

Н. В. АВДЕЕВ

Т Е О Р И Я
И П Р А К Т И К А
М Е Т А Л Л И Р О В А Н И Я



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УзССР
ТАШКЕНТСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ

Н. В. АДДЕЕВ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УзССР
ТАШКЕНТ 1978



Авдеев Н. В. Теория и практика металлизации. Ташкент, Издательство «Фан» УзССР, 1978. Рис. 15, табл. 12, библиограф. 37 назв., стр. 76.

В работе изложены классификация и технико-экономическая оценка существующих способов нанесения покрытий, дается описание технологии металлизации, свойств получаемых покрытий, работоспособности металлизированных изделий, рекомендаций по выбору технологии металлизации и экономическим обоснованиям предлагаемого способа. Сущность его состоит в нанесении на покрываемую поверхность «сырого слоя», состоящего из порошка, гранул, волокон, пластин, оболочек, армированных систем или композиции, нанесенных напре-совкой, пульверизацией, шликерным или другими способами, и последующей термической или термомеханической обработки.

Книга рассчитана на работников промышленных и научно-исследовательских учреждений, а также студентов и аспирантов, занимающихся вопросами повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов.

Ответственный редактор канд. техн. наук Н. Б а б а с в.

ВВЕДЕНИЕ

Производство предметов материальной культуры с древних времен связано с применением покрытий для улучшения их функциональных и эстетических достоинств. В настоящее время нанесение покрытий для защиты конструкционных материалов от вредного воздействия факторов окружающей среды или придания поверхности специальных свойств является весьма важной областью промышленного производства, без которой уже невозможно решение многих задач новой техники.

В промышленности используется или находится в стадии внедрения значительное количество различных способов нанесения покрытий. Много сделано для создания различных типов покрытий учеными, инженерами и технологами. Однако задачи, поставленные производством, настолько велики и ответственные, что достигнутые результаты не могут быть признаны удовлетворительными. Вследствие этого совершенствование существующих и разработка новых способов нанесения является важной народнохозяйственной задачей.

В первой главе данной книги рассмотрены технико-экономические оценки существующих способов нанесения покрытий и на основании их анализа обоснованы перспективы нового способа нанесения покрытий — металлизации. Во второй главе изложены технология металлизации, физико-химические процессы, происходящие при нанесении и образовании покрытия, физико-механические технологические свойства покрытий, нанесенных металлизацией, а также экономические расчеты металлизации.

Преимущества металлизации — легкость полной автоматизации, наиболее полное использование исходных материалов, а соответственно относительно низкая себестоимость, высокие свойства покрытий и изделий с покрытиями. Все это определяет перспективность практического применения описанного способа.

НАЗНАЧЕНИЕ, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

1.1 Назначение и классификация покрытий

Покрытиями называются покровные слои, нанесенные на изделия для придания их поверхности специальных (необходимых) свойств или изменения (восстановления) размеров основания. Покрытие — это искусственно созданный поверхностный слой материала, неразъемно сцепленный с основанием (изделием). Если получение покрытий связано с соответствующей обработкой поверхностного слоя — закалкой, накаткой, цементацией, борированием и т. д., наиболее целесообразно использовать слово «создание», а не «нанесение».

Все детали машин, механизмов и сооружений взаимодействуют с окружающей средой — газами, жидкостями и твердыми телами (в том числе и с сопряженными). Вследствие взаимодействия, а также действия различных полей (тепловых, электромагнитных, радиационных и гравитационных) внутри материала детали возникают напряжения, а на поверхности протекают физико-химические процессы — адсорбция, коррозия, эрозия, трение, трещинообразование и т. д. От интенсивности этих процессов зависит надежность и долговечность большинства деталей, определяющих ресурс работы машин и сооружений.

Таким образом, защита конструкционных материалов от разрушения состоит в уменьшении скорости или устранении вообще отеченных выше поверхностных процессов. Исходя из этого, надежность и долговечность большинства деталей могут быть значительно увеличены: использованием материалов с повышенным сопротивлением поверхностным процессам, изменением структуры или химического состава поверхностного слоя, нанесением покрытий из материала с максимальным или достаточным сопротивлением внешним воздействиям.

Основное направление повышения надежности и долговечности деталей и узлов в данное время — использование при их изготовлении материалов с повышенным сопротивлением внешнему воздействию. В связи с этим в производстве все больше используются легированные сплавы, композиционные и другие материалы с высо-

кими и специфическими свойствами: сталь 40X, X25H14, BT10, Ni, армированный W и т. д.

