - 30, 1986.* - Sendai. 1987. - P. 896 - 901 (РЖМет, 1988. 8И204).
63. Kainuma R., Matsumoto M., Honma T. The mechanism of the all—round shape memory effect in Ni-rich TiNi—alloy // *Ibid.* - P. 717 - 722 (РЖМет. 1988, 8И196).
64. Stachowiak G. B., McCormick P. G. Two stage yielding in a NiTi alloy // *Scr. met.* - 1987 -.21. № 3. - P. 403 - 406 (РЖМет. 1988. 1М501).
65. Nishida M., Honma T. Effect of heat treatment on the all-round shape memory effect in Ti-51 at. % Ni // *Scr. met.* - 1984. - 18. № 11. - P. 1299 - 1302 (РЖМет, 1985, 5М199).

66.Ильин А. А., Гозенко Н. Н., Скворцов В. И., Никитин А. С. Структурные изменения в сплавах на основе никелида титана при деформации и их влияние на характеристики восстановления формы // Изв. вузов. Цв. металлургия. - 1987. - № 4. - С. 88 - 93 (РЖМет, 1987, 12И195).

67.Sasano H., Suzuki. Shape memory effect in Ti-Mo-Al alloys // Titanium: Sci. and Technol. Proc. 5th Int. Conf. Munich. Sept. 10 - 14, 1984. - Oberursel, 1985. - P. 1667 - 1674 (РЖМет. 1985. 4И230).

68.Ильин А. А., Алексеев В. В., Коллеров М. Ю., Скворцова С. В. Влияние фазового состава и структуры на эффекты неупругого поведения сплавов на основе титана // Изв. вузов. Цв. металлургия. - 1985. - № 3. - С. 97 - 104 (РЖМет, 1985, 10И921).

69.Sade M., Halter K., Hornbogen E. The effect of thermal cycling on the transformation behaviour of Fe—Mn—Si shape memory alloys // Z. Metallk. - 1983. - № 8. - P. 487 - 491 (РЖМет. 1988, 8И538).

70.Лушанкин И. А., Мартынов В. В., Хандрос Л. Г. Тепловые эффекты при мартенситных и межмартенситных превращениях в сплавах Cu-Al-Ni // Физ. мет. и металловед. - 1987. - 63, № 5. - С. 981 - 986 (РЖМет, 1987, 9И171).

71.Hidekazu S., Ken'ichi S. Pseudoelasticity due to consecutive $\beta_1 \Leftrightarrow \beta'_1 \Leftrightarrow \alpha'_1$ transformations and thermodynamics of the transformation in a Cu-14,4Al—3,6Ni alloy // Trans. Jap. Inst. Metals. - 1987. - 28. № 9. - P. 715 - 722 (РЖМет, 1988, 3И125).

72.Hiroyasu S., Kazuyoshi T., Shin'ichi S. The second martensitic transformation stress—induced in Cu-Zn-Al alloy single crystals // Trans. Jap. Inst. Metals. — 1984. — 25, № 5. - P. 324 - 331 (РЖМет. 1985. 11И201).

73.Sakamoto H., Shimizu K. A new martensite phase, 18R type β'_2 , and pseudoelasticity caused by $\gamma'_2 \Leftrightarrow \beta'_2$ transformations in Au-47,5 at. % Cd alloy single crystals // Scr. met. - 1986. - 20. № 10. - P. 1349 - 1354 (РЖМет, 1987, 4И163).

74.Maki T., Furutani S., Tamura I. Shape memory effect related to thin plate martensite with large thermal hysteresis in an aged Fe-Ni-Co-Ti alloy // ISIJ International. — 1989. - 19, № 5. - P. 438 - 445 (РЖМет. 1989. 11И303).

75.Nishida M., Wayman C. M. Electron microscopy studies of the $Ti_{11}Ni_{14}$ phase in an aged Ti—52 at.% Ni shape memory alloy // Scr. met. - 1985. - 19 № 10. - P. 983 - 987 (РЖМет, 1986. 3И314).

76.Nishida M., Wayman C. M. Electron microscopy studies of the premartensitic transformations in an aged Ti—51 at. % Ni shape memory alloy // Metallography. - 1988.- 21, № 3. - P. 255 - 273 (РЖМет, 1989. 111198).

77.Nishida M., Wayman C. M. Electron microscopy studies of precipitation processes in near-equiatomic TiNi shape memory alloys // Mater. Sci. and Eng. - 1987. - 93. - P. 191 - 203 (РЖМет, 1988, 5И245).

78.Nishida M., Wayman C. M., Honma T. Precipitation processes in near—equiatomic TiNi shape memory alloys // Met. Trans. A. - 1986. - 17. - P. 1505 - 1515 (РЖМет, 1986, 2И805).

79.Чернов Д. Б., Паскаль Ю. И., Гюнтер В. Э., Монасевич Л. А. Диаграммы структурных превращений сплавов на основе никелида титана и эффекты памяти формы // Изв. вузов. Физ. - 1981. -. 24. № 3. - С. 93 - 96 (РЖМет, 1981, 8И126).

80.Гришков В. Н., Лотков А. И. Мартенситные превращения в области гомогенности интерметаллида TiNi // Физ. мет. и металловед. - 1985. - 60. № 2. - С. 351 - 355 (РЖМет, 1985, 8И149).

81.Бернштейн М. Д., Хасенов Б. П., Хасьянов У. Многократная реализация эффекта памяти формы в сплаве TiNi // Металловед, и герм. обраб. мет. - 1987. - № 2. - С. 49 - 55 (РЖМет, 1987, 6И780).

82.Todoroki Tsunehiko, Tamura Hirokazu. Effect of heat treatment after cold working on the phase transformation in TiNi alloy // Trans. Jap. Inst. Metals. - 1987. - 28, № 2. - P. 83 - 94 (РЖМет. 1987. 10И181).

83.Liu Y. McCormick P. G. Influence of heat treatment of the mechanical behaviour of TiNi alloy // ISIJ International. - 1989.- 29, № 5. - P. 417 - 422 (РЖМет, 1989. 2И368).

84.Miyazaki S., Imai T., Igo Y. Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ti—Ni alloys // Met. Trans. A. - 1986. - 17, № 1. - P. 115 - 120 (РЖМет. 1987. 1И623).

85.Miyazaki S., Igo Y., Otsuka K. Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti—Ni alloys // Acta met. - 1986. - 34 № 10. - P. 2045 - 2051 (РЖМет. 1986. 4И153).

86. Airoidi G., Bellini G., Francesco C. D. Transformation cycling in TiNi alloys // J. Phys. F.: Met. Phys. - 1984. - 14, № 8. - P. 1983 - 1987 (РЖМет. 1984, 12И190).

87. Ильин А. А., Скворцова В. И., Никитич А. С. Характеристики восстановления формы листов из сплава Ti-49,5% Ni // Изв. вузов. Цв. металлургия. - 1986. - № 12. - С. 69 - 71 (РЖМет, 1987, 3И907).

88. Ковнеристый Ю. К., Федотов С. Г., Матлахова Л. А., Олейникова С. В. Эффекты запоминания формы и формообратимости сплава TiNi в зависимости от деформации // Физ. мет. и металловед. - 1986. - 62. № 2. - С. 344 - 348 (РЖМет. 1986, 12И467).

89. Nishida M., Wayman C. M., Kainuma R., Honma T. Further electron microscopy studies of the $Ti_{11}Ni_{14}$ phase in an aged Ti-52at.% Ni shape memory alloy // Scr. met. - 1986. - 20, № 6. - P. 899 - 904 (РЖМет, 1986. 11И213).

90. Kainuma R., Mataumoto M. Shape memory effect by diffusional transformation in Ti-52 Ni alloy // Scr. met. - 1988. - 22. № 4. - P. 475 - 478 (РЖМет, 1988. 9И1062).

91. Nishida M., Wayman C. M., Chiba A. Electron microscopy studies of the martensitic transformation in an aged Ti—51 at. % Ni shape memory alloy // Metallography. - 1988. - 21, № 3. - P. 275 - 291 (РЖМет, 1988. 5И245).

92. Tsugio T., Yoshiyuki N. Thermal cycling effects in an aged Ni-rich Ti-Ni shape memory alloy // Trans. Jap. Inst. Metala. - 1987. - 28, № 11. - P. 883 - 890 (РЖМет. 1987. 5И277).

93. Ермаков В. М., Коломыцев В. И., Лещинская О. И., Лободюк В. А., Мусиенко Р. Я. Влияние легирования и термической обработки на фазовые превращения в сплавах на основе соединения TiNi // Металловед. и терм. обраб. металл. - 1988. - № 9. - С. 61- 63 (РЖМет, 1988, 12И352).

94. Лотков А. И., Гришков В. Н. Влияние структурного состояния аустенита на мартенситные превращения в $Ti_{49}Ni_{51}$. Низкотемпературное старение // Физ. мет. и металловед. - 1990. - № 7. - С. 88 - 93.

95. Okamoto Y., Hamaoka H., Miuza F., Tamura H., Horikawa H. Reversible changes in yield stress and transformation temperature of a NiTi alloy by alternate heat treatments // Scr. met. - 1988. - 22. № 4. - P. 517 - 520 (РЖМет, 1988. 9И534).

96.Шоршоров М. Х., Степанов И. А., Фломенблй Ю. М., Травкин В. В. Фазовые и структурные превращения, вызываемые водородом в сплавах на основе никелида титана. // Физ. мет. и металловед. - 1985. - 60, № 2. - С. 326 - 333 (РЖМет, 1986, 1И151).

97.Масленков С. Б., Будигина Н. Б., Шоршоров М. Х., Фломенблй Ю. М. Эффекты памяти формы, фазовые и структурные превращения, вызванные водородом в сплавах системы Ti-Ni // Физ. мет. и металловед. - 1988. - 66, № 2. - С. 307 - 312 (РЖМет, 1989, 2И179).

98.Хунджуа А. Г., Захарова М. И., Сорокин А. В. Мартенситное превращение в легированном никелине титана // Металлофизика. - 1986. - 8, № 2. - С. 38 - 42 (РЖМет, 1986, 7И18).

99.Захарова М. И., Кокоев Г. Н. Мартенситные характеристики в легированных сплавах никелина титана // Металлофизика. - 1990. - 12, № 3, - С. 122 - 123.

100.Чернов Д. Б., Монасевич Л. А., Башанова Н. Н., Паскаль Ю. И., Влияние меди на структурное превращение в TiNi по разрезам TiNi-TiCu и TiNi-Cu тройной системы Ti-Ni-Cu // Физ. мет. и металловед. - 1983. - 59, № 6. - С. 1226 - 1228 (РЖМет, 1985, 10И202).

101.Хунджуа А. Г., Захарова М. И., Сорокин А. В, Структура X - фазы, формирующейся при старении сплавов на основе никелина титана // Физ. мет. и металловед. -1986. - 31, № 1. - С. 109 - 114 (РЖМет. 1986, 6И234).

102.Khachin V. N. Martensitic transformation and shape memory effect in B2 intermetallic compounds of titanium // Rev. Phys. Appl. - 1989. -24, № 7. - P. 733 - 739 (РЖМет . 1990, 4И144).

103.Воронин В. П., Сивоха В. П., Хачин В. Н., Мартенситные превращения и эффект памяти формы в $Ti_{50}Co_{50-x}Ni_x$ // Физ. мет. и металловед. - 1989. - 68, № 4. - С. 728 - 732 (РЖМет, 1990, 3И146).

104.Закревский И. Г., Кокорин В. В., Муслев С. А., Хачин В. Н., Шевченко А. Д. Мартенситные превращения и свойства сплавов TiNi-TiFe // Металлофизика. - 1986.- 8, № 6. - С. 91 - 95 (РЖМет, 1986, 3И148).

105.Kim C., Hwang C. M. Electron microscopy studies of phase transformations in a $Ti_{49.5}Ni_{48}Cr_{2.5}$ alloy // Scr. met. - 1987. - 21 № 7. - P. 909 - 961 (РЖМет, 1987, 2И160).

106.Duering T. W., Albrecht J., Richter P., Fescher P. Formation and reversion of stress induced martensite in Ti-10V-2Fe-3Al // Acta met. - 1982. - № 30. - P. 2172 - 2182, (РЖМет. 1983. 3И186).

107.Ильин А. А., Скворцова С. В., Коллеров М. Ю. Эффект запоминания формы в титановых сплавах // Повыш. качества, надеж. и долговечн. изделий из конструкцион., жаропроч. порош. и инструм. сталей и сплавов. Матер. кратко-сроч. семинара, 24 - 25 июня. - Л., 1986. - С. 58 - 63 (РЖМет, 1986, 10И654).

108.Ильин А. А., Алексеев В. В., Коллеров М. Ю. Влияние режимов термической обработки на эффект запоминания формы в титановом сплаве ВТ23 / Новые конструкцион. стали и сплавы и методы их упрочнения. - М., 1984. - С. 127 - 131 (РЖМет, 1984, 11И485).

109.Мальцев М. В., Кашников Н. И. Восстановление формы при обратном мартенситом превращении в закаленном и деформированном титановом сплаве ВТ 16 // Металловед. и терм. обраб. мет, - 1983. - № 9. - С. 25 - 26 (РЖМет. 1983. 1И335).

110.Sohmura T., Kimura H. Shape recovery in Ti-V-Fe-Al alloy and its application to dental implant // Proc. Int. Conf. Martensit. Transform. (ICOMAT-86), Nara, Aug. 26 - 30, 1983. - Sendai. 1987.- P. 1065 - 1070 (РЖМет. 1987, 9И198).

111.Sakamoto H., Shimizu K. Some problems in the development of Cu-Al-Ni shape memory alloys // Mem. Inst. Sci. and Ind. Res. Osaka Univ. - 1989. - 46 - P. 99 - 100 (РЖМет. 1989.9М148).

112.Fischer P., Dunne P., Kennon N. The effects of transformation cycling and ageing on the $\beta_1 \Rightarrow \alpha'$ thermoelastic martensitic transformation in Cu-Al-Ni // Proc. Int. Conf. Martensit. Transform (ICOMAT-86). Nara, Aug. 26 - 30, 1986. - Sendai, 1987. - P. 946 - 951 (РЖМет, 1987. 6И185).

113.Singh J., Chen A., Wayman C. M., Precipitation behaviour of a Cu-Al-Ni shape memory alloy at elevated temperatures // Scr. met. - 1985. - 19, № 2. - 231 - 234 (РЖМет. 1985. 10И272).

114.Agafonov V., Pinto N., Bedjai R., Naudof A., Dubertret A., Dubois B. Contribution à la connaissance des alliages à mémoire de forme du système Cu-Al-Ni // Mem. et étud. sci. Rev. met. - 1987. - 84, № 9.- P. 493 (РЖМет, 1989, 12И1218).

115. Kuwano N., Wayman C. M., Some effects of parent phase aging on the martensitic transformation in a Cu-Al-Ni shape memory alloy // *Met. Trans. A.* - 1984. - 15, № 1 - 6. - P. 621 - 626 (РЖМет, 1986. 3И234).
116. Sakamoto H., Shimizu K. Effect of heat treatments on thermally formed martensite phases in monocrystalline Cu-Al-Ni shape memory alloy // *ISIJ International.* - 29. № 5. - P. 395 - 404 (РЖМет. 1989, 5И282).
117. Humbeeck J. van, Pelay L., Roedolf D. Stabilisation of isothermally transformed 18R Cu-Al-Ni martensite // *Proc. Int. Conf. Martensit. Transform. (ICOMAT-86)*, Nara. Aug. 26 - 30. 1986. - Sendai. 1987. - P. 862 - 867 (РЖМет, 1988, 7И231).
118. Sure G. N., Brown L. C. The fatigue properties of grain refined β -Cu-Al-Ni strain-memory alloys // *Scr. met.* - 1985. - 19, № 4. - P. 401 - 404 (РЖМет, 1985, 11И676).
119. Sakamoto H., Shimizu K. Experimental investigation on cyclic deformation and fatigue behaviour of polycrystalline Cu-Al-Ni shape memory alloys above M_s // *Trans. Jap. Inst. Metals.* - 1986. - 21, № 8. - P. 592 - 600 (РЖМет, 1987. 1И493).
120. Sure G. N., Brown L. C. The mechanical properties of grain refined β -CuAlNi strain-memory alloys // *Met. Trans. A.* - 1985. - 15. № 7 - 12. - P. 1613 - 1621 (РЖМет, 1985, 11И1050).
121. Lee J. S., Wayman C. M. Grain refinement of a Cu-Al-Ni shape memory alloy by Ti and Zr additions // *Trans. Jap. Inst. Metals.* - 1986. - 27, № 8. - P. 584 - 591 (РЖМет, 1987, 2И1004).
122. Ларин В. К., Забульский Г. З., Нощадим В. Н. Специальные свойства литейных алюминиевых бронз и латуней с эффектом запоминания формы // *Изв. вузов. Цв. металлургия.* - 1986. - № 5. - С. 89 - 93
123. Ларин В. К. Влияние легирования на характеристические температуры мартенситного превращения в медных сплавах, обладающих эффектом запоминания формы // *Изв. вузов. Цв. металлургия.* - 1987. - № 6. - С. 81 - 84 (РЖМет, 1988, 6И180).
124. Мусиенко Р. Я., Коломьцев В. М., Коваль Ю. Н., Лободюк В. А., Дугкевич Я. Структурные и фазовые изменения в сплавах Cu-Al-Zn на начальных стадиях старения // *Металлофизика.* - 1989. - 11, № 6. - С. 8 - 15.

- 125.Segers D., Humbeeck J. van, Delaey L., Dorikens M., Dorikens-Vanpraet L. Positronannihilation study of defects in the cyclically transformed martensite phase in a Cu-Zn-Al alloy // Appl. Phys. A. - 1985. - 36, № 4. - P. 179 - 182 (РЖМет, 1985, 9И266).
- 126.Friend C. M., Miofownik A. P. The stability of the reversible shape memory in CuZnAl alloy // Proc. Int. Conf. Martensit. Transform.. (ICOMAT-86). Nara, Aug. 26 - 30. 1986.- Sendai. 1987. - P. 902 - 907 (. 1987. 8И202).
- 127.Contardo L., Guenin G., Naudot P. Traitements d'йducation et stabilitй de l'effet мйmoire рйversible d'alliages de cuivre-zinc-aluminium // Mem. at etud. sci. Rev. met. - 1987.-84. № 9. - P. 507 (РЖМет, 1989, 3И1043).
- 128.Loper del Castillo C., Hernaez J., Mellor B.G. The effect of thermal and stress cycling on thermoelastic martensite formation in Cu-Al-Mn alloys // J. Mater. Sci. - 1986.- 21, № 11. - P. 4043 - 4047 (РЖМет. 1986. 6И153).
- 129.Mellor B. C., Hernaez J., Lopez del Castillo C. Shape memory effects in Cu-Al-Mn alloy // Scr. met. - 1986. - 20, № 6.- P. 839 - 841 (РЖМет, 1987, 11И177).
- 130.Кузьмин С. Л., Лихачев В. А., Патрикеев Ю. И., Королев М. Н. Эффекты памяти формы в условиях реализации пластичности превращения // Металлофизика,- 1985. - 7 № 2. - С. 50 - 56 (РЖМет, 1985, 9И264).
- 131.Сплавы с эффектом запоминания формы // Когё дзайрё - Eng. Mater. - 1988. - 36, № 2. - С. 34 - 35 (РЖМет, 1989, 12И1213).
- 132.Коваль Ю. Н., Козлов А. П., Монастырский Г. Е. Мартенситное превращение и эффект памяти формы в сплавах Fe-Ni-Nb // Металлофизика. - 1985. - 7 № 4. - С. 53 - 59 (, 1985. 12И182).
- 133.Murakami M., Otsuka H., Suzuki H. G., Matsuda S. Complete shape memory effect in polycrystalline Fe-Mn-Si alloy // Proc. Int. Conf. Martenait. Transform. (ICOMAT-86), Nara, Aug. 26 - 30. 1986. - Sendai, 1987. - P. 985 - 989 (РЖМет, 1988 7И205).
- 134.Wu S. K., Wayman C. M. Transmission electron microscopy studies of the martensitic transformation in a $Ti_{50}Ni_{45}Au_5$ alloy // Mater. Sci. and Eng. - 1987. - 96. - P. 296 - 302 (РЖМет, 1988. 5И247).

135.Лободюк В. А. Взаимосвязь эффекта памяти формы и тонкая структура мартенсита / Препр. // Ин-т металлофизики АН УССР - 1984 - № 5 - 12с. (РЖМет. 1985.,3И18).

136.Ивасишин О. М., Свириденко Н. В., Полушкин Ю. А. Эффект запоминания формы в конструкционных титановых сплавах // Металлофизика. - 1989. - 11, № 1. - С. 30 - 35 (РЖМет, 1989, 5И132).

137.Фаткуллина Л. П., Левченкова Л. А. Использование сплавов на основе никелида титана с эффектом памяти формы в народном хозяйстве // Технол. легких сплавов. - 1990. - № 4. - С. 72 - 84.

138.Материалы с эффектом памяти формы. Матер, семинара. - Новгород, Л., 1989. - 267 с.

139.Daniel Amariei, Ion Vela, Gilbert-Rainer Gillich, Sava Ianici, Eugen Raduca, Ladislau Augustinov, "Mathematical Modelling of Shape Memory Alloy Effect", 5th International Vilnius Conference EURO Mini Conference "Knowledge-Based Technologies and OR Methodologies for Strategic Decisions of Sustainable Development" (KORSD-2009), September 30-October 3, 2009, Vilnius, LITHUANIA, pp. 477-482.

140.Dieter Stöckel, "THE SHAPE MEMORY EFFECT • Phenomenon, Alloys, Applications", NDC, Nitinol Devices & Components, Inc., Fremont, CA, 2000.

141.ALBERTO PAIVA AND MARCELO AMORIM SAVI "AN OVERVIEW OF CONSTITUTIVE MODELS FOR SHAPE MEMORY ALLOYS" 21st Canadian Congress of Applied Mechanics RYERSON UNIVERSITY Department of Mechanical and Industrial Engineering Toronto, Canada June 3-7, 2007.

142.Guhan Kumar, "MODELING AND DESIGN OF ONE DIMENSIONAL SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS", The Ohio State University 2000.

2. ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ В ТЕХНИКЕ

2.1. Анализ специальных свойств сплавов с памятью

Основные свойства материалов с термомеханической памятью (ТМП) связаны с мартенситными превращениями, которые могут порождаться как механическими усилиями, так и изменением температуры.

Мартенситные термопревращения, как правило, возбуждаются и нагревом, и охлаждением. При этом высокотемпературную фазу принято называть аустени- том, а низкотемпературную - мартенситом.

На рис. 2.1 показана зависимость фазового состава от температуры. При охлаждении материала из аустенитного состояния мартенсит начинает образовываться при некоторой температуре M_n . При температуре M_k процесс превращения завершается во всем объеме. Ниже температуры M_k термодинамически устойчивой является только мартенситная фаза.

При нагревании мартенсит остается стабильным до температуры A_n и полностью превращается в аустенит при температуре A_k . Ширина гистерезиса кривых по температурной шкале может быть различной для разных материалов, как это показано на рис. 2.1,а и 2.1,б. Существенным является то, что для материалов с широким и узким гистерезисом может быть различным расположение характеристических температур. К последним, кроме названных, относятся:

- температура термодинамического равновесия - T_0 ;
- температура M_0 , ниже которой мартенсит возникает как под действием температуры, так и механического напряжения;
- температура A_0 , характеризующая возможность возникновения выше которой механического аустенита.

В случае широкого гистерезиса температура M_0 может оказаться левее A_n (рис. 2.1,а), а в случае узкого - правее A_k (рис.2.1,б). Тогда для материала с широким гистерезисом наведенный механомартенсит будет термодинамически устойчив и сохранится при разгрузке. При узком гистерезисе точно такой же процесс приведет к образованию нестабильного мартенсита, который исчезает при разгрузке, что связано с эффектом псевдоупругости (или сверхупругости),

свойственной некоторым материалам с ТМП и заключающемся в способности восстанавливать исходную деформацию при удалении внешней силы в изотермических условиях. Диапазон обратимых деформаций очень широк - от величин близких к упругим деформациям до 30%, как, например, в монокристаллах $CuZnAl$.

Анализ показывает, что в зависимости от температуры сверхупругий возврат может быть очень незначительным или, наоборот, полным. Так, деформирование материала в интервале температур M_n - A_c , особенно вблизи M_n , происходит, как правило, при низком уровне напряжений и приводит к появлению большой остаточной деформации. Если же нагружение производится при температурах вблизи или выше A_c (но ниже M_o), то уровень напряжений значительно повышается, а остаточная деформация сводится к нулю.

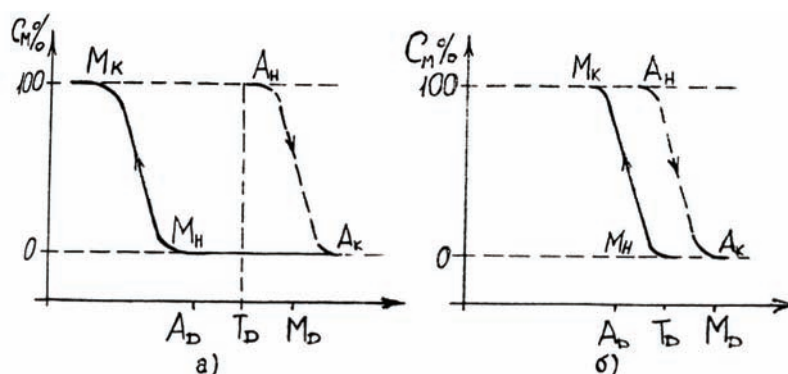


Рис. 2.1. Зависимость от температуры фазового состава сплавов с памятью

Сверхупругий возврат деформации осуществляется сразу после снятия нагрузки. Другой способ реализации возврата связан с изменением температуры путем нагрева через интервал мартенситных превращений, причем температура начала наиболее интенсивного восстановления деформации близка к A_n , а температура окончания - к A_c . Явление восстановления деформации, вызванное изменением температуры, называется эффектом памяти формы (ЭПФ).

Его механизм заключается в следующем. Деталь, выполненную из материала, обладающего ЭП, пластически деформируют при температуре T_n выше температурного диапазона мартенситных превращений M_n (рис. 2.2) с целью прида-

ния ему определенной формы, например, прямого стержня. Затем полученная деталь охлаждается до температуры T_0 ниже температуры конца мартенситного превращения M_k , чтобы обеспечить полное протекание мартенситного превращения.

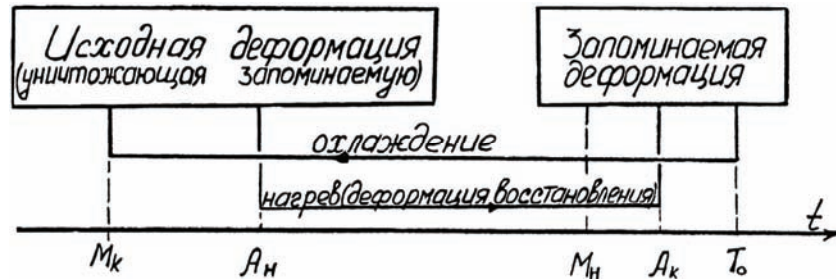


Рис. 2.2. Восстановление деформации, вызванное изменением температуры

Так как в этой температурной области сплавы с памятью обладают высокой пластичностью, то детали при относительно небольших нагрузках можно придать некоторую промежуточную деформацию, например, придать стержню форму кольца. Эта деформация является исходной для последующего восстановления.

Если после этого деталь нагреть до температуры A_n начала обратного фазового превращения, то исходная деформация начинает восстанавливаться таким образом, что деталь начинает возвращаться к форме, приданной ей при температуре T_n . Процесс восстановления, как и фазовые превращения, завершается при температуре A_k . При этом стержень вновь становится прямолинейным.

Если деталь снова охладить и подвергнуть такой же или какой-либо другой деформации, то при повторном нагреве процесс восстановления повторится. Такому циклу деталь можно подвергать многократно.

При необходимости изменить форму, к которой сплав стремится при восстановлении требуется, как и первоначально, нагреть деталь до температуры T_n и придать ей при этой температуре требуемую форму.

В некоторых случаях той же цели можно достигнуть путем деформирования заготовки при низкой температуре с последующим высокотемпературным отжигом в заневоленном состоянии.

Для большинства сплавов восстановление начинается еще в мартенситной фазе. Затем в интервале A_n-A_k осуществляется основной возврат, а выше A_k - и некоторый дополнительный. Соотношение между величинами деформаций на каждой из стадий различно для разных сплавов. Тем не менее возврат при температуре выше A_k , как правило, незначителен, а при температуре ниже A_n может быть сравним с возвратом в интервале A_n-A_k . Эффект памяти реализуется для всех видов деформации: продольной, изгибной, кручения, а также их комбинаций. Это позволяет при необходимости придавать деталям для механического запоминания самые разнообразные формы.

Температуры превращения зависят от состава сплава и условий обработки. У наиболее известного, как сплава с памятью, интерметаллида $TiNi$ при изменении концентрации Ni от 50 до 52 ат.% температуры фазовых переходов снижаются на 300...400°C.

Величина деформации, реализуемая как за счет ЭП, так и за счет псевдоупругости, может быть намного выше, чем упругая деформация в обычных материалах. Так, например, для сплавов никель-титан и медь-цинк-алюминий полностью восстанавливаемая относительная деформация достигает 6...8%. Весьма важно, что в сочетании с большими деформациями в процессе восстановления развиваются и большие усилия, величина которых существенно больше, чем усилия, затраченные на деформирование материала в мартенситной фазе. Это иллюстрируется диаграммой на рис. 2.3. Кривая 0-1-2 характеризует деформирование материала в мартенситной фазе, а кривая 3-4-0 - на этапе восстановления. Количественное соотношение величины напряжения в мартенситной и аустенитной фазе различно для разных сплавов. Так, например, для сплавов $Ni-Ti$ эти напряжения соответственно равны 200-250 МПа и 600-800 МПа.

Большие усилия в сочетании с большими деформациями свидетельствуют о том, что в процессе восстановления совершается механическая работа. Способность материала преобразовывать тепловую энергию в механическую является еще одним важным свойством материалов с памятью. Это свойство в совокупности с ЭПФ называется термомеханической памятью (ТМП).

Связь между развиваемым в процессе восстановления напряжением и деформацией можно описать соотношением:

$$\sigma = E(T) \cdot \varepsilon^m \quad (2.1)$$

где $E(T)$ - напряжение текучести на единицу деформации при температуре T ;

$\varepsilon = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)$ - истинная деформация;

$\Delta l, l$ - удлинение и длина.

Показатель степени $m < 1$ также зависит от температуры. Так, например, на рис. 2.4 приведены графики $\sigma = f(\varepsilon)$ для поликристаллического сплава *Ni-Ti* при разных температурах. В частности при температуре 200...300°C $m = 0,28$.

Полная истинная деформация при максимальной нагрузке определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n + \varepsilon_u + \varepsilon_o \quad (2.2)$$

где (рис. 2.5) ε_y - упругая деформация;

ε_n - неупругая деформация, обуславливающая некоторый возврат формы при снятии нагрузки, наиболее заметная в области низких напряжений;

ε_u - запоминаемая исходная деформация, восстанавливаемая при последующем обратном превращении;

ε_o - остаточная деформация.

По поводу выражения (2.2) необходимо отметить. Во-первых, величина остаточной деформации определяется величиной исходной - ε_u , причем для каждого сплава существует некоторое максимальное значение ε_u^{\max} , при котором происходит полное восстановление, когда остаточная деформация равна нулю. В частности, для сплавов никель-титан эта величина составляет 6... 10 % в зависимости от содержания никеля и легирующих добавок.

Во-вторых, в выражении (2.2) не учтена составляющая, связанная с термическим удлинением. Однако, для таких сплавов, как никелид титана эта величина мала и составляет около 1% от исходной деформации.

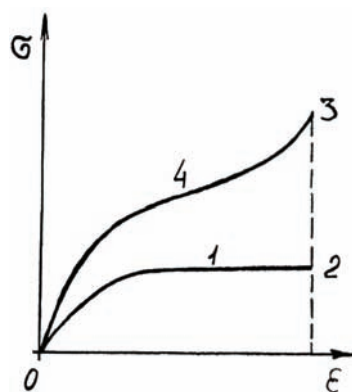


Рис. 2.3. Кривая 0-1-2 - деформирование сплава в мартенситной фазе; кривая 3-4-0 - деформирование на этапе восстановления

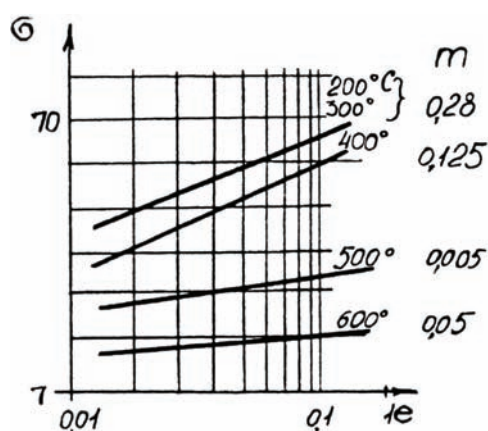


Рис. 2.4. Графики $\sigma = f(\varepsilon)$ для поликристаллического сплава *Ni-Ti* при разных температурах

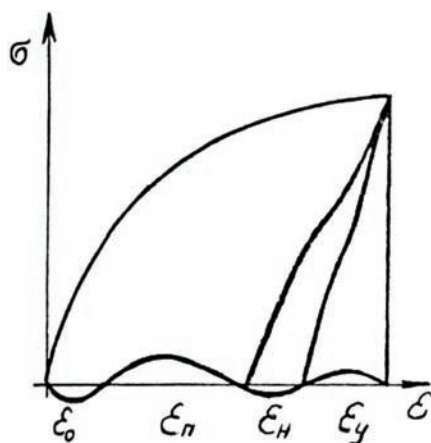


Рис. 2.5. Полная истинная деформация при максимальной нагрузке

Как следует из выражения (2.1) с изменением температуры изменяется механическая характеристика материала, причем с увеличением температуры нагрузочная способность и жесткость материала растут. При этом происходит как бы

непрерывное упрочнение материала в зависимости от температуры. Это свойство, которое можно условно назвать "термическим упрочнением", хорошо иллюстрируется графиками на рис. 2.6. Испытаниям подвергалась пружина из сплава никель-титан. Диаметр проволоки - 1,0 мм, средний диаметр пружины - 9,0 мм, эффективное число витков спирали - 8, температуры превращения: $A_n = 41^\circ\text{C}$, $A_k = 53^\circ\text{C}$.

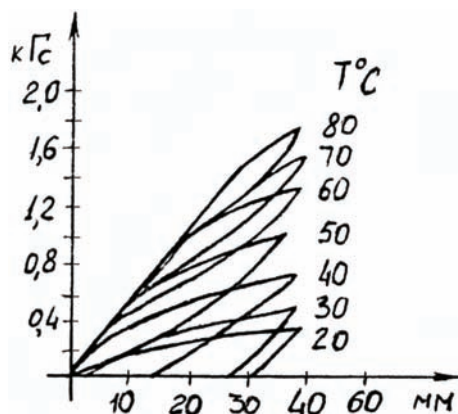


Рис. 2. 6. Зависимость диаграммы деформирования от температуры

Графики зависимости (рис. 2.6) между нагрузкой и деформацией имеют, во-первых, выраженную нелинейную форму, и, во-вторых, в случае одинаковой деформации при более высокой температуре воспринимаемая нагрузка оказывается большей.

Эти графики хорошо иллюстрируют также факт, заключающийся в том, что кривые разгрузки не совпадают с кривыми нагружения, т.е. при снятии нагрузки в изотермических условиях восстановление деформации сопровождается образованием петли гистерезиса, величина которой зависит от температуры. Наличие большой петли гистерезиса определяет еще одно важное свойство материалов с памятью, заключающееся в их высокой демпфирующей способности.

На рис. 2.7 приведены сравнительные экспериментальные данные по затуханию колебаний при вибрации пружины из сверхупругого материала и пружины из фортепианной струны, из которых следует, что первая имеет коэффициент затухания примерно на порядок больше.

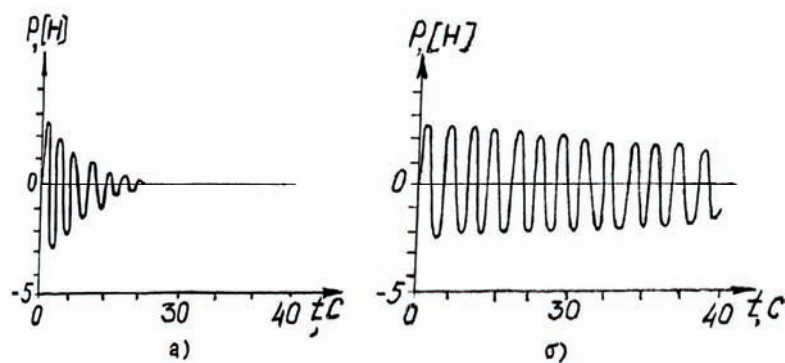


Рис. 2.7. Затухание колебаний при вибрации пружины из сверхупругого материала (а) и пружины из фортепианной струны (б)

Все сплавы с мартенситными переходами по характеру влияния температуры на уровень демпфирования делятся на две группы. К первой относятся материалы, у которых внутреннее трение в низкотемпературном состоянии намного выше, чем в высокотемпературном. К ним, в частности, относятся *TiNi*. Вторую группу составляют композиции с приблизительно равными демпфирующими свойствами мартенсита и аустенита.

Во всех случаях вблизи температур мартенситного превращения происходит резкое увеличение внутреннего трения, и логарифмический декремент колебаний δ здесь может достигать 20% и более, в то время как в аустенитном состоянии он обычно не превышает 1...2%. Наличие такого пика иллюстрируется кривыми на рис. 2.8, полученными при колебаниях на частоте 10 (кривая 1), 12 (кривая 2) и 15 МГц (кривая 3).

Изменяя соотношение компонент в сплавах, влияют не только на температуры мартенситных переходов, но и на физико-механические свойства, в том числе и на характер демпфирования. Значительное влияние на диссипативные свойства оказывает термомеханическая обработка. Например, пластическая деформация и интенсивная механическая обработка приводят к резкому уменьшению логарифмического декремента колебаний, а отжигом можно добиться заметного повышения диссипативных свойств.

Таким образом, варьируя режимы термомеханической обработки можно изменять уровень внутреннего трения, а также смещать в заданном направлении по температурной шкале область высокого демпфирования.

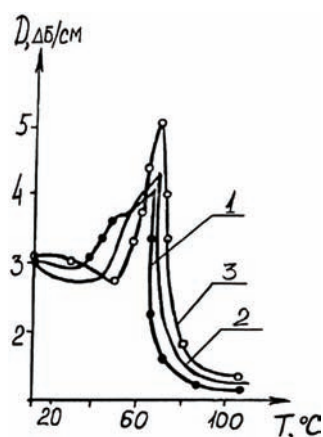


Рис. 2.8. Затухание колебаний при вибрации на частоте 10 (кривая 1), 12 (кривая 2) и 15 МГц (кривая 3)

Рассмотренные свойства сплавов с памятью представлены на рис. 2.9. Количественная оценка этих свойств, требуемая при практическом применении сплавов, производится по параметрам, показанным на этой же схеме. Так, например, возможность придания сплаву восстанавливаемой формы (ЭПФ) ограничивается величиной максимальной деформации, при которой происходит полное восстановление.

В случае применения сплава в качестве преобразователя энергии (ТМП), требуется знать усилие развиваемое сплавом в процессе восстановления и усилие для деформирования в мартенситной фазе. Эти характеристики определяются соответствующими диаграммами "напряжение-деформация".

Таким образом, зависимость "напряжение-деформация-температура" является общей для рассматриваемого типа сплавов, характеризующей его свойства.



Рис. 2.9. Основные свойства сплавов с памятью и параметры их количественной оценки

У традиционных материалов зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ и $\varepsilon = f(T)$ линейны и не связаны между собой в области эксплуатационных температур. Поэтому для их описания достаточно указать несколько параметров, определяемых экспериментально: модуль упругости - E , предел текучести $-\sigma_T$, предел прочности $-\sigma_{np}$ и коэффициент линейного расширения $-\alpha_T$.

Зависимости для материалов с памятью носят более сложный характер. Поэтому для описания свойств материалов с памятью требуется значительно больше информации, чем в случае традиционных материалов.

Проведенные исследования показывают, что материалы с памятью могут характеризоваться совокупностью функций $f_i(\sigma, \varepsilon, T) = 0$, каждая из которых соответствует своей величине исходной деформации - ε_u . Одна из таких поверхностей представлена на рис. 2.10.

Можно показать, что на полученной диаграмме отражены как качественно, так и количественно, основные свойства сплава. Рассмотрим, например, задание исходной и восстановление запоминаемой деформации.

При температуре T_0 ниже температуры M_k пассивным деформированием задается начальная деформация ε_u . Этот процесс описывается кривой 1-2-3, получаемой сечением поверхности $f(\sigma, \varepsilon, T) = 0$ плоскостью $T = T_0$, параллельной плоскости $\sigma - \varepsilon$. При этом в процессе нагружения стержня на участке 1-2 возникает упругая деформация. При последующем увеличении нагрузки зависимость между напряжением и деформацией принимает нелинейную форму за счет формирования кажущегося пластического течения. При снятии нагрузки (участок 3-4) деформация частично восстанавливается за счет упругой составляющей. Остаточная деформация (отрезок 1-4) является исходной для последующего восстановления.

Если образец в свободном состоянии подвергнуть нагреву (участок 4-5-7), то в интервале температур $A_n - A_k$ (участок 5-7), он восстановится до начального размера. Этот процесс характеризует "эффект памяти формы".