Применение материалов с повышенными свойствами увеличивает срок службы деталей в 1,5—3,0 раза и более. Однако в условиях непрерывного повышения параметров внешнего воздействия однородный по всему объему детали материал во многих случаях не в состоянии обеспечить надежность и желаемую долговечность. Кроме этого, материалы (сплавы, керметы, волокнистые материалы и т. п.), которые обеспечивают наименьшую скорость поверхностных явлений, в большинстве случаев не обладают достаточным сопротивлением другим (не поверхностным) воздействиям (ударным или циклическим нагрузкам и т. д.), не удовлетворяют производство по технологическим свойствам (ковкости, обрабатываемости и т. п.) или технико-экономическим показателям. Это объясняется тем, что производство легированных сплавов, композиционных и других материалов с высокими свойствами связано с использованием дорогостоящих и дефицитных компонентов и, естественно, ограничивает их применение в массовом производстве на широком классе деталей.

Наиболее целесообразно основную часть детали изготавливать из малodeфицитного (дешевого) материала с хорошими (достаточными) технологическими свойствами и высокой сопротивляемостью внутренним напряжениям, а поверхности изготавливать из материала, который обладает высокой сопротивляемостью поверхностным процессам (коррозии, изнашиванию и т. д.). Такая конструкция деталей называется композитной. Композитные детали изготавливаются с помощью термической или химико-термической обработкой, биметалла и нанесения покрытий.

Термическая обработка в виде поверхностной закалки — наиболее широко распространенный в данное время способ повышения сопротивляемости поверхностных слоев, так как она технологически относительно проста и в ряде случаев дает удовлетворительные результаты. Однако получаемая при термической обработке структура обладает в подавляющем большинстве случаев значительно меньшей сопротивляемостью поверхностным процессам, чем материал (структура) с максимально возможными или достаточными свойствами.

Химико-термическая обработка (нитроцементация, борирование и т. д.) более совершенный способ повышения свойств поверхностных слоев материала, и на ряде деталей достигается сопротивляемость поверхностным явлениям, которая обеспечивает долговечность детали до планируемого срока работы машины или механизма [10]. Однако при химико-термической обработке за основу поверхностного слоя принимается материал основания, что является значительным ограничением в достижении максимальных свойств. Кроме того, малая толщина диффузионных слоев (борирование и т. д.), снижающая несущую способность изделия, корабле-

ние при нагреве и охлаждении и ряд других невысоких показателей сужают область применения химико-термической обработки.

Один из достаточно широко применяемых в данное время и перспективных в будущем способов защиты конструкционных материалов — использование при изготовлении деталей, узлов и конструкций многослойного материала (биметалла) [7]. Однако следует отметить, что при производстве многослойного материала используются металлы (сплавы) с относительно высокой пластичностью, а этим свойством, к сожалению, не обладают многие материалы с высокой жаростойкостью, износостойкостью и другими защитными свойствами. Кроме того, для многих деталей защита необходима лишь для небольших участков поверхности, а применение биметалла экономически оправдано в том случае, когда создаваемая защита «работает» по всей или значительной поверхности изделия (конструкции).

Наиболее универсальным и эффективным способом защиты конструкционного материала является нанесение защитных покрытий. Нанесение покрытий — не просто повышение или улучшение эксплуатационных характеристик изделия, а создание по существу принципиально новой композиции, обладающей высокими свойствами, которые позволяют изменить конструкцию детали или узла и значительно повысить производительность машин и механизмов при увеличении их надежности и долговечности. Нанесение покрытий дает возможность наиболее рационально и экономически рентабельно использовать материалы по их физико-механическим свойствам, упростить в ряде случаев технологию изготовления деталей, заменить дорогостоящие и редкие металлы менее дефицитными материалами без снижения работоспособности деталей, конструкций и механизмов, а в большинстве случаев — с ее повышением [25]. Эти факторы в наибольшей мере проявляются при серийном и массовом производстве.

Дальнейшее развитие народного хозяйства связано с использованием непрерывно возрастающего количества различных машин и механизмов. С увеличением мощности и быстроходности машин, ростом автоматизации, усложнением условий эксплуатации особенно становится важной задача повышения качества машин, которую можно решить путем комплекса конструктивных, технологических и эксплуатационных мероприятий. При этом важную роль должны сыграть защитные и специальные покрытия.