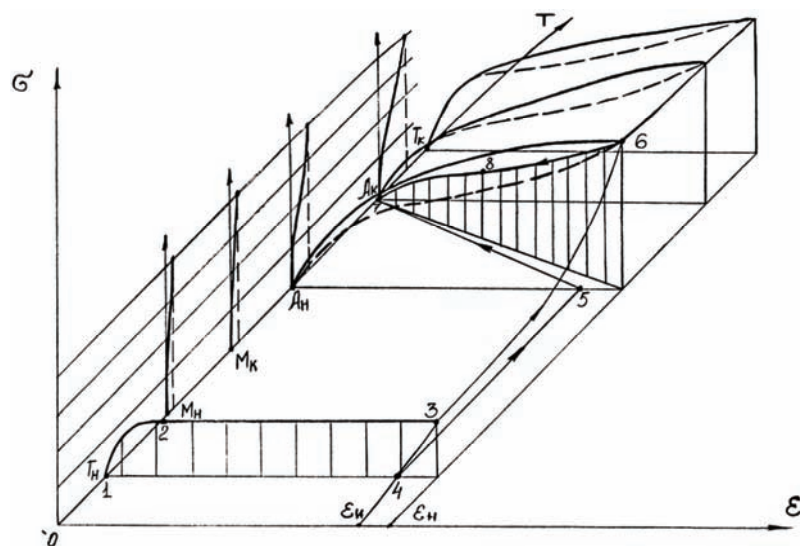


Рис.2.10. Геометрическая интерпретация свойств и характеристик сплавов с памятью

Восстановление деформации для сплава может быть как полным, так и не полным в зависимости от величины исходной деформации и определяется коэффициентом термического восстановления.

Таким образом, "эффект памяти" характеризуется следующими экспериментальными параметрами: диапазонами температур превращений - M_n , M_k , A_n и A_k и коэффициентом восстановления $K_u^{TM} = f(\epsilon_u)$. При нагреве образца под нагрузкой (точка 3 диаграммы) первоначально наблюдается некоторое увеличение жесткости материала. Если при этом нагрузку изменять таким образом, чтобы препятствовать упругим деформациям, то нагрев до температуры A_n опишется кривой, лежащей в плоскости $\epsilon = \epsilon_n$, параллельной плоскости $\sigma - T$ (участок 3-6).

Процесс восстановления деформации в диапазоне температур $A_n \leq T \leq A_k$ (кривая 6-7) сопровождается снижением нагрузочной способности так, что полное восстановление происходит только при внешней нагрузке равной 0. Если же внешняя нагрузка не равна нулю, то процесс восстановления прекращается при величине деформации, соответствующей значению напряжения от внешней нагрузки (точка 8).

Восстановление деформации сопровождается совершением механической работы (ТМП), причем эта работа, определяемая площадью под кривой 6-7,

спроектированной на плоскость перпендикулярную оси T , больше работы, затрачиваемой на деформирование при начальной температуре, равной площади под кривой 1-3.

Для практического использования ТМП требуются следующие экспериментальные данные, характеризующие свойства сплавов: диапазоны температур превращений, коэффициент термического восстановления, механическая характеристика при температуре T_n и в диапазоне температур A_n - A_k .

Рассмотрим характер деформирования сплава в области температур выше A_k (область псевдоупругости). Рассечем поверхность $f(\sigma, \varepsilon, T) = 0$ плоскостью $T = T_k$, где $T_k > A_k$. При этом получим кривую $\sigma = f(\varepsilon)$, характеризующую псевдоупругие свойства сплава при данной температуре. Так как кривая разгрузки не совпадает с кривой нагружения, этот график характеризует и диссипативные свойства.

Следовательно, поверхности типа $f(\sigma, \varepsilon, T) = 0$ отражают основные свойства сплавов и могут быть использованы для расчета деталей различного назначения и в разных режимах эксплуатации.

Предлагаемая совокупность поверхностей, определяющая механические свойства сплавов с памятью, может быть получена экспериментально как совокупность поверхностей отклика различными способами.

Так как характеристические температуры зависят от напряжения сопротивления σ_c , должны быть также экспериментально определены соответствующие зависимости $M_n = f(\sigma_c)$; $M_k = f(\sigma_c)$; $A_n = f(\sigma_c)$; $A_k = f(\sigma_c)$. Эти графики включаются в деформационно-силовую структуру, как это показано на рис. 2.18, завершая ее формирование.

Полученные таким образом характеристики сплавов с памятью представляют собой банк данных, служащий основой для расчета деталей из материалов с памятью, и может быть представлен в форме удобной для использования ЭВМ.

Эти данные не исчерпывают всех свойств сплавов, информация о которых требуется при практическом их использовании. Так, во многих случаях допол-

нительно определяется теплоемкость, теплопроводность, коэффициенты отражения, электрическое сопротивление и т.д. В то же время рассмотренные деформационно-силовые характеристики являются необходимыми во всех случаях применения сплавов.

Для разработки и конструирования механизмов и конструкций с элементом однократного действия из сплава с памятью в работе достаточно иметь следующие температурные и деформационно-силовые (механические) характеристики:

- M_n^0, M_k^0 - температуры начала и конца прямого мартенситного превращения, определенные на образцах в ненагруженном состоянии;
- $M_n^{0,7}, M_k^{0,7}$ - те же температуры, но определенные на образцах под нагрузкой при напряжении деформирования $\sigma_o = 0,7 \cdot \sigma_c$, т.е. 0,7 от минимального напряжения сопротивления восстановлению деформации, полностью подавляющего проявление ЭП;
- A_n^0, A_k^0 - температуры начала и конца обратного мартенситного превращения, определенные на образцах в ненагруженном состоянии;
- $A_n^{0,7}, A_k^{0,7}$ - те же температуры, определенные на образцах при напряжении сопротивления восстановлению формы $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;
- $\Delta_M = M_k - M_n; \Delta_A = A_k - A_n$ - интервалы температур превращений
- $\Delta_\Sigma = A_k - M_k$ - полный интервал превращений
- $\Gamma_n = 0,5 ((A_n + A_k) - (M_k + M_n))$ - гистерезис превращений
- $T_p^{0,7}$ - температура начала релаксации, определенная на образцах при напряжении сопротивления восстановлению формы $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;
- ε_p^0 - деформация памяти (деформация восстановления), определенная при отсутствии сопротивления восстановлению;
- $\varepsilon_p^{0,7}$ - деформация восстановления, определенная на образцах при напряжении сопротивления $\sigma_c = 0,7 \cdot \sigma_c^0$;
- $K_B = \varepsilon_o^0 / \varepsilon_u^M$ - степень восстановления деформации;

– $\sigma_{-I}^{m\sigma}$ - Предел выносливости при термоциклировании под рабочей нагрузкой;

T_{np} - Предельная рабочая температура (без потери термомеханических свойств);

– σ_c^0 - минимальное напряжение сопротивления восстановлению, полностью подавляющее проявление ЭП;

– σ_p^0 - максимальное реактивное напряжение, генерируемое в образце при полном запрещении деформации восстановления формы;

– $\sigma_p^{0,7}$ - реактивное напряжение, генерируемое в образце при разрешенной деформации восстановления $\varepsilon_p = 0,7 \cdot \varepsilon_p^0$;

– σ_{TA} - предел текучести материала в аустенитном состоянии;

– $\sigma_{\partial kp}$ - максимальное напряжение деформирования, при котором имеет место полное восстановление формы, если $\sigma_c = 0$;

– $\sigma_{с kp}$ - максимальное напряжение сопротивления восстановлению, при котором в процессе силового термоциклирования в режиме $\sigma_{\partial} < \sigma_{\partial kp}$ имеет место полное восстановление формы.

Все указанные характеристики должны определяться на образцах, подготовленных к эксплуатации, т.е. со структурой текстурированного наведенного мартенсита, что достигается, например, термомеханической тренировкой (циклированием).

Кроме этих данных для расчёта конструкций необходимо представлять деформационно-силовые диаграммы в зависимости от величины исходной деформации или деформирующего напряжения и диаграммы зависимости температур превращений от напряжений деформирования и сопротивления.

2.2. Классификация изделий на основе

функциональных материалов из сплавов с памятью

Для сплавов с ТМП предложено множество разнообразных областей применения и использования их в устройствах различного функционального назначения [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]. ТМП используется при конст-

руировании силовых и управляющих устройств для создания механизмов и отдельных узлов, в которых отсутствует трение и износ, достигается значительное упрощение конструкции и экономия габаритов и массы, имеется возможность дистанционного управления и другие преимущества. В работе [11] говорится о том, что применение материалов с ТМП еще недостаточно глубоко изучено. В настоящее время наблюдается расширение сферы их применения в различных подотраслях машиностроения, робототехнике, автоматике и в других отраслях знания, например, в биологии.

Первое промышленное применение сплав Ni-Ni (нитинол) нашел в области соединительных устройств в качестве соединительной муфты трубопроводов гидравлической системы. Это соединительное устройство прошло успешные испытания и было рекомендовано для использования в самолетах F-14 [1].

С 1972 по 1982 годы фирма Райхем" (США) поставила для авиации более 300 тысяч штук термомеханических муфт. На истребителе F -14А устанавливалось по 800 соединений. Кроме того, эти муфты использовались на надводных и подводных кораблях, в космонавтике. При этом не наблюдалось ни одного отказа или ослабления герметичности.

На атомных подводных лодках и кораблях ВМС устанавливает муфты из сплава нитинол, устойчивого морской воде, фирма "Делта Милори Металл" (Англия).

Пример трубной муфты из сплава с памятью приведен в работе [12].

В обзоре [13] сообщается, что материалы с ЭП (или ТМП) с 1970 года находят промышленное применение в США, Бельгии, Великобритании, Франции и Японии. Кроме соединительных муфт, известны различные предохранительные и защитные устройства для отключения систем в аварийной ситуации. Прогнозируется развитие на основе ТМП микромеханизмов без двигателей для рекуперации тепла в системах с низким уровнем температур.

Широко используются сплавы с памятью в различных видах механических соединений. Различные заклепки, штифты и другие крепежные элементы описаны в работе [14] Они позволяют осуществлять сборку деталей без приложе-

ния усилий. В [15] описывается простая конструкция зажима с прямоугольной шайбой из материала с памятью, а в [16] - заклепка с конусной головкой и втулкой с конусным отверстием. Обе детали выполнены из сплава с памятью, но с разными температурами фазового превращения.

Для соединения концов труб используются две жестко связанные кольцевые пластины, помещаемые между торцами труб [17]. При нагреве пластины из сплава с памятью загибаются и плотно обнимают трубы.

Как указывается в работе [18], соединительные детали из материала с ТМП имеют значительно более простую форму, более надежны, чем сварка и пайка, облегчают сборку и разборку соединений, уменьшают их массу, габариты и стоимость.

В области изготовления термочувствительных элементов, используемых в измерительной, регулирующей, компенсационной и защитной аппаратуре для машиностроительной, электротехнической, автомобильной, электронной, приборостроительной и других отраслей народного хозяйства материалы с памятью успешно конкурируют и вытесняют термобиметаллы, по сравнению с которыми они обладают рядом преимуществ.

Эти преимущества следующие [1].

1. Усилия, развиваемые сплавами на основе никеля и титана, гораздо выше, чем развиваемые термобиметаллами.

2. Чтобы с помощью биметаллического элемента получить такое же перемещение, как и с помощью нитинола, эти элементы необходимо нагреть до значительно более высокого температурного интервала. Кроме того, с помощью нитинола можно получить более разнообразное изменение формы.

3. Усилия и изменение формы нитинола происходят в определенном и сравнительно узком температурном интервале, в то время как у биметаллов усилие и деформация развиваются во всем рабочем интервале температур.

Примеры использования сплавов с памятью для изготовления термо-выключателей в электротехнике, термовентилей для систем отопления, механизмов для управления работой клапана гидро- и пневмосистем, противопо-

жарных механизмов, дроссельных устройств, 'штекеров с термозащитой для интегральных модулей и др. приведены в работе [19].

Кроме этого, можно отметить автоматическое устройство на основе ЭП, предохраняющее от перегрузки [20], диск для фрикционной муфты с дистанционным управлением [21], автоматическую фрикционную муфту [22]. В последней управление осуществляется путем нагрева фрикционного диска и пружины из сплава с ЭП при повышении нагрузки. Во всех этих устройствах используется или ЭПФ, или ТМП.

Другим направлением использования ЭПФ являются самомонтируемые или самотрансформируемые конструкции, применяемые, например, в космической технике. При этом из материала с памятью может быть изготовлена вся конструкция целиком или отдельные ее элементы. В исходном состоянии конструкции складываются в компактную форму за счет деформации рабочих элементов. Восстановление формы может осуществляться за счет тепла окружающей среды, нагрева солнечным излучением или искусственным путем.

Примером такого использования может служить антенна в космических спутниках [23]. Такая антенна была предложена фирмой "Гуднер Аэроспейс корпорейшн", Акрон, штат Огайо, США. Антенна собирается в небольшом объеме и размещается в спутнике. При нагревании под действием солнечного излучения антенна раскрывается и самоустанавливается.

Другая подобная антенна сферической формы для спутниковой связи описана в [24]. Меридионально расположенные ребра выполнены из нитинола. С помощью специальных хомутов к ребрам прикрепляется металлическая оболочка, служащая собственно отражающей поверхностью. Высокая компактность в укладке достигается тем, что нитиноловым ребрам придается форма спиралей. Приведение из транспортного положения в рабочее осуществляется путем нагрева с помощью электрического тока от специального источника питания или солнечной радиацией.

Особый интерес представляет использование термомеханической памяти для создания устройств, преобразующих тепловую энергию в механическую рабо-

ту. Такие тепловые или термомеханические двигатели (ТМД) могут получить широкое распространение в различных исполнительных механизмах и устройствах благодаря простоте конструкции и управления, малой массе и габаритам, возможности дистанционного управления, плавности, отсутствию шума и вибрации.

Одно из таких устройств описано в [25]. Для преобразования тепловой энергии в механическую используется полый цилиндр из материала с ТМП, закручивающийся при нагреве и раскручивающийся с помощью торсиона или груза при охлаждении. Для нагревания используется вода с температурой до 100°C, периодически сменяемая водой комнатной температуры.

Преобразователь электромагнитной энергии в механическую на основе передачи с гибкой связью предложен в [26]. Гибкая связь между двумя шкивами выполнена из проволоки из сплава с ТМП, навитой в пружину и покрытой железным порошком. Участок пружины нагревается от источника электромагнитного излучения, а противоположный участок охлаждается водой. При этом шкивы поворачиваются, приводя в движение установленную на одних с ними осях ременную передачу.

Рассмотренные типы преобразователей относятся к ТМД непрерывного действия. Большие перспективы представляет использование ТМД циклического действия, когда требуется получить малые перемещения исполнительного органа при больших развиваемых усилиях или малые скорости при ограниченных массово-габаритных характеристиках.

Так, в работе [8] описывается пресс для штамповки, в направляющих корпуса которого установлен попеременно нагреваемый и охлаждаемый элемент, выполненный в виде стержня из материала с ТМП и осуществляющий рабочий ход. Возврат стержня в исходное положение и придание ему исходной деформации производится с помощью силового элемента в виде втулки из упругого материала.

В работе [27] описан ряд механизмов на основе сплавов с ТМП. К ним относятся: пружина, заменяющая силовой цилиндр с поршнем; шариковые механизмы, рычажно-шарнирные механизмы и т.д.

Вызывает интерес использование материалов с памятью в приводах роботов и манипуляторов. Благодаря большой величине восстанавливающей силы при малой массе ТМД достигается высокая компактность привода, причем малые скорости перемещения достигаются путем изменения интенсивности нагрева, что позволяет обходиться без редуктора [27].

Возможность реализации всех видов деформации позволяет варьировать развиваемое усилие и величину рабочего хода, а также облегчает компоновку привода в зависимости от конструктивных особенностей исполнительного органа. Такие механизмы очень просты и надежны при эксплуатации и могут быть особенно полезны при работе в экстремальных условиях эксплуатации, когда использование электромеханических и гидравлических приводов проблематично. К таким условиям прежде всего относятся пониженные температуры (-30°C и ниже) и вакуум. В этих случаях отсутствие трущихся частей и смазки обеспечивает нормальное функционирование ТМД.

В работе [7] приводятся данные об эффективности использования материалов с ТМП при создании роботов и манипуляторов. Как основное достоинство отмечается их высокая компактность. Возможны два варианта исполнения привода циклического типа.. В первом варианте привод может быть выполнен в вид двух проволок из материала с памятью таким образом, что поворот звена влево или вправо осуществляется поочередным нагревом левой и охлаждением правой или нагревом правой и охлаждением левой проволоки, Во втором варианте вместо одного из проволочных элементов может быть применена обычная пружина растяжения.

Привод с пружиной по сравнению с первым имеет следующие существенные недостатки:

- отсутствует контроль перемещения рабочего звена, так как для такого перемещения требуется естественное охлаждение проволоки из сплава с памятью;
- усилие, развиваемое пружиной постоянно воздействует на проволочный элемент.

Поэтому для привода манипулятора рекомендуется первый вариант. Нагрев

осуществляется путем пропускания через проволоку из материала с ТМП электрического тока.

Ведутся исследования по применению сплавов с памятью в виде волокон или нитей в качестве компонентов композиционных материалов

Использование свойства сверхупругости позволяет проектировать из материала с памятью упругие элементы различной конфигурации и назначения. Такие элементы могут иметь форму оболочки (например, сильфон), пластины, балки, а также спиральных или цилиндрических витых пружин.

Использованию пружин из сплавов с памятью для управления собственной частотой изгибных форм колебаний валов посвящен ряд работ. Управление может осуществляться изменением жесткости опор, выполненных в виде пружин из сплава с памятью путем их нагрева. Здесь используются также диссипативные свойства материала.

Исследуются также возможности использования сплавов с памятью в антенной технике. Большинство из известных технических решений, рассмотренных выше, могут быть использованы при проектировании антенных устройств различного назначения с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Кроме того, в ряде случаев использование материалов с памятью позволяет получить технические решения, которые не могут быть получены другими способами. Привода, пружинные детали НЧ- и ВЧ-разъемов, виброзащитные устройства и другие поглотители энергии, устройства терморегулирования и термокомпенсации, обеспечивающие требуемую стабилизацию эксплуатационных параметров (например, геометрических параметров антенн) в заданном диапазоне температур - все это является областью возможного применения материалов с памятью в технике антенн и СВЧ-устройств.

Вопросы использования материалов с памятью в медицине и в медицинской технике освещены в работах [9], [28], [29].

При большом многообразии областей применения, сплавы с памятью внедряются однако еще недостаточно широко. Одним из основных препятствий для их внедрения, как указывается в работе [9], является высокая стоимость.

Причина заключается, с одной стороны, в большой трудоемкости получения этих сплавов, а с другой - в незначительном пока спросе на них.

Большая трудоемкость связана со сложностью достижения высокого качества сплава и заданной конфигурации детали. В частности, трудно достичь высокой однородности сплава по объему, получить с высокой точностью диапазоны температур фазового превращения.

Эти и другие технологические проблемы решаются в настоящее время достаточно активно. Поэтому можно предполагать, что в ближайшее время они найдут свое решение. Этому также должны способствовать работы над стандартизацией типов материалов, их основных показателей и методов испытаний.

Для повышения эффективности и расширения использования сплавов с памятью необходима разработка практических рекомендаций по конструированию и расчету устройств из этих материалов. Решению этой задачи может способствовать систематизация, увязывающая свойства сплавов и возможные способы их применения в технике.

В работе [9] предлагается провести систематизацию, во-первых, по основным свойствам материалов и, во-вторых, по отраслям техники. К основным свойствам автор относит псевдоупругость, эффект памяти высокотемпературный (одинарный) и эффект памяти обратимый (двойной эффект).

Предлагаемая систематизация приведена в табл. 2.1

Представляется вполне правомерным, то, что в качестве одного из признаков, положенных автором в основу сведенной в таблицу классификации, приняты свойства материалов с памятью, так как именно на базе этих свойств могут быть разработаны научные методы проектирования и расчета изделий, выполненных из таких материалов.

Вместе с тем, как показывает анализ, предложенная классификация имеет целый ряд следующих существенных недостатков.

1. В таблице не нашло отражения различие между ЭПФ и ТМП. Как было показано в разделе 2.1, при реализации ТМП совершается механическая работа, для расчета которой требуется деформационно-силовая характеристика сплава,

а при реализации ЭПФ осуществляется только восстановление геометрии, формы. Поэтому каждое из этих свойств может иметь свои области применения.

2. Не включены в основные свойства "термическое упрочнение" и повышенные диссипативные свойства, которые имеют самостоятельные области применения и для оценки которых требуется специальный методологический подход.

3. При проектировании устройств типа "соединение" используется не только ЭПФ (на стадии изготовления), но и псевдоупругость (при эксплуатации). Не учитывать этого при расчете и проектировании недопустимо.

4. Целый ряд устройств (двигатели, регуляторы, органы роботов и манипуляторов и т.д.) реализуются не только на базе двойного эффекта, но и, причем главным образом, одинарного (ТМП).

5. Представляется не перспективной классификация устройств по отраслям техники, так как область техники не отражает функциональных особенностей устройства, а, с другой стороны, устройства определенного функционального назначения (пружины, двигатели, виброзащитные устройства) находят применение в различных отраслях техники.

6. Совершенно не учитываются условия эксплуатации, играющие определяющую роль при выборе материалов, конструктивных решений и способов управления.

На рис. 2.11. показаны возможности применения сплавов с памятью в авиакосмической технике. На блок-схеме не отражены такие области, как термомеханические соединения различного назначения, которые наиболее широко известны и на сегодня применяются в авиационной технике (соединения трубопроводов гидро-, пневмо- и топливных систем; известны применения соединений в нефтяной и газовой промышленности, СВЧ-технике, электротехнике и т. д.), а так же медицина, где использование сплавов с памятью представляется весьма эффективным.

На сегодня существует довольно большое количество технических решений по конструкциям устройств на основе сплавов с памятью различного назначения, реализованных на уровне лабораторных, опытных образцов и реализован-

ных на практике, как, например, проект "Софора", а так же запатентованных в разных странах мира.

Таблица 2.1.

Эффект памяти Отрасли техники	Одинарный	Двойной	Сверхупругость
Соединения	Соединения трубопроводов, заклепочные соединения		Уплотнения, крышки сальников
Регулирование		Управление клапанами, предохранение от перегрева и переохлаждения, регулирование потоков, температуры в теплицах	
Автомобилестроение		Створки фар автомобилей	Высокодемпфирующие сплавы
Обработка данных	Штекерные соединения для коммуникаций	Система "диск головки", накопление данных на магнитных носителях, изменение цвета для оптических систем накопления данных	

Эффект памяти Отрасли техники	Одинарный	Двойной	Сверхупругость
Энергетика		Тепловые двигатели, управление ячейками солнечных батарей, включение системы охлаждения	
Автоматизация		Органы роботов, манипуляторов	
Медицина	Имплантаты (остеосинтез)	Управление эндоскопами	Стоматологические хомуты
Лёгкая промышленность	Обеспечение жесткости тканей		Заменители резины

Получило широкое распространение использование сплавов с памятью для создания различного рода терморегуляторов. Никель-титановые сплавы с эффектом памяти с их особыми металлургическими характеристиками являются далеко не простыми. Однако они могут использоваться в ряде простых механизмов, в которых термические пускатели из сплавов с памятью могут экономичным образом заменить соленоиды, пневмо-гидравлические цилиндры, механизмы с линейным движением, устройства с коротким ходом в редукторах и электродвигателях и использоваться во многих современных электронных устройствах. Известно большое количество таких технических устройств в противопожарных средствах, бытовой технике, медицине и т.д.

Весьма большой интерес представляют возможности применения сплавов с памятью в качестве преобразователей тепловой энергии в механическую – тепловых (термомеханических) двигателей, особенно когда предъявляются жёст-

кие требования по массе и габаритам. Это в первую очередь относится к авиакосмической технике. Возможность обеспечения требуемой траектории движения рабочего органа путём подбора соответствующей конфигурации активного элемента, а требуемой скорости движения путём варьирования интенсивности нагрева, позволяет практически создавать безредукторный привод, что существенно снижает его массу и габариты.

При этом уменьшение трущихся пар является важным фактором повышения надёжности механизма особенно в условиях космического пространства, т.е. в вакуумной среде.

Управление термомеханическим двигателем (ТМД) обеспечивается любыми способами нагрева, реализация которых зависит от вида, геометрических параметров механизма и вида окружающей среды. Таким образом, простота, доступность и надёжность способов нагрева обеспечивают широкие возможности для проектирования и создания ТМД.

В последнее время уделяется большое внимание к проблеме создания нового поколения адаптивных систем. В частности, исследуются возможности создания на базе материалов с памятью интеллектуальной конструкции (ИК), адекватно реагирующей на внешние силовые и тепловые воздействия, вызывающие нежелательные деформации конструкции. Принцип адекватного реагирования ИК на внешние факторы заключается в следующей цепочке информационно-силового воздействия на конструкцию.

Внешнее воздействие вызывает деформацию или колебания конструкции, регистрируемые чувствительными датчиками, сигнал с которых поступает в блок управления. В блоке управления текущая деформационная картина конструкции сравнивается с заданной и формируется силовой сигнал управления, который отрабатывается исполнительными элементами, выполненными из сплава с памятью и распределёнными по всей конструкции, восстанавливая тем самым заданное состояние конструкции.

Из сказанного следует, что области применения сплавов с памятью достаточно широки и разнообразны.

Вместе с тем, практически отсутствуют методы расчета и проектирования элементов и конструкций на основе сплавов с памятью, что, безусловно, является серьезным тормозом в использовании сплавов с памятью в современной технике. Это, в свою очередь, объясняется многофакторностью проблемы как на уровне металлофизики, что связано с задачей получения сплавов с заданными свойствами, так и на уровне физики твердого тела, объясняющей поведение конструкций из сплавов с памятью, что обусловлено необходимостью решения связанной задачи с нелинейными соотношениями термодинамики и теории упругости как физическими, так и геометрическими с учетом изменения параметров, определяемых свойствами сплавов.

Таким образом, рассмотренная в таблице 2.1 классификация фактически не раскрывает взаимосвязи между свойствами материалов и функционированием изделий из них при заданных условиях эксплуатации и, следовательно, не является в достаточной степени информативной для разработчиков этих устройств и поэтому не может быть признана удовлетворительной.

Наиболее полно, на наш взгляд, этим требованиям отвечает классификация устройств по их функциональному назначению с учетом используемых свойств материала и условий эксплуатации (рис. 2.12). При разработке общей классификации устройств из материалов с памятью, предложенной авторами настоящей работы и опубликованной в [23], ставилась задача сформулировать основу, обеспечивающую рациональный синтез этих устройств на базе эффективного использования свойств материалов, а также способствовать научно обоснованному расширению областей применения материалов с памятью.

По функциональному назначению наиболее характерные виды изделий можно сгруппировать в основные девять видов: термомеханические двигатели, термомеханические энергетические установки, соединения, упругие элементы, приборные и технические системы, гасители колебаний, трансформируемые системы, адаптивные системы и программируемые конструкции, каждый из которых осуществляет выполнение законченной однородной функции. В тоже



Рис. 2.11. Применение функциональных материалов из сплавов с памятью в авиакосмической технике

время, каждый функционально однородный вид может быть также разбит на подвиды, которые также осуществляют выполнение части общей функции, т.е. являются подмножеством однородной функции. Например, приборные и технические системы, могут выполнять подфункции реле, переключателей, актуаторов и другие, что в целом обуславливает выполнение функции управления без значительных силовых воздействий. Более подробно классификация каждого функционального вида изделия приводится ниже при рассмотрении областей применения соответствующих устройств, механизмов и деталей функциональных изделий.

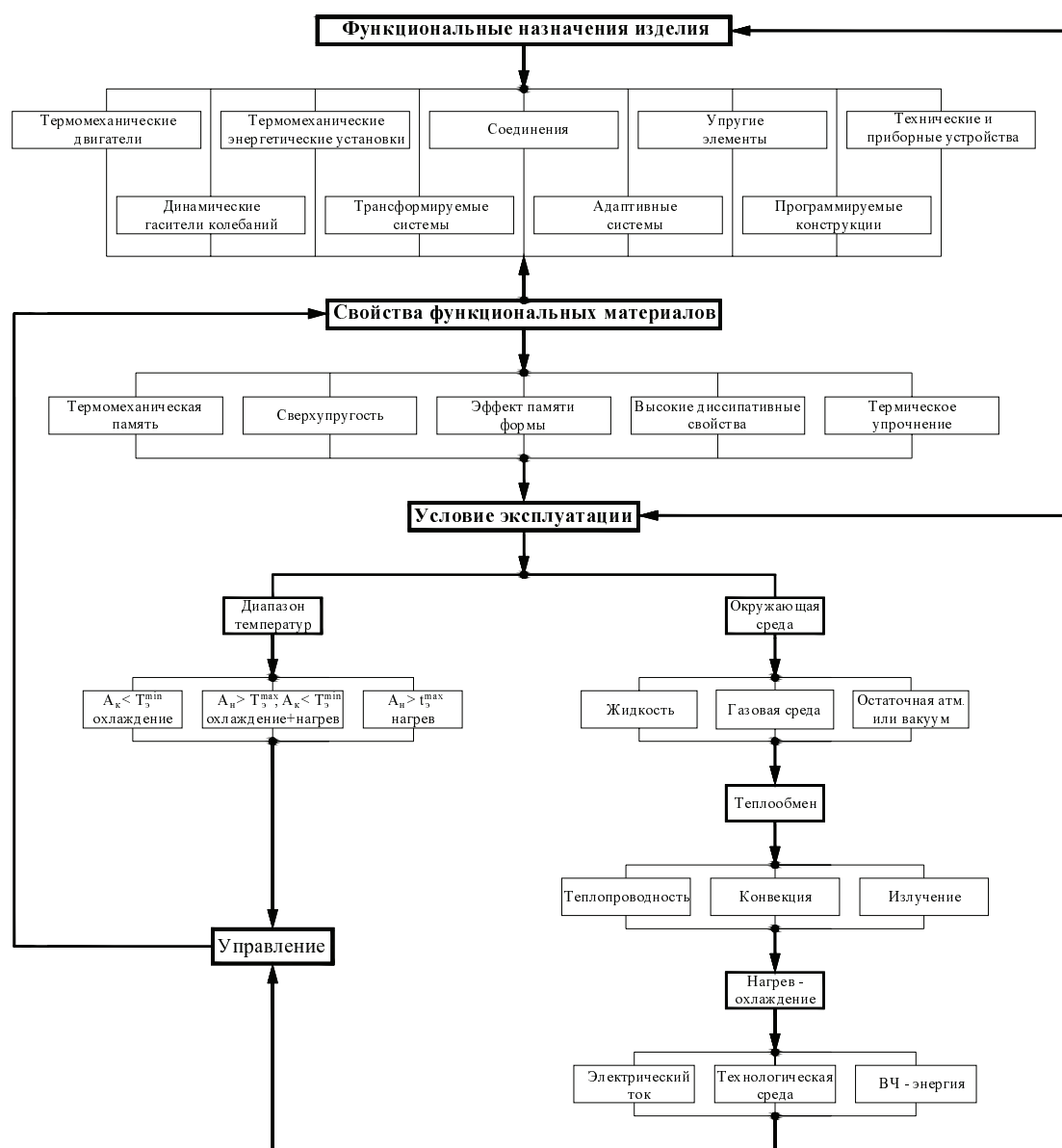


Рис. 2.12. Классификация изделий (устройств) на основе функциональных материалов из сплавов с памятью

Основные свойства материалов были рассмотрены в разделе 2.1. К ним относятся: термомеханическая память, эффект памяти формы, высокие диссипативные свойства, сверхупругость и термическое упрочнение. Наиболее важным из них является собственно термомеханическая память. Это свойство используется для создания термомеханических двигателей (ТМД) и термомеханических энергетических установок (ТМЭУ) электрической или механической энергии.

Принципиально то, что в любом случае каждый вид однородной функции, осуществляемой деталями, механизмами и устройствами функциональных изделий, может быть основан на применении и реализации одного или нескольких видов из перечисленных свойств материалов, что обуславливается и определяется технологической, конструкционной и эксплуатационной целесообразностью и эффективностью в соответствии с заданными техническими условиями и ограничениями. Например, при создании соединительных изделий используются такие свойства материала как, эффект памяти формы и сверхупругость, в то время как функцию амортизаторов целесообразно реализовывать на основе высоких диссипативных свойств и сверхупругости и т.д.

Перспективной представляется и такая специфическая область, как механизмы, управляемые путём изменения геометрии их звеньев, и трансформируемые конструкции. К последним, в частности, относится крыло с изменяемой геометрией. Система привода крыла (СПК) включает гидропривод, редуктор привода крыла, карданные шарниры и два винтовых преобразователя. Максимальное усилие на штоке преобразователя 230000 Н, рабочий ход - 450 мм, время рабочего хода - 23 с. Масса СПК –200 кг. Оценочный расчет показывает, что ТМД, выполненный в форме сильфона при указанных характеристиках, позволит снизить вес СПК примерно на 30%.

При проектировании деталей механических соединений используют материалы с температурами фазовых превращений ниже температур эксплуатации: ($A_k < T^{min}$). Для придания деталям исходной деформации, обеспечивающей сборку соединений, их необходимо охлаждать до температуры M_k . В собранном виде детали, нагреваясь, восстанавливают запоминаемую форму, форми-

руя соединение. Таким образом, на стадии изготовления используется основное свойство - ЭПФ. Механическая прочность и жесткость соединения при эксплуатации в заданном диапазоне температур обеспечивается благодаря другому свойству - псевдоупругости.

Группа "механические соединения и их элементы" включает в себя большое количество разнообразных деталей и узлов, используемых в различных отраслях техники, в том числе в таких специфических, как техника СВЧ и космическая. Объем механических креплений (заклепочных, болтовых) в конструкциях современных ЛА достаточно высок. Такие соединения являются основными в конструкциях из алюминиевых сплавов, в которых другие способы (сварка, склеивание) уступают заклепочным и болтовым в прочности и трудоемкости. Дальнейшее совершенствование на пути повышения прочности, ресурса, снижения массы планера и конструкций космического базирования может быть достигнуто применением механических соединений из материалов с памятью. К наиболее перспективным можно отнести соединения для деталей из композиционных материалов на основе углепласта, сохраняющие требуемые эксплуатационные параметры в условиях жесткого температурного режима.

Большой эффект по повышению надежности и снижению веса гидросистем достигается при использовании термомеханических муфт для соединения трубопроводов.

Псевдоупругость используется для создания различных упругих элементов с нелинейной характеристикой. Они могут использоваться в качестве торсионов, обезвешивающих устройств, пружинных деталей в силовых механизмах НЧ- и ВЧ-разъемах и т.д. Особый интерес представляет использование таких элементов в качестве приводов одноразового действия, например, для раскрытия складных космических конструкций. Благодаря нелинейной характеристике при этом удается по сравнению с пружинными приводами из традиционных материалов существенно снизить уровень динамического воздействия на раскрываемые конструкции.

Известно, что пружинные приводы компактны, обладают малой массой, не

требуют для своей работы источника энергии, но неуправляемы, что ограничивает возможности их применения. Однако, путём введения в систему противодействующего элемента (контртела), создающего вязко-упругое сопротивление, можно получить практически любую наперед заданную скорость движения рабочего органа.

Следует отметить новое направление – "саморазвивающиеся по заданной программе объекты", которое не имеет аналогов. В этих системах используются сверхупругость, свойственная сплавам с памятью и вязкотекучесть, свойственная некоторым материалам, например фторопласту. Элемент из сплава с памятью создает воздействующее усилие на элемент из вязкотекучего материала, размеры и форма которого непрерывно изменяются под этим воздействием в соответствии с величиной и направлением воздействующих усилий. Применение таких устройств может быть самым разнообразным, начиная с простейших технических средств временной задержки исполнительного действия и кончая медициной.

Как показали специальные исследования, необходимыми вязко-упругими свойствами обладает, в частности, фторопласт. Варьируя размерами такого элемента противодействия, можно изменять время срабатывания от нескольких минут (секунд) до десятков и более часов.

Возможно, что такой же эффект может быть получен при использовании способности материалов с памятью к ползучести. Однако этот вопрос требует соответствующего изучения, Указанный способ управления движением нашел применение не только в технике, но и в медицине.

Благодаря повышенным диссипативным свойствам материала с памятью используются в виброзащитных устройствах и других поглотителях энергии. При этом диапазон температур фазовых превращений может быть ниже диапазона температур эксплуатации, но может и совпадать, а в некоторых случаях, в частности, при защите от кратковременных динамических воздействий, быть выше.

Свойство материала, заключающееся в увеличении жесткости и несущей способности с ростом температуры, - термическое упрочнение позволяет разра-

батывать устройства терморегулирования и термокомпенсации. Так как изменение механических характеристик наиболее интенсивно в области температур обратных мартенситных превращений и несколько менее интенсивно в области псевдоупругости, то в этом случае, как правило, выбирают так, чтобы диапазон температур превращений совпадал с диапазоном температур эксплуатации. Термическое упрочнение используется также для управления динамическими свойствами объекта регулирования.

Основными эксплуатационными факторами, определяющими способы управления, являются диапазон температур и вид окружающей среды. Диапазон эксплуатационных температур определяется минимальной T^{min} и максимальной температурой - T^{max} . К видам окружающей среды относятся: жидкость, газовая среда и среда с остаточной атмосферой или вакуум. Последняя может быть как естественного происхождения (космос), так и искусственного, создаваемого, в частности, для некоторых технологических процессов.

Если сплав с памятью выбран таким образом, что диапазон температур эксплуатации лежит выше диапазона температур фазовых превращений ($A_K < T^{min}$), то управление должно осуществляться путем искусственного охлаждения до температуры $T < M_K$, обеспечивающей мартенситное превращение в материале.

Обычно при проектировании выбирают сплавы, имеющие диапазон температур аустенитного превращения выше температур эксплуатации ($A_H > T^{max}$), а диапазон мартенситных превращений, лежащий в пределах температур эксплуатации ($M_K > T^{min}$). При этом управление осуществляется путем искусственного нагрева активного элемента).

Возможны также случаи, когда диапазоны температур превращений и эксплуатации частично перекрываются ($A_H < T^{max}$ или $A_K > T^{min}$). Тогда для управления требуется и нагрев, и охлаждение.

Способ осуществления требуемого теплового режима зависит, в первую очередь, от окружающей среды и вида теплообмена: теплопроводность, конвекция или излучение. Наибольшее ограничение при этом накладывается вакуумной средой.

Конструктивная реализация способов подвода или отвода энергии (при необходимости) различна и зависит от вида механизма, его геометрических параметров, вида объекта, способа размещения, условий сопряжения с соседними элементами и т.д. Простейшими видами подвода энергии являются: нагрев с помощью жидкости или газа с заданной температурой; с помощью пропускания электрического тока непосредственно через элемент; с помощью специального нагревательного элемента; с помощью электромагнитного поля и т. п.

Таким образом, предложенная классификация охватывает области применения материалов с памятью и определяет основанные на физических свойствах этих материалов принципы функционирования устройств различного назначения и их синтеза.

В соответствии с классификацией представляется возможным систематизировать методы расчета и проектирования устройств из материалов с памятью по основным признакам: функциональное назначение, используемое основное свойство материала и условия эксплуатации (диапазон рабочих температур и вид окружающей среды).

2.2. Конструкции термомеханических двигателей

2.2.1. Классификация термомеханических двигателей

Ранее предлагались способы классификации приводов с элементами из материала с ТМП, которые можно представить в следующем виде.

Регулирующие устройства (привода) разбиваются на две группы - одноразового и многократного действия. Механизмы одноразового действия имеют привод в виде элементов из материалов с памятью разнообразной конструкции (стержни, пластины, сильфоны, спиральные и плоские пружины и т.д.). Устройства многократного действия используются в регулирующих механизмах, реагирующих на температуру окружающей среды. Схема работы таких устройств включает "рабочий ход", совершающийся при нагреве, и "обратный ход" - при охлаждении. Во время рабочего хода элемент из сплава с памятью совершает полезную работу, т.е. непосредственно выполняет регулирующую функцию. Обратный ход совершается под действием либо специального конструк-

тивного элемента, называемого контртелом, либо под действием самого регулирующего тела, либо за счет изменения внутренней структуры материала.

Соответственно регулирующие устройства многоразового действия подразделяются по виду регулирования (регулятор-исполнитель и регулятор-переключатель) и по характеру обеспечения обратного хода (с контртелом и двухстороннего действия).

В качестве контртела могут быть использованы стальные или бронзовые пружины, а также вес груза. При этом жесткость или вес контртела подбирается таким образом, чтобы, во-первых, при нагреве усилие элемента с памятью было достаточным для деформирования пружины или подъема груза и осуществления дополнительной полезной работы и, во-вторых, чтобы при охлаждении (в мартенситной фазе) усилия контртела было достаточно для деформирования элемента с памятью.

В приводе двухстороннего действия используются два элемента из материала с памятью, один из которых перед установкой деформируется. При его нагреве и восстановлении формы осуществляется деформирование второго элемента. Для перемещения в обратном направлении нагревается второй элемент, а первый охлаждается.

Рассмотренная классификация носит частный характер и касается только приводов.

Анализ выполнен квалифицировано с учетом основных факторов, определяющих принципы построения привода (назначение, структура, функциональные особенности), и может быть полезен при проектировании охваченных классификацией типов приводов.

Однако, следует отметить, что эта классификационная схема не является полной. В ней, в частности, отсутствуют приводы непрерывного действия, неуправляемые приводы одноразового действия, основанные на использовании эффекта псевдоупругости; не учтены условия эксплуатации и их влияние на способы управления приводом (нагрев-охлаждение).

В настоящее время известно большое число возможных конструктивных ис-

полнений ТМД различного назначения. Однако наибольший интерес представляет использование ТМД в тех случаях, когда требуется получить малые перемещения исполнительного органа или малые скорости при ограниченных массово-габаритных характеристиках.

На рис. 2.13 приведена классификация ТМД, которая представляет собой подструктуру общей классификации на рис. 2.12.

Движение исполнительных механизмов выполняется активными элементами из сплава с памятью (АЭ), которые в зависимости от функционального назначения перемещаются поступательно, вращательно или имеют сложную траекторию движения. При этом каждый вид движения должен характеризоваться величиной этого перемещения, его скоростью, развиваемым усилием, а также возникающими динамическими, тепловыми характеристиками. Таким образом, выбор типа АЭ, отвечающего заданным требованиям с учётом его напряжённо-деформированного состояния в процессе работы, является в каждом конкретном случае ключевым при построении схемы ТМД.

Кроме того, указанные элементы или узлы должны обеспечивать в зависимости от назначения ТМД непрерывное, циклическое или одноразовое движение механизма. В зависимости от этого определяется, в том числе, требуемое количество АЭ, их взаимосвязь и характер работы каждого из них. Циклическое движение, например, может включать рабочий ход и холостой или иметь рабочий ход в обоих направлениях.

Для выбора схемы построения двигателя должны быть рассмотрены характеристики, приводящие к изменению начального положения или состояния элементов. При этом в качестве ограничений должны быть рассмотрены термомеханические параметры материалов с памятью в связи с требованиями, обусловленными характером движения, конструктивным обликом механизма, его геометрическими параметрами, силовыми и т.д.

В качестве примера рассмотрим случай, когда исполнительный орган должен совершать одноразовое линейное перемещение. Такая схема может быть реализована при четырех видах деформирования элементов, изготовленных из мате-

риалов с ТМП: продольная деформация, деформация изгиба, кручение или сложное деформированное состояние.

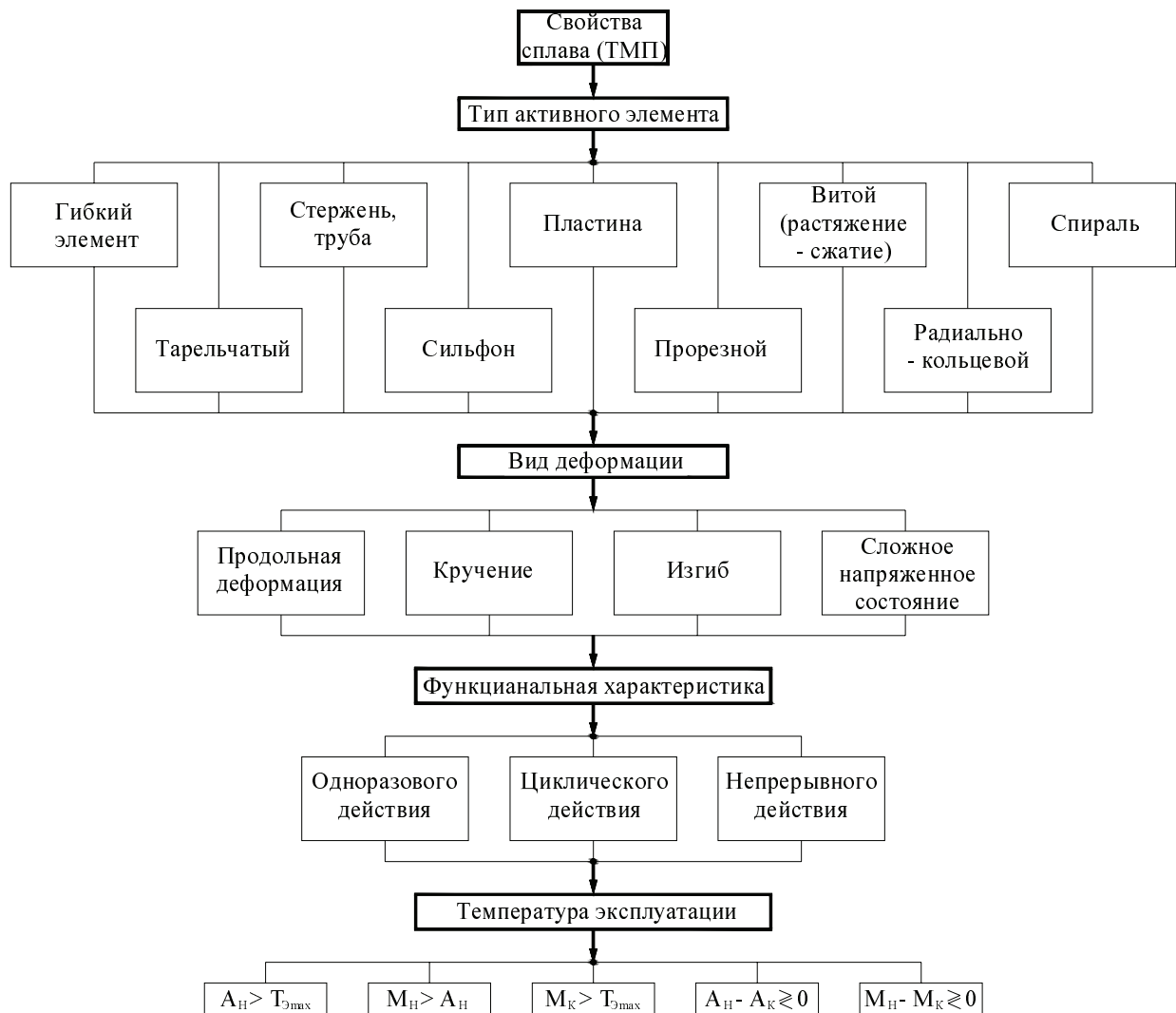


Рис. 2.13. Классификация термомеханических двигателей

Создать указанное перемещение можно следующим образом.

1. Продольная деформация достигается, если элемент имеет простые геометрические формы (стержень), когда обеспечивается равномерный нагрев элемента по объему.

2. Изгибная деформация преобразуется в линейное перемещение так, что конечная точка элемента перемещается поступательно, а сам элемент также будет иметь равномерный по объему нагрев, а траектория перемещения сечений задается при формировании памяти.

3. Деформация кручения достигается, например, путем придания элементу формы цилиндрической витой пружины. При этом, если перемещение превысит длину пружины в исходном состоянии, будет иметь место сложное деформированное состояние.

4. Сложное деформированное состояние возникает также в элементах сильфонного типа.

Аналогичным образом может быть выполнен ТМД, обеспечивающий вращательное или другое движение исполнительного органа.

В случае продольного деформирования развивается наибольшее усилие. Однако величина рабочего хода при этом, определяемая деформацией возврата, составляющей, например, для никелида титана 6...8% от длины элемента, не всегда бывает достаточной. При изгибной деформации рабочий ход можно увеличить, но развиваемое усилие при этом уменьшается. Увеличения рабочего хода можно добиться, придавая элементу специальную форму, например, в виде упомянутой выше витой цилиндрической или спиральной пружины. Подобные приемы позволяют варьировать усилие и рабочий ход в достаточно широких пределах.

В приводах циклического действия с холостым ходом рабочий ход осуществляется с помощью активного элемента (АЭ) из материала с памятью, также как и в приводах одноразового действия. Обратный (холостой) ход, в процессе которого осуществляется деформирование и приведение АЭ в исходное положение, производится с помощью специального элемента или устройства, причем усилие возврата может иметь различную физическую природу: упругая сила, сила веса, подъемная сила, сила давления.

Наиболее распространены устройства в виде разнообразных упругих элементов, реже встречаются устройства в виде груза.

ТМД циклического действия без холостого хода (двухстороннего действия) выполняется из двух АЭ из материала с ТМП, поочередно перемещающих исполнительный орган во взаимно противоположных направлениях.

Аналогично возможны схемы реализации непрерывного, вращательного движения при различных видах деформации.

Таким образом, простота, доступность, надежность, ясность физического процесса нагрева дают конструктору широкие возможности в создании и конструктивном воплощении ТМД.

В механизмах различного функционального назначения, используемых в станкостроении, робототехнике, антенной космической технике, в летательных аппаратах и других областях техники, используются, как правило, гидравлические и электромеханические приводы, обладающие рядом достоинств по сравнению с другими типами приводов.

Вместе с тем в ряде случаев термомеханический. привод может составить традиционным приводам серьезную конкуренцию. Это относится, в частности, к сравнительно слабо нагруженным механизмам при различной величине рабочего хода: приборные привода СВЧ-устройств, привода малогабаритных и микроманипуляторов, замки фиксации различных элементов ЛА и складных космических конструкций и т.д. Снижения веса и более широких возможностей по компоновке можно достичь и в высоконагруженных механизмах с малой скоростью перемещения, в таких как механизмы управления стабилизаторов. Скорость перемещения стабилизатора самолета ИЛ-8 составляет 0,22 °/с, что вполне допустимо при использовании ТМД,

К подобным приводам также следует отнести механизмы развертывания крупногабаритных складных космических конструкций, механизмы технологического оборудования (например, прессов) некоторые крановые механизмы и механизмы, применяемые в наземной антенной технике.

2.2.2. Конструкции активных элементов

Конструктивные виды активных элементов приведены на рис. 2.13. Выбор оптимального варианта конструктивного исполнения имеет большое значение при построении ТМД, ТМЭУ, а также при проектировании конструкций упругих элементов. При этом должны приниматься во внимание свойства АЭ такие, как характер движения, величина рабочего хода, нагрузочная способность, диа-

пазон реализуемых скоростей, а так же условия эксплуатации, окружающая среда, возможности выбора вариантов управления, включая вид подводимой энергии. Ниже приводятся основные (базовые) конструктивные виды АЭ и их ориентировочные технические характеристики (табл. 2.2).

В зависимости от характера движения рабочего органа и величины рабочего усилия форма активного элемента (АЭ) может быть различной. На практике получили распространение простейшие, технологичные формы, в которых используется продольная деформация, изгиб или кручение, а также их сочетание.

Эффективность АЭ и соответственно термомеханического привода определяется величиной произведённой удельной работы, т.е. работы отнесённой к единице объёма АЭ [30].

Максимальное использование энергоёмкости сплава в АЭ (и, следовательно, снижение его массы и габаритов) достигается при однородном напряжённо-деформированном состоянии и однородном температурном поле по сечению и длине АЭ. Однородное напряжённо-деформированное состояние реализуется в случае продольной деформации. Однородность температурного поля связана со способом нагрева. Так как никелид титана обладает низкой теплопроводностью, относительно однородное температурное поле по сечению достигается при нагреве АЭ путём пропускания через него электрического тока.

Поступательное движение наиболее просто реализуется с помощью элемента в виде проволоки. Его целесообразно использовать при рабочих усилиях P до 2000 Н и величине рабочего хода S примерно 30 мм, что составляет 0,05...0,06 длины проволоки. Нагрев проволоки целесообразно осуществлять за счёт омического сопротивления, что позволяет обеспечить равномерный нагрев по сечению. В зависимости от интенсивности нагрева могут быть получены скорости примерно в пределах 0,2...50 мм/с.

При больших значениях усилий ($P = 2000...20000$ Н) может быть использован элемент, выполненный в виде стержня или трубы. Его нагрев осуществляется другими способами, например, с помощью спирали, расположенной на наружной или внутренней поверхности трубы, через которую пропускается элек-

трический ток. Для обеспечения равномерного прогрева по сечению толщина стенки трубы не должна превышать 2...3 мм.

При больших значениях рабочего хода ($S = 50 \dots 1000$ мм) наиболее компактным является АЭ в форме цилиндрической витой пружины. Её длина в начальном состоянии в 2...5 раз меньше (пружина растяжения) или больше (пружина сжатия). Эти элементы могут быть рекомендованы для рабочих усилий до 1000...3000 Н. Их нагрев, как и проволочных элементов, можно осуществлять непосредственно электрическим током, получая примерно такие же скорости перемещения.

Непосредственно вращательное движение обеспечивается с также помощью АЭ в форме стержня или трубы, работающего на кручение. Развиваемый крутящий момент для стержня обычно не более 50 Нм при угловом ходе до 360^0 , а для трубы – примерно до 1000 Нм.

При нагреве с помощью электрического тока, пропускаемого через стержень могут быть получены скорости срабатывания до $180^0/\text{с}$. При больших значениях крутящего момента (до 1000 Нм и более) АЭ выполняется в форме трубы с оконцовками для передачи движения исполнительному органу непосредственно или через механическую передачу.


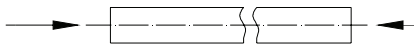
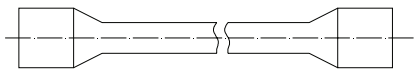
При толщине стенки трубы $0,1D$ и менее напряжённно-деформированное состояние является практически однородным, что существенно повышает эффективность двигателя.

Для обеспечения вращательного движения в пределах угла поворота примерно до 90^0 могут быть использованы АЭ в виде пружины работающей на кручение.

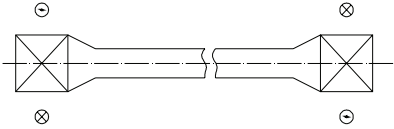
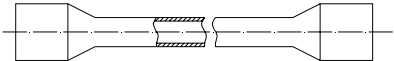
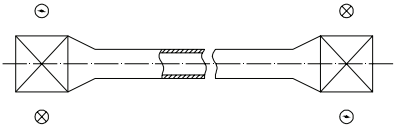
АЭ в форме спирали может обеспечивать поворот до 20 оборотов и более, но усилие развиваемое таким элементом незначительно.

При значении усилий $P = 10000 \dots 300000$ Н может использоваться АЭ сильфонного типа или элементы в форме усечённой конической оболочки (тарельчатого типа). Такие АЭ позволяют обеспечить рабочий ход $S = 5 \dots 400$ мм, что составляет примерно до 0,4 их длины в недеформированном состоянии.

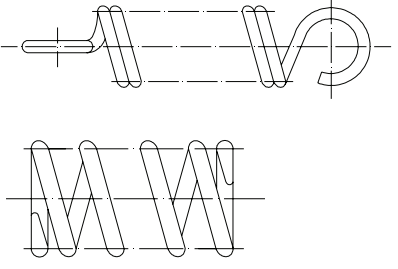
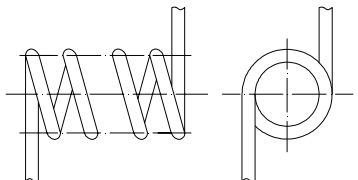
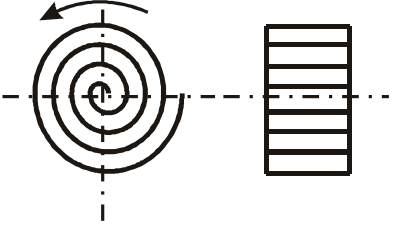
Таблица 3.2.

Название		Свойства	Рисунок
1. Гиб- кий эле- мент	а) про- волока	<ul style="list-style-type: none"> - диаметр 0,1...2,0 мм; - вид деформации при восстановле- ние – сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05...0,08)l$, где l длина; - развиваемое усилие $P \leq 2000$ Н; - скорость: $U = 0.1...50$ мм/с 	
	б) лен- та	<ul style="list-style-type: none"> - толщина 0,04...0,8 мм - вид деформации при восстано- вление – сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05...0,08)l$, где l длина; - развиваемое усилие $P \leq 2000$ Н; - скорость: $U = 0.1...50$ мм/с 	
2. Стер- жень	а) Ра- бота на растя- жение и сжа- тие	<ul style="list-style-type: none"> - диаметр – до 5 мм; - вид деформации при восстано- вление – растяжение и сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05...0,08)l$, где l - длина; - развиваемое усилие $P \leq 10000$ Н; - скорость $U = 0.1...5,0$ мм/с 	

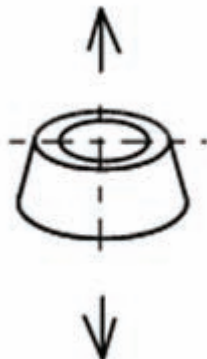

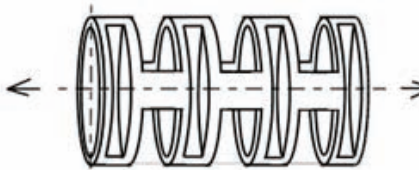
Продолжение таблицы 3.2.

Название		Свойства	Рисунок
3. Полый стержень (труба)	б) Работа на кручение	<ul style="list-style-type: none"> - диаметр – до 5 мм; - вид деформации при восстановлении – кручение; - движение – вращательное; - величина рабочего хода $\varphi = 15 \dots 360^\circ$ - развиваемое усилие $M \leq 50 \text{ Нм}$; - скорость $\omega \leq 180^\circ / \text{с}$ 	
	а) Работа на растяжение и сжатие	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – растяжение и сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05 \dots 0,08)l$, где l - длина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 5,0 \text{ мм/с}$ 	
	б) Работа на кручение	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – кручение; - движение – вращательное; - величина рабочего хода $\varphi = 15 \dots 360^\circ$ - развиваемое усилие $M \leq 1000 \text{ Нм}$; - скорость $\omega \leq 30^\circ / \text{с}$ 	

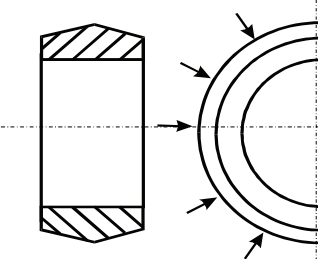
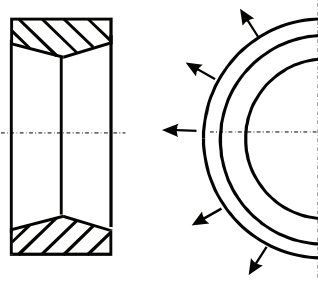

Продолжение таблицы 3.2.

Название		Свойства	Рисунок
4. Ви- той	а) Ра- бота на растя- жение и сжа- тие	<ul style="list-style-type: none"> - диаметр проволоки 0,8...2,0 мм; - вид деформации при восстановле- ние – сложная; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (2...5)l$, где l – длина элемента; - развиваемое усилие $P \leq 3000$ Н; - скорость $U = 0.5...50$ мм/с 	
	б) Ра- бота на круче- ние	<ul style="list-style-type: none"> - диаметр проволоки 0,8...2,0 мм; - вид деформации при восстановле- ние – изгиб; - движение – вращательное; - величина рабочего хода $\varphi = 15...90^\circ$ - развиваемое усилие $M \leq 500$ Нм; - скорость $\omega \leq 10^0$ /с 	
5. Спираль		<ul style="list-style-type: none"> - лента толщиной 0,1...0,8 мм - вид деформации при восстановле- ние – изгиб; - движение – вращательное; - величина рабочего хода $\varphi = 1...20$ оборотов - развиваемое усилие $M \leq 100$ Нм; - скорость $\omega \leq 0,5$ об/с 	

Продолжение таблицы 3.2.

Название	Свойства	Рисунок
6. Тарельчатый	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – растяжение и сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,2 \dots 1,0)H$ (в зависимости от угла конусности), где H - высота; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость: $U = 0,1 \dots 5,0 \text{ мм/с}$ 	
7. Сильфон	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – растяжение и сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05 \dots 0,4)l$, где l - длина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 5,0 \text{ мм/с}$ 	
8. Прорезной	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – сложная; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,05 \dots 0,2)l$, где l - длина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 5,0 \text{ мм/с}$ 	

Продолжение таблицы 3.2.

Название		Свойства	Рисунок
9. Радиально-кольцевой	а) сжатия	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 8 мм; - вид деформации при восстановлении – сжатие; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,5 \dots 0,8) b$, где b - ширина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 2,0 \text{ мм/с}$ 	
	б) растяжения	<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – растяжение; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,5 \dots 0,8) b$, где b - ширина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 2,0 \text{ мм/с}$ 	
10. Пластина		<ul style="list-style-type: none"> - толщина стенки – до 2 мм; - вид деформации при восстановлении – растяжение; - движение – поступательное; - величина рабочего хода $S = (0,5 \dots 0,8) b$, где b - ширина; - развиваемое усилие $P \leq 20000 \text{ Н}$; - скорость $U = 0,1 \dots 2,0 \text{ мм/с}$ 	

Использование для возврата сил давления дает возможность объединить в одном устройстве АЭ и элемент холостого хода, что расширяет возможности применения ТМД. С этой целью АЭ в форме цилиндрического сильфона жесткого в радиальном направлении и податливого в осевом выполнен в виде замкнутой оболочки. Из внутреннего объема оболочки откачивается воздух, после

чего она герметизируется. При нагреве сильфон, вспоминая приданную ему в высокотемпературной фазе форму, вытягивается, а при охлаждении давление, действующее на торцы сильфона, сжимает его, приводя в исходное положение.

Нагрев осуществляется электрической спиралью, токами Фуко или с помощью ТЭМО. В последнем случае достигается эффективный нагрев и охлаждение АЭ, что позволяет увеличить быстродействие при циклической работе.

АЭ прорезного типа по нагрузочной способности несколько превышает сильфон, но рабочий ход у него меньше.

Так, например, АЭ (рис. 2.14) длиной 100 мм диаметром 38 мм при толщине стенки 2,0 мм имеет рабочий ход 16 мм при нагрузке 35...49 КН.

Радиально-кольцевые элементы обладают достаточно высокой нагрузочной способностью и могут быть использованы для некоторых специальных технологических операций.



Рис. 2.14. АЭ прорезного типа

Элементы, работающие на изгиб, чаще всего используются для передачи вращательного движения и выполняются либо в виде пластины при небольших углах поворота (до 180^0), либо в виде спиральной пружины, если угол поворота составляет от 1 до 20 оборотов. Напряжённо-деформированное состояние по сечению при изгибе существенно неоднородно и поэтому эффективность АЭ в этом случае в 2...3 раза ниже, чем при продольной деформации.

Нагрев может осуществляться различными способами, в том числе и непосредственно электрическим током. В последнем случае, чтобы избежать корот-

кого замыкания, поверхность пластины покрывается электроизоляцией.

Механическая передача в термомеханических приводах применяется в следующих случаях:

- Когда двигатель (АЭ) по конструктивным или другим соображениям не может быть непосредственно подключён к исполнительному органу;
- Когда величина рабочего хода или усилия на исполнительном органе больше соответствующих величин, развиваемых АЭ (двигателем).

Таким образом, приведённые данные позволяют осуществлять рациональный выбор типов АЭ при проектировании ТМД.

2.2.3. Термомеханические двигатели однократного действия

Как уже отмечалось, термомеханические двигатели однократного действия содержат только один активный элемент. Поэтому выглядят наиболее просто. Но, с другой стороны, к таким двигателям предъявляются, как правило, очень высокие требования по надёжности, например, в случае их применения в аэрокосмической технике. А это, в свою очередь, требует высокого уровня профессионализма на всех стадиях разработки и изготовления. Рассмотрим несколько таких примеров.

На рис.2.15 представлен термомеханический двигатель с гибким АЭ и предназначенный для развёртывания фрагмента складной космической конструкции.

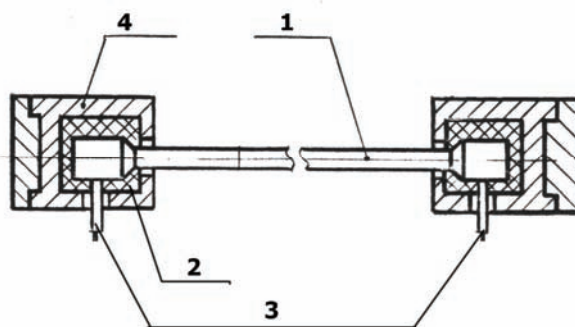


Рис. 2.15. Термомеханический двигатель с проволочным активным элементом

АЭ поз.1 выполнен из проволоки диаметром 2 мм с конусными законцовками, зажатými в безлюфтовых диэлектрических втулках поз.2, служащих одно-

временно в качестве изоляторов. Управление двигателя осуществляется пропуском через АЭ электрического тока, подводимого через припаянные штекеры поз. 3. Тяговое усилие, развиваемое АЭ, передается к исполнительному органу непосредственно через корпус поз. 4. АЭ в виде стержня конструктивно выполняется аналогично.

Так как узлы с трением в конструкции отсутствуют, такой двигатель способен работать не только в воздушной среде, но и в вакууме. При этом, как и для любого двигателя одностороннего действия, система охлаждения не требуется.

Термомеханический двигатель с активным элементом в виде полого стержня (трубы) показан на рис. 2.16. В отличие от предыдущего варианта такой двигатель может работать не только на растяжение, но и на сжатие и развивать, как это следует из таблицы 3.2, значительно большие усилия. Однако в этом случае для решения проблемы управления требуется специальное нагревательное устройство.

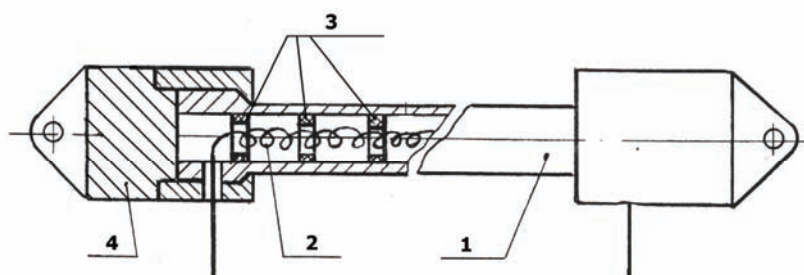


Рис. 2.16. Термомеханический двигатель с активным элементом
в виде полого стержня (трубы)

В качестве теплоносителя может использоваться жидкость или газ. В космической технике, где механизмы одностороннего действия наиболее востребованы, управление должно осуществляться электрическим способом. Для этого внутри АЭ устанавливается электрическая спираль (поз. 2), которая изолируется путем использования диэлектрических вкладышей (поз. 3). Движение исполнительному элементу передается через корпус (поз.4). Однородность температурного поля в объеме АЭ зависит от толщины стенки трубы, которая должна быть минимальной, и теплового сопротивления в узлах крепления, которое должно быть максимальным.

Термомеханический двигатель с активным элементом тоже в виде стержня, но работающего на кручение, показан на рис. 2.17. Отличие его заключается в том, что законцовки стержня для передачи вращательного момента выполнены не коническими, а квадратного сечения.

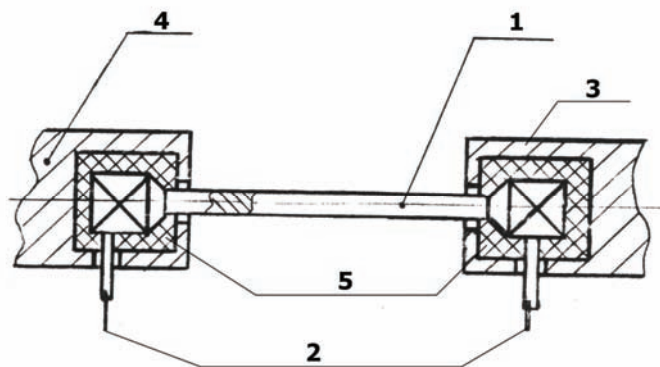


Рис. 2.17. Термомеханический двигатель с активным элементом в виде стержня, работающего на кручение

Если для передачи движения требуется больший момент (см. табл. 2.2), применяется термомеханический двигатель с активным элементом в виде полого стержня (трубы), изображенный на рис. 2.18. Нагрев активного элемента выполненного в виде цилиндрической трубки (поз.1) осуществляется нагревательным устройством, которое состоит из спирали (поз. 4), намотанной на керамическую втулку (поз. 3). Для снижения тепловых потерь предусмотрен теплозащитный кожух (поз.2.).

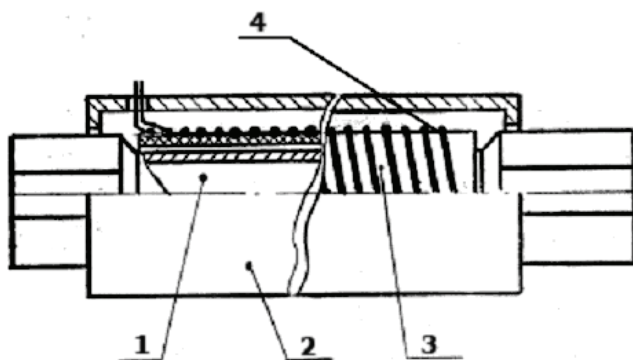


Рис. 2.18. Термомеханический двигатель с активным элементом в виде полого стержня (трубы), работающим на кручение

Такого типа ТМД с активным элементом диаметром 14 мм, длиной 300 мм при толщине стенки 2,5 мм обеспечивает поворот на рабочий угол 180^0 и развивает момент около 150 Нм.

Конструкция термомеханического привода с активным элементом, работающим на изгиб, показана на рис.2.19.

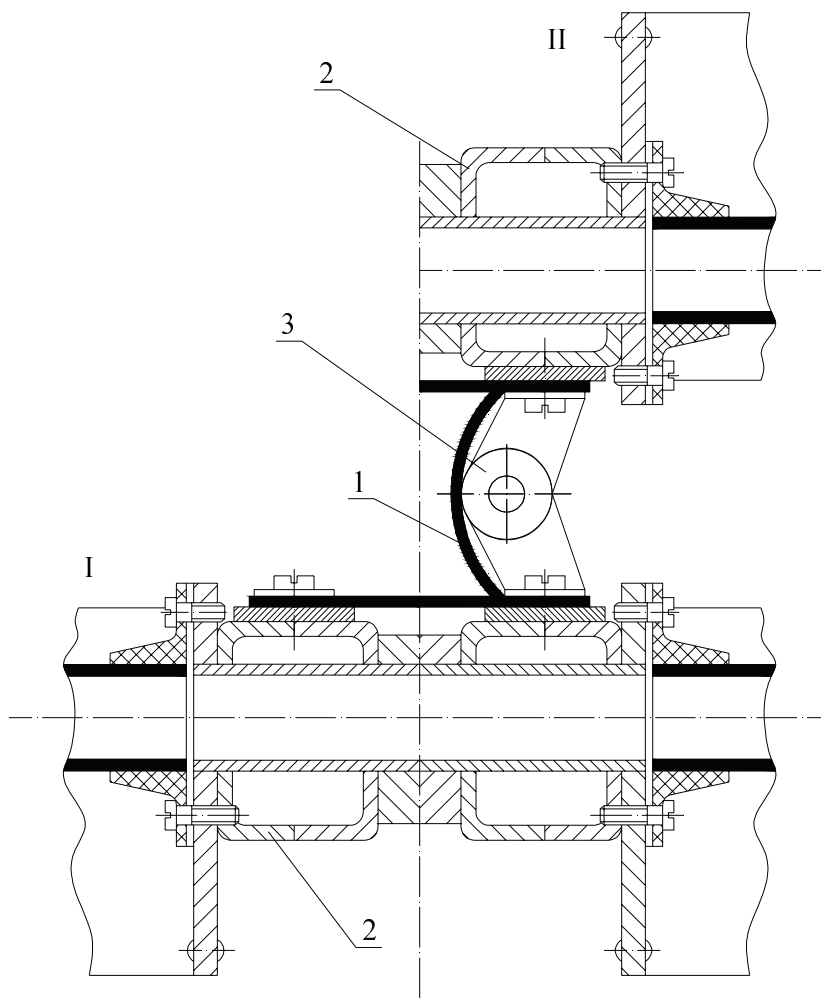


Рис. 2.19. Термомеханический двигатель с активным элементом, работающим на изгиб

Механизм предназначен для разворачивания панелей складной космической платформы. АЭ (поз.1) представляет собой пластину толщиной 5 мм и шириной 50 мм, концы которой с помощью прижимов соединены с панелями 2. Перед установкой пластина подвергается термообработке на цилиндрической оправке диаметром 250 мм для запоминания формы. При сборке панели располагаются в развернутом положении (положение I) и соединяются выпрямленными пластинами так, чтобы сжатые волокна располагались сверху. При складывании

панелей в транспортное положение (положение II) пластина выгибается в другую сторону и охватывает ограничительный ролик 3 диаметром 125 мм. При этом положение ролика регулируется таким образом, чтобы АЭ находился в натянутом положении.

К широким стенкам элемента приклеена электроизоляционная пленка, внутри которой зигзагообразно проложен проводник из нихромовой проволоки, с помощью которого осуществляется нагрев АЭ. В начале рабочего хода АЭ развивает момент 190 Нм, а в конце - 130 Нм. Потребляемая мощность при раскрытии в течение одной минуты - 450 Вт.

2.2.4. Термомеханические двигатели циклического действия

Для выполнения работы в циклическом режиме в отличие от механизмов однократного действия необходимо, во-первых, иметь, по крайней мере, два элемента (прямого и обратного хода); во-вторых, обеспечить не только нагрев, но и охлаждения АЭ. Обратный ход может быть холостым или рабочим, как и прямой. В последнем случае оба элемента выполняются из сплава с памятью. Выбор типа АЭ осуществляется в соответствии с рекомендациями, приведёнными в таблице 2.2. В частности, ТМД с АЭ в виде цилиндрической витой пружины нашёл применение в манипуляторах, замковых и других устройствах с большим по величине рабочим ходом. Один из таких примеров приведён на рис. 2.20.

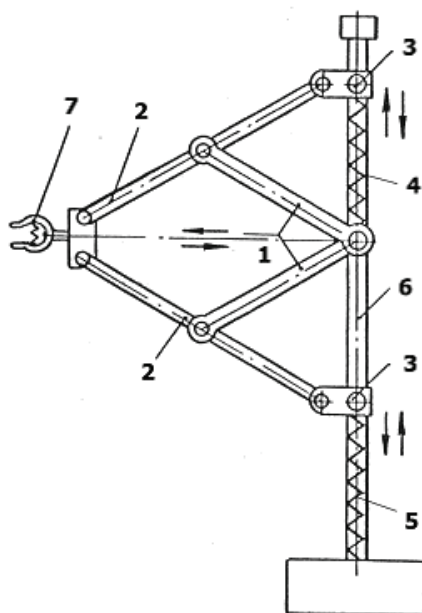


Рис. 2.20. Схема конструкции манипулятора

Механизм горизонтального перемещения схвата манипулятора состоит из звеньев 1 и 2, шарнирно соединённых между собой, причём звенья 1 шарнирно соединены со стойкой 6, а звенья 2 – с ползунами 3, перемещающимися по направляющим стойки. Ползуны приводятся в движение с помощью АЭ 4 и 5, включённых навстречу друг другу. Элементы выполнены из проволоки диаметром 2 мм, диаметр пружины – 14 мм, число витков – 10. Предварительное натяжение составляет 80 мм, рабочий ход – 170 мм. Рабочее усилие в начале рабочего хода – 100 Н, в конце – 55 Н. Механизм захвата 7 также выполнен из сплава с памятью.

Если привод должен развивать большие усилия (тысячи Ньютонов и более) при ограниченных осевых габаритах, активный элемент может выполняться в форме тарельчатой пружины. Конструкция такого привода для шлюзового затвора показана на рис.2.21. Затвор размещается в шлюзовой камере I шириной 60 мм и предназначен для герметизации электропровода 2, представляющего собой трубу с внутренним диаметром 46 мм. Герметизация осуществляется с помощью резинового уплотнителя 3, устанавливаемого в корпусе шлюзовой камеры и прижимаемого диском 4 из радиопрозрачного материала.

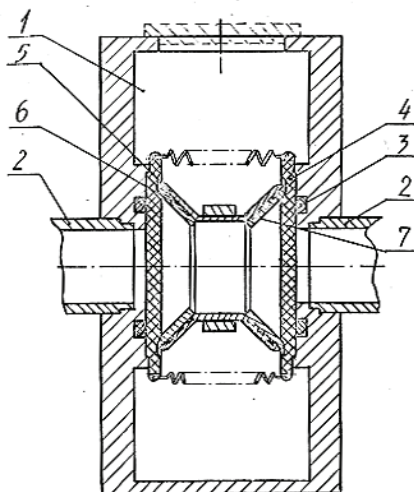


Рис. 2.21. Привод шлюзового затвора

Прижимное устройство состоит из элемента 5, выполненного из криогенного сплава ТН-К и элемента 6, выполненного из высокотемпературного сплава ТН-1. В диапазоне эксплуатационных температур элемент 5 находится в аустенитной фазе в области сверхупругости, а элемент 6 - в мартенситной фазе. Таким

образом, элемент 5 выполняет роль пружины и, пластически деформируя элемент 6, прижимает диски 4 с усилием около 2500 Н, достаточным для обеспечения герметизации соединения.

Для открывания затвора активный элемент 6 нагревается с помощью нагревательного устройства, располагаемого в пазах 7 и, стремясь выпрямиться, развивает усилие, превышающее усилие прижатия пружины и образует таким образом зазор в уплотнительных узлах величиной 0,5... 1,0 мм.

Из зоны электропровода освобожденный затвор выводится с помощью двух пар активных элементов 8 в форме цилиндрической витой пружины из проволоки диаметром 1 мм, имеющих рабочий ход 90 мм. В течение своего срока службы механизм затвора должен обеспечить не менее 100 циклов срабатывания.

Для повышения податливости конические элементы устанавливают последовательно в виде секций из двух элементов. Тогда при том же усилии рабочий ход увеличивается пропорционально числу элементов.

Механизм циклического действия с активным элементом в виде сильфона может в некоторых случаях конкурировать с гидравлическими приводами. В частности, на рис.2.22 показан термомеханический привод поступательного действия, который при наружном диаметре сильфона, равном 45 мм, и толщине стенки 2,5 мм развивает усилие 17000...25000 Н при рабочем ходе ± 175 мм. Расчетная масса, привода равна 16 кг.

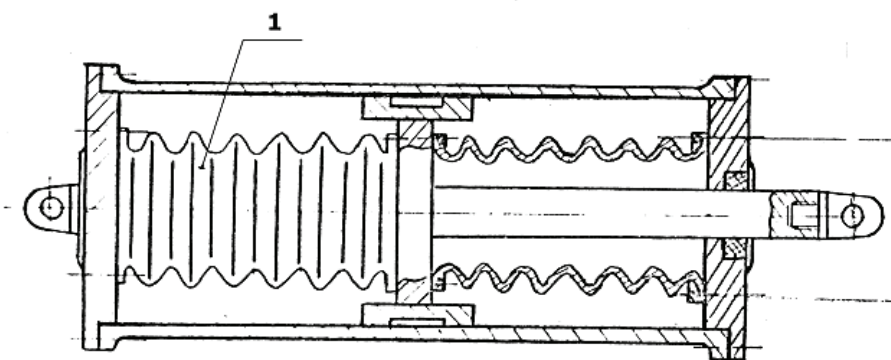


Рис. 2.22. Механизм с активным элементом в виде сильфона

Аналогичный гидравлический механизм ГМК-1 при несколько больших габаритах имеет массу 20 кг (без рабочей жидкости). Учитывая, что гидравлический механизм требует для себя достаточно сложную гидросистему, общая масса и габариты гидропривода получаются значительно больше по сравнению с термомеханическим. Однако, термомеханические привода, в свою очередь, проигрывают гидравлическим по быстродействию, что ограничивает область их применения.

На рис. 2.23 показано приводное устройство, в котором также применён АЭ сильфонного типа, а на рис. 2.24 представлена схема управления приводным устройством [63].



Рис. 2.23. Приводное устройство сильфонного типа.

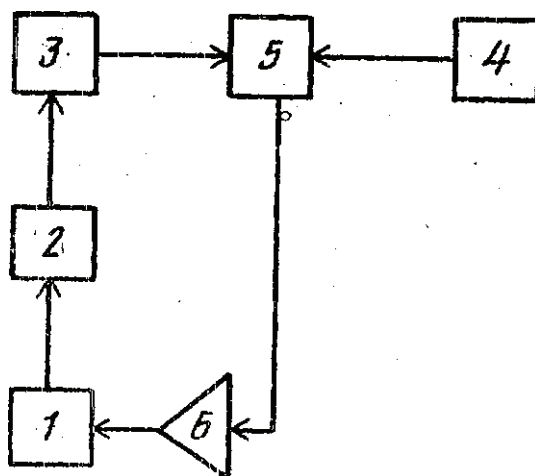


Рис. 2.24. Схема управления приводным устройством

Схема управления может содержать следующие элементы: сильфон 1, датчик 2 положения, блок 3 определения расчетной температуры поля, блок 4 определения фактической температуры поля, элемент 5 сравнения и усилитель 6.

Сплав с памятью может быть применен либо восстанавливающий свою форму самостоятельно после температурного воздействия, либо восстанавливающий свою форму с помощью внешнего воздействия. На рис.2.23 изображен сильфон 1 с замкнутым объемом. Внутри сильфона создано разрежение (либо повышенное давление), выполняющее роль возвратной пружины. Нагревательные элементы 7 закреплены на оболочке сильфона в виде сетки. Один конец сильфона связан с основанием, а другой - с перемещаемым телом. Элементы 7 имеют возможность индивидуального включения. Изменяя температуру определенных элементов 7, сильфон изменяет свою форму по определенному закону, что позволяет обеспечить необходимые движения привода. После снятия температурного воздействия сильфон восстанавливает прежнюю форму.

Датчик 2 связан с входом блока 3 определения расчетной температуры поля, а выход блока 3 - с входом элемента сравнения 5. Второй вход элемента 5 сравнения связан с блоком 4 определения фактической температуры поля, а выход - через усилитель 6 с приводным устройством (сильфоном).

Устройство работает следующим образом. Пусть требуется перемещать тело вдоль оси x в соответствии с заданным законом движения $x=x(T)$, который устанавливает связь текущей координаты x тела с температурой поля T . На основании закона движения находится функция $T = T(x)$.

Для того чтобы определить T , нужно знать значение текущей координаты x тела, которое определяется датчиком 2. Информация о текущем положении тела (координата x) от датчика 2 поступает на вход блока 3 определения расчетной температуры поля. В этом блоке по заранее введенной в него зависимости $T = T(x)$ определяется текущая расчетная температура T .

Из блока 3 значения температуры, определяющие температурное поле, поступают на элемент 5 сравнения, на второй вход которого поступают значения температурного поля T_i , из блока 4 определения фактической температуры поля.