Для восстановления изношенных деталей и узлов важное значение имеет металлопокрытие. Нанося покрытия, можно увеличить размеры изделия до требуемых. Материал с повышенными свойствами увеличивает в несколько раз срок службы восстановленной детали по сравнению с новой. Многократное нанесение покрытий обеспечивает долговечность даже таких быстро выходящих из строя деталей как лемеха, валы, билы, направляющие и т. д. [20]. Как известно, самое слабое звено ремонтного производства — технология восстановления изношенных деталей: значитель-

ные расходы материальных средств приближают стоимость ремонта к стоимости новых машин и механизмов без повышения их долговечности. Созданием технической базы на основе прогрессивных способов нанесения покрытий можно коренным образом усовершенствовать технологию восстановления деталей и сделать ремонтное производство высокорентабельным.

Покрытия классифицируются по назначению, т. е. по функциональным признакам, способу нанесения, роду материала и строению (схема 1).

1. В общей проблеме надежности, долговечности и точности машин, основная роль принадлежит вопросам трения, смазки и износа, а в сфере этих вопросов — влиянию состояния и свойств тончайших слоев, граничащих с поверхностями трения. Следовательно, металлопокрытие, обеспечивающее нанесение слоев с требуемыми химическим составом и структурой, приобретает первостепенную роль в создании антифрикционных, фрикционных, противоэрозионных и т. п. поверхностей, соответственно, и в решении важнейших задач машиностроения [19].

В связи с непрерывно увеличивающимся запасом употребляемого металла, внедрением в технику новых металлов и усложнением условий эксплуатации металлических конструкций общие потери металла от коррозии год от года возрастают — примерно одна треть добываемого металла выбывает по этой причине из употребления. Получение металлических сплавов повышенной устойчивости и изыскание новых способов противокоррозионной защиты — необходимая основа развития техники. Основой противокоррозионной защиты металлов является нанесение покрытий, обладающих необходимой стойкостью в атмосфере, агрессивных средах и при высоких температурах [1, 6, 9, 17, 31].

Декоративные покрытия наносятся для придания поверхности фактуры, цвета, информативности и коррозионностойкости. Материалом служат краски, эмали, алюминий, хром, серебро, золото и т. д. Наносятся они окраской, эмалированием, осаждением и другими способами [32].

Теплотехнические покрытия способствуют регулированию теплообмена между изделием и окружающей средой, осуществлению преимущественного отвода тепла в заданном направлении и т. д. При нанесении теплопроводных покрытий используются материалы с высокой теплопроводностью — медь, алюминий, серебро и т. д., для термостойких — материалы с низкой теплопроводностью — эмали, окислы, керметы и т. п. [6, 9].

Электротехнические покрытия определяют электромагнитные характеристики поверхности изделия. Покрытия, обладающие хорошей электропроводностью, широко применяются в местах стыка токоведущих систем, для улучшения работы электроконтактов и волноводов, для придания диэлектрикам сплошной или избирательной поверхностной проводимости, в частности для производства печатных радиосхем и т. д.

В качестве электропроводных покрытий наиболее широко используются медные, серебряные, золотые, радиевые и палладиевые. Их нанесение в большинстве случаев осуществляется осаждением [8]. Для равномерного нагрева поверхности диэлектриков применяются покрытия из электролитических сплавов, обладающих высоким электросопротивлением, например, железо — хром, нихром и т. д. Эти покрытия — сплавы на непроводящей основе — могут