При этом элемент 5 сравнения определяет величину разности $T_i - T$ для каждой точки температурного поля, в соответствии 30 с которой формируется сигнал управления перемещением исполнительного устройства (сильфона) 1, которое посредством изменения своей геометрии перемещает тело. Знак разности $T_i - T$ для каждой точки температурного поля, как это обычно происходит в следящих системах управления, определяет направление движения исполнительного устройства 1 по оси x .

Блок 3 определения расчетной температуры поля может быть выполнен, например, в виде массива памяти с ячейками, содержащими коды положения тела в соответствующие моменты времени как функцию температурного поля. Выполняемая им операция определения расчетного температурного поля по уравнению (2), заданному аналитически или таблично (численно), может быть реализована на любой микроЭВМ с помощью стандартной программы поиска. Фактическое температурное поле может не совпадать с реальным температурным полем как по началу отсчета, так и по скорости изменения. Оно может отсчитываться в установленном масштабе. При этом изменение масштаба фактического температурного поля приводит к ускорению или замедлению воспроизведения закона движения тела в том же масштабе. Элемент 5 сравнения может быть снабжен регулятором масштаба фактического температурного поля.

На рис. 2.25 показан пресс с приводом из материала с ТМП и энергоносителем. В состав пресса [64] входят установленные на станине 1:

- ползун 2;
- попеременно нагреваемый и охлаждаемый силовой элемент;
- самотормозящий клин 3, имеющий возможность взаимодействовать с силовым элементом;
- привод 4 перемещения самотормозящего клина в горизонтальной плоскости;
- рама 5, расположенная соосно ползуну, связанная с силовым элементом и подпружиненная относительно станины в вертикальной плоскости.

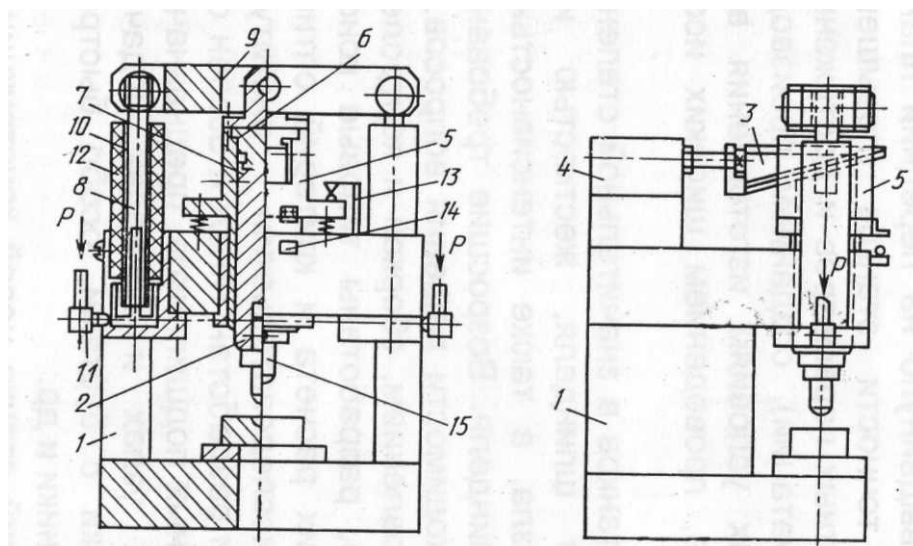


Рис. 2.25. Пресс с приводом из материала с ТМП и энергоносителем

Ползун установлен в раме с возможностью перемещения в вертикальном направлении. Самотормозящий клин расположен между рамой и торцом ползуна с возможностью возвратно-поступательного перемещения в вертикальной плоскости. На боковой поверхности самотормозящего клина выполнены наклонные пазы 6. На боковой поверхности ползуна закреплены крюки 7, взаимодействующие с наклонными пазами. Силовой элемент состоит из двух полых цилиндров 8, выполненных из материала с ТМП, установленных симметрично относительно ползуна 2 и закрепленных одними концами на станине 1, и коромысла 9, концы которого шарнирно связаны со свободными концами полых цилиндров 8, а средняя часть — с рамой 5. Полые цилиндры нагреваются электрической спиралью 10, а охлаждаются воздухом, подводимым через штуцер 11. Для экономии энергии и обеспечения безопасности работы цилиндры помещены в кожухи 12.

Пресс оснащен датчиком исходного положения 13 и регулируемым датчиком конечного положения 14 пуансона 15, жестко закрепленным на ползуне 2.

Пресс работает следующим образом. После включения начинает нагреваться спираль 10, которая прогревает силовой элемент. Привод 4 перемещает в горизонтальном направлении самотормозящий клин до упора, что обеспечивает подвод ползуна с пуансоном к заготовке. По достижении определенной темпе-

ратуры полые цилиндры начинают сжиматься. При этом вместе с коромыслом начинают двигаться, сжимая силовые возвратные пружины, рама, самотормозящий клин, ползун и пуансон, составляющие единое целое. Затем датчик исходного положения размыкается, и производится штамповка детали.

Окончание процесса контролируется регулируемым датчиком 14, который выдает одновременно сигналы на отключение спирали 10, включение подачи охлаждающего воздуха, а также на цилиндр пневмопривода 4. Последний, перемещая клин относительно рамы в обратную сторону, поднимает с помощью крюков ползун с пуансоном – происходит резкое снятие нагрузки с силового элемента. После этого охлаждаемые воздухом полые цилиндры возвращаются в первоначальное положение. Установку силового элемента в исходное положение обеспечивают силовые пружины. При возврате пуансона в начальную точку по сигналу датчика отключается подвод охлаждающего воздуха. Затем подают новую заготовку, и цикл повторяется.

Высокую производительность пресса обеспечивают совмещение загрузки заготовок в штамп с охлаждением силового элемента, а также сокращение времени его нагрева до температуры штамповки.

На рис. 2.26 показан пресс для штамповки [65], отдельные узлы которого изготовлены из материала с ТМП. Корпус 12 пресса установлен на основании 1. В направляющих корпуса размещен силовой элемент 3 (выполнен в виде стержня из материала с ТМП), попеременно нагреваемый и охлаждаемый энергоносителем. На одном конце стержня закреплен механизм регулирования положения рабочего органа в вертикальной плоскости относительно корпуса. На опоре 4 шарнирно закреплен один конец рычага 5, другой взаимодействует с ползуном 6. Средняя часть рычага шарнирно связана с другим концом силового элемента. В верхней части ползуна размещен механизм 9 возвратного хода и предварительного растяжения силового элемента, выполненный в виде втулки из упругого материала, например полиуретана, а в нижней установлена верхняя часть 10 штампа.

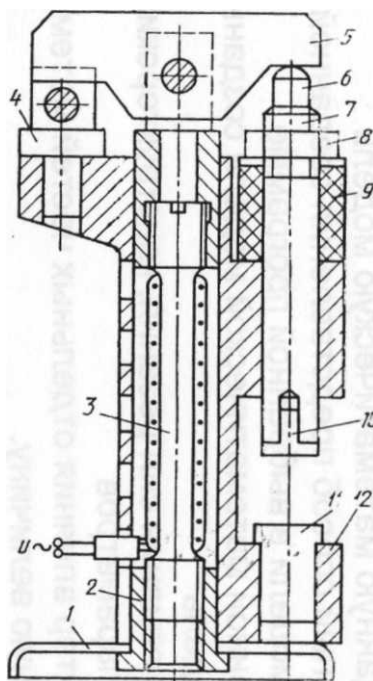


Рис. 2.26. Пресс для штамповки с узлами из материала с ТМП

На корпусе закреплена нижняя часть штампа. На ползуне размещен механизм регулирования возвратного хода и предварительного растяжения силового элемента 3, выполненный в виде винтовой пары 7 и 8 и взаимодействующий с механизмом 9 возвратного хода и предварительного растяжения. Механизм возвратного хода и предварительного растяжения силового элемента, а также механизм 2 регулирования усилия возврата и предварительного растяжения силового элемента могут быть размещены не только на ползуне, но и в любом месте между корпусом и силовым элементом.

Пресс работает следующим образом. В рабочую зону штампа подается заготовка, которая укладывается на нижнюю часть штампа. Затем осуществляют электронагрев силового элемента, который при достижении температуры «памяти» начинает сжиматься. Один конец рычага упирается в опору 4, другой перемещает ползун 6 вниз. Одновременно дополнительно нагружается механизм 9 возвратного хода и предварительного растяжения, верхняя часть штампа опускается вместе с ползуном — производится штамповка заготовки.

При охлаждении силовой элемент начинает возвращаться в первоначальное положение. Полный возврат силового элемента обеспечивается механизмом

возвратного хода и предварительного растяжения, направление воздействия которого на рычаг совпадает с направлением возвратного хода силового элемента 3. Для создания усилия возвратного хода необходимой величины производится предварительное нагружение силового элемента сжатием механизма 9 возвратного хода и предварительного растяжения с помощью механизма регулирования 2 положения силового элемента. В процессе работы прессы с помощью этого механизма также можно регулировать зазор между верхней и нижней частями штампа.

На основе эффекта Пельтье специалисты одной из японских фирм создали термомодуль, состоящий из трех пластин длиной 50 мм, две из которых спаяны. Между пластинами имеются две перемычки размерами 4,4x4,4 и 2,2x4,4 мм. Изменяя величину тока, подводимого к термомодулю, можно управлять градиентом температур ΔT между верхней и нижней поверхностями термо-модуля. Невозможно регулировать температуру только верхней поверхности модуля, т. к. при ее повышении возрастает температура всех-элементов термомодуля при сохранении температурного градиента между различными пластинами. На нижней поверхности модуля необходимо поддерживать определенную температуру за счет теплообмена. При температуре окружающей среды + 26,5°C с увеличением тока в пределах -1,0... +1,0 А температура его верхней поверхности повышается до +50°C.

С помощью термомодуля была создана схема управления температурой формозапоминающего сплава, в качестве которого использовали монокристаллические пластины сплава меди, алюминия и никеля, имеющего хорошую теплопроводность. На рис. 2.27 представлена схема микросхвата, привод которого осуществляется ТМД [66].

Схват, в конструкцию которого входят две плоские пружины, с помощью формозапоминающего сплава перемещает одну из плоских пружин, уменьшая зазор между ними, что позволяет зажимать небольшие детали. Для того, чтобы отпустить деталь, опускают плоскую пружину путем охлаждения формозапоминающего сплава. Для повышения быстродействия схвата необходимо быстро

изменять величину тока управления термомодулем. Управление величиной фиксирующего усилия микросхвата производится с помощью тензодатчиков, установленных на тарельчатых пружинах.

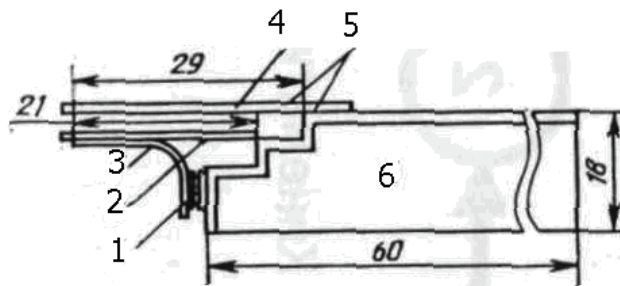


Рис. 2.27. Схема микросхвата: 1 – термомодуль; 2 – тарельчатая пружина; 3 – формозапоминающий сплав; 4 – плоская пружина; 5 – тензодатчик; 6 – медная пластина

Блок-схема системы управления микросхватом показана на рис. 2.28. В систему входят устройство управления усилием микросхвата и цепь управления приводом из формозапоминающего материала. Для регулирования величины усилия приходится определять все параметры термомодуля. При проектировании контроллера, управляющего усилием микросхвата, требуется создать динамический компенсатор. В приведенной схеме при возрастании фиксирующего усилия более 0,5 Н линейные компенсаторы не срабатывают, т. к. термомеханическая характеристика устройства и деформация формозапоминающего сплава имеют нелинейную зависимость от температуры.

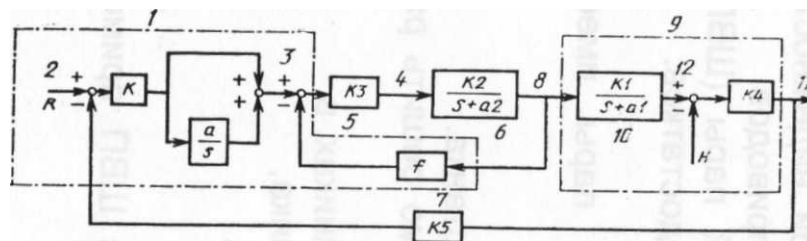


Рис. 2.28. Блок-схема устройства управления микросхватом:

1 – контроллер; 2 – сигнал; 3 – напряжение; 4 – ток; 5 – усилитель мощности; 6 – термомодуль; 7 – эталонный усилитель; 8 – температура; 9 – схват; 10 – формозапоминающий сплав; 11 – усилие зажима; 12 – прогиб плоской пружины

В результате анализа динамической и статической характеристик системы управления микросхватом установлено, что при шаге изменения величины усилия менее 0,025 Н время регулирования усилия величиной 0,5 Н составляет около 3 с.

Привод линейных перемещений [67] обеспечивает значительную величину перемещения и создает большее усилие по сравнению с аналогичными устройствами. Это достигается за счет того, что силовые элементы выполнены в виде двух кольцевых диафрагм из материала с термомеханической памятью формы, периферийные части которых закреплены в корпусе, снабженном проточками для них, а внутренние - закреплены на передающем элементе, который выполнен в виде вала с выступами для диафрагм. Одна диафрагма изготовлена предварительно деформированной в одну сторону, а другая - в противоположную. У каждой диафрагмы с одной стороны установлены электронагревательные элементы, а с противоположной - охлаждающие элементы, выполненные в виде трубок с хладагентом. В качестве варианта исполнения на торцах корпуса закреплены упругие защитные кожухи с отверстиями для подвода и отвода нагревающей среды в полости между этими кожухами и кольцевыми диафрагмами, а в самом корпусе выполнены отверстия для подвода и отвода хладагента в полость между самими кольцевыми диафрагмами.

Привод линейных перемещений (Рис 2.29) содержит корпус 1, силовые элементы 2 и 3 и передающий элемент 4, выполненный в виде вала. Силовые элементы 2 и 3 выполнены в виде кольцевых диафрагм из материала с термомеханической памятью формы. Их периферийные части 5, 6 закреплены в проточках 7 и 8 корпуса 1. Внутренние части 9 и 10 силовых элементов 2 и 3 закреплены на выступах 11 и 12 передающего элемента 4. Одна из кольцевых диафрагм 2 и 3 изготовлена предварительно деформированной в одну сторону, а другая - в противоположную. У каждой диафрагмы 2, 3 с одной стороны установлены электронагревательные элементы 13 и 14, а с противоположной - охлаждающие элементы 15 и 16, которые выполнены в виде трубок с хладагентом. При втором варианте исполнения на торцах 17 и 18 корпуса 1 закреплены упругие за-

щитные кожухи 19 и 20 с отверстиями 21 и 22 для подвода и отвода нагревающей среды (газ, жидкость) в полости 23 и 24 между этими кожухами 19, 20 и кольцевыми диафрагмами 2 и 3. В самом корпусе 1 выполнены отверстия 25 и 26 для подвода и отвода хладагента в полость 27 между самими кольцевыми диафрагмами 2 и 3. В этом варианте электронагревательные элементы 13 и 14 и охлаждающие элементы 15 и 16 не нужны. Передающий элемент 4 снабжен базовой поверхностью 28 для крепления перемещаемого объекта.

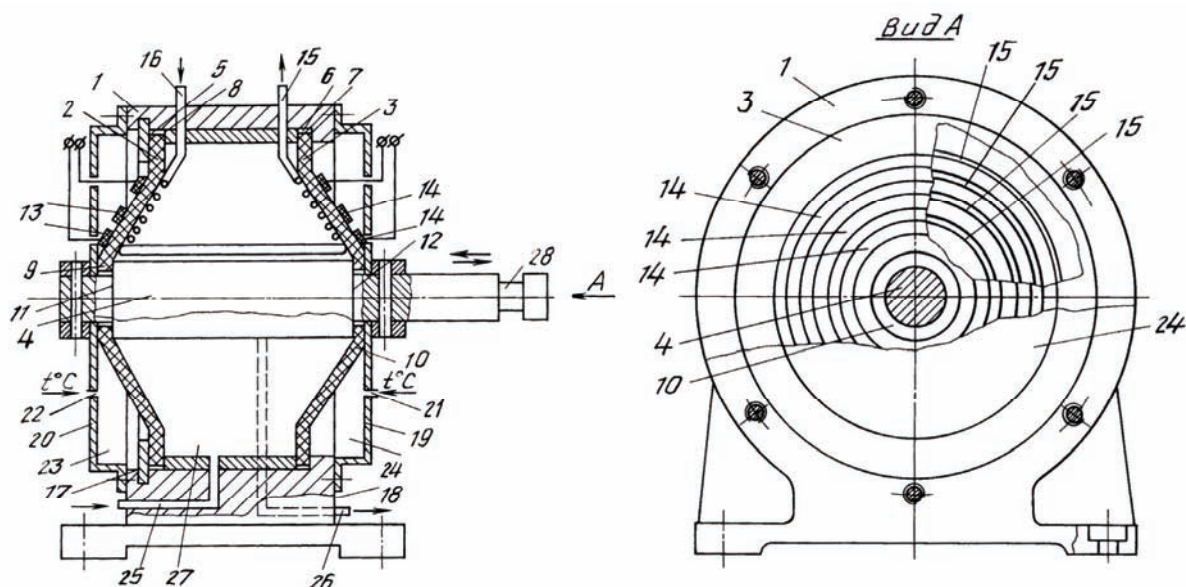


Рис. 2.29. Привод линейных перемещений

Привод линейных перемещений работает следующим образом. После включения электронагревательных элементов 13 и 14, сплав с памятью, из которого изготовлены диафрагмы 2 и 3, переходит в аустенитное состояние. В результате внутренние части диафрагм 9 и 10 будут перемещаться в одном направлении и передающий элемент 4 переместится влево или вправо. Величину перемещения передающего элемента 4 можно изменять величиной напряжения тока, передаваемого на электронагревательные элементы 13 и 14. Для совершения обратного перемещения передающего элемента 4 ток выключают и подают хладагент к охлаждающим элементам 15 и 16, при этом сплав с памятью перейдет из аустенитного состояния в мартенситное.

При втором варианте исполнения через отверстия 21 и 22 подают нагревающую среду (газ, жидкость) в полости 23 и 24, затем удаляют эту среду и подают

хладагент через отверстия 25 и 26 в полость 27. При этом варианте электронагревательные элементы 13 и 14 и охлаждающие элементы 15 и 16 не нужны.

В предложенном устройстве при толщине стенок диафрагм 2 и 3, равной 5 мм, и радиусе 35 мм усилие составит около 1000 кгс. А так как диафрагмы 2 и 3 могут деформироваться на 40%, при длине передающего элемента 4, равной 100 мм – перемещение составит 15 мм.

На рис.2.30 изображен привод с АЭ, работающим на продольную деформацию. Этот привод предназначен для переключения каналов антенны спутниковой связи и не является силовым, но в процессе эксплуатации должен обеспечить 10^5 циклов срабатывания.

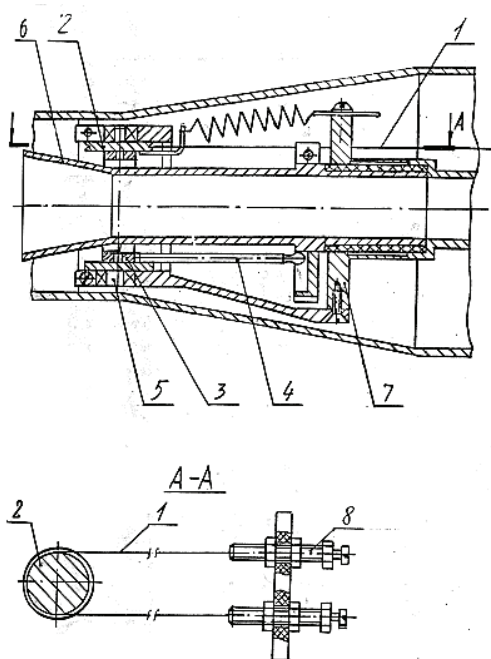


Рис. 2.30. Привод для переключения каналов спутниковой антенны

Собственно термомеханический привод выполнен по следующей схеме. Блок 2, через который проходит проволоочный элемент из сплава с памятью 1, жестко связан с кольцом 3, на котором, в свою очередь, закреплена кулиса 4. При поочередном нагреве одного из концов проволоки блок с кольцом поворачивается относительно оси 5 на угол $\pm 22,5^\circ$, вращая с помощью кулисы волновод 6 относительно корпуса 7 соответственно на угол $\pm 45^\circ$. В каждом положении

волновод фиксируется с помощью специальных фиксаторов. Максимальное усилие сопротивления в проволоке - 15 Н.

Так как привод является многоцикловым, размеры его поперечного сечения, исходная деформация и деформация восстановления должны выбираться с учетом диаграммы работоспособности материала при термоциклировании. Для применяемой марки сплава при величине исходной деформации $\varepsilon_{и} = 4\%$ рекомендуется $\sigma_c = 60$ МПа. Исходя из этого был выбран диаметр проволоки 0,6 мм. Принимая деформацию восстановления равной 3 %, получаем необходимую длину проволоки равную 240 мм. Предварительное натяжение проволоки и подвод питания осуществляется с помощью устройства 8. Перед установкой в конструкцию активный элемент подвергался десятикратному термоциклированию под нагрузкой.

Изготовленный образец механизма был подвергнут испытанию на термоциклирование в климатической камере в условиях пониженных и повышенных температур. После 10 циклов механизм сохранил свою работоспособность. При времени срабатывания I с потребляемая мощность составляла примерно 40 Вт.

Применение термомеханического привода позволило существенно снизить массу и габариты по сравнению с электромеханическим аналогом. Так, масса термомеханического привода составила 95 г против 2,5 кг электромеханического. Следует отметить также более высокую надёжность термомеханического привода в условиях пониженных температур.

2.2.5. Термомеханические двигатели непрерывного действия

В термомеханических двигателях непрерывного действия используются те же типы АЭ, что и в предыдущих случаях. При этом их количество должно быть больше одного, но за одним исключением, когда АЭ выполняется в виде петли. Именно такая конструкция представлена на рис. 2.31 [31].

Тепловой двигатель, снабжён петлей 2 (или петлями) из сплава с памятью, насаженной на вал 1 и бобину 3. При помощи вала поз.1 осуществляется нагрев ленты путем прямого контакта до температуры выше A_k .

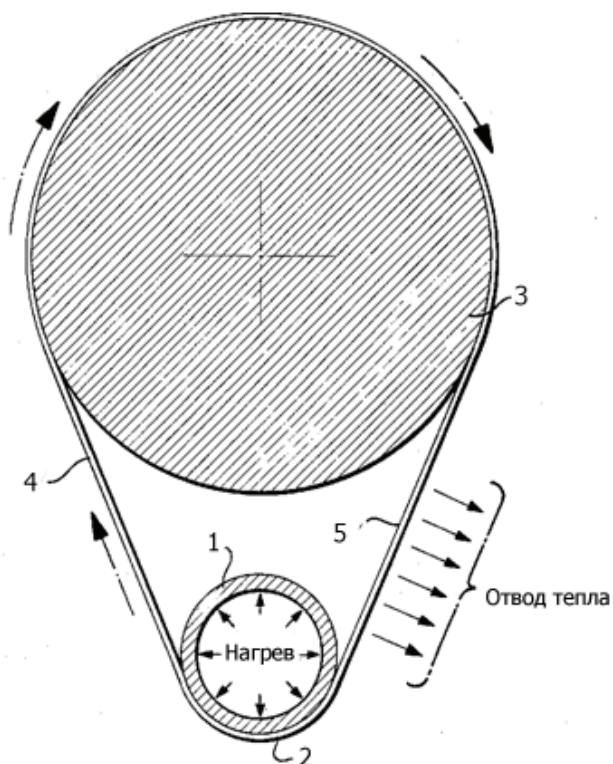


Рис 2.31. Петлевой термомеханический двигатель непрерывного действия.

Лента расширяется на участке 4 и вращает бобину 3, после чего охлаждается на участке 5 до температуры мартенситной фазы путем теплообмена с окружающей средой, и далее весь процесс непрерывно повторяется, что обеспечивает непрерывное движение ленты и соответственно непрерывное вращение бобины.

Петля нагреваемая и охлаждаемая таким образом создаёт силу, достаточную для осуществления вращения хотя бы одного из валов. Можно предположить, что нагрузочная способность такого двигателя не велика.

Двигатель непрерывного действия с распределительным устройством в виде коленвала показан на Рис 2.32 [32].

Рассматриваемый двигатель приводится в действие тремя активными элементами 5, 6 и 7 в виде цилиндрических пружин растяжения из сплава с памятью (нитинол 55) Нагрев и охлаждение активных элементов осуществляется с помощью подачи горячей/холодной жидкости в камеры 8, 9 и 10. Схема управ-

ления подобрана таким образом, что режим подачи холодной и горячей жидкости в камеры соответствует активации либо пружин 5 и 7, либо пружины 6.

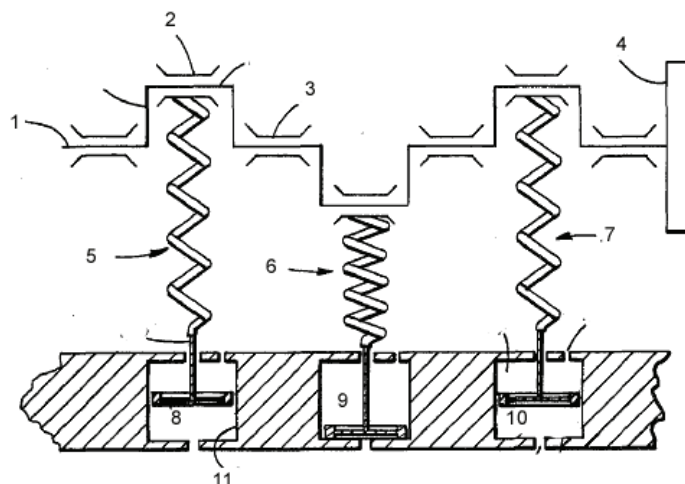


Рис 2.32. Двигатель с распределительным устройством в виде коленвала

Активированные активные элементы воздействуют на коленчатый вал 1, спроектированный таким образом, что он возвращает в исходное положение неактивную пружину и освобождает ее камеру от жидкости. Для обеспечения равномерности вращения вала и общей инерционности системы на вал применён маховик 4.

Термомеханический двигатель, использующий тепловую энергию жидкости (Рис 2.33), как и предыдущий, построен по схеме с применением распределительного устройства в виде коленвала [33].

Для работы такого двигателя необходимо два источника с жидкостью – горячей и холодной. Горячая жидкость подается в трубку 6 и, минуя стакан поршневой системы 4, попадает в распределительную трубку 3, причем клапаны 2 предотвращают просачивание жидкости куда-либо еще. Активный элемент 1, представляющий собой набор из тарельчатых пружин, нагревается и через механическую передачу осуществляет поворот коленчатого вала 8 на 180 градусов. Коленчатый вал, связанный с поршневыми системами 4 и 5, обеспечивает забор горячей жидкости в стакан поршневой системы 4 и одновременное выталкивание холодной жидкости из стакана поршневой системы 5. Холодная

жидкость по трубке устремляется в распределительную трубу 3 и охлаждает активный элемент. Активный элемент возвращается в начальное положение и снова поворачивает коленчатый вал 8. В стакан 5 набирается холодная жидкость, а из стакана 4 набранная ранее горячая жидкость выталкивается в распределительную трубку 3 и цикл повторяется. В результате описанных процессов, двигатель обеспечивает непрерывное вращение коленчатого вала 8.

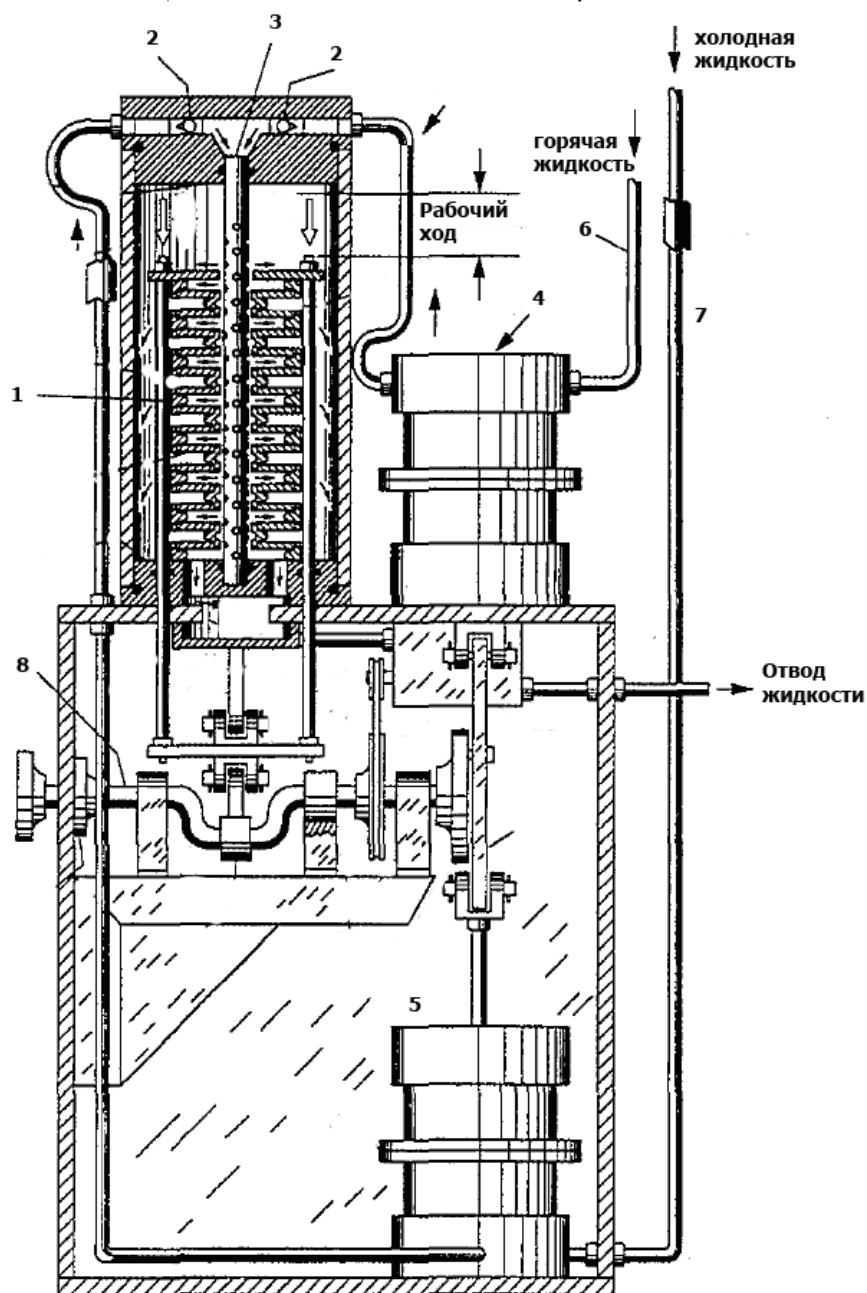


Рис 2.33. Термомеханический двигатель на основе сплавов с памятью

2.3. Конструкции термомеханических энергетических установок

2.3.1. Классификация термомеханических энергетических установок

Любой двигатель, в том числе и термомеханический, служит для преобразования какой-либо энергии (чаще всего электрической), подведённой к нему в механическую работу необходимую для выполнения определённых технологических операции машиной или устройством, в состав которого этот двигатель входит.

Назначением энергетической установки является получение энергии, которая в дальнейшем может быть использована различными исполнительными устройствами, в том числе и двигателями.

Отсюда, не смотря на большое сходство между ТМД и ТМЭУ, существенное различие в подходе к проектированию, требованиям к конструкции составных частей, в том числе и к АЭ, материалам, в том числе и к сплавам с памятью.

Первичным источником энергии для ТМЭУ является тепловая энергия. В качестве такого источника может быть использован энергетический потенциал внешних возобновляемых источников тепла, в частности, рекуперация тепла промышленных и технических объектов, а так же использования природных тепловых источников (солнечный свет, геотермальное тепло).

Поэтому большинство разработок по созданию ТЭМУ на основе нитинола связано с возможностью получить автономный источник электроэнергии в труднодоступных и малонаселенных районах страны, где не потребуется сооружения линия электропередачи и подвода топлива, так как нитинол может работать при небольших перепадах температур, в частности на геотермальных водах, горячих солевых источниках и т. д.

Известно большое количество конструктивных решений ТМЭУ. Все они, так или иначе, вписываются классификацию, приведённую на рис. 2.34. С другой стороны, теоретические исследования в области расчёта и проектирования весьма ограничены, чему в том числе, препятствует системный подход в решении проблемы. Поэтому в большинстве случаев процесс разработки ТМЭУ носит эмпирический характер, приводящий к принятию неоптимальных решений

в процессе проектирования и появлению механизмов, обладающих низкими функциональными характеристиками.

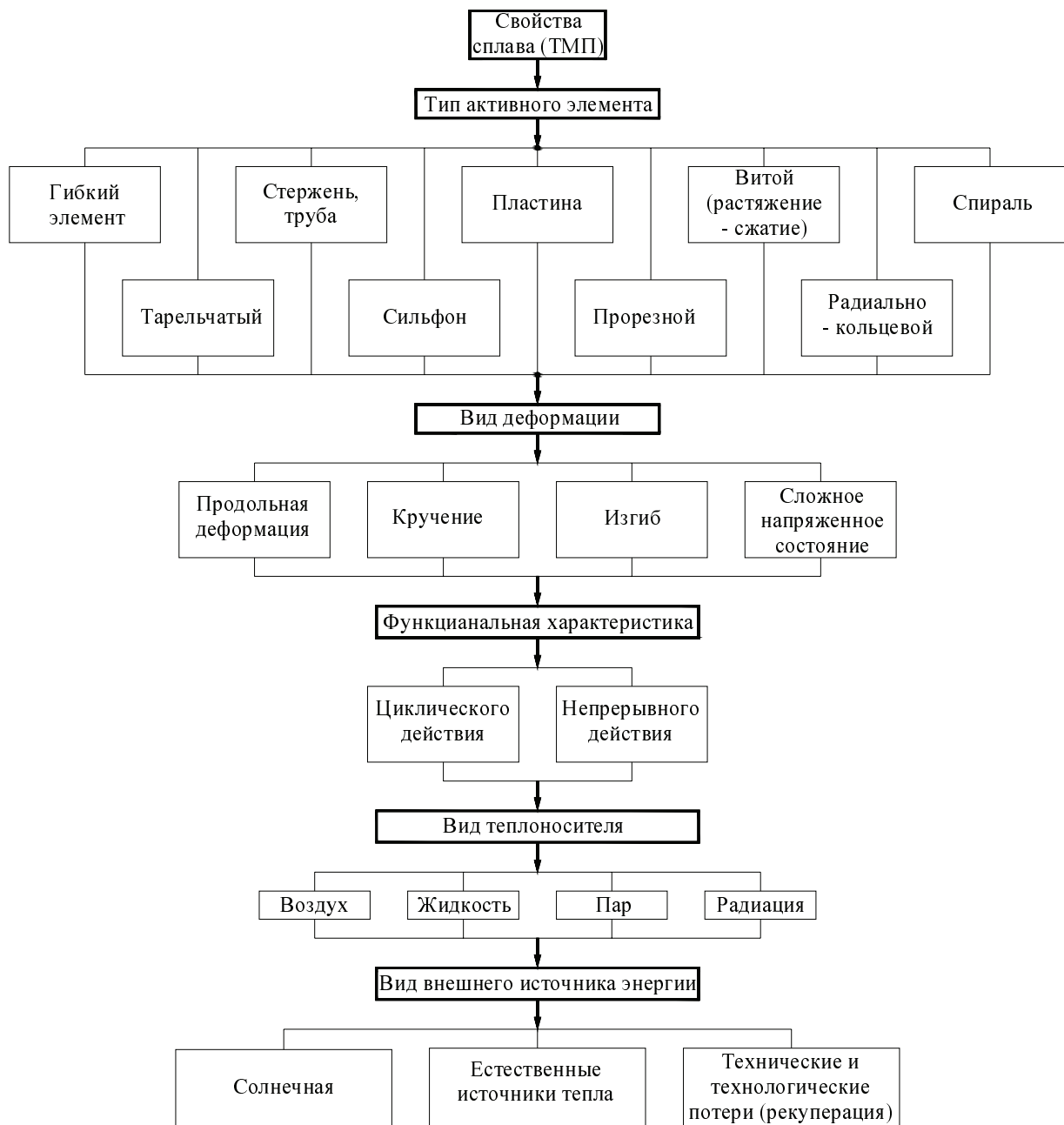


Рис. 2.34. Классификация ТМЭУ

2.3.2. Термомеханические энергетические установки циклического действия

Энергетическая установка [34] представленная на рис. 2.35. преобразует солнечную энергию в механическую. Механическая энергия снимается с шестерни

5. Вращение шестерни 5 происходит за счет неуравновешенных сил в точке механического зацепления шестерни 5 и активного элемента 2. Неуравновешенные силы появляются вследствие разности напряжений в нагретых и охлажденных частях активного элемента 2. Активный элемент выполнен в форме замкнутого гибкого элемента, имеет волнообразную форму в профиле (рис. 2.36.) и подвергается сложнапряженным деформациям. Нагрев активного элемента происходит за счет солнечной радиации, а охлаждение за счет конвективного теплообмена с окружающей средой.

Энергетическая установка состоит из элемента 1 и шестерни 5, которые установлены в корпус 6. В верхней части корпуса 6 предусмотрено отверстие для прохождения солнечных лучей, которые в последствие нагревают часть элемента 1.

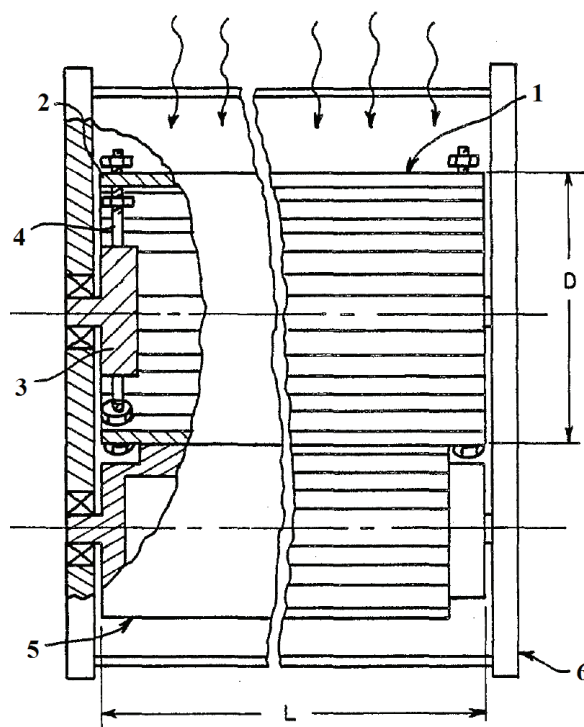


Рис. 2.35. ТМЭУ, использующая солнечную энергию

Элемент 1 состоит из активного элемента 2, вала 3 и спиц 4, с помощью которых удерживается труба 2 на валу 3. При переходе из мартенситного состояния в аустенитное расстояние между вершинами волн уменьшается, и профиль активного элемента 2 принимает форму, схожую с формой зубьев шестерни 5.

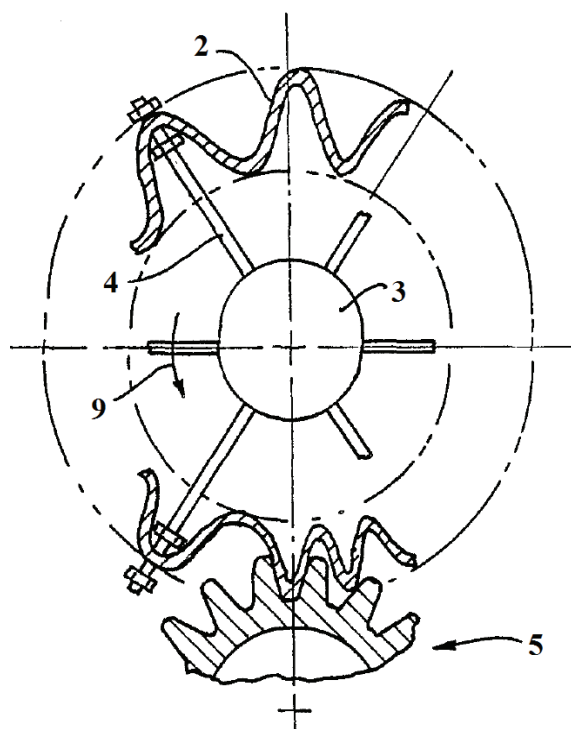


Рис. 2.36. Механическое зацепление активного элемента и шестерни

При попадании солнечного излучения на часть активного элемента 2 (область 7 см. рис. 2.37) сплав с памятью переходит из мартенситного состояния в аустенитное и нагретая часть элемента сжимается. В результате механического зацепления элемента 1 и шестерни 5, в точке касания (8) активного элемента 2 и шестерни 5 возникает неуравновешенная сила, которая заставляет вращать шестерню 5 в направлении 9. В процессе прохождения части активного элемента 2 через область 10 сплав с памятью переходит в мартенситное состояние и профиль трубы принимает изначальную волнообразную форму. После чего процесс повторяется.

Необходимым условием для работы установки является неуравновешенные силы в точке 8, которые создадутся при наличии угла φ (угол между направлением солнечных лучей 11 и вертикальной линией 12, которая проходит через центры активного элемента 2 и шестерни 5).

Мощность установки, изготовленной по вышеописанному принципу, составила порядка 1000 ватт. При этом диаметр трубы 2 равен 0,5 метра, а ее длина 1,5 метра.

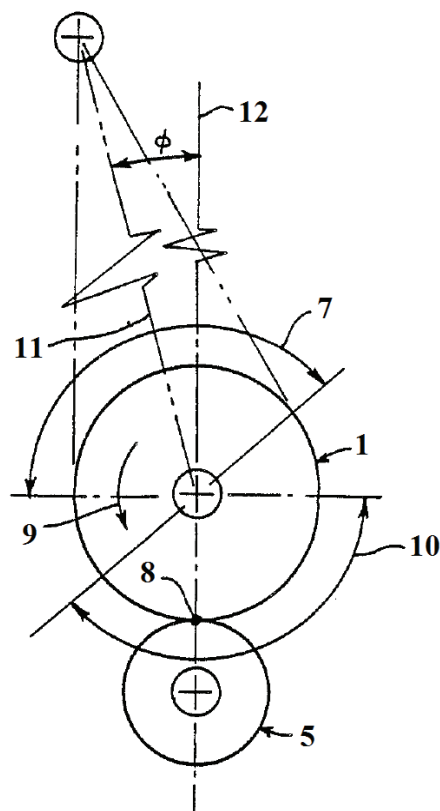


Рис. 2.37. Схема работы ЭУ

В энергетической установке, представленной на рис. 2.38, также в качестве первичного источника используется солнечная энергия [35]. Преобразование происходит за счет смещения под действием силы тяжести элемента 4, который опирается на активный элемент, попеременно прогибающийся противоположные части. Активный элемент выполнен в форме пластины, работающей на изгиб. Нагрев активного элемента осуществляется за счет солнечной радиации, охлаждение – конвективным теплообменом с окружающей средой.

Солнечные лучи проходят через линзу 2, фокусируются на распределительном элементе 5 и нагревают часть активного элемента 1. В результате нагрева часть материала с памятью переходит в аустенитное состояние, и часть активного элемента 1 прогибается. Вследствие этого, элемент 4, который опирается на элемент 1 подшипником 7, под действием силы тяжести смещается в сторону прогиба элемента 1. Элемент 4, смещаясь, сдвигает элемент 8, который свободно перемещается вдоль стержня 9. Элемент 8 через вертикальный стержень 10 соединен с заслонкой 11, которая смещаясь препятствует прохождению сол-

нечных лучей через линзу 2, и одновременно открывает для прохождения солнечных лучей линзу 3. Далее процесс повторяется, и элемент 4 движется в противоположную сторону. Элементу 4 через жестко прикреплен стержень 12 и плечо 13 соединен с колесом 14, с которого в последствии снимется механическая энергия.

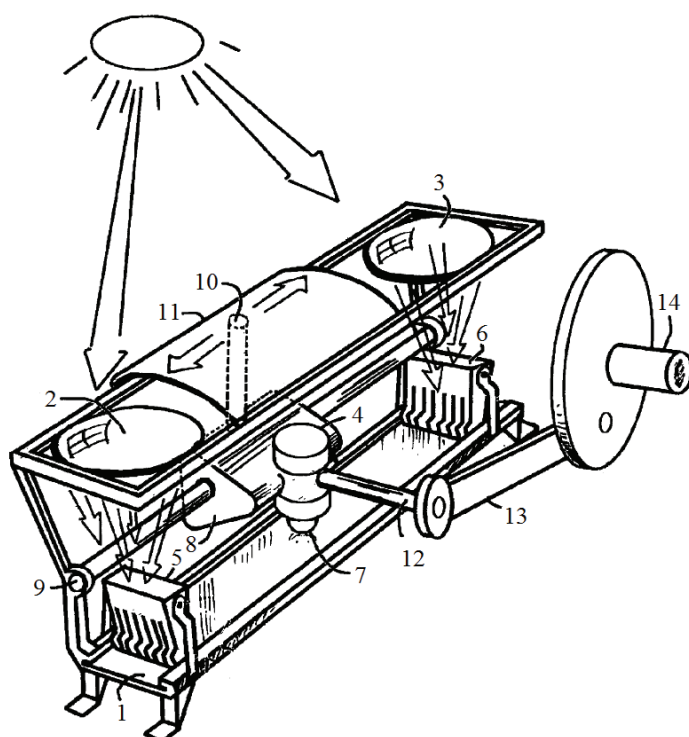


Рис. 2.38. Солнечная ТМЭУ

Время работы установки определяется продолжительностью светового дня и соответствующими погодными условиями.

Энергетическая установка (гелиомеханический преобразователь) представленная на рис. 2.39 преобразует солнечную энергию в механическую [36]. Установка наклоняется на определенный угол альфа и возвращается в первоначальное положение, совершая колебательное движение. Происходит это за счет смещения центра масс установки, который изменяется смещением дебалансных грузов 6. Дебалансные грузы 6 смещаются вследствие механического зацепления с активным элементом 12, на который в зависимости от наклона установки падает солнечное излучение. Активный элемент 12 имеет форму витого эле-

мента или трубы и совершает продольную деформацию (удлинение). Нагрев активного элемента происходит за счет солнечной радиации, а охлаждение за счет конвективного теплообмена с окружающей средой.

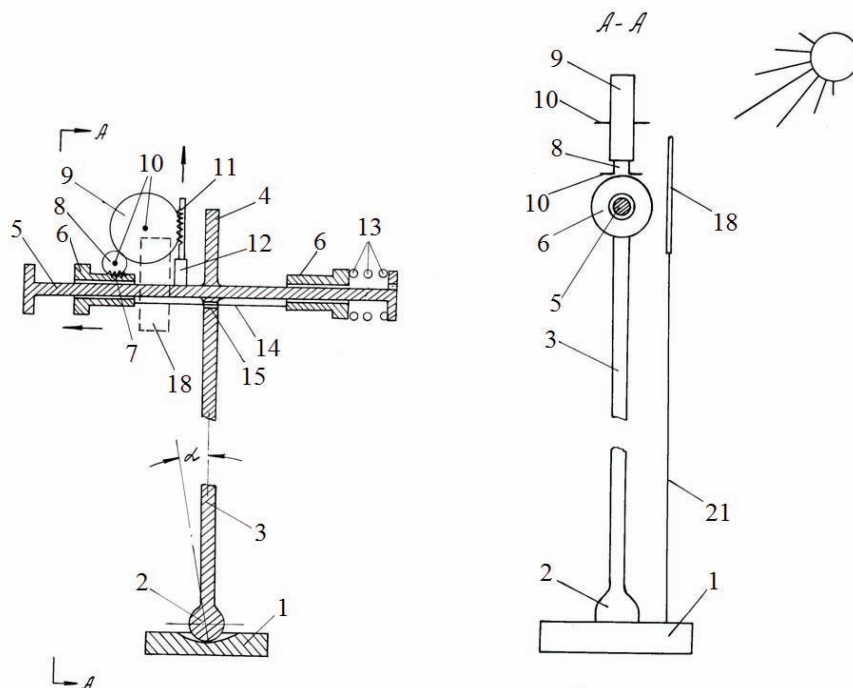


Рис. 2.39. Гелиомеханический преобразователь

Энергетическая установка состоит из неподвижного основания 1, на котором размещена ось вращения 2. Ротор преобразователя выполнен в виде крестовины, содержащей вертикальные стойки 3, 4 и горизонтальные плечи 5. На плечах 5 размещены дебалансные грузы 6, которые выполнены полыми и размещены с возможностью осевого перемещения вдоль плеч 5. На одном из дебалансных грузов 6 жестко закреплена зубчатая рейка 7, входящая в механическое зацепление зубчатой шестерней 9 через зубчатую шестерню 8. Шестерни 8 и 9 размещены с возможностью вращения на осях 10, установленных на опорах, связанных со стойкой 4. Зубчатая шестерня 9 входит в зацепление с зубчатой рейкой 4, которая жестко закреплена на тепловом рабочем элементе 12. Размещенный на втором плече дебалансный груз 6 с помощью пружины 13 связан с жестким упором, выполненным на конце плеча 5. Дебалансные грузы 6 связаны друг с другом с помощью тяги 14, проходящей через отверстие 15, выполненное в стойке

13. Перед крестовиной, параллельно ей, и с ориентацией на Юг размещен отражатель 18, укрепленный на стойке, жестко связанный с основанием 1.

Как только лучи солнца нагревают рабочий элемент 12 до температуры аустенитного превращения (участок 4-5-7), он восстанавливается до размера, которую имел до начала деформирования, в данном случае увеличится продольный размер, при этом перемещается жестко связанная с элементом 12 зубчатая рейка 11. Так как рейка 11 находится в зацеплении с зубчатой шестерней 9, то эта шестерня поворачивается вокруг оси 10 на определенный угол. Связанная с шестерней 9 зубчатая шестерня меньшего диаметра 8 повернется в этом случае на больший угол. Поворот зубчатой шестерни 8 вызывает перемещение связанной с ней зубчатой рейки 7, что вызывает перемещение дебалансного груза 6 вдоль плеча 5. При этом центр тяжести дебалансного груза смещает в сторону от стойки 3. Так как оба дебалансных груза связаны тягой 14, то перемещается вдоль плеча и второй подпружиненный дебалансный груз, но этот груз перемещается уже вдоль плеча к стойке 3. В результате смещения грузов 6 смещается центр тяжести гелиомеханического преобразователя и стойка 3 отклоняется от первоначального положения на угол α . При отклонении на угол α рабочий элемент 12 экранируется отражателем 18, солнечные лучи не попадают на рабочий элемент 12 и через некоторое время его температура уменьшается (становится равной температуре окружающей среды). Как только температура рабочего элемента 12 достигнет интервала температур мартенситного превращения (участок 1-2-3), элемент уменьшается в размере, и в результате упругости пружины 13 оба дебалансных груза сместятся вдоль плеч 5 и возвратятся в первоначальное положение. При этом изменится центр тяжести гелиомеханического преобразователя и стойка 3 возвратится в первоначальное положение. Еще раз рабочий элемент 12 освещается солнечными лучами, прогревается и далее все вышеописанное повторяется.

Работа гелиомеханического преобразователя может осуществляться в течение времени, когда лучи солнца смогут нагревать элемент 12 до температуры большей температуры конца аустенитных превращений.

Система отбора механической энергии от гелиомеханического преобразователя не рассматривается.

Необходимо отметить, что не выяснен вопрос, достаточно ли вырабатываемого энергетического потенциала для преодоления внутренних сил сопротивления в такой установке.

На рис. 2.40 показана другая гелиоустановка роторного типа [37]. Вращение ротора 1 происходит за счет разницы моментов от сил тяжести дебалансных грузов 2. Сумма моментов от грузов 2 со стороны освещенной солнцем больше чем сумма моментов от грузов со стороны, которая в тени. Это происходит за счет смещения активным элементом центра тяжести дебалансного груза от оси вращения ротора 1 при нагреве и охлаждении активного элемента. В состав дебалансного груза 2 входит активный элемент, который имеет форму витого элемента или трубы и работает на продольные деформации (удлинение). Нагрев активного элемента происходит за счет солнечной радиации, а охлаждение за счет конвективного теплообмена с окружающей средой.

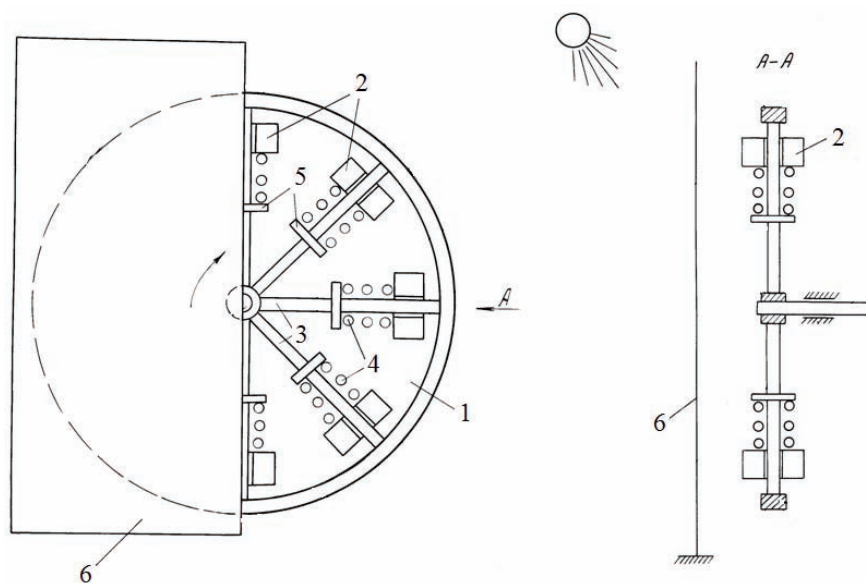


Рис. 2.40. Гелиоустановка роторного типа

Лучи солнца падают на часть поверхности ротора 1. Дебалансные грузы 2 установлены на спицах 3 и одной стороной связаны с пружинами 4, которые закреплены на жестких упорах 5. При нагреве элемента 2, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние (участок 4-5-7) и в результате увеличивается

линейный размер в радиальном направлении. Таким образом, при освещении солнцем грузов **2**, находящихся на освещенной солнцем половине ротора **1**, они смещаются и смещается их центр тяжести в направлении от оси вращения ротора **1**. Возникает вращательный момент и ротор начинает вращаться. Когда грузы **2** вместе с элементом памяти формы перемещаются в зону, экранированную от солнца экраном **6**, сплав переходит в мартенситное состояние (участок 1-2-3), и за счет упругости пружины **4** центр тяжести груза **2** становится ближе к оси ротора **1**.

Время работы гелиоустановки определяется продолжительностью светового дня и соответствующими погодными условиями. Для работы установки необходимо подобрать сплав с памятью таким образом, чтобы теплового излучения солнца было достаточно для обеспечения фазового перехода мартенсит - аустенит в сплаве с памятью и оценить получаемую полезную работу.

2.3.3. Термомеханические энергетические установки непрерывного действия

Одно из последних изобретений конструкции кривошипного нитинолового двигателя (ТМЭУ) показано на рис. 2.41 [38], а на рис. 2.42 и 2.43 соответственно показано размещение активных элементов кривошипной ТМЭУ и схема кривошипного механизма.

Вращение коленвала **12** осуществляется за счет возвратно – поступательного движения тяг **11**, которые движутся вследствие попеременного сжатия активных элементов **1** и пружины **19**. Активные элементы **1** попеременно опускаются в ванны с горячей **4** и холодной **5** жидкостью. При погружении в горячую жидкость сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и активные элементы сжимаются, а при погружении активных элементов в холодную жидкость сплав с памятью переходит в мартенситное состояние, и за счет силы упругости пружины активные элементы разжимаются. Активный элемент представляет собой гибкий элемент в форме проволоки и работает на продольную деформацию (сжатие). В качестве нагрева и охлаждения активного элемента выступает жидкость.

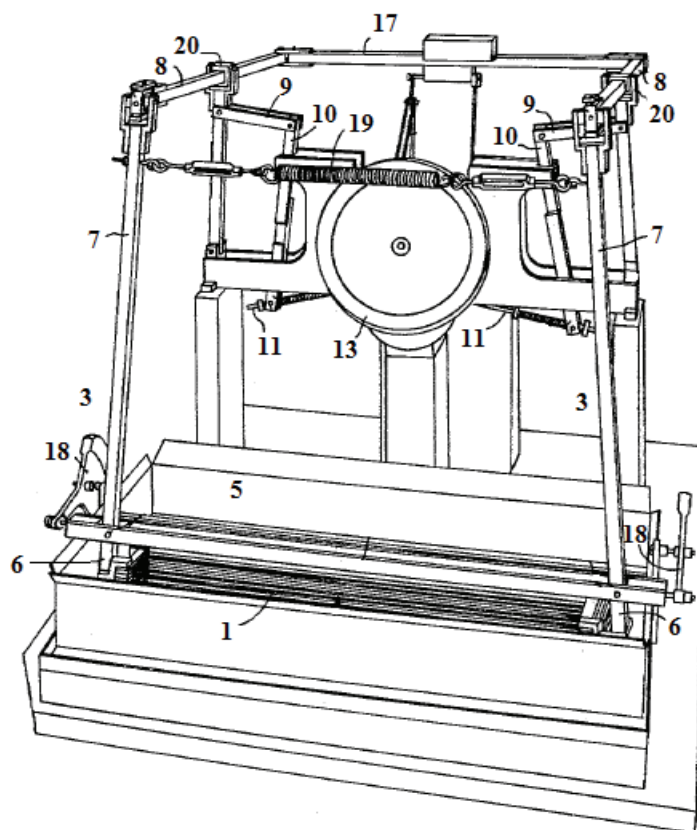


Рис. 2.41. ТМЭУ с кривошипом

Элементы поз. 1 устанавливаются в пазы держателя поз. 2, который расположен на конце силовых рычагов поз. 3. В основании двигателя размещаются ванна с горячей (позиция 4) и ванна с холодной (позиция 5) жидкостью.

При погружении элементов 1 в ванну с горячей жидкостью сплав с памятью переходит в аустенитное состояние, и проволока сжимается, сокращая расстояние между точками 6 силовых рычагов 3, за счет этого увеличивается расстояние между точками 7, вследствие этого увеличивается расстояние и между плечами 8. От плеч 8 с помощью связующего элемента 9 передается движение рычагу 10 так, что тяги 11, установленные на конце рычага 10 движутся на встречу друг другу, и другим концом соединены с коленвалом 12. С одной стороны коленвала 12 размещается маховик 13, накапливающий энергию для начала новой фазы, с другой стороны расположена коробка передач 14. С коленвала 12 вращательное движение через коробку передач 14 передается на кривошип 15. Кривошип 15 через складную петлю 16, опускает траверсу 17, изменяет поло-

жение силовых рычагов 8, опуская один их конец и поднимая другой. В результате элементы из сплава с памятью 1 поднимаются из ванны с горячей жидкостью.

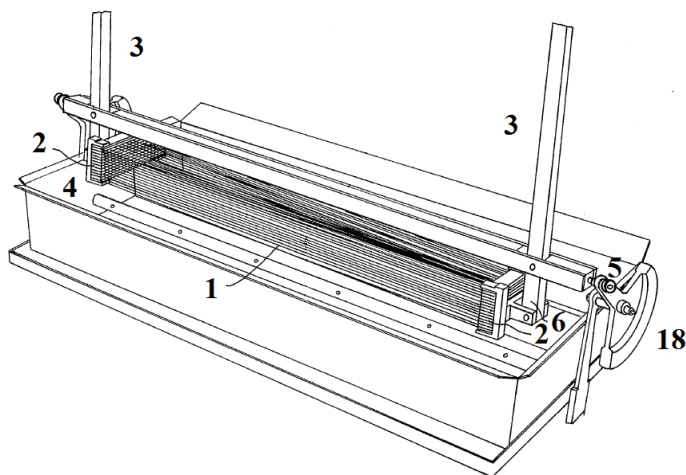


Рис. 2.42. Размещение активных элементов кривошипной ТМЭУ

За счет шпинделей с противовесом 18, элементы 1 после выхода из ванны с горячей жидкостью смещаются в сторону ванны с горячей жидкостью. А за счет дальнейшего вращения кривошипа 15 (посредством накопленной энергии маховика 13) элементы 1 опускаются в ванну с горячей жидкостью.

После погружения элементов 1 в ванну с холодной жидкостью сплав с памятью переходит в мартенситное состояние, элемент 1 удлиняется и концы силовых рычагов (7) за счет упругости пружины 19 сближаются. В результате шарниры 20, расположенные на плечах 8 тоже сближаются, смещая связующие звенья 9. Звенья 9, смещая плечи 10, воздействуют на тяги 11, и расстояние между тягами увеличивается.

Получаем, что когда элементы 1 опускается в ванну с горячей жидкостью 4, тяги 11 сближаются, а когда элементы 1 опускается в ванну с холодной жидкостью 5, тяги 11 удаляются друг от друга. Тем самым через коленвал 12 возвратно поступательное движение тяг 11 преобразуется во вращательное.

Источником тепла может служить солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери.

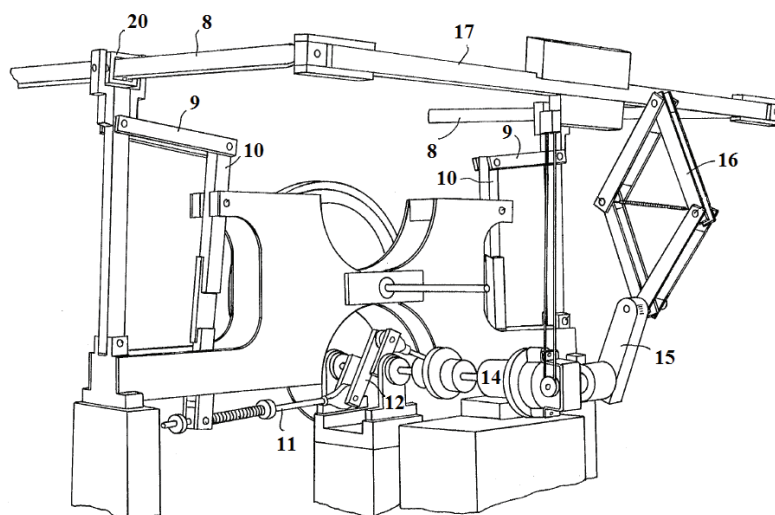


Рис. 2.43. Схема кривошипного механизма

В описании к патенту говорится, что данный двигатель является самым надежным первым тепловым двигателем, способным производить полезную и существенную работу.

Конструкция турбинной машины с применением нитинола, запатентованная в 1977 году приведена на рис. 2.44 [39]. Шкив 2 служит в качестве расширителя или турбины, и получает мощность от активного элемента 1, так как напряжение в активном элементе с горячей стороны 5 больше, чем напряжение с холодной стороны 4.

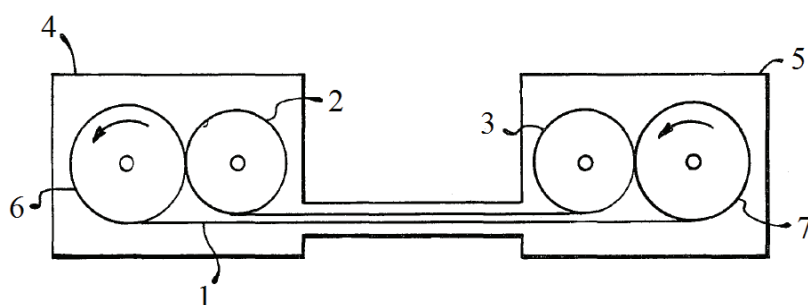


Рис. 2.44. Конструкция турбинной установки

Активный элемент выполнен в виде замкнутой гибкого элемента (проволока или лента) и работает на продольную деформацию. Активный элемент 1 направляется шкивами 2 и 3 через сосуды с холодной 4 и горячей 5 жидкостью, а затем через дифференциальные шкивы 6 и 7. При прохождении части АЭ 1 че-

рез сосуд с горячей жидкостью, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и АЭ 1 сжимается, а при попадании части АЭ 1 в холодный сосуд, сплав с памятью переходит в мартенситное состояние и АЭ 1 принимает первоначальную форму. Шкив-расширитель (2) механически соединен с компрессором (3). Работа, производимая АЭ 1 на расширитель (2), превышает работу, затрачиваемую компрессором (3) на обслуживание АЭ 1, что дает возможность получать чистый выход работы. В рассматриваемой установке теплоносителем является жидкость, источником тепла может являться солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери. По грубым оценкам при температуре горячей жидкости 5, равной температуре кипения, и температуре холодной жидкости 4, равной температуре замерзанию, данная установка может достигать К.П.Д. до 25% цикла Карно.

На рисунке 2.45. показана ещё одна энергетическая установка турбинного типа [40]. Механическая энергия снимается с вращающихся блоков 2 и 3, которые вращает одетый на них активный элемент 1. Вращение активного элемента 1 происходит за счет разности напряжений в элементе, которое создается вследствие нагрева одной части и охлаждения другой части активного элемента 1. Активный элемент 1 выполнен в виде замкнутого гибкого элемента (провода или ленты) и работает на продольную деформацию. Нагрев активного элемента осуществляется с помощью жидкости, а охлаждение за счет конвективного теплообмена с окружающей средой.

Во время прохождения элемента 1 через жидкость 4, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и часть активного элемента сжимается (6), создавая напряжение большее чем в другой части пояса. После выхода активного элемента 1 из жидкости, сплав с памятью переходит в мартенситное состояние и активный элемент выпрямляется. Блоки 2, 3 устанавливаются в корпус 5 на определенном расстоянии.

Источником тепла может служить солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери.

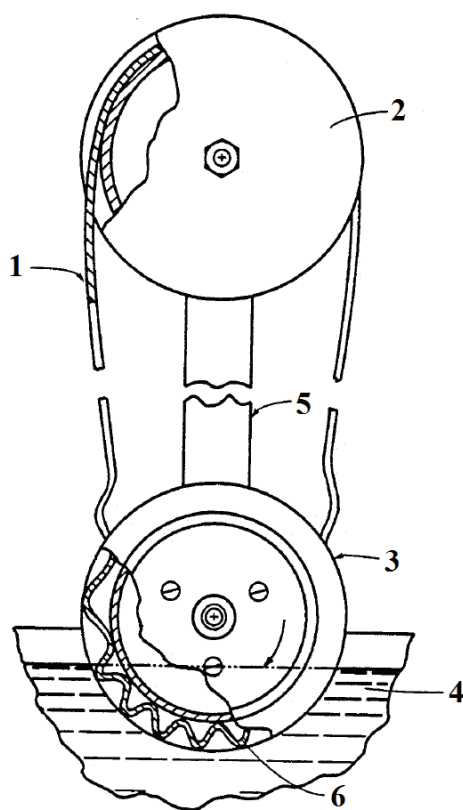


Рис. 2.45. ТМЭУ Турбинного типа

Принцип действия турбинной машины [41], изображенной на рис. 2.46, заключается в следующем: части активных элементов 1 и 2 при помощи блоков последовательно опускаются в сосуды с горячей и холодной жидкостями, создавая разницу напряжений, которая вращает блоки, создавая ведущую тягу. Активные элементы 1 и 2 выполнены в виде замкнутого гибкого элемента (провода) и работают на продольную деформацию, и одеты на блоки 7, 10, 11, 12, 8, 9, 13, 14 соответственно. Элементы 1, 2 находятся в тепловом контакте с тепловыми источниками (ванны с горячей водой 5 и 6) и теплоотводами (ванны с холодной водой 3 и 4).

При погружении части элемента 1 в горячую жидкость 5, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние, а при погружении противоположной части элемента в холодную жидкость 3 сплав переходит в мартенситное состояние. При переходе в аустенитное состоянии элемент сжимается, а при переходе в мартенситное состояние принимает исходную длину. В результате, при прохождении части элемента через горячую жидкость создается напряжение боль-

шее, чем напряжение при прохождении через холодную жидкость, и элемент 1 перемещаясь, вращает блок 7, создавая ведущую тягу. Аналогичным образом работает элемент 2, вращая блок 8.

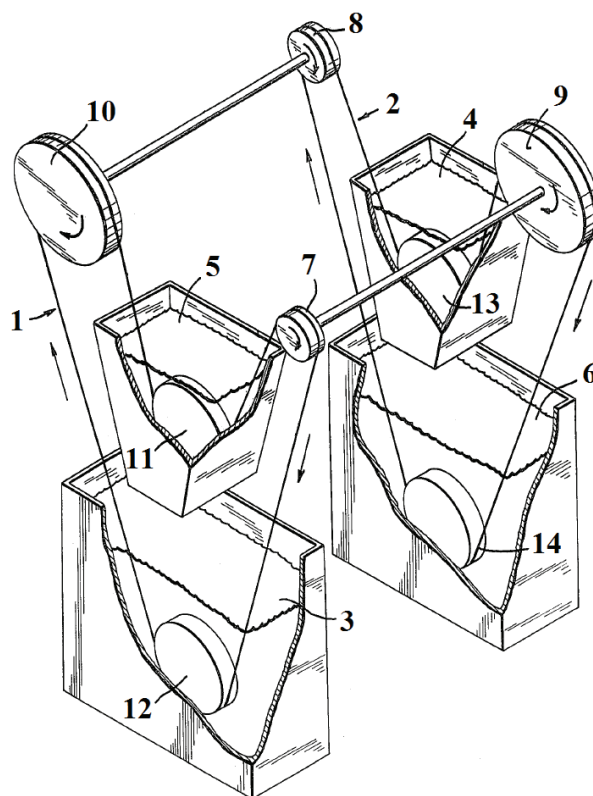


Рис. 2.46. Энергетическая установка турбинного типа

Блоки между собой соединены, так что ведущая тяга первого нитинолового элемента соединена с ведомой тягой второго нитинолового элемента (блоки 7-9), ведущая тяга второго нитинолового элемента механически соединена с ведомой тягой первого нитинолового элемента (блоки 8-10). Направляющие блоки 11, 12, 13, 14 служат для нагревания и охлаждения элементов 1 и 2 в ваннах с холодной и горячей жидкостями. Спаренные нитиноловые элементы образуют термотурбинный двигатель, в котором все нитиноловые элементы лежат в одной плоскости, а двигатель состоит из множества таких пар.

Теплоносителем, в рассматриваемой установке, является жидкость, источником тепла может служить солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери.

Первая хорошо известная рабочая тепловая машина была построена Бэнксом в 1973 году [42], рисунок 2.47. Работа ТМЭУ заключается в следующем, активные элементы 1, которые установлены между большим ведомым кольцом 2 и неподвижным кривошипом 3, поочередно погружаясь в сектора с холодной и горячей жидкостью, толкают кривошип 3, который вращает колесо 2.

Активный элемент выполнен в виде стержня, который работает на изгиб. Сектора с холодной и горячей жидкостью размещаются в ванне 4 и разделяются наклонными плоскостями 5. При попадании в сектор нагрева, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и активный элемент принимает высокотемпературную (прямую) форму, а при охлаждении материал с памятью переходит в мартенситное состояние и элемент принимает “U”-образную форму. Работа, требуемая для сгибания стержней и преодоления трения, меньше, чем работа, производимая во время выпрямления, поэтому кольцо вращается.

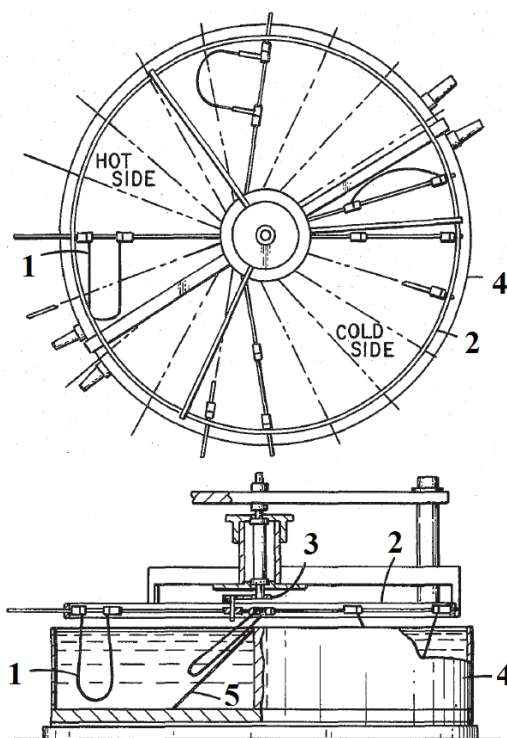


Рис. 2.47. Принципиальная схема машины Бэнкса

В рассматриваемой ТМЭУ теплоносителем является жидкость, источником тепла может являться солнечная радиация, естественные источники тепла или

технические (технологические) потери. Машина которая состояла из 20 нити-ноловых стержней диаметром 1,2 мм, при разности температур 23 К развила скорость вращения 69 об/мин с выходной мощностью около 0,23 Вт. Машина совершила более, чем 108 циклов без признаков появления усталости или выходов из строя по причине износа.

Еще один вариант кривошипной конструкции представляет собой машину, запатентованную в 1977 году и показанную на рис. 2.48 [43]. В этой машине активные элементы 1 соединены между вращающейся центральной втулкой 2 и кулачками 3 через рычаги 4, скользящими по синусоидально искривленной кромке 5 (рис. 2.49).

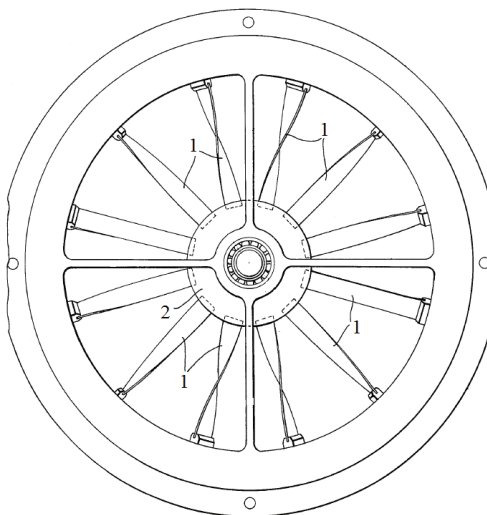


Рис. 2.48. Конструкция кривошипной машины

Активные элементы напрягаются (изгибаются) в холодном квадранте и производят работу во время распрямления в горячем квадранте. Активный элемент выполнен в форме пластины, и одновременно работает на изгиб и кручение. Теплоносителем является жидкость, источником тепла может являться солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери.

Машины этого типа при максимальной скорости вращения порядка 70 об./мин. выдавали 10 - 20 ватт мощности.

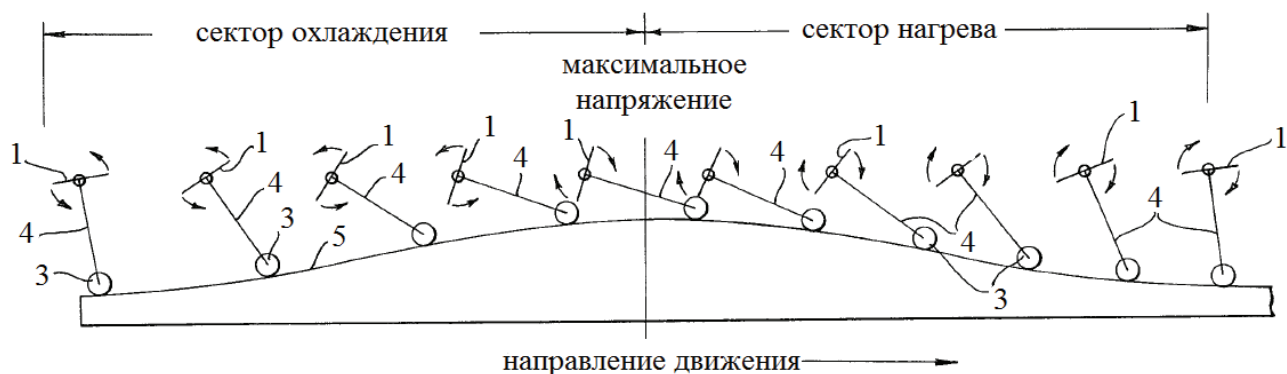


Рис. 2.49. Движение ролика по синусоидально искривленной кромке

Конструкция возвратно-поступательной кривошипной машины с нитинолом изображённая на рис. 2.50 запатентована в 1978 году [44]. Вращение коленвала осуществляется за счет прикрепленных к нему активных элементов, которые попеременно сжимаются, за счет подвода к ним, через распредел, горячего или холодного теплоносителя. В роли теплоносителя может выступать воздух, пар и жидкость.

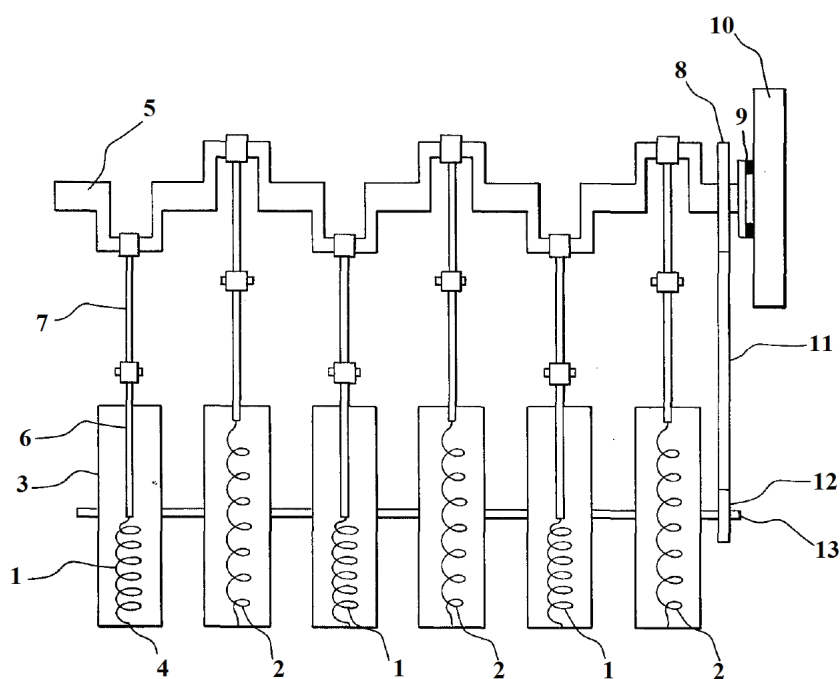


Рис. 2.50. Возвратно-поступательная кривошипная машина

В установке применяются витые элементы (пружины) 1 и 2, работающие на сжатие. АЭ устанавливаются в закрытые цилиндры 3, через которые проходят горячие и холодные воздух. Витые элементы одним концом закреплены к основанию цилиндра в точке 4, другим концом соединены с коленвалом 5 через шарнирно-соединенные стержни 6 и 7.

На коленвале 5 размещен блок 8, фрикционное колесо 9 и маховик 10. Блок 12 через ремень 11 и блок 12 соединен с распредвалом 13. Распредвал управляет нагнетанием горячего и холодного воздуха (жидкости) в цилиндры 3. В одном положении распредвала горячий воздух нагревает пружины 2, а холодный охлаждает спиральные кольца 1. В результате нагрева спирального кольца 2, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние, кольцо 2 сжимаются и через соединительные стержни 6, 7 проворачивают коленвал 5. Одновременно спиральные кольца 1 охлаждаются, сплав с памятью переходит в мартенситное состояние, и кольца 1, за счет вращения коленвала через связующие стержни 6 и 7, удлиняются. Вращательное движение с коленвала 5 через ременную передачу (8-11-12) передается на распредвал 13, который перераспределяет проступание воздуха в цилиндрах, и в итоге на спиральные кольца 1 подается холодный воздух, а на спиральные кольца 2 подается горячий воздух. Цикл повторяется. Маховик 10 расположенный на колесе 5 накапливает энергию для начала новой фазы.

Источником тепла для рассматриваемой установки может служить солнечная радиация, естественные источники тепла или технические (технологические) потери.

Для примера, двенадцатиступенчатый двигатель, конструкция которого была изложена, по заявлению авторов, работая при температурах 137°C и 70°C, достиг К.П.Д. порядка 28.3% цикла Карно.

На рис. 2.51 показан модуль ТМЭУ роторного типа, работающей в двух средах: горячая вода (нагрев) – воздух (охлаждение).

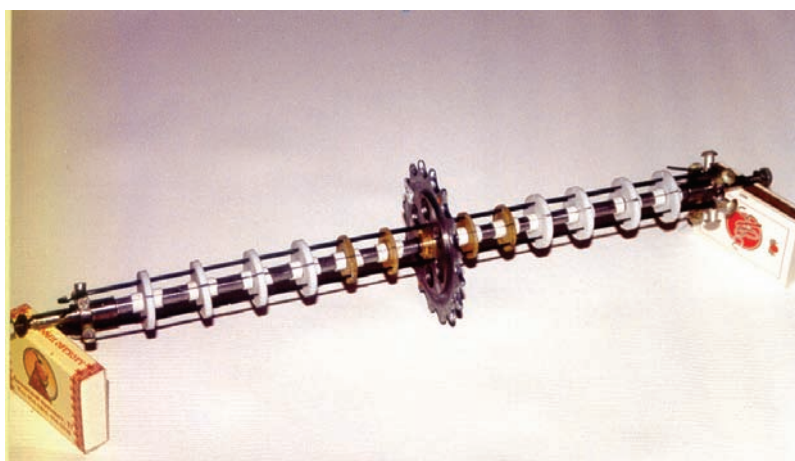


Рис. 2.51. Модуль ТМЭУ роторного типа

Установка представляет собой колесо, на половину погружённое в воду. По ободу колеса устанавливаются шесть или более модулей, оси которых параллельны оси колеса. На выходе из воды шестерня каждого модуля поочередно входит в зацепление с зубчатым сектором статора. При вращении шестерни модуля АЭ, выполненные в виде ленты из аморфного сплава никелида титана толщиной 40 мк, растягиваются, получая требуемую исходную деформацию. Пройдя половину оборота относительно оси ротора модуль попадает в ёмкость с водой и входит в зацепление со вторым зубчатым сектором статора, создавая полезный момент на валу ротора. При диаметре ротора равном 1,0 м такая установка способна развивать мощность порядка 400 Вт.

Аналогичная машина роторного типа приведена на рис. 2.52. [48] Шкив 1, устанавливается над резервуаром с жидкостью 2. Бесконечная лента 3 перекинута через блок 1 и механически подвергается воздействию горячего 5 и холодного 6 резервуаров. Лента 3 изготовлена из материала с памятью, к ленте через равные интервалы крепятся массы 4. При вращении шестерни модуля АЭ, выполненные в виде ленты из аморфного сплава никелида титана толщиной 40 мк, растягиваются, получая требуемую исходную деформацию. Пройдя половину оборота относительно оси ротора модуль попадает в ёмкость с водой и входит в зацепление со вторым зубчатым сектором статора, создавая полезный момент на валу ротора. При диаметре ротора равном 1,0 м такая установка способна развивать мощность порядка 400 Вт.