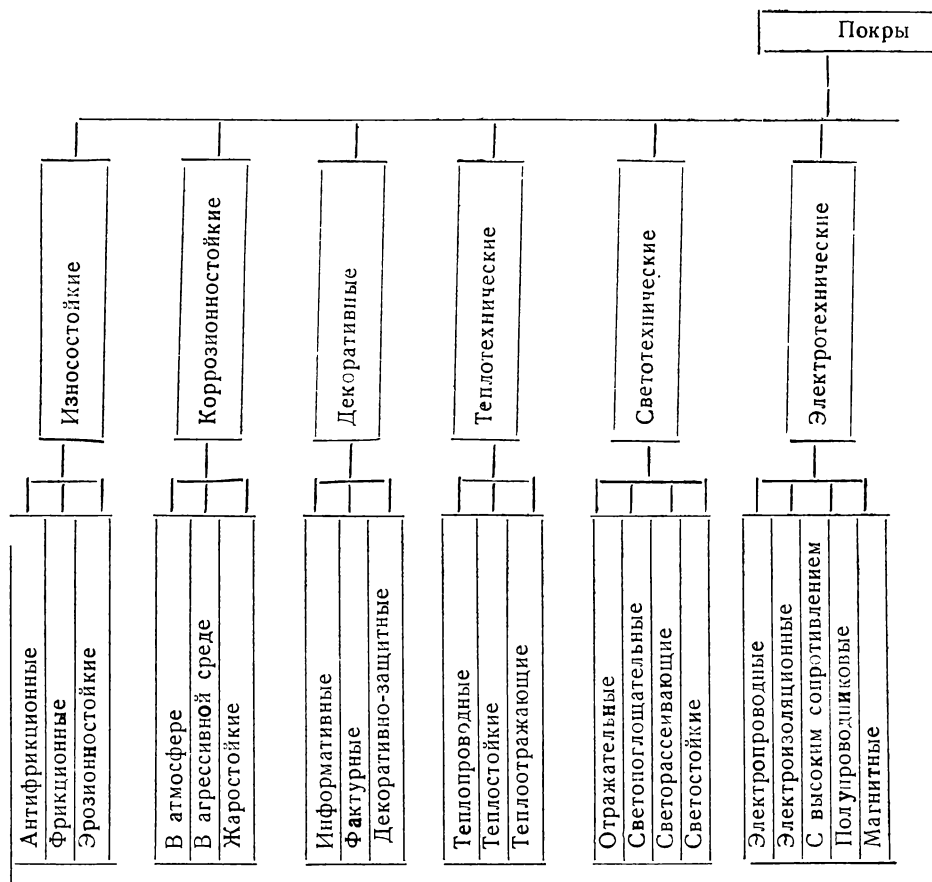


Схема 1. Классификация покрытий

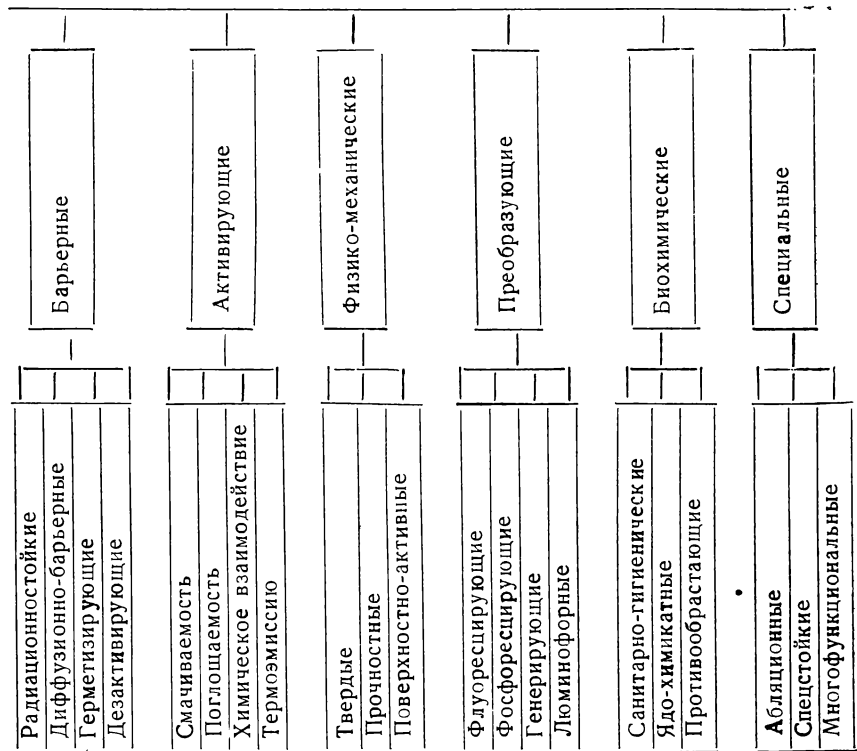
выполнять роль электронагревательных элементов [32]. Для изоляции токонесущих элементов различной аппаратуры на их поверхность наносят электроизоляционные покрытия из диэлектрического материала. В современной радиоэлектронике и технике широко распространены покрытия с полупроводниковыми и магнитными свойствами [32].

Оптические покрытия обладают высокой отражательной или светопоглощательной способностью, светостойкостью, люминисцент-

ностью, эмиссионностью и т. п. Барьерные покрытия наносятся для снижения или предотвращения прохождения радиации, диффузии и других процессов, а активирующие, наоборот, для возбуждения или активизации поверхностных процессов — смачиваемости (при пайке), поглощения газов или жидкости и т. д. [28].

Физико-механические покрытия повышают прочностные свойства изделия. Твердые покрытия увеличивают стойкость поверхности

тия



по функциональным признакам

изделия против остаточной деформации при воздействии на нее вдавливающих или ударных усилий. Прочностные покрытия повышают прочность изделия при растяжении, изгибе и других видах нагрузки за счет увеличения площади поперечного сечения и торможения выхода на поверхность дислокации. Преобразующие покрытия