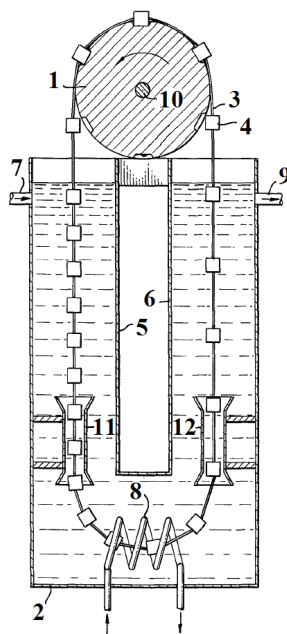


Рис. 2.52. Машина Кори

Горячая жидкость поступает резервуар 5 через трубу 7, отбор тепла производится с помощью спиральной трубки 8, в которую подается охлаждающее вещество, холодная вода вытекает из резервуара 6 через трубу 9. Прикрепленные

к ленте массы 4 взаимодействуют с внешними гравитационными полями. Массы двигаются под воздействием гравитационного поля от источника нагрева и против поля от участка отбора тепла. При попадании части ленты 3 в горячий участок, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и сжимается, а при попадании в холодный участок сплав переходит в мартенситное состояние и растягивается. В результате плотность масс выше на участке ленты, движущейся с полем по сравнению с участком, движущимся против поля. Для правильного движения масс 4 предусмотрены направляющие 11 и 12. В результате этого возникает сила, которая движет ленту через шкив 1, насаженный на вал отбора мощности 10. Такая схема построения установки видимо позволяет получить на выходе небольшую мощность.

2.4. Конструкции термомеханических соединений

Механические соединения являются одними из наиболее ответственных узлов в конструкциях летательных аппаратов (ЛА), космической технике, станкостроении и в других областях, во многом определяющих работоспособность и надежность устройств, в состав которых они входят. В частности, заклепочные и болтовые крепления являются основным способом соединения при изготовлении планера ЛА. Так, например, количество заклепочных соединений на изделиях тяжелого класса таких, как В-747, DC-10, ИЛ-86 и др., достигает 1,5... 2 МЛН. штук. Большое количество механических соединений применяется в ЛА нового типа таких, как "Буран".

В процессе эксплуатации соединения подвергаются интенсивным динамическим и тепловым воздействиям, что может привести к снижению надежности в основном в результате ослабления натяга. Поэтому повышение надёжности, технологичности при одновременном снижении веса механических соединений является важной задачей.

В исследованиях, направленных на совершенствование механического крепежа можно отметить два направления.

1. Разработка новых материалов для крепежа. Основной задаче при этом является исключение контактной коррозии и повышение прочности самих кре-

пёжных деталей.

2. Разработка новых конструкций крепежа. Главной задачей этого направления является создание таких конструкций крепежа, которые позволяют снизить трудоёмкость выполнения соединений и добиться таких осевых и радиальных натягов, которые бы обеспечили прочность соединения в условиях воздействия эксплуатационных дестабилизирующих факторов.

С целью снижения веса конструкций в последнее время всё шире применяются композиционные материалы (КМ). При соединении деталей из КМ, армированным графитовым волокном, основной проблемой, связанной с материалами является контактная коррозия. Почти все материалы кроме титана подвергаются коррозии при контакте с графитом. Кроме того, при постановке обычных сплошных заклёпок происходит разрушение деталей из-за большого радиального натяга.

Указанные проблемы, связанные как с коррозионной стойкостью, так и с прочностью соединения при одновременном снижении веса могут быть решены путем выполнения крепежа из сплавов с памятью на основе никелида титана.

Известно большое количество видов механических соединений, выполненных из сплавов с ТМП. К таким соединениям относятся заклёпки, болты, элементы контровки болтовых соединений, соединительные муфты пневмо- или гидропривода и т.д. Описание разнообразных термомеханических соединений имеется в большом количестве патентов и других публикаций. На рис. 3.35 приведена классификация термомеханических соединений.

Не зависимо от типа соединения используемые свойства сплава определяются, во-первых, технологией постановки и, во-вторых, собственно процессом эксплуатации. Этот процесс выглядит следующим образом. Вначале деталь механически деформируют, задавая ей исходную деформацию (форму). Эта операция производится при температуре $t < M_k$, причем $M_k < t_s^{min}$. При этом реализуется свойство «эффект памяти формы». Затем деталь устанавливается в соединение при температуре, лежащей в пределах интервала эксплуатационных температур. Интервал аустенитных превращений должен лежать ниже t_s^{min} . По-

этому при нагреве происходит восстановление исходной деформации и создаётся натяг в соединении. При этом реализуется свойство «термомеханическая память».

Из сказанного ясно, что в процессе эксплуатации выполняется условие $A_k > t_{\text{max}}$ и, следовательно реализуется свойство «сверхупругость».

На рис. 2.53 приведена классификация термомеханических соединений. В её основу положены следующие основные признаки: вид соединения, тип соединения, материал соединяемых деталей и требования, связанные с условиями эксплуатации.

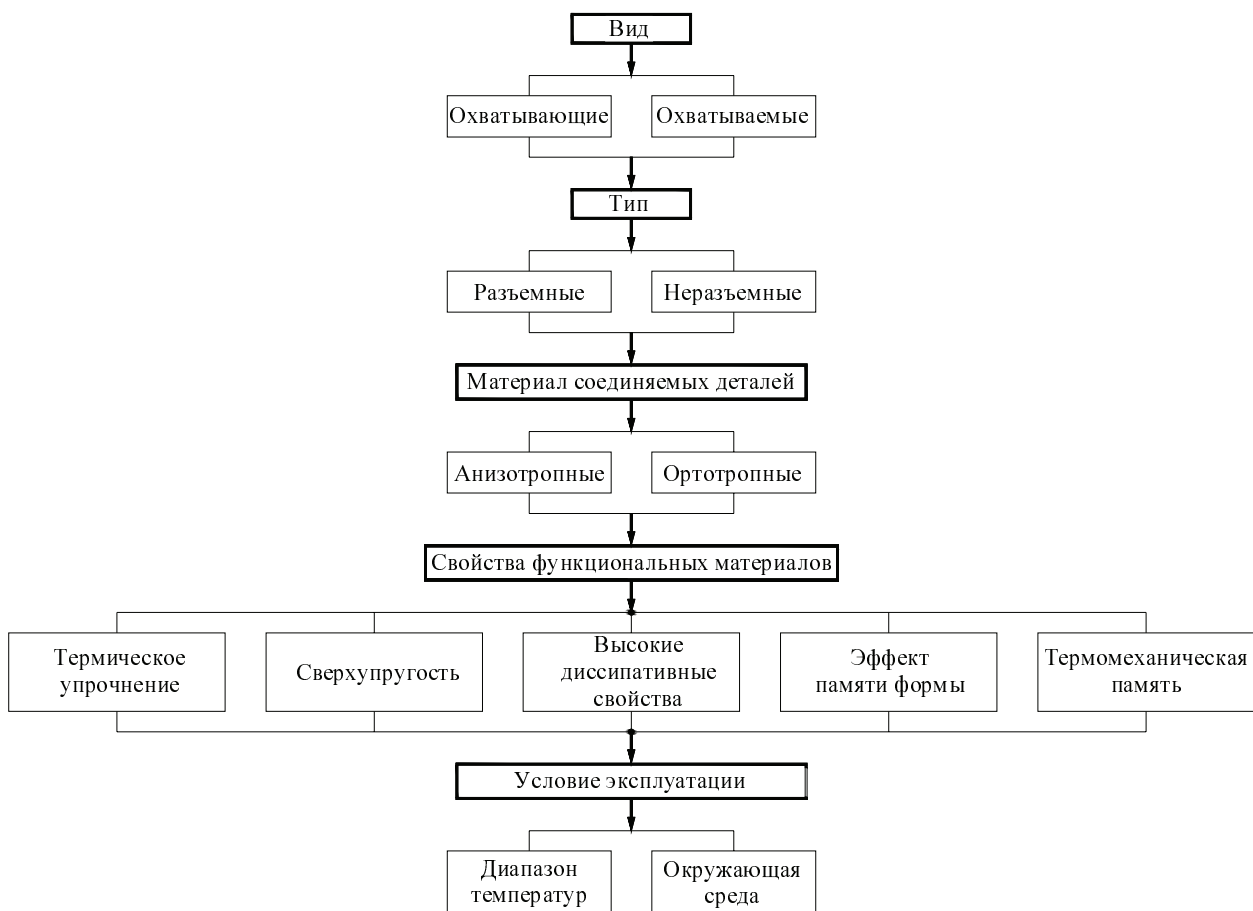


Рис. 2.53. Классификация термомеханических соединений

Термомеханические соединения трубопроводов относятся к числу наиболее широко известных примеров конструкционного применения "эффекта памяти". С 1972 по 1982 гг. фирма "Райхем" (США) поставила для авиации более 300 тыс. штук ТМС, известных за рубежом под названием "Крайофит". Соединения

успешно применяются в авиастроении, надводных и подводных кораблях, космонавтике, причем качество соединений таково, что не наблюдалось ни одного случая отказа или ослабления герметичности. Английская фирма "Делта Мемори Метал" успешно устанавливает ТМС на атомных подводных лодках и надводных кораблях Британских ВМС. Порядок монтажа муфты, а также внешний соединения в сборе показаны на рис. 2.54 [45].

Номенклатура ТМС по диаметрам расширена до 150 мм, что позволило их применить при ремонте участков подводных трубопроводов из углеродистых сталей на глубинах до 1 км разрушающихся от морской коррозии. Муфты из сплава типа "нитинол" вполне устойчивы в морской воде. Поскольку температура в придонных участках всегда положительна, то возможно использование сплава с не слишком низкой температурой превращения ($M_n \sim 0^\circ\text{C}$). Охлажденную и деформированную муфту опускают к ремонтируемому участку в водолазной камере [46].

Для соединений с низкой коррозионной стойкостью и механической прочностью, фирма "Райхем" изготавливает ТМС из сплавов на основе медь-алюминий-никель и медь-цинк под общим названием "Беталлой". При этом температура восстановления фирмы задается в пределах 100 - 200 °C. Муфты ТМС деформируют, хранят и монтируют при комнатной температуре, а восстановление формы осуществляют при небольшом нагреве, для чего используют газовые горелки или паяльные лампы.

Для лучшей герметичности между ТМС и трубой помещают клеевую прокладку, которая одновременно повышает устойчивость соединения к воздействию окружающей среды. Муфты при необходимости могут окрашиваться специальной краской, чувствительной к нагреву. По изменению ее цвета определяют достаточность напева и готовности соединения. Механические и коррозионные свойства муфты из "Беталлой" аналогичны свойствам медно-цинковых и медно-алюминиевых бронз. Напряжение термомеханического возврата при радиальном сжатии муфты достигает 280 МПа.

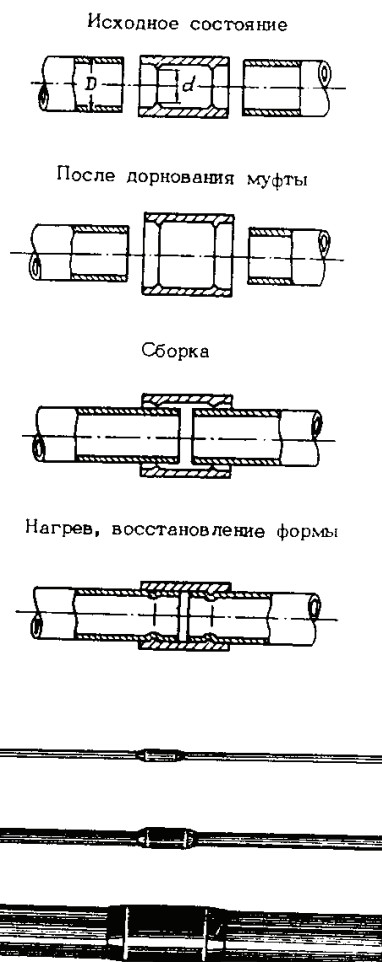


Рис. 2.54. Схема получения неразъёмного термомеханического соединения с применением муфты из сплава с памятью и общий вид соединения.

Муфты могут устанавливаться на трубопроводы диаметром от 10 до 50 мм. Разработан метод расчета соединения, позволяющий существенно снизить сроки и стоимость проектирования, в том числе за счет уменьшения объема экспериментов.

Возможно также применение термомеханической соединительной муфты в современной вакуумной технике для соединения между собой электропроводов. Разработанная для релятивистского ускорителя, имеющего вакуум 10^{-7} мм. рт. ст., термомеханическая муфта (рис. 2.55) надежно соединяет магистрали. Вакуумная плотность соединения обеспечивается специальным уплотнением. Такое соединение имеет высокую надежность и позволяет производить многократную разборку и сборку для профилактических работ без применения сварки, что достигается путем тарирования контактного давления между муфтой и электропроводом.

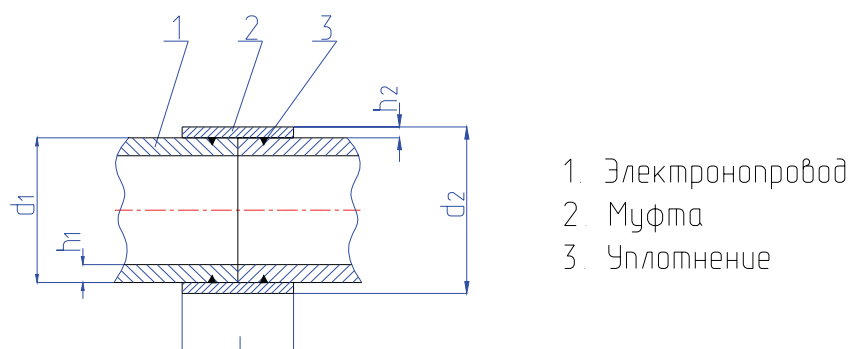


Рис. 2.55. Термомеханическое соединения вакуумного электропровода

Разработаны технологические рекомендации по изготовлению муфт и сборке соединения. Кроме того, разработаны рекомендации по применению технологической оснастки для монтажа соединения и его последующей эксплуатации.

Примером крепежного использования элементов из сплава с памятью является конструкция с уплотняющей шайбой, срабатывающей при нагреве (рис. 2.56) [45].

Конечные размеры шайбы рассчитываются из условия получения заданного натяга δ_n . Общее восстановление шайбы по высоте складывается из сборочного зазора δ_1 , натяга δ_n и упругой деформации, зависящей от уровня напряжений в шайбе. Величины зазора, натяга и изменения размеров шайбы на схеме увеличены для наглядности.

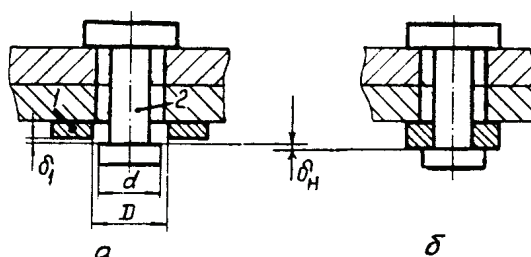


Рис. 2.56. Схема соединения деталей с использованием шайбы из сплава с памятью:

а – сразу после сборки; б – после нагрева и восстановления формы шайбы с уменьшением по диаметру и увеличением высоты. 1 – шайба из сплава “с памятью”; 2 – соединительный элемент

Изготовленную шайбу отжигают "на память" и в мартенситном состоянии деформируют с уменьшением по высоте и увеличением по внутреннему отверстию. Затем проводят сборку узла и нагрев шайбы с образованием напряженного соединения за счет восстановления исходных размеров шайбы.

Как правило, при сборке деталей из композиционных материалов в узел, их соединяющиеся части делают металлическими. При этом необходимо обеспечить соединение композиционной детали с металлической. Известны соединения композиционных деталей с металлическими с помощью крепежных деталей. Недостатком таких соединений является нарушение целостности волокон и снижение прочности композита в окрестности отверстия под крепеж.

Известен также способ соединения композиционного элемента с металлическим за счет расклинивания композиционного элемента. Этот способ соединения приводит к неравнопрочности композиционного элемента в месте соединения, не обеспечивает надежности соединения при действии циклически изменяющихся температур. Он также неприменим для непластичных композитов (например, углепластов и боропластов).

Также известен способ соединения, содержащий стеклопластиковую трубу и металлический наконечник. Это соединение осуществляется за счет обжатия наконечника на конической законцовке композиционной детали и внедрения в него проволоочной арматуры, которой снабжена композиционная деталь. При действии циклически изменяющихся температур, в силу существенного различия коэффициентов температурного расширения металла и композита, в соединении возникают внутренние напряжения, что снижает его надежность. Кроме того, данная конструкция соединения требует индивидуального изготовления заготовки композиционной детали для каждого типоразмера, что усложняет производство.

На рис. 2.57. показан метод лишенный этих недостатков. Основной целью предлагаемого метода является повышение надежности соединения при действии циклических температурных нагрузок, а также унификация заготовок композиционных деталей.

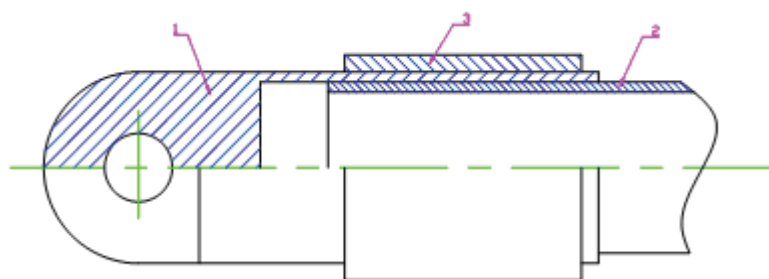


Рис. 2.57. Соединение деталей из композиционного и металлического материалов

Указанная цель достигается тем, что соединение наконечника со стержнем осуществляется за счет натяга. Натяг в соединении создается кольцами из сплава с памятью. Использование колец из сплава с памятью для создания натяга обеспечивает стабильность контактного давления между соединяемыми деталями при изменении температур благодаря свехупругости и росту жесткости с повышением температуры, которые свойственны данным сплавам. Стабильность контактного давления при изменении температуры обеспечивает стабильность соединения. Унификация заготовок стержней достигается тем, что конструкция стержня не требует арматуры и законцовки, что позволяет в качестве заготовки использовать отрезки трубы.

Соединение содержит стержень круглого сечения из композиционного материала 1, на который надет металлический наконечник 2. На внешней поверхности наконечника размещены кольца 3 из материала с памятью формы.

При повышении температуры среды внутренний диаметр кольца получит температурное расширение и с силу существенного различия коэффициентов температурного расширения металла и композита натяг уменьшится, однако благодаря возрастающей жесткости колец, а также из-за большой величины начальной деформации кольца, контактное давление между наконечником и стержнем изменится незначительно. При этом соответствующим подбором размеров кольца и начального натяга обеспечивается сохранение контактного давления в заданных пределах при изменении температуры.

Применение самоуплотняющихся штифтов, болтов и заклепок дает ряд преимуществ, к которым относятся повышение точности монтажа, простота мон-

тажа, бесшумность техпроцесса, и в ряде случаев возможность последующей разработки [45].

Исходный диаметр штифта изготавливается с учетом необходимого натяга при окончательном формировании. Штифт в мартенситном состоянии деформируют до диаметра необходимого для обеспечения сборки.

Собранный из комплектующих деталей узел имеет смещение на величину δ , которая не должна превышать возрастание диаметра штифта при восстановлении его формы в процессе нагрева (рис. 2.58а). Узел в окончательном виде после нагрева и смещения деталей в конечное положение относительно оси штифта (рис. 2.58,б) иллюстрирует возможность повышения точности монтажа.

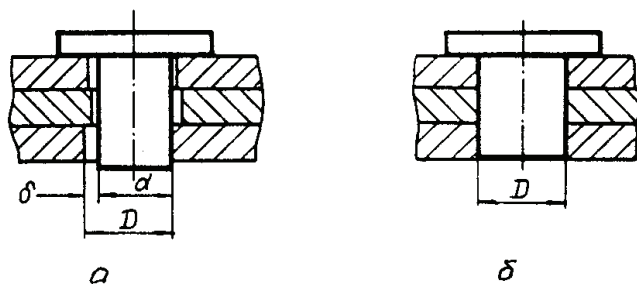


Рис. 2.58. Схема использования штифта с памятью для повышения точности монтажа: а - положение деталей после сборки; б - положение деталей после нагрева и увеличения диаметра штифта

Применение элементов с памятью требует, как правило, нового конструктивного решения, так как механическая замена материала в известных конструкциях либо не позволяет достичь требуемого эффекта восстановления размеров, либо использует свойство памяти неоптимальным образом.

Например, простая замена материала стандартной заклепки на сплав "с памятью" не позволяет осуществить самоформование законцовки, так как необходимое формоизменение превышает возможности даже лучших сплавов на основе никелида титана.

Принципиальная схема получения соединения с использованием саморазвивающейся заклепки состоит из обычных стадий: изготовления заклепки

конечной формы, термообработки "на память", деформации для придания формы, удобной для сборки, установки в соединение, нагрева. Если соединительный элемент должен сохранять рабочее напряжение, то материал выбирается с соблюдением условия $M^H < T^{раб}$ (рис. 2.59) [46].

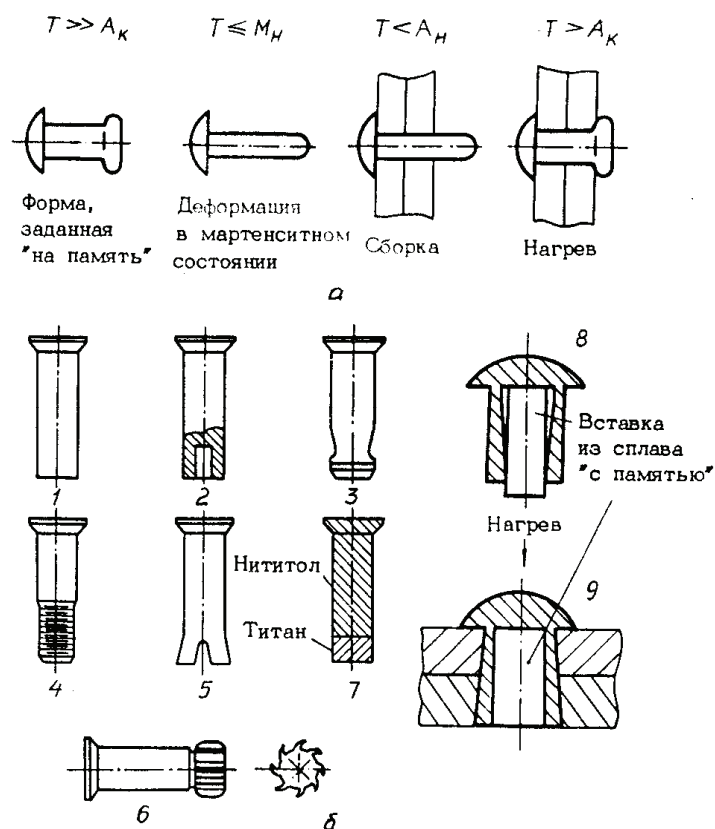


Рис. 2.59. Схема получения заклёпочного соединения с использованием сплава с памятью (а) и различные конструкции заклёпок (б): 1 - стандартная (NAS 1199); 2 - с полой высадной головкой; 3 - "Хайшир" (NAS 1106); 4 - "Хай-лок" (HL 499); 5 и 6 - с конической и ребристой высадными головками; 7 - составная, с использованием сплава на основе никелида титана; 8 и 9 - комбинированная, с внутренней вставкой из сплава с памятью

Конструкции заклепок, показанных на схеме, предполагают использование материала с криогенным восстановлением для обеспечения сохранности напряжения возврата в рабочем интервале температур. Подготовительную деформацию, соответственно, необходимо проводить при низкой температуре. Для этой цели фирма "Standart pressed steel" рекомендует косую прокатку или

экструдирование. Конструкции варианта 8, 9 не требуют низкотемпературного материала, так как основное уплотнение обеспечивается особой формой заклепки, а сплавов с памятью в основном работает как аккумулятор энергии.

Уплотнительный элемент может иметь весьма разнообразную форму, например, сферическую, как это показано на рис. 2.60 [46].

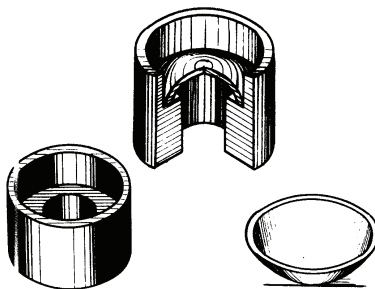


Рис. 2.60. Сферический герметизирующий диск из сплава с памятью на основе меди; внизу слева - выпуклый диск до применения, сверху - уплотнение нагретым диском

Крепежные функции элементов из сплавов с памятью могут использоваться для специального технологического применения. К таким примерам относятся зажимы, трубки и другие приспособления, срабатывающие при нагреве и ослабевающие при последующем охлаждении (рис. 2.61) [46].

Другим направлением использования сплавов с памятью является применение самотрансформирующихся конструкций. При этом из сплава с памятью может быть изготовлена вся конструкция целиком или отдельные ее элементы.

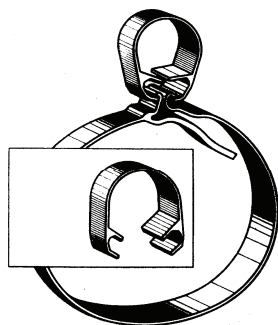


Рис. 2.61. Промышленный зажим из сплава "с памятью" для технологических операций; в центре - зажимом в исходном (до нагрева) состоянии, сверху - после нагрева с зафиксированными деталями

В исходном состоянии конструкцию складывают в компактную форму за счет деформации рабочих элементов, что позволяет резко уменьшить объем, необходимый для ее хранения. Восстановление формы может осуществляться за счет тепла окружающей среды (вода, воздух) или естественного нагрева солнечным излучением либо искусственным путем (электротоком, феном и др.) (рис.2.62 и 2.63,) [46,47].

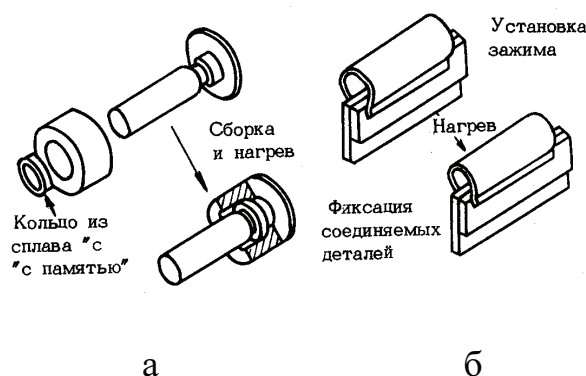


Рис. 2.62. Схемы получения соединения с использованием фиксирующего кольца (а) и применения технологического зажима (б) из сплавов с памятью.

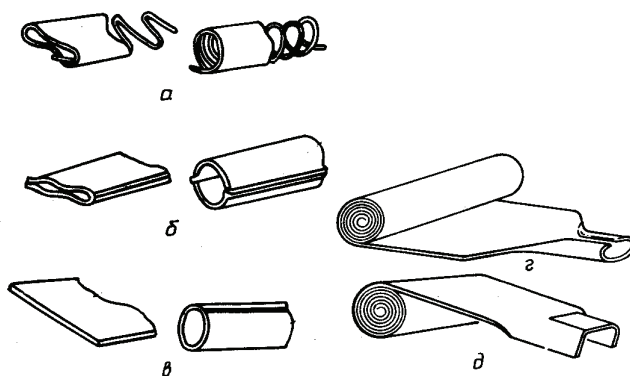


Рис. 2.63. Схемы формирования трубы или профиля с помощью проволоки или каркаса из сплава с памятью (а) и из упаковки пакетного типа, включающей две заготовки (б), листовой заготовки (в), рулонной упаковки (г, д).

На рис. 2.64 показана конструкция (а) и схема работы (б) штекера типа "Криокон" [45-47]. Устройство состоит из: 1,2 - цанговый упругий элемент при изготовлении и в подготовленном для работы виде; 3 - кольцо с памятью; 4 -

штекер в сборе (нагрет); 5 - охлаждение; 6 - нагрев. Преимущества соединения "Криокон" следующие:

- газонепроницаемый поверхностный контакт;
- отсутствие внутриконтактных вибраций при ударах;
- большое механическое усилие;
- высокая стабильность электросопротивления и падения напряжения;
- нулевое усилие при включении.

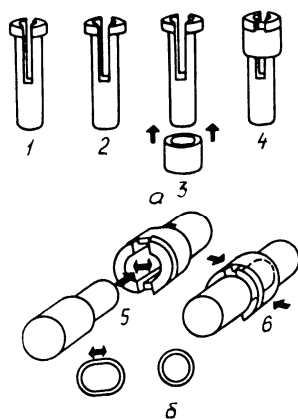


Рис. 2.64. Штекер (охватывающее электрическое соединение)

Соотношение жесткости цангового зажима и кольца с памятью выбирается таким образом, что при нагреве кольцо, вспоминая форму, сжимает цангу, а при охлаждении - наоборот, цанга растягивает кольцо, так как в мартенситном состоянии оно легко деформируется. Сборку штекера проводят в охлажденном состоянии (кольцо растянuto). При нагреве кольцо, сжимая цангу, плотно фиксирует ответный штырь штекера. Охлаждение сопровождается разжимом цанги, что позволяет расстыковывать соединение.

Температуру срабатывания выбирают, исходя из требований эксплуатации. Если нижняя граница работоспособности не слишком низка (0°C), то для понижения температуры можно применять охлаждающие солевые растворы, если интервал эксплуатации близок к обычным требованиям, т.е. $T_{\text{мин}}^{\text{раб}} > -60^{\circ}\text{C}$, то для разборки штекера используют смесь на основе сухого льда.

Для достижения большего перемещения используются конструкции, реализующие деформацию изгиба. Это проиллюстрировано, на примере рис. 2.65. а).

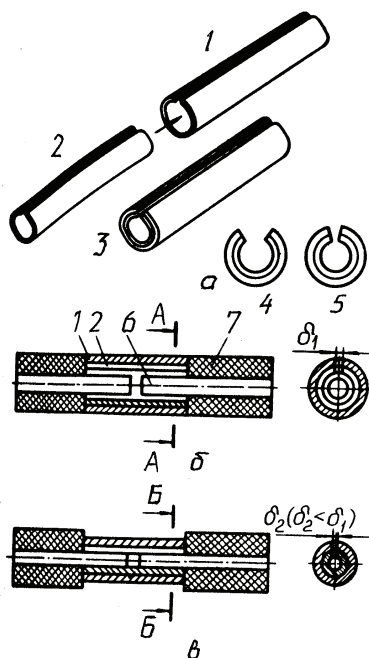


Рис. 2.65. Конструкции НЧ-разъёма

На примере изображена конструкции НЧ-разъёма [45]. Конструкция состоит из следующих элементов: 1 - трубка из медно-бериллиевого сплава; 2 - трубка из сплава с памятью; 3 - муфта в сборе; 6 - провод; 7 - оплетка. Также на рис. 2.65. показана схема получения (б, в) разъёмного соединения проводов муфтой с памятью (4 - нагрев; 5 - охлаждение). Трубка из сплава с памятью изготавливается большего диаметра, чем наружная трубка из материала с высокими упругими свойствами, являющаяся контртелом.

При сборке муфты трубку с памятью в охлажденном состоянии сжимают и вводят в наружную трубку. Жесткость трубок рассчитывается таким образом, что в нагретом состоянии трубка с памятью, вспоминая форму, раскрывается, преодолевая сопротивление контртрубы. Муфта готова к сборке, в нее вводят концы проводов и охлаждают. Наружная трубка, сжимая трубку с памятью, создает плотный контакт между проводами. При нагреве муфта вновь раскрывается и соединение можно легко разобрать.

Термомеханические соединения на основе муфт из сплавов с памятью, о которых говорилось выше, могут быть использованы не только для осуществления соединения, но и в качестве технологической оснастки. В этом случае, после того как, муфта сожмёт соединяемые детали, и тем самым осуществит их соединение с гарантированным натягом, её снимают и готовят (дорнованием) для очередного цикла работы. При этом, возможно осуществить до 109 циклов. Такая технология позволяет применять термомеханические муфты (кольца) в качестве пресса, для осуществления сборочных и ремонтных работ во многих механизмах и устройствах радиотехники.

Одним из перспективных направлений применения сплавов с памятью является создание технологической оснастки для сборки трубчатых конструкций в заводских условиях. В качестве реализованного и наиболее известного примера можно привести проект “Софора” по сборке фермы в космическом пространстве с помощью термомеханической втулки. Однако, в отличие от космических условий, в данном случае ставилась задача по созданию многократно используемой технологической оснастки. На рис. 2.66. показан вариант способа такого соединения.

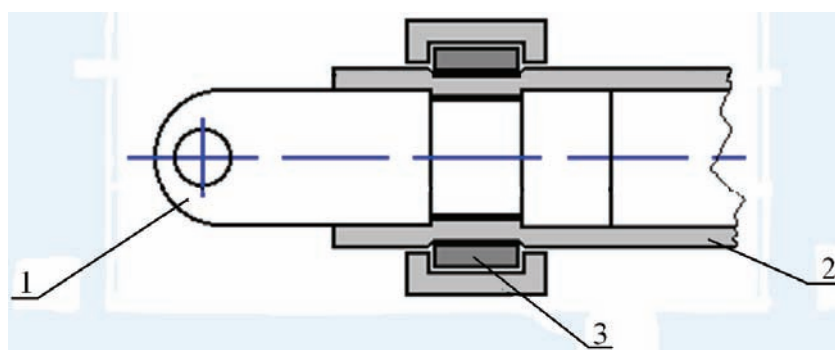


Рис. 2.66. Соединение деталей из композиционного и металлического материалов

Фитинг 1, имеющий специальную проточку, устанавливается в торце одной из соединяемых труб 2. Кольцо 3 из высокотемпературного термомеханического сплава, предварительно подвергшееся дорнованию, устанавливается на трубу непосредственно над проточкой в фитинге. Нагрев кольца осуществляется с

помощью специального нагревателя 4 равномерно по всей его поверхности. При этом происходит восстановление деформации кольца и обжатие трубы, которая, пластически деформируясь, заполняет проточку фитинга, обеспечивая соединение последнего с трубой.

Разработан технологический процесс сборки ферменных конструкций из труб, и предложен вариант комплекта технологической оснастки, обеспечивающий этот процесс.

Манжетное уплотнение [49], рис. 2.67., применяется в качестве адаптивного уплотняющего элемента для гидро-, пневмоприводов химического машиностроения, имеющих повышенные требования в отношении надежности и безопасности конструкций уплотнения подвижных соединений, а также для повышения надежности уплотнения замкнутых объемов и исключение аварийных ситуаций за счет бесступенчатого регулирования диаметра уплотняющего пояса. При нагреве дополнительно введенной винтовой пружины сжатия, выполненной из материала с односторонней термомеханической памятью формы, происходит сжатие этой пружины 5. При этом она растягивает основную пружину 4 сжатия и увеличивает усилие обжатия уплотняющего пояса 3, вследствие чего он плотнее охватывает уплотняемый подвижный элемент.

Манжетное уплотнение рис. 2.67. а, б содержит тарельчатый корпус 1, на который наварено термостойкое резиновое кольцо 2 с уплотняющим пояском 3. Уплотняющий поясок 3 охвачен основной винтовой рис.2 пружиной 4 сжатия, которая образует кольцо. Между торцами этой пружины 4 установлена дополнительная винтовая пружина 5 сжатия, выполненная из материала с односторонней термомеханической памятью формы (сплав . на основе Ti~Ni). Торцовые витки 6 этой пружины 5 расположены (рис. 2.67. в) между витками 7 основной пружины 4 и замыкают тем самым ее кольцевую форму. Витки 6 пружины 5 вкручиваются при сборке уплотнения в витки 7 основной. пружины 4, При этом дополнительная пружина 5 имеет (рис. 2.67. г) у торцов усы 8, выполненные из той же проволоки, что и пружина.5, которые подсоединены по короткозамкнутой схеме через терморегулятор с источником электроэнергии.

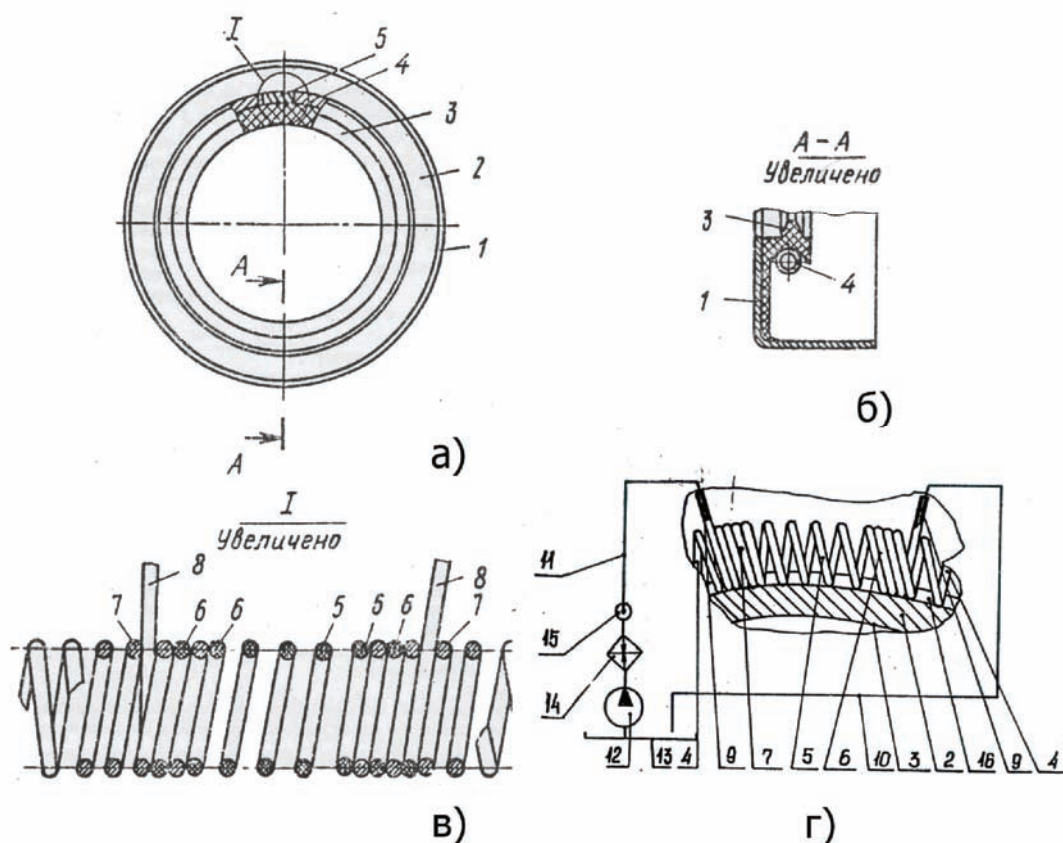


Рис. 2.67. Манжетное уплотнение

Для крупногабаритных манжетных уплотнений целесообразно изготавливать дополнительную пружину 5 полый. Аналогично варианту использования цельнометаллической пружины 5, она связана с торцами основной пружины 4. При этом внутренняя полость 9 полый пружины 5 из материала с односторонней термомеханической памятью формы связана, дополнительно введенными магистралями (рис. 2.67. г) 10 и 11 с компрессором 12, который нагнетает рабочую среду в полость 9 пружины 5. Рабочая среда поступает в компрессор 12 из бака 13, далее проходит через нагревающий или охлаждающий (в зависимости от свойств материала как самой пружины 5, так и рабочей температуры уплотняемого объема) элемент 14, терморегулятор 15, проходит внутри пружины 5 и сливается снова в бак 13 по сливной магистрали 10. Сами пружины 4 и 5 расположены в канавке резинового кольца 2.

При прохождении электрического тока, подводимого к усам 8 пружины 5 через терморегулятор по короткозамкнутой схеме, происходит нагрев пружины 5

и ее сжатие. Тем самым на уплотняющий поясok 3 будет равномерно по диаметру воздействовать возросшее усилие со стороны пружин 4 и 5 и этот поясok 3 будет плотнее прилегать (компенсировать износ) к уплотняемому подвижному элементу. Величина нагрева пружины 5 будет определяться временем прохождения электрического тока через терморегулятор, который выполнен в виде реле времени и расположен вне манжетного уплотнения.

После прекращения нагрева, вследствие односторонней термомеханической памяти формы материала пружины 5, ее витки занимают определенное положение и не возвращаются в первоначальное более растянутое положение. При дальнейшем износе уплотняющего пояска 3 или при любой иной необходимости изменения диаметра уплотняющего пояска 3 повторяется описанный процесс поднастройки.

Аналогично работает манжетное уплотнение (рис. 2.67. г) в случае наличия .полый пружины 5. Рабочая среда подается из бака 13 компрессором 12 через нагревающий или охлаждающий элемент 14 и терморегулятор 15 к полый пружине 5. Проходя по внутренней полости 9, рабочая среда либо нагревает, либо охлаждает пружину 5, которая сжимается и совместно с основной пружиной 4 уменьшает диаметр уплотняющего пояска.

2.5. Конструкции технических и приборных устройств

2.5.1. Классификация технических и приборных устройств

Конструкции технических и приборных устройств представляют собой те же термомеханические двигатели, но слабонагруженные. Они используются в качестве выключателей/включателей, переключателей, приборных приводов. Классификация этих устройств приведена на рис. 2.68.

Перспективно направление применения сплавов с памятью в регулирующих и исполнительных механизмах систем и устройств радиотехники и связи. Большинство разработанных конструкций, на основе элементов из сплавов с памятью, подвергалось многоцикловым испытаниям на срабатывание, при этом не наблюдалось заметного изменения характеристик работоспособности. Такие устройства содержат новые технические решения и служат основой для

создания целого ряда качественно новых устройств приводного типа: механизмы настройки, устройства дистанционного управления (реле), микропереключатели и т.д.

Эти устройства можно разбить на две группы — одноразового действия и многократного действия. Устройства одноразового действия конструктивно проще и предназначены, например, для приведения в действие систем терморегулирования, открытия различных люков, дверей, окон и др.

Возможные схемы использования элементов из сплава с памятью в устройствах такого рода показаны на рис. 2.69 для привода поршня (I), открытия крышек и заглушек (II) изменения конфигурации элементов конструкций (III) [45,47,49]: 1 - сплав "с памятью"; а - исходное состояние, б - после нагрева.

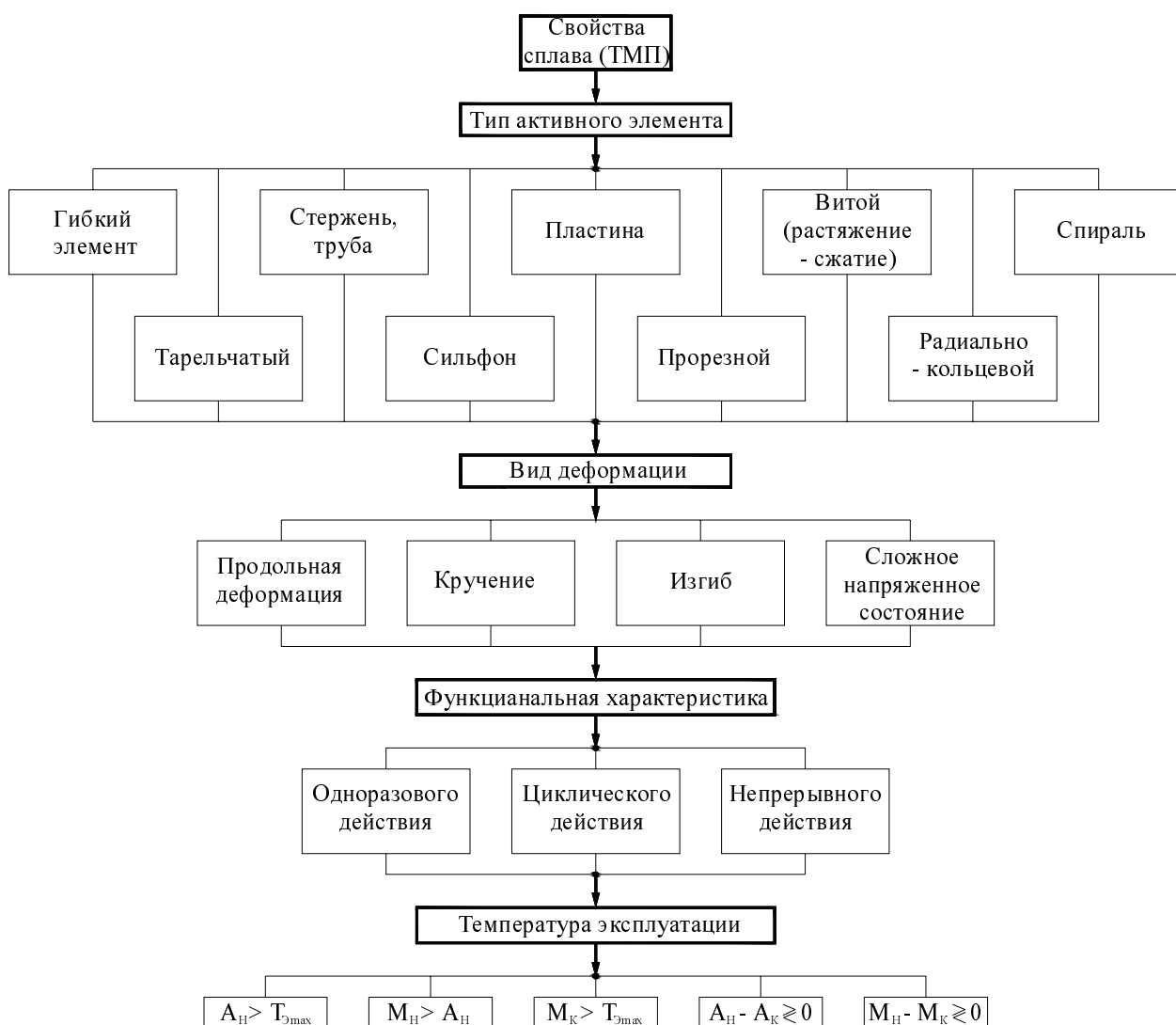


Рис. 2.68. Классификация технических и приборных устройств

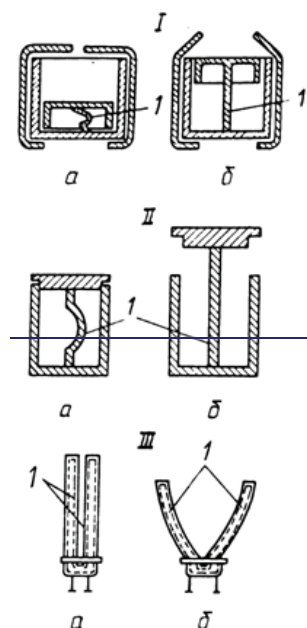


Рис. 2.69. Варианты использования элементов из сплава с памятью

Устройства многоразового действия используются в регулирующих механизмах, реагирующих на температуру окружающей среды. Схема работы таких устройств включает "рабочий ход", совершающийся при нагреве, и "обратный ход" - при охлаждении. Во время рабочего хода элемент из сплава с памятью совершает полезную работу по открытию или закрытию проходных отверстий газовых и гидравлических магистралей, раскрытию жалюзей, окон, заслонок, т.е. непосредственно выполняет регулирующие функции. В тех случаях, когда это невозможно либо по причине недостаточной мощности рабочего элемента, либо по конструктивным причинам, когда регулирующий орган расположен в отдалении от места регистрации и изменения температуры, рабочий элемент приводит в действие соответствующую исполнительную схему с собственным приводом.

Обратный ход совершается под действием контртела, либо под действием самого регулируемого тела (например, веса открываемого люка), либо за счет изменения внутренней структуры материала.

Регулирующие устройства можно классифицировать по виду регулирования: регулятор-исполнитель или регулятор-переключатель и по характеру обеспечения обратного хода: с контртелом или двухстороннего действия.

К термокомпенсаторам относятся устройства многоразового действия, обеспечивающие сохранение рабочих характеристик устройства радиотехники и связи, в условиях переменного теплового воздействия.

Терморегуляторы предназначены для обеспечения заданного теплового режима элементов и устройств радиотехники и связи. В таких устройствах элементы из сплава с памятью одновременно выполняют функции датчика температуры и исполнительного устройства, что позволяет значительно упростить, повысить надежность системы при одновременном снижении массы и габаритов. Такое устройство срабатывает при определенной температуре в диапазоне от -50 до $+100^{\circ}\text{C}$. Заданная температура обеспечивается подбором сплава соответствующего состава и конструктивных параметров основных элементов.

При расчете и проектировании перечисленных выше устройств используется единый подход, основанный на математической модели, описывающей свойства сплавов с памятью.

По функциональному назначению, способу управления механизмы с элементами из сплавов с памятью делятся на два класса: пассивные и активные. К пассивным относятся механизмы, реагирующие на температуру окружающей среды, т.е. срабатывающие от внешних (обычно естественных) тепловых потоков. К активным относятся механизмы, управляемые с помощью специального источника энергии вручную или автоматически с использованием специальных датчиков — механических, электрических и т.д.

Пассивные механизмы, в свою очередь, делятся на выключатели и регуляторы, выключатели — это устройства, работающие в аварийном режиме, т.е. срабатывающие, если температура окружающей среды достигает некоторой критической величины $T_{кр}$. Регуляторы обеспечивают поддержание определенной эксплуатационной температуры $T_{ном}$ с заданной точностью. Регуляторы могут работать в режиме реле, включая и выключая, например, по мере необходимости систему охлаждения, или в режиме плавного перемещения исполнительного органа, регулирующего поступление в систему хладагента.

При проектировании пассивных механизмов сплав для активного элемента (АЭ) выбирается из условия $A_n < T_{кр} (T_{ном}) < A_k$

где A и A — температуры начала и конца обратных фазовых превращений.

В активных механизмах для предотвращения самопроизвольного срабатывания активные элементы должны выполняться из сплавов, имеющих температуру начала обратных фазовых превращений несколько больше максимальной эксплуатационной температуры: $A_n > T_{э\max}$.

Кинематическая схема механизма, тип активного элемента (его форма, размеры, характер и способ деформирования), выбор основных конструктивных параметров механизма и его узлов определяются функциональным назначением и специальными требованиями, связанными с характером объекта, в котором данный механизм устанавливается.

Выключатели, срабатывающие при некоторой предельной температуре, имеют существенное значение для защиты радиоаппаратуры от перегрева.

В тоже время, терморегуляторы в отличие от выключателей имеют более сложную структуру. Поэтому синтез и расчёт таких приборов существенно сложнее. Общий метод проектирования терморегуляторов приводится ниже.

Вариант кинематической схемы регулятора, работающего в режиме реле (термореле) показан на рис. 2.70. Во всех случаях регулятор содержит АЭ 1 и контрэlement 2, чаще всего в виде пружины. Если температура окружающей среды $t < T_{ном} - T$, подпружиненное коромысло 3, занимает положение I, замыкая контакты электрической цепи 4 нагревательного устройства. При повышении температуры до $T_{ном}, \dots (T_{ном} + \Delta T)$, жесткость АЭ возрастает и, восстанавливая форму, последний переводит коромысло в положение II, размыкая электрическую цепь. При работе реле в составе системы охлаждения например, в электрической цепи. вентилятора, АЭ и контрэlement меняются местами, и порядок работы реле меняется на обратный, когда электрическая цепь замыкается при повышении температуры.

Схема терморегулятора, работающего в непрерывном режиме, приведена на рис. 2.71. Собственно механизм состоит из активного элемента 1 и контрэlementа 2, связанных между собой с помощью блока 3.

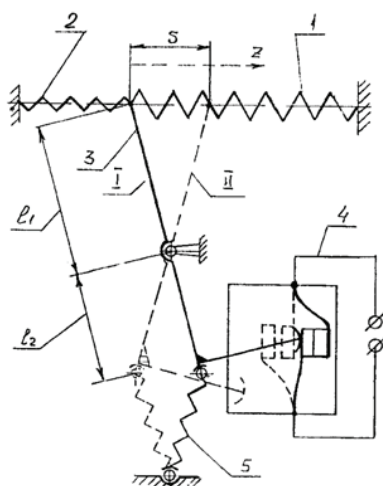


Рис. 2.70. Кинематическая схема терморегулятора (термореле)

Ось блока, в свою очередь, жёстко связана с заслонкой 4, регулирующей подачу воздуха из воздухопровода 5. Принцип работы системы основан на условии выполнения в любой момент времени равенства:

$$P_d(x) + P_{II}(x) + P_c(x) = 0,$$

где $P_d(x)$ - силовая характеристика АЭ; $P_{II}(x)$ - силовая характеристика пружины; $P_c(x)$ - сила сопротивления, состоящая из сил трения и аэродинамической силы, действующей на заслонку.

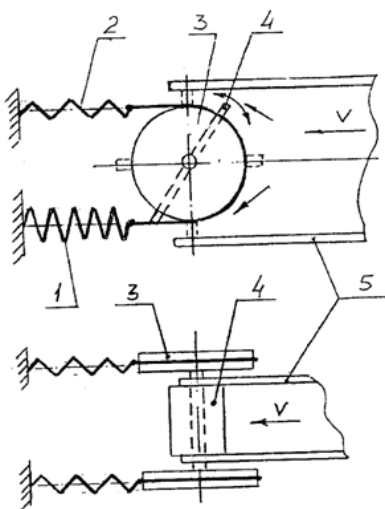


Рис. 2.71. Схема терморегулятора, работающего в непрерывном режиме

Если температура внутри регулируемого объёма возрастает до величины, превышающей A_H , восстановление деформации АЭ приводит к повороту заслонки по часовой стрелке. В результате этого расход воздуха увеличивается,

что приводит к снижению температуры объекта терморегулирования. При этом восстановление деформации прекращается и механическая характеристика АЭ (напряжение сопротивления) уменьшается до тех пор, пока она не станет меньше сил противодействия. После этого заслонка под действием контрэлемента поворачивается против часовой стрелки, уменьшая подачу воздуха в регулируемый объём. Затем цикл повторяется.

Частота, скорость регулирования и амплитуда перемещения (угол поворота заслонки) главным образом зависят от скорости воздушного потока и размеров сечения воздуховода.

Термореле — нелинейная система. Поэтому при его проектировании используется вариантный метод. Для его реализации разработан графоаналитический метод расчета. В качестве исходных данных для проектирования берутся: кинематическая схема, величина рабочего хода, силы сопротивления (нагрузка) и диапазон температур регулирования.

По заданному диапазону эксплуатационных температур определяется интервал температур обратного фазового превращения $A_n \dots A_k$ и подбирается требуемый сплав. Форма активного элемента и его размеры выбираются, исходя из обеспечения величины рабочего хода 5. При этом развиваемое активным элементом усилие в процессе восстановления должно быть достаточным для преодоления сил сопротивления и противодействия контрпружины. При выборе типа АЭ учитываются также технологические особенности его изготовления.

Основной при расчете является силовая характеристика активного элемента, являющаяся функцией двух переменных — x и T . Ее расчет производится, исходя из физических соотношений, определяемых, свойствами используемого сплава. Конкретные соотношения определяются типом АЭ (его формой, размерами) и характером деформирования. Для этого, как правило, используются численные методы.

2.5.2. Устройства одноразового действия

Предохранители с использованием сплавов с памятью, в отличие от плавких предохранителей вытягивают разъемную часть с большой силой, поэтому за-

метно проявляется эффект гашения дуги. Эти элементы используются в качестве предохранителей на большую мощность или высокое напряжение. Пример температурного предохранителя [50] показан на рис. 2.72. Активный элемент 1 представляет собой пластину, работающую на изгиб, нагрев осуществляется за счёт омического сопротивления. Элемент 1 обладает высокой электропроводностью и входит в состав электрической цепи, контактируя с токопроводящим элементом 2. В момент критической ситуации элемент 1 нагревается, сплав с памятью переходит из мартенситного состояния в аустенитное и пластина распрямляется, прекращается контакт между элементом 1 и элементом 2 и электрическая цепь размыкается.

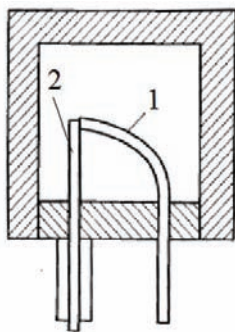


Рис. 2.72. Температурный предохранитель с использованием сплава с эффектом памяти: 1 — тонкая пластина из сплава Ti – Ni,
2 – электропроводный элемент

Противопожарная установка [51] представлена на рисунке 2.73. Активный элемент 6 представляет собой пластину, работающую на изгиб, нагрев осуществляется за счёт температуры окружающей среды.

В верхнюю часть втулки 1 вворачивается труба, через которую подводится вода или другая жидкость. К нижней части втулки 1 ввинчивается поджимная гайка 2 и опора 3. Между втулкой 1 и поджимной гайкой 2 устанавливается шайба 4 и хрупкий стеклянный диск 5. К нижней части опоры 3 присоединяется активный элемент 6. Для того чтобы температура опоры не отбирала тепло при нагреве активного элемента 6, её устанавливают через керамические кольца 7. В опору 3 устанавливается вертикально стержень с острым наконечником 8, таким образом, что он едва касается активного элемента 6 и стеклянного диска 5.

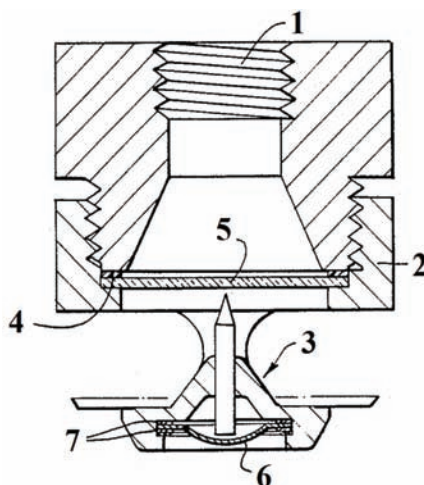


Рис. 2.73. Противопожарная установка

В исходном состоянии стеклянный диск 5 удерживает давление оказываемое водой через втулку 1. При увеличении температуры окружающей среды (температуры аустенитного превращения сплава с памятью) активный элемент 6 изменяет свою форму – выгибаясь в обратную сторону, поднимая стержень 8. Стержень 8 разламывает стеклянный диск 5 и вода разбрызгивается под противопожарной установкой.

Следует отметить, что срабатывание установки происходит быстрее при более высокой температуре окружающей среды. Например при температуре 128°C срабатывание происходит в течении 5 минут, а при температуре 93°C – 10 минут.

Другая противопожарная установка [52] на рисунок 2.74, содержит разблокирующее средство, например стеклянную ампулу или плавкий предохранитель, которое предназначено для срабатывания при заранее определенной температуре.

Активный элемент 8 представляет собой витой элемент, работающий на растяжение, нагрев осуществляется за счёт температуры окружающей среды.

Разработанная конструкция разблокируется быстрее, чем ранее известные конструкции. Для измерения скорости разблокирования обычно используется так называемый показатель времени срабатывания. У обычных разбрызгивателей показатель времени срабатывания составляет около 300, у разрабатываемого устройства он составляет менее 10.

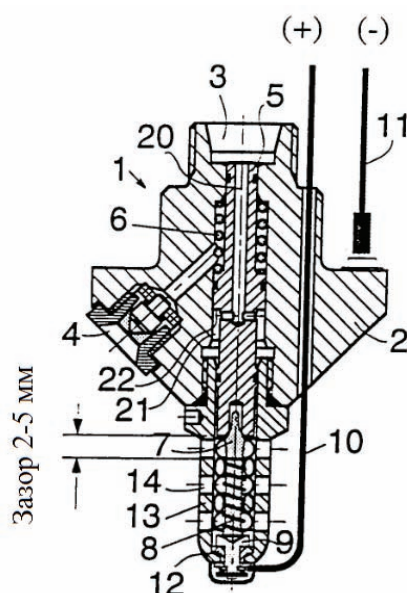


Рис. 2.74. Противопожарная установка.

В состав разбрызгивателя входит корпус 2, и имеет входное отверстие 3 для жидкости и ряд сопел 4. В центральном отверстии корпуса 2, начинающемся от входного отверстия 3, расположен стержень 5, который под действием пружины 6, опирающейся на бортик в корпусе 2, прижимается к разблокирующему устройству 7, представляющему собой, например, обычную стеклянную ампулу.

При нормальной температуре ампула 7 выдерживает механическую нагрузку, создаваемую пружиной 6 и передаваемую через стержень 5, при этом верхний торец стержня блокирует соединение между входным отверстием 3 и соплами 4.

При повышенной температуре, как правило, около 70°C , ампула 7 разрушается и позволяет пружине 6 прижать стержень в осевом направлении, при этом соединение между входным отверстием 3 для жидкости и соплами 4 разблокировано (открыто).

Вокруг ампулы 7 установлена спираль 8 из металла с памятью. При нормальной температуре активный элемент 8 сжат, при этом имеется зазор, например, в 2-5 мм между верхним концом элемента 8 и соседним нижним торцом стержня 5. Нижний конец активного элемента 8 находится в контакте с электропроводящей опорой 9 для ампулы 7, причем указанная опора 9 присоединена к одному контакту 10 электрической схемы. Второй контакт 11 схемы присоединен к

корпусу 2 разбрызгивателя 1. Между опорой 9 и, как правило, металлическим кожухом 13, окружающим ампулу 7 и имеющим определенное количество отверстий 14, установлена изолирующая деталь 12.

Если внутри помещения, которое находится под контролем разбрызгивателя (системы пожаротушения) разгорается пожар, элемент 8 быстро нагревается окружающими дымовыми газами, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние, активный элемент 8 немедленно выпрямляется до заранее установленной "заданной" длины, которая выбирается таким образом, что спираль 8 входит в контакт с соседним торцом стержня 5, прижимаясь к нему и замыкая таким образом электрическую схему 10-9-8-5-(6)-2-11. Теперь элемент 8 действует в качестве нагревающей обмотки и быстро нагревает ампулу 7 до температуры разблокирования. Ток, величиной примерно в 1,0 А, через элемент 8 может привести к разрушению ампулы 7 примерно в течение двух секунд. При нормальной температуре элемент 8 не обязательно должен находиться в контакте с опорой 9, между ними может быть зазор.

2.5.3. Устройства многоразового действия

Тепловое реле [53] изображенное на рисунке 2.75, замыкает контакты 8 и 15. Активные элементы 4 и 5 представляют собой гибкие элементы, выполненные в форме проволоки, работающие на сжатие, нагрев осуществляется за счёт омического сопротивления.

В состав теплового реле входит актуатор 2, контактная пластина 13, две проволоки из сплава с памятью 4 и 5, два контактных элемента 6 и 7. Все элементы, за исключением корпуса электропроводны.

При прохождении электрического тока через клемму 8 – пластину 13 – актуатор 2 – проволоку 4 – шпильку 9 проволока 4 нагревается, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и проволока сжимается. В результате наклоняется актуатор 2, который закреплен на корпусе в точке 90.

Актуатор соединяется с пластиной 13 с помощью насадки 11. Он смещает пластину, которая устроена таким образом (рисунок 2.76), что часть пластины – 12 смещается в одну сторону (в сторону смещения актуатора), а другая часть

пластины – 13 (которая соединена с частью 12 с помощью U-образной пружины 14) в другую сторону (противоположную смещению актуатора). В результате этого смещения контактные элементы 6, 7 замыкаются.

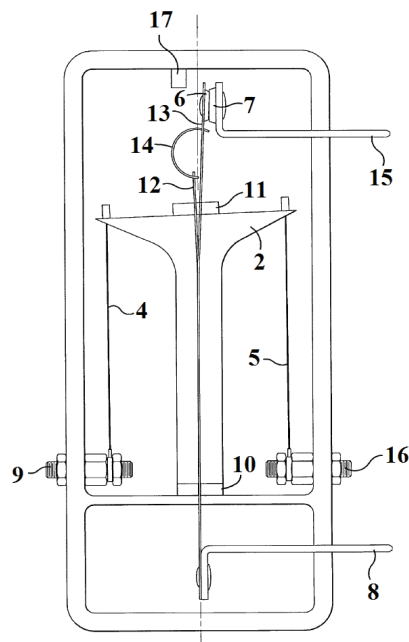


Рис. 2.75. Тепловое реле в режиме “включено”

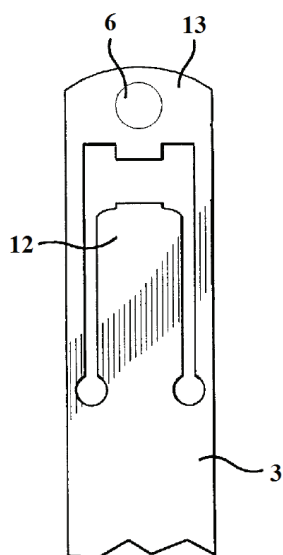


Рис. 2.76. Устройство пластины

Во втором случае (рисунок 2.77), когда ток идет по контуру: клемма 8 – пластина 13 – актуатор 2 – проволока 5 – шпилька 16, сплав с памятью, из которого состоит проволока 5, вследствие увеличения температуры переходит в аусте-

нитное состояние. И аналогично проволоке 4 сжимается и наклоняет актуатор 2 в противоположную сторону, относительно первоначального отклонения. Актуатор воздействует на пластину 13, в итоге часть пластины 13 упирается в упор 17, размыкая контактные элементы 6, 7.

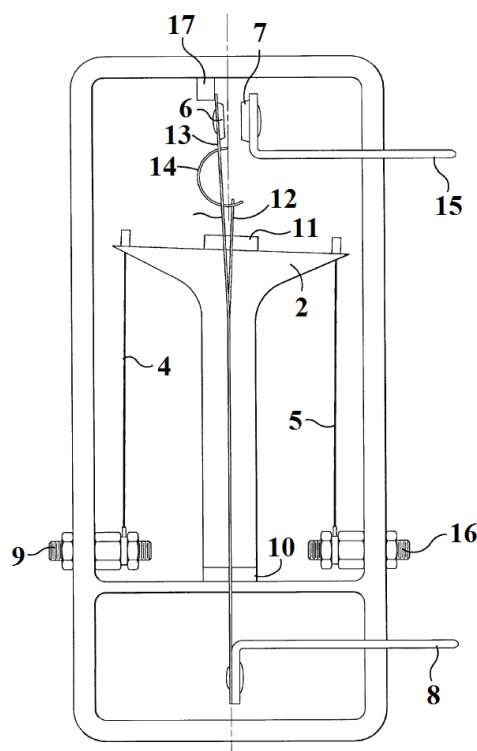


Рис. 2.77. Тепловое реле в режиме “выключено”

Переключатель на рисунке 2.78 используется для переключения линий электросигнала в многовибраторных сложных антеннах и переключения элементов многовибраторной сложной антенны [54]. Активные элементы 6 и 7 выполнены в форме пластин, которые работают на изгиб, нагрев осуществляется за счёт нагревательных элементов 3 и 5, а охлаждение за счет температуры окружающей среды.

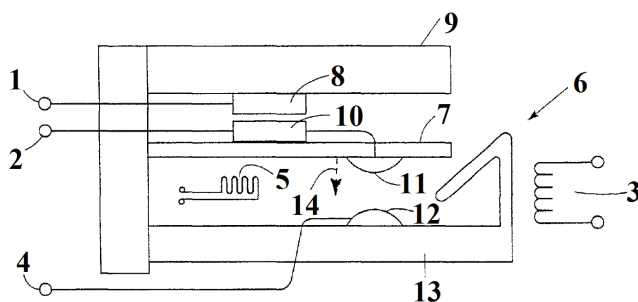


Рис. 2.78. Переключатель электросигнала для многовибраторных антенн

Переключатель имеет малые размеры, его габариты 1 мм х 5 мм. Использо-

Замыкание выводов 1, 2 осуществляется путем подачи напряжения на нагре-

Уберем напряжение с нагревательного элемента 3 и подадим напряжение на

На рисунке 2.79 представлен датчик [55] включения и выключения электри-

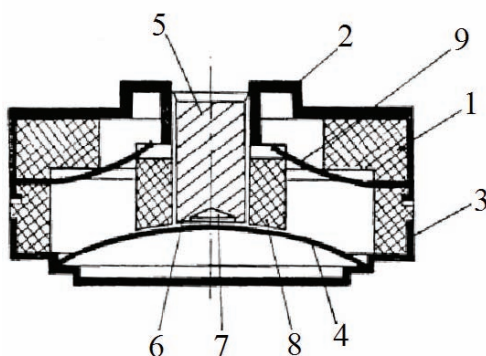


Рис. 2.79. Датчик контроля температуры

Активный элемент 9 представляет собой пластину, работающую на изгиб, нагрев и охлаждение осуществляется за счёт температуры окружающей среды.

Противоположные стенки 2 и 3 электропроводны и образуют электровыводы датчика. Мембрана 4 выполнена в качестве одного контакта, который электрически замкнут (соединен) со стенкой 3, другой контакт 5 выполнен в виде стержня с кольцеобразной контактной поверхностью 6, образованной выемкой 7, на одном конце и соединенный на другом конце со стенкой 2 резьбовым соединением. Толкатель 8 представляет цилиндрическую втулку из электроизолятора, с которым связан активные элементы 9, одним концом утопленных в тело корпуса 1 и закрепленных в нем, а другим опирающийся на толкатель 8.

При увеличении температуры сплав с памятью, из которого изготовлены элементы 9, переходит в аустенитное состояние, пластины выпрямляются, занимая свое первоначальное положение, и посредством толкателя 8 воздействуют на мембрану 4. В результате электрический контакт прерывается, так как контактная поверхность 6 и мембрана 4 перестают соприкасаться. Предлагаемый датчик-реле температуры имеет повышенную точность срабатывания, увеличенный диапазон коммутируемых токов, упрощенную конструкцию и уменьшенные габариты.

Другая конструкция температурного переключателя [56] представлена на рисунке 2.80.

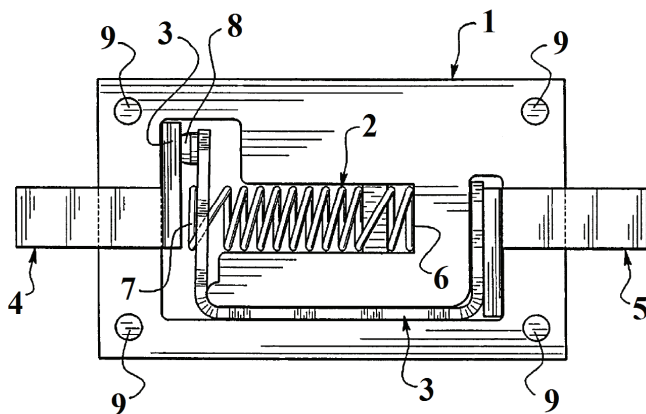


Рис. 2.80. Температурный переключатель

Активный элемент 2 представляет собой витой элемент, работающий на растяжение и сжатие, нагрев и охлаждение осуществляется за счёт температуры окружающей среды.

Рассмотрим его основные элементы и принцип работы. В корпус 1 устанавливается активный элемент 2, скоба 3 и две клеммы 4, 5. Элемент 2, изготовлен из сплава с памятью. Одним концом элемент закреплен к стенке 6, другим концом (7) соединен с электропроводной скобой 3. Скоба может быть выполнена из бериллиево-медного сплава, один ее конец жестко соединен с клеммой 5, другой конец может отгибаться на небольшой угол (3-5 градусов) и имеет на конце подмагниченный контакт 8. Этот контакт в зависимости от угла отгиба плеча скобы соединяется с зафиксированным контактом 9. Переключатель устанавливается в электрическую цепь с помощью клемм 4 и 5.

При увеличении температуры, где находится переключатель выше определенной температуры, сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и элемент 2 сжимается и отгибает плечо скобы. В результате электрическая цепь размыкается в связи с отсутствием соприкосновения между контактами 3 и 8. При понижении температуры сплав переходит в мартенситное состояние, за счет магнитных сил контакты 3,8 притягиваются и электрическая цепь замыкается. Для установки переключателя в корпусе 1 предусмотрены отверстия 9.

Датчик [57], представленный на рисунке 2.81., обеспечивает устойчивую индикацию того, что он подвергается воздействию температур ниже некоторой критической температуры в течение определенного срока.

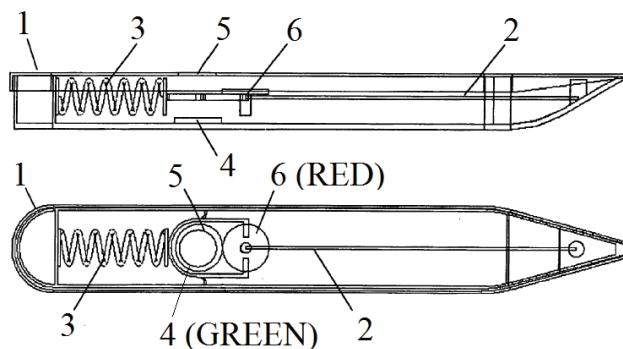


Рис. 2.81. Визуальный датчик температуры

Активный элемент 3 представляет собой витой элемент, работающий на растяжение и сжатие, нагрев и охлаждение осуществляется за счёт температуры окружающей среды.

Датчик заключен в непрозрачный корпус 1, в котором выполнено окно 5. Принцип работы датчика заключается в отображении в окне 5 дисков 6 (RED) и 4 (GREEN), которые и показывают изменение температуры. При увеличении температуры активного элемента 2, сплав переходит из мартенситного состояния в аустенитное, в результате элемент 2 сжимается, разжимает пружину 3 и сдвигает диск 6, который закреплен на ее конце. В итоге в окне 5 виден диск 4, который неподвижно закреплен на корпусе 1, с противоположной стороны от окна 5.

Когда температура понижается и становится ниже температуры аустенитного превращения, сплав с памятью переходит в мартенситное состояние, длина элемента 2 увеличивается, и за счет упругости пружины 3, диск 6 смещается, заслоняет диск 4 и становится виден в окне 5.

Представленное на рисунке 2.82. реле [58] обладает значительной скоростью переключения, высокой надежностью, низкими энергозатратами и способно одновременно переключать до семи секций. Рассмотрим переключение одной из них, остальные секции переключаются аналогичным образом.

Активный элемент 19 представляет собой витой элемент, работающий на растяжение и сжатие, нагрев осуществляется за счёт омического сопротивления, охлаждение за счёт температуры окружающей среды.

Переключение тока осуществляется между клеммами 1, 2 и 3 за счет изменения положения дугообразной, упругой пластины 4, выполненной из токопроводящего материала. Пластина 4, в зависимости от условий, контактом 5 касается контактов 6 или 7. При замыкании контактов 6 и 5 ток течет через клемму 3, дугообразный элемент 8, контакты 6 и 5, дугообразную пластину 4, и клемму 2. Если замыкаются контакты 7 и 5, то ток течет через клемму 1, дугообразный элемент 9, контакты 7 и 5, дугообразную пластину 4, и клемму 2.

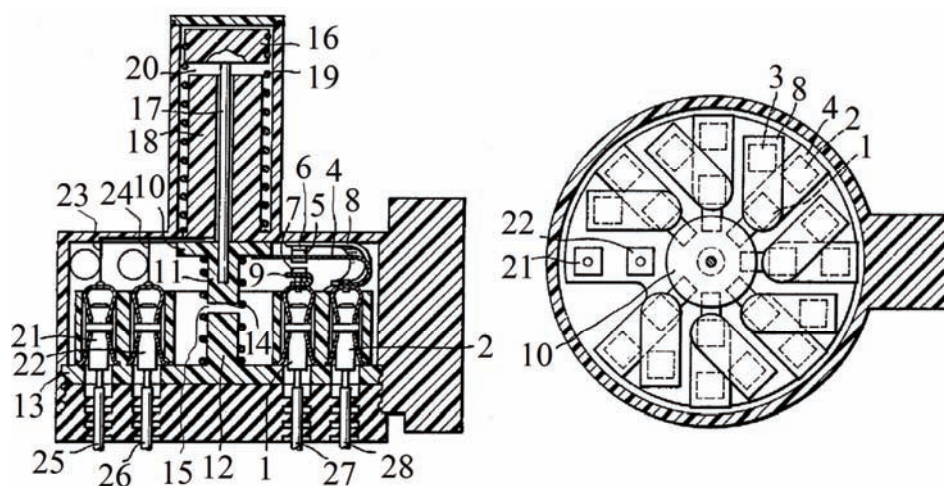


Рис. 2.82. Тепловое реле, способное переключать до семи секций

Пластина 4 одним концом закреплена к электрической клемме 2, а другой конец расположен под диском 10, который расположен на валу 11. На вал 11 и цилиндрический выступ 12, расположенный на основании 13, устанавливается сжатая пружина 14. Между валом 11 и выступом 12 предусмотрен зазор 15. Вал 11 жестко связан с поршнем 16 через стержень 17. Поршень 16 и направляющая 18 устанавливаются в элемент 19 так, что между ними имеется зазор 20. Активный элемент 19 при переходе из мартенситного состояния в аустенитное уменьшается в продольном размере (сжимается), совершая работу. Нагрев активного элемента 19 осуществляется с помощью электрического тока через контакты 21, 22. Активный элемент 19 сжимается, сдвигая поршень 16, уменьшая зазор 20. Через стержень 17 поступательное движение передается на вал 11. Диск 10, размещенный на валу 11, сгибает пластину 4, в результате замыкаются контакты 7 и 5. При опускании вала 11 пружина 14 сжимается и зазор 15 уменьшается. Как только подача тока на контакты 21, 22 прекращается, активный элемент 19 охлаждается, и сплав с памятью переходит из аустенитного состояния в мартенситное. Усилие сжатой пружины 14 поднимает крышку 10 и вал 11. В следствии этого упругая пластина 4 отгибается, размыкая контакты 7, 5 и замыкая контакты 6, 5.

Подключение реле к внешним устройствам, как показано на рисунке, осуществляется с помощью электрических проводов 25, 26, 27, и 28, которые механически соединяются с контактами 1, 2, 21, 22, 3.

Электрический переключатель [59], изображенный на рисунке 2.83, осуществляет замыкание контактов 6 и 7. Активный элемент 14 представляет собой витой элемент, работающий на кручение, нагрев осуществляется за счёт теплового излучения от светодиодов 10 и 11, охлаждение за счёт температуры окружающей среды.

Переключатель состоит из трех диэлектрических плат 1, 2 и 3. К плате 1 и 3 крепятся токопроводящие пластины 4 и 5, к которым подходят электрические контакты 6 и 7 соответственно. В платах 1 и 3 предусмотрены отверстия 8, 9, для установки светодиодов 10, 11. Средняя пластина 2 имеет “П” – образную форму с двумя плечами 12, 13. На плечи 12, 13 крепится тонкая скрученная проволока 14 в точках 15, 16. Проволока 14 выполнена из сплава с памятью. На проволоке 14, между плечами 12, 13 посередине установлена токопроводящая пластина 17. В зависимости от скручивания проволоки 14, пластина 17 может касаться пластин 4 и 5 частями 18 и 19. Для поворота пластины 17, предусмотрен зазор, который обеспечивается за счет упоров 20.

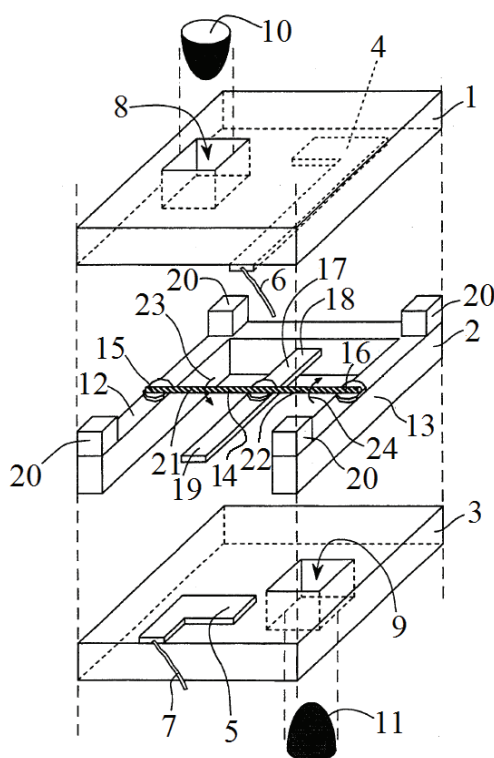


Рис. 2.83. Электрический переключатель

Изначально пластина 17 параллельна пластинам 1 и 3, и выключатель находится в положение “выключено”. После подачи напряжения на светодиод 10, тепловое излучение нагревает часть проволоки 21 до температуры аустенитного превращения, в результате этого проволока 14 скручивается в направлении стрелки 23. Проволока 14, скручиваясь, поворачивает пластину 17, в результате пластина 17 касается точками 18 и 19 пластин 4 и 5 соответственно, цепь замыкается и переключатель переходит в положение “включено”.

Если напряжение убрать со светодиода 10, и подать на светодиод 11, то часть нагретой проволоки – 21 остынет и сплав с памятью перейдет в мартенситное состояние, а другая часть проволоки – 22 нагреется и сплав с памятью перейдет в аустенитное состояние. Проволока начнет скручиваться в направлении стрелки 24, поворачивая пластину 17, размыкая электрическую цепь.

Предусматриваются различные модификации данного переключателя, отличия их от рассмотренного заключаются в следующем: нагрев элемента из сплава с памятью осуществляется за счет пропускания через него электрического тока; переключение реализуется между двумя электрическими цепями.

2.6. Динамические гасители колебаний

При динамических воздействиях на объекты применяются, как правило, динамические методы гашения колебаний. Метод гашения колебаний состоит в присоединении к объекту виброзащиты дополнительных устройств с целью изменения его состояния, которое может осуществляться путём перераспределения колебательной энергии как от объекта к гасителю, так и в направлении увеличения рассеяния энергии колебаний. Первое реализуется путём коррекции упругоинерционных свойств системы. В этом случае присоединяемые к объекту устройства называются инерционными динамическими гасителями. Они применяются для подавления узкополосных колебаний.

При действии вибрационных нагрузок более широкого частотного диапазона применяют второй способ, основанный на повышении диссипативных свойств системы путём присоединения к ней демпфирующих элементов. Динамические гасители диссипативного типа называются поглотителями энергии. Устройства,

в которых применяются оба способа называются динамическими гасителями с трением.

Сплавы с памятью в этом плане интересны своими уникально высокими диссипативными свойствами особенно в мартенситной фазе и нелинейностью механической характеристики.

Наиболее распространенным способом применения сплавов с памятью для гашения колебаний являются амортизаторы. Чаще всего это элементы в виде различных витых и тарельчатых пружин.

Однако существуют и другие иногда не простые технические решения.

Устройство, изображенное на рис. 2.84. предназначено для демпфирования колебаний алмазных отрезных кругов в технологии резания заготовок из твердых и хрупких материалов на пластины [60]. За счет элементов из сплава с памятью достигается автоматизация управления процессом демпфирования. Активный элемент 9 выполнен в форме стержня, работающий на изгиб. Нагрев АЭ осуществляется с помощью омического сопротивления, а охлаждение за счет конвективного теплообмена с окружающей средой.

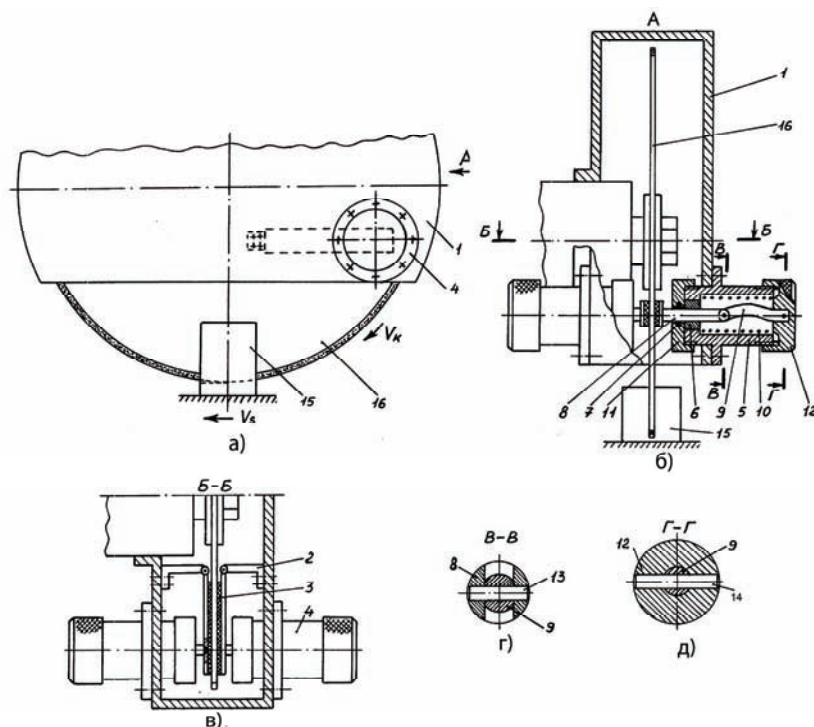


Рис. 2.84. Устройство для демпфирования колебаний

В процессе разрезания круг 16 углубляется в заготовку 15. Виброизмерительные датчики фиксируют амплитуду колебаний отрезного круга и передают ее в систему обратной связи. Как только амплитуда колебаний круга превысит допустимый уровень, подается сигнал на включение теплового элемента 10 (например, нихромовую спираль). Тепловой элемент 10 вырабатывает тепловой поток, который нагревает стержень 9 до температуры структурных превращений, стержень выгибается, и через шарнирное соединение (рис. 2.84. г) передает движение штоку 8, который прижимает демпфирующие элементы 3 к плоскости отрезанного круга 16.

Как только амплитуда колебаний круга уменьшится до допустимых значений, тепловой элемент 10 обесточивается, стержень 9 останавливается и принимает свою первоначальную криволинейную форму. Соответственно шток 8, перемещаемый стержнем 9, ослабляет силу прижима демпфирующих элементов 3 к плоскости круга 16.

Устройство для демпфирования колебаний отрезных кругов содержит кожух 1, установленные в нем держатели 2 в виде поворотных петель, демпфирующие элементы 3, закрепленные на подвижных частях держателей 2, и силовые элементы 4, смонтированные на кожухе 1 (рис. 2.84. а, б, в).

Силовой элемент 4 состоит из корпуса 5, втулки 6, сальника 7, перемещающегося во втулке 6 штока 8, АЭ в форме стержня 9, теплового элемента 10 и двух крышек 11 и 12 (рис. 2.84. б).

Шток 8 соединен шарнирно с одним концом стержня 9 при помощи оси 13 (рис. 2.84. в). Другим концом стержень 9 жестко заделан в крышку 12 при помощи оси 14 (рис. 2.84. г).

Тепловой элемент 10 расположен внутри корпуса 5 концентрично оси стержня 9 и полностью охватывает последний (рис. 2.84. б).

Токопроводящая система для теплового элемента 10 и виброизмерительные датчики системы обратной связи на рис. 2.84. условно не показаны.

В устройстве для микроподачи заготовок при шлифовании [61], изображенном на рис. 2.85. предусмотрена система клиньев 8 и 9, установленных на осно-

вании 1 и верхней плите 2, контактирующих с несущими шариками 7, расположенными в планках 6, закрепленных на концах активного элемента 4. Активный элемент 4 выполнен в форме трубы, работающей на сжатие. Нагрев АЭ осуществляется с помощью омического сопротивления, а охлаждение с помощью смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

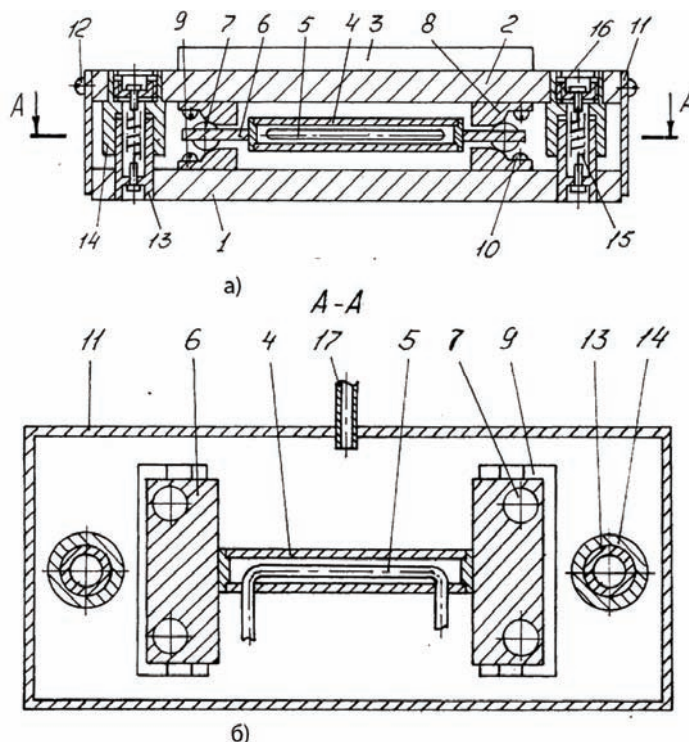


Рис. 2.85. Устройство для микроподачи заготовок при шлифовании

Устройство работает следующим образом: заготовку устанавливают и закрепляют в приспособлении 3, установленном на верхней плите 2. Включают станок и производят предварительное плоское шлифование заготовки. При этом работает механизм врезной подачи станка. На этом этапе цикла шлифования с заготовки снимается основная часть припуска. По окончании первого этапа цикла шлифования механизм врезной подачи станка отключается и на спираль 5 активного элемента 4 подается напряжение. Сплав с памятью переходит в аустенитное состояние и активный элемент укорачивается, перемещая планки 6 с шариками 7 по пазам клиньев 8 и 9, тем самым перемещая верхнюю плиту 2 вверх (рис. 2.85. а) по цилиндрическим направляющим 13 и 14, производя тем

самым микроподачу заготовки для съема всего заданного припуска. После выхода шариков 7 на параллельные основанию площадки клиньев 8 и 9 происходит выхаживание заготовки с целью обеспечения высокого качества шлифовальной поверхности. По окончании обработки напряжение со спирали теплового элемента снимается и на него через штуцер 17 подается СОЖ. При охлаждении и увеличении длины теплового элемента шарики 6 раздвигаются, под действием пружин 15 верхняя плита 2 опускается и все механизмы устройства возвращаются в исходное положение. При этом снижается уровень колебаний детали при обработке.

Устройство для микроподачи заготовок при шлифовании содержит: основание 1 и верхнюю плиту 2 с установленным на ней приспособлением 3 для закрепления заготовки; тепловой элемент 4, содержащий нагревательную спираль 5 и две планки 6, несущие шарики 7; клинья 8 и 9, закрепленные на верхней плите 2 и основании 1 винтами 10; кожух 11, закрепленный винтами 12 по периметру верхней плиты 2 и касающийся основания 1; две цилиндрические направляющие в виде скалок 13, неподвижно закрепленных в основании 1, и двух втулок 14, жестко связанных с верхней плитой 2; две пружины 15, одним концом закрепленные в скалках 13, а другим в винтах 16, ввернутых в верхнюю плиту 2 и служащих для натяжения пружин 15. В кожухе 11 расположен штуцер 17 для подачи СОЖ на тепловой элемент 4.

Комбинированный шлифовальный круг, показанный на рис. 2.86, предназначен для чистовой и отделочной обработки заготовок [62]. Активный элемент, имеющий форму гибкой ленты, и работающий на изгиб, повышает стойкость шлифовального круга следующим образом: на ленте жестко закреплены элементы с крупнозернистыми абразивными слоями, между ними расположены мелкозернистые абразивные элементы, которые радиально перемещаются за счет деформации ленты и принимают форму, обеспечивающую участие в резании всей абразивной поверхности. Нагрев АЭ осуществляется с помощью омического сопротивления, а охлаждение с помощью смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).

При этом одновременно достигается равномерность износа шлифовального круга и сохранения его цилиндричности, что, в свою очередь, снижает уровень вибрации.

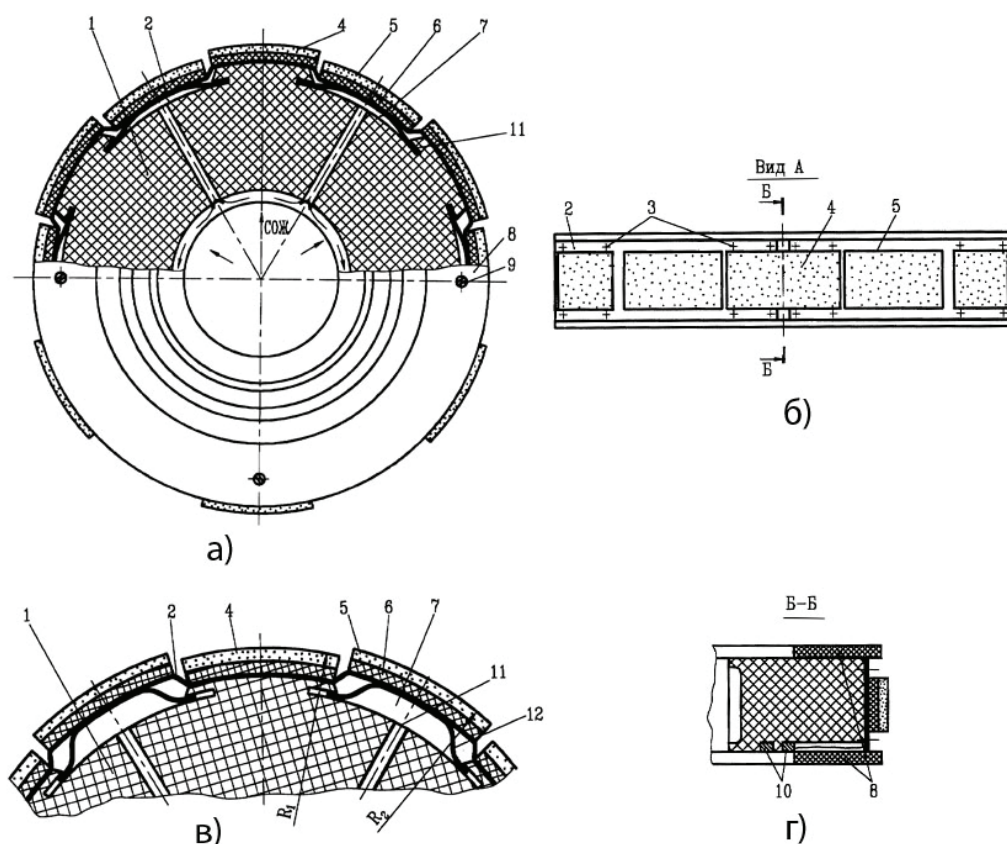


Рис. 2.86. Комбинированный шлифовальный круг

Комбинированный шлифовальный круг работает следующим образом. При съеме основного припуска (на предварительную обработку) шлифование осуществляется крупнозернистыми абразивными элементами 4, закрепленными неподвижно на корпусе 1 круга (рис. 3.3. а), на режимах, соответствующих предварительному шлифованию жестким инструментом. Врезная подача круга осуществляется механизмами шлифовального станка. При этом рабочая поверхность мелкозернистых элементов "утоплена", т.е. размещена в углублениях 7 круга 1, находится на некотором расстоянии от рабочей поверхности крупнозернистых элементов и не касается обрабатываемой поверхности заготовки.

После снятия основной части припуска вручную или по сигналу контролирующего устройства на ленту 2 подается электрический ток, в результате чего

она нагревается до 70-105оС и восстанавливает форму, полученную при предварительном деформировании (рис. 2.86. в). При этом эластичные вставки с мелкозернистыми абразивными слоями перемещаются в радиальном направлении, выступая за пределы крупнозернистых элементов ($R_2 > R_1$), с их помощью удаляется остальная часть припуска на режимах, соответствующих окончательному шлифованию нежестким (эластичным) инструментом. Величина радиального перемещения эластичных вставок с мелкозернистыми абразивными слоями определяется величиной предварительной деформации ленты 2. После окончания цикла шлифования лента 2 отключается от электрической цепи и принимает форму, изображенную на рис. 2.86. а. Возвращение ленты в исходное положение обеспечивают силовые пружины 12.

Для ускорения охлаждения ленты 2 по радиальным каналам 11, выполненным в корпусе круга, подают СОЖ.

Комбинированный шлифовальный круг содержит сплошной корпус 1 (рис. 2.86. а), ленту 2, установленную на периферии корпуса и закрепленную равномерно расположенными в нескольких местах винтами 3 (рис. 2.86. б). На ленте 2 (рис. 2.86. б) в местах ее жесткого крепления на корпусе 1 (рис. 2.86. а) закреплены элементы 4 (рис. 2.86. а) с крупнозернистыми абразивными слоями. На ленте 2 (рис. 2.86. в) в местах ее деформации размещены мелкозернистые элементы, выполненные в виде вставок, состоящие из абразивных слоев 5 и промежуточных эластичных прокладок 6. Для размещения участков ленты с мелкозернистыми элементами в период работы крупнозернистых элементов на корпусе круга выполнены углубления 7. Две планшайбы 8 (рис. 2.86. г) прикреплены с помощью винтов 9 (рис. 2.86. а) к корпусу круга 1. Круг содержит два токосъемных кольца 10 (рис. 2.86. г). В корпусе 1 выполнены радиальные каналы 11 (рис. 2.86. в) для подвода жидкости, охлаждающей ленту 2 с термомеханической памятью. Возвращение ленты в исходное положение обеспечивают силовые пружины 12.

2.7. Адаптивные системы

Летательные аппараты и оборудование на них размещённое, в частности, антенные устройства эксплуатируются в самых различных условиях. Однако,

практически во всех случаях они подвергаются динамическому воздействию (механическому и тепловому), в результате которого искажается форма антенны и, следовательно, чувствительность и разрешающая способность. Конструкции с жесткой геометрией представляется при этом, как компромисс между расчетными радиотехническими характеристиками и технико-экономическими показателями. В отличие от этого природа создала естественный адаптивный агрегат в виде крыла птицы, с помощью которого она, изменяя форму профиля, может оптимизировать условия своего полета. Имеющийся между традиционным обликом жёсткой конструкции и чутким крылом птицы огромный разрыв может быть уменьшен благодаря, использованию адаптивного профиля, представляющего собой интеллектуальную конструкцию, т.е. конструкцию, обладающую способностью обеспечения функций контроля и управления, которая программируется, закладывается в структуру при изготовлении, в том числе на уровне микроструктуры.

Исследования в этом направлении применительно к тяжелым транспортным самолетам в течение последнего времени активно проводятся в США и в Германии. Область применения интеллектуальных конструкций в антенной технике определяется тремя основными аспектами:

- повышение качества приёма-передачи информации за счёт оптимизации электродинамического и аэродинамического качества для конкретных рабочих режимов,
- расширение области применения радиолокации благодаря возможности перехода в более высокий частотный диапазон,
- снижение массо-габаритных характеристик конструкции,
- повышение экономического качества летательных аппаратов.

Конструкция с изменяемой кривизной позволяет оптимальным образом адаптироваться к изменению величины и распределения внешних механических и тепловых воздействий.

Названные концепции имеют целью разработку технологии несущих конструкций антенн и других объектов космического базирования, при которой, пу-

тем управления геометрией конструкции в целом или её частей, обеспечивается их эксплуатационное качество.

Благодаря появлению новых материалов, управляющих и чувствительных элементов, открывается долгосрочный и продуктивный потенциал решения указанной проблемы.

Основной базой для таких разработок стали материалы со специфическими свойствами – функциональные наноматериалы, к которым относятся и сплавы с памятью.

В настоящее время одной из актуальных задач является обнаружение скрытых объектов, объектов малых размеров и неоднородностей в различного рода средах. Одним из перспективных путей решения подобных, в частности, является использование широкозахватных технических устройств обнаружения, работающих в полосе частот от 100 МГц до нескольких ГГц, что дает возможность в зависимости от выбранной рабочей частоты или диапазона частот адаптироваться к свойствам зондируемой среды и размерам обнаруживаемого объекта.

Достижение такого уровня точности традиционными методами конструирования в условиях чрезвычайных жёстких требованиях, предъявляемых к космической технике, даже при использовании современных композитных волокнистых материалов, обладающими наиболее высокими удельными характеристиками прочности, жесткости, малыми температурными деформациями, но представляется возможным.

Альтернативным подходом, позволяющим решить задачу создания конструктивных систем высокой точности является концепция адаптивных, т.е. интеллектуальных конструкций и в перспективе материалов. При этом параметры конструкций должны не только достоверно определяться системой контрольных датчиков, но и находиться в заданных пределах благодаря действию исполнительных устройств. Адаптивные системы, встроенные в конструкции, позволяют управлять свойствами в процессе эксплуатации для обеспечения функционирования объекта на заданном уровне. Под интеллектуальными материа-

лами при этом понимаются композиционные материалы, включающие в себя все или почти составляющие элементы адаптивной системы, обеспечивающие функций контроля и управления, закладываемые в структуру и программируемые при изготовлении, в том числе на уровне нано и микроструктуры.

Для создания таких систем необходимо выявить основные принципы их структурного построения, требования к составным частям и способы реализации этих требований.

В общем случае адаптивная (самоуправляемая) система состоит из следующих основных частей:

- объект управления, функциональные параметры которого должны находиться в пределах установленного допуска;

- устройство контроля, содержащее чувствительные элементы, на которые влияют воздействия внешней среды и изменение состояния объекта управления по контролируемым параметрам;

- исполнительное устройство (регулятор), обеспечивающий поддержание или изменение состояния объекта управления по функциональным параметрам;

устройство обработки информации и управления, осуществляющие оперативную обработку информации по определенной программе и выдающие команду исполнительному устройству.

В адаптивных (интеллектуальных) конструкциях могут реализоваться самые различные виды управления, в том числе механическими свойствами (скорость, жесткость, колебания), тепловыми режимами (температура, поглощение тепла, теплопроводность, температурные деформации), оптическими и электромагнитными свойствами.

Например, применительно к антеннам основным параметрам, определяющим их функциональное состояние, является геометрия, т.е. поддержание формы антенны при внешних дестабилизирующих воздействиях. Очевидно, что контроль геометрии может осуществляться дискретно, ограниченным количеством датчиков, вне зависимости от их физического принципа действия. Отсюда следует важное требование к системе контроля: обеспечить достаточную достоверность

информации о форме контролируемой поверхности при минимальном количестве чувствительных элементов, определяющих отклонения выбранных для измерения координатных точек.

В условиях ограниченной информации (количество контрольных точек) решение поставленной задачи связано с разработкой соответствующего алгоритма аппроксимации.

Работоспособность конструкций космического базирования определяется их стойкостью к воздействию динамических и тепловых нагрузок. Динамические свойства конструкции главным образом определяются динамическими характеристиками материала - удельной жесткостью и диссипацией. По указанным параметрам композиционные материалы (углепластики, стеклопластики и др.) имеют значительно более высокие удельные показатели, чем металлические материалы. В частности, низкий коэффициент температурного расширения при высокой удельной прочности и жесткости углепластиков позволяет создавать легкие конструкции, стойкие к воздействию дестабилизирующих эксплуатационных факторов.

Стойкость конструкций космического базирования при тепловых воздействиях определяется, главным образом, температурными деформациями, возникающими, при действии на них переменных тепловых потоков.

С другой стороны, низкая теплопроводность композитов приводит, как правило, к большим, по величине, градиентам температур в объеме конструкции антенны, что вызывает существенные изменения её формы и ухудшение ее функциональных свойств, приводящее к сбоям или отказам в работе системы.

Существует два основных способа построения адаптивных систем – дискретный и континуальный. При дискретном способе конструкция расчленяется на отдельные составные части (например, панели), между которыми размещаются регулирующие силовые элементы, обеспечивающие уменьшение прогиба путём поворота панели относительно соседних.

Пример такого элемента торсионного типа, выполненного из высокотемпературного сплава системы никель-титан рассмотрен в разделе 2.2.2.

Континуальный способ термокомпенсации может быть реализован для конструкций малых размеров, например, панелей или. При этом силовые элементы встраиваются в конструкцию в виде определённой структуры отработывая, требуемым образом, взаимное расположение панелей, и являются её неотъемлемой частью.

Управление системой при этом определяется характером деформирования. В простейшем случае, например, если задача плоская, схема управления мало отличается от дискретного варианта. Однако при более сложных видах деформирования структура силовых элементов и алгоритмы управления существенно усложняются. Поэтому важной технической задачей является создание достоверных методов расчёта элементов управления.

В зависимости от конструктивного вида объекта управления и характера его деформирования при механических и тепловых воздействиях структура активных элементов может быть различной.

Сложное деформирование стержня, включающее все три вида деформации требует создания структуры активных элементов, включающей в себя все три перечисленные компоненты.

В частности, в двумерных конструкциях активные элементы могут выполняться в виде проволоки, из которой формируется сетка, встраиваемая в конструкцию таким образом, чтобы обеспечить необходимую компенсацию возникающих в процессе эксплуатации прогибов. Структура сетки в этом случае во многом определяется априорной информацией о возможных возмущающих эксплуатационных воздействиях и разработанном на основе этой информации прогнозе о виде и характере деформирования системы.

В ферменных конструкциях управление осуществляется путем изменения длины стержней. С этой целью формируется структура активных элементов таким образом, чтобы число задействованных стержней было минимальным.

Точность, обеспечиваемая при компенсации искажения геометрии объекта определяется не только статическими характеристиками активных элементов, но и их реакцией во времени. Динамика процесса определяется инертностью

самих активных элементов, датчиков и элементов управления как информационных, так и командных.

Ввиду относительно большой инерционности элементов из сплавов с памятью их применение целесообразно при компенсации деформаций, связанных с тепловым воздействием.

При использовании континуального метода термокомпенсации активные элементы, как уже отмечалось, выполняются в виде тонкой проволоки или нити, работающей на растяжение. При этом нити располагаются на некотором расстоянии h от срединной поверхности и закрепляются по краям пластины. Таким образом при восстановлении деформации активные элементы создают по краям пластины изгибающиеся моменты и сжимающиеся силы. В прямоугольной пластине активные элементы располагаются параллельно ее сторонам, а в круглой пластине — в радиальном направлении r , в случае необходимости, в окружном.

При малых прогибах, существенно меньших по сравнению с толщиной влиянием сжимающих сил можно пренебречь, и тогда деформированное состояние пластины будет определяться изгибающими моментами, распределенными по краям пластины.

Восстановление деформации активных элементов (АЭ) осуществляется за счет джоулева тепла при прохождении через них электрического тока. Ошибка управления при этом связана с оценкой физических (тепловых и механических) свойств активного элемента и с параметрами источника питания. При управлении по напряжению интенсивного нагрева, а, следовательно, и скорость реакции исполнительного элемента зависит от напряжения. Поэтому регулирование интенсивности нагрева целесообразно проводить путем регулирования напряжения методом широтно-импульсной модуляции.

Существующие источники питания постоянного тока имеют весьма высокие колебания по напряжению (10% и более) и поэтому не могут обеспечить надежного управления системами, к которым относятся и термостабильные адаптивные системы.

Альтернативный способ заключается в управлении в импульсном режиме, когда на некоторое значение постоянного напряжения U накладываются прямоугольные импульсы с амплитудой U_u , длительностью Δt и скважностью τ .

Таким образом, подбирая первичный источник питания и варьируя значения постоянной составляющей, амплитудой напряжения и частотой импульсов, можно добиться достаточно высокого качества управляющего сигнала.

2.8. Программируемые конструкции

Ползучесть материалов приводит к снижению несущей способности конструкций. Это связано с возникновением недопустимо больших по условиям эксплуатации деформаций.

При расчёте на ползучесть обычно определяется время, по истечении которого деформация достигает предельно допустимой величины, которая для металлов составляет 0,1 – 0,2%. На значительно большую величину без разрушения деформируются некоторые неметаллические материалы. Однако и в этом случае при проектировании ограничиваются малыми деформациями, исходя из условий работы изделия. Например, изменение размеров подшипника скольжения из полиамида при длительном действии нагрузки приводит к увеличению зазора в соединении, что приводит к нарушению работы зубчатого зацепления.

Менее известным является полезное использование ползучести в технике. С этой целью подбираются такие материалы, у которых деформация ползучести соизмерима с размером детали. На основе этих материалов могут быть созданы различного типа устройства, в которых осуществляется изменение геометрии объекта или задержка исполнительного действия после подачи управляющего сигнала, например, развёртывание складной конструкции, размещаемой в летательном аппарате.

Устройство такого типа содержит два основных элемента. Первый выполняется из материала, обладающего хладотекучестью (полимера), у которого деформация ползучести соизмерима с размерами детали (например, стержня). Другой элемент создаёт нагрузку на первый элемент (например, растяжение стержня), инициируя процесс ползучести последнего. Величина рабочего хода

силового элемента должна быть достаточной, чтобы полностью реализовать процесс ползучести.

Очевидно, что постановка задачи проектирования и расчёта таких устройств в корне отличается от постановки традиционной задачи теории ползучести.

Механические свойства полимера определяются его кристаллическим строением. При малых деформациях полимер ведёт себя как упругое тело, и его деформация связана с изменением межмолекулярных расстояний, валентных узлов и межатомных расстояний. Упругость при малых деформациях обусловлена изменением внутренней энергии, как и в других твёрдых телах. При больших деформациях в кристаллических полимерах совершается структурный переход от кристаллической исходной фазы к ориентированной вдоль оси деформирования. Установлено, что одной из причин ползучести полимеров является вынужденно-эластичная деформация, развивающаяся при температурах меньших, чем температура стеклования, а другая состоит в перекристаллизации и разрушении структуры, что иногда сопровождается образованием мельчайших трещин. Для описания процесса ползучести существуют разные модели: теория ползучести, гипотеза упрочнения, гипотеза течения, гипотеза старения, теория наследственности. Так как универсальной зависимости для всех материалов найти не удаётся, то ограничивают число переменных и связывают их определённой, обычно несложной аналитической зависимостью, наиболее полно согласующейся с результатами экспериментов.

Разработанная расчётная модель получена на основе теории наследственности деформируемого твёрдого тела. На основе этой теории для вязкоупругого тела деформация в любой момент времени t определяется следующим выражением:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) / E + \int K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau$$

где $\varepsilon(t) = \ln L(t)/L_0$ - истинная деформация, L_0 - начальная длина, $\sigma(t)$ - напряжение, генерируемое силовым элементом, E - мгновенный модуль упругости, $K(t - \tau)$ - ядро оператора Вольтерра, характеризующее наследственные свойства материала и в общем случае зависит не только от напряжения, но и от температуры - T .

При постоянной внешней нагрузке выражение (3.1) можно упростить:

Тогда решение уравнения получается в следующем виде:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left(1 + \int_0^t K(t - \tau) d\tau \right)$$

где $\varepsilon_0 = \sigma_0 / E$

Для стержня, нагруженного силой P , $\sigma_0 = P/F_0$, F_0 – начальная площадь поперечного сечения стержня. Уменьшение площади сечения в процессе деформирования может быть учтено путём соответствующей коррекции функции $K(t - \tau)$. Последняя в общем случае зависит не только от напряжения (нагрузки), но и от температуры. В ряде случаев решение уравнения (3.2) может быть получено в виде:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left(1 + A(T) / \varepsilon_0 (1 - e^{-B(\sigma, T)t}) \right)$$

где коэффициенты $A(T)$ и $B(\sigma, T)$ должны быть определены экспериментально. Такие эксперименты проводились в течение нескольких лет на образцах из фторопласта. Первая серия испытаний проводилась на универсальной разрывной машине 2042 Р-5 при комнатной температуре в автоматическом режиме с записью регистрирующим устройством графика зависимости $\Delta l = f(P)$, Δl – удлинение образца, P – усилие на захватах машины. В результате испытаний был определен предел текучести материала при комнатной температуре. Последующие испытания проводились в термостабильных условиях под нагрузкой, создаваемой грузами так, чтобы напряжение в образце превышало предел текучести. Удлинение образца замерялось визуально по линейке, установленной рядом с испытуемым образцом. Кроме того, в контрольных сечениях проводились замеры диаметра образца. Время измерений строго фиксировалось. Результаты испытаний представлялись в виде графиков вида: $\Delta L_p = f(t)$ или $\varepsilon_\sigma = f(t)$.

Варьируя нагрузку и температуру, получаем выборку для определения параметров $A(T)$ и $B(\sigma)$. В частности, при температуре $T = 36^\circ \text{C}$ получены следующие результаты:

$$A = 1,314; B = (34,2 \varepsilon_0)^6$$

Проведенные испытания, а также испытания одномерных макетов подтвердили возможность создания программируемых конструкций, в которых осуществляется изменение во времени геометрии по заданной программе.

Полученные результаты можно характеризовать как оценочные, во-первых, ввиду малости выборки, что связано с большой длительностью испытаний, и, во-вторых, невозможностью определения мгновенного модуля упругости, для чего требуется современное оборудование с постоянной времени 0,001с. Следует отметить, что современное оборудование позволяет проводить ускоренные испытания на ползучесть.

Проведение таких исследований позволит программировать развитие объектов с высокой точностью, в том числе в течение длительного времени.

В качестве контрэлемента в программируемой конструкции можно использовать пружину, усилие которой в пределах рабочего хода соизмеримое с L_0 изменялось (уменьшалось) на возможно меньшую величину. Этого можно достичь, если выполнить пружину из материала, обладающего псевдоупругостью. Такими материалами, например, являются никелиды титана. Диаграмма деформирования этого сплава (физическое соотношение) может быть аппроксимирована следующим уравнением:

$$\sigma = \varepsilon E^m$$

где $m = 1/3$ показатель степени в области псевдоупругости.

Рабочая характеристика пружины может быть определена из следующего уравнения:

$$\lambda = 2\pi n P^{\frac{1}{m}} R^{\frac{2m+1}{m}} \left[\left(\frac{\cos 2\alpha}{I_{кр}^*} \right)^{\frac{1}{m}} + 0,5 \left(\frac{\sin 2\alpha}{2EI_x^*} \right)^{\frac{1}{m}} \right]$$

Здесь: λ - перемещение пружины; n – количество витков пружины; R - радиус витка пружины; α – угол подъёма витка пружины.

Расчёт по этой формуле ведётся методом последовательного догружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ РАЗДЕЛА 2

1. Джексон К.М. и др. 55-нитинол, обладающий памятью; его металлургия, свойства и применение. ВЦП НТЛ, перевод №Ц-63445, М., 1976, 236с.
2. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохоров И.И. Применение ЭПФ в современном машиностроении.-М. :Машиностроение, 1981
3. Хамако Т., Сато С. Расчеты и проектирование пружин из сплавов с эффектом запоминания формы: Пер. с японского / ВЦП. — 1986. - № Л-50520. - с.24.
4. Крахин О.И., Белотелов Ю.А. Материалы с термомеханической памятью в приводах роботов и манипуляторов. Тезисы докладов IV Всесоюзного совещания по робототехническим системам.- Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, 1987, с 197-198
5. Крахин О.И., Глезерман Е.Г. Некоторые вопросы проектирования и расчёта приводов одноразового действия//Современные проблемы динамики машин и их синтез.-М.:МАИ, 1985, с. 21-25.
6. O.Krahin, A.Zotov: The calculation and design of adaptive structures components based on memory shape alloys // Luft- und Raumfahrt vor dem neuen Jahrtausend, Berlin, 1999.
7. Katsutoshi Kuribayashi, A New Actuator of a Joint Mechanism Using Ti-Ni Alloy Wire. The International Journal of Robotics Research. Vol. 4, №4, Winter 1986, p.p.47-58
8. Крахин О.И., Кузнецов А.П., Косов М.Г. Материалы с термомеханической памятью в станкостроении.- М: ВНИИТЭМР, 1988. -68с.
9. E. Hornbogen. Schersystem in der Kristallen von Legierungen mit Formgedächtnis übernimmt die Rolle der Gelenke Maschinenmarkt // Würzburg-93. — 1987, №9, s.58-61.
10. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. — Л.: Изд-во Ленингр. университета, 1987. - с.216.
11. Цукерман Э.М. Детали машин из материалов с памятью формы. «Итоги науки и техники», серия «Машиностроительные материалы, конструкции и

расчёт деталей машин. Гидропривод», т.10.-М., 1988, с 3-23

12. Melton K., Duerig T. Industrial application of shape memory alloys, Metallurgia, 1985, p. 318.

13. Benastean Donique-Maric. Les alliages a memoire retrouvent la forme.- Usine nouv., 1986, №42, Suppl. Pp 90-95

14. Судзуки Юити. Использование сплавов с памятью формы в деталях машин. - "Кикай-но кэнкю, Sci. Mach.", 1985, .№10, pp.1145-1149 (РЖ, 1987, 6.48.482).

15. Афанасьев С.П., Печников А.С., Савельев А.И. Безрезьбовое крепежное соединение. -А.с. № 1300207, СССР. Заявл. 10.07.85. Оpubл. в Б.И., 1987, № 12.

16. Остапенко А.В. Заклепка. - А.с. № 1278500, СССР. Заявл. 02.11.84. Оpubл. в Б.И.. 1986, № 47. МКИ F 16B 19/08.

17. Фаддев В.Б. и др. Способ соединения труб. - А.с..№ 1200013, СССР. Заявл. 04.02.85. Оpubл. в Б.И., 1985, № 47. МКИ F 16 D 1/02.

18. Крахин О.И., Спешинский В. С. Исследование материалов, обладающих термомеханическим эффектом, в приводных устройствах. - Сб. Проектирование механизмов ЛА и аэродинамических поверхностей". – М. МАИ, деп. № 594-Га 87, ЦНТИ ГА, с.41-46.

19. Tautzenberger P., Stockel D. Anwendung von Formgedacht-nis-tegierungen in der Technik. ZWF, 1986, - 81, №12, pp. 705-708.

20. Lemme Charles D. Automatic tcekeup and overload protection device for shape memory metal actuator. Пат. № 4567549, США, заявл. 21.02.85. опубл. 28.01,86. .МКИ У 03 67/06, Н 01 Н 61/04, НКН 362/279.

21. Лямин А.Е. и др. Фрикционная муфта с дистанционным управлением. - А.с. №1275155. СССР. Заявл. 18.01.85. Оpubл. в Б.И.. 1986. №45, МКИ F 16 D 25/04.

22. Лямин А.Е. и др. Фрикционная муфта. - А.с. № 1239434, Х!СР. Заявл. 22.01.85. Оpubл. в Б.И.. 1986. № 23. МКИ F 16 D 43/25, F 16 D 47/80.

23. Крахин О.И. Конструкции из материалов с термомеханической памятью и их расчет. - Деп. в п/я Р-6704 №3-8530, 1987.

24. J.F. Johnson, D. Reisez, G.S. Ovrevik. Erectable structure for a space environment. Keltik Industries, Inc. Пат. США № 3391889.

25. Иванов Г.И. и др. Устройство для преобразования тепловой энергии в механическую.- А.С. №1317179, СССР. Заявл. 17.12.85. Оpubл. в Б.И., 1987, №22. МКИ F 03 G 7/06.

26. Эхата Ясуо и др. Передача с гибкой связью из материала с памятью формы. – К.к. Тосиба. Заявка 60-219477. Япония. Заявл. 13.04.84. Оpubл. 02.11.85. МКИ F 03 G 7/06.

27. Ида Набухиро. Механизмы с эффектом памяти формы. – Киндзоку, Metals and Technol., 1985, №8, pp/ 46-50 (РЖ, 1986, 1.48.434).

28. Эффект памяти формы в сплавах. Пер. с англ. Под ред. Займовского В.А.- М., 1979, 217 с.

29. Мергазизов М.З., Гюнтер В.Е., Итин В.И. и др. Сверхэластичные импланты и конструкции из сплавов с памятью формы в стоматологии: Quintessenz Veriags GmbH, Berlin, 231 p.

30. Крахин О.И., Зенин В.А., Фатьянов С.А. Термомеханические двигатели и энергетические установки на основе сплавов с памятью// Вестник МАИ; М. 2010, с 120-130.

31. Patent No 4117680, Continuous loop shape memory effect heat engine, Ronald H. Smith, San Francisco, California

32. Patent No 4393654, Shape memory element engine, L.Ronald Pelly, Box 385, Fillmore, CA 93015

33. Patent No 5442914, Shape memory alloy heat engine, George K. Otsuka, 15545 N. Brentwood, Channelview, Tex. 77530

34. US 4938026, 3.07.1990, Heat engine based on shape memory alloys, David Goldstein, Adelphi, Md.

35. US 6786045, 7.09.2004, Thermal reciprocating engine, Howard Letovsky, Willits, CA (US).

36. RU 2086863, 18.07.1994, Гелиомеханический преобразователь энергии, Карминский В.Д.

37. RU 2089794, 11.07.1994, Гелиоустановка, Карминский В.Д.
38. US 4257231, 24.03.1981, Heat engine, Ridgway M. Banks, B Stannage Ave., Berkeley, Calif.
39. US 4055955, 1.11.1977, Memory alloy heat engine and method of operation, Alfred Davis Johnson, Oakland, Calif.
40. US 4996842, 5.03.1991, Heat engine with corrugated shape memory drive belt, David Goldstein, Adelphi, Md.
41. US 4305250, 15.12.1981, Solid state heat engine, John S. Cory, View Point Ave., Escondido, Calif.
42. US № 3913326, 21.10.1975, Energy conversion system, Ridgway M. Banks, Orinda, Calif.
43. US 4037411, 26.07.1977, Thermal energy converting assembly, Peter A. Hochstein, Sterling Heights, Mich.
44. US 4086769, 20.5.1978, Compound memory engine, Warren K. Smith, Poway, Calif.
45. Billy J., Karel V., Longuer S., Janak G. Termoelasticka Martensitika Transformacia CuAlNi Zliatinach s Tvarovou Pamaton. 'Kavove mater'. 1986, 24, n 5, 584-588.
46. Blackwood G.H., Chu C-C, Fanson J.L. and Sirlin S.W. 'Uncertainty Modeling for the Control of an Active Structure'. Adaptive Structures, ASME AD-Vol.15, 1989, pp. 43-51.
47. Blackwoode G.H. and von Flotow A.H. 'Experimental Component Mode Synthesis of Structures with Sloppy Joints', Proceedings of the 29th SDM Conference, Williamsburg, VA, April, 1988.
48. US 4027479 7.06.77, Variable density heat engine, John S. Cory, View Point, Escondido, Calif.
49. SU 1649198 A1, 05.01.89, Манжетное уплотнение, М.Г. Косов, О.И. Крахин, А.П. Кузнецов и др., Московский станкоинструментальный институт.
50. Отцука К., Симидзу К., Судзуки Ю., Сэкичуги Ю., Тадаки Ц., Хомма Т., Миядзаки С. Сплавы с эффектом памяти формы: пер. с японского. М.: Металлургия, 1990. - 221 с.

51. US 4896728, 30.01.1990, Fire sprinklers with frangible body closing a flow passage and separate means for shattering same, Heinz S. Wolff, London; David W. Hawes, Cuckfield, both of England.

52. RU 94045959, 21.10.1994, Противопожарная установка, Геран Сундхольм.

53. US 5990777A, 23.11.1999, Shape memory wire actuated switch, Robert Neil Middletown, Whiteman, Jr., Pa.

54. US 6603386 B2, 5.08.2003, Bi stable microswitch including shape memory alloy latch, Dinesh Kumar Sood, Ringwood (AU); Ronald Barry Zmood, North Caulfield (AU).

55. RU 94043008, 30.11.1994, Датчик-реле температуры, Кондраков И.М., Хачин В.Н.

56. US 6239686, 5.29.2001, Temperature responsive switch with shape memory actuator, Philip B. Eder, Mansfield; William F. Quinn, Greenwich; Mark A. Roberts, Mansfield; Richard E. Welch, Lexington, all of OH (US); David W. Clow, Spring Lake, MI (US).

57. US 6837620, 4.01.2005, Shape memory alloy temperature sensor, Mohsen Shahinpoor, 9910 Tamoan Dr., NE., Albuquerque, NM (US) 87111.

58. US 4949061, 14.08.1990, Electromechanical relay, Safa Kirma, Wedel/Holstein, Fed. Rep. of Germany.

59. US 5410290, 25.04.1995, Shape memory alloy relays and switches, Dong-II Cho, Dept. of Control & Instrumentation Engineering Seoul National University, Kwanaku-ku, Shinlim-dong San 56-1 Seoul 151-742, Rep. of Korea.

60. RU 2109632, Устройство для демпфирования колебаний, Худобин Л.В., Крупенников О.Г., Кремнев М.В., Ульяновский государственный технический университет.

61. RU 2092299, Устройство для микроподачи заготовок при шлифовании, Худобин Л.В.; Псигин Ю.В.; Мукин А.А., Ульяновский государственный технический университет.

62. RU 2151047, Комбинированный шлифовальный круг, Худобин Л.В.; Правиков Ю.М.; Муслина Г.Р.; Обшивалкин М.Ю., Ульяновский государственный технический университет.

63. US 1699298, Приводное устройство, О.И.Крахин, А.П.Кузнецов, М.Г.Косов и Ю.А. Белотелов, Опубл. 07.12.91, Бюл. №45

64. Глущенко В. А., Феоктистов В. С. и др. Пресс для штамповки. А. с, № 1184697, СССР МКИ В 30 В 13/00, 15/34. Б. И. № 38, 1985.

65. Глущенко В. А., Феоктистов В. С. Пресс для штамповки А. с. № 1159805, СССР МКИ В 30 В 15/34, 13/00. Б. И. № 2.1, 1985.

66. Мацусима К-, Усуи Н. Микросхват из формозапоминающего сплава// Робот. — 1986. — № 53. — С. 122—126.

67. RU 2015413, Привод линейных перемещений, М.Г. Косов, О.И. Крахин, А.П. Кузнецов и др., Московский станкоинструментальный институт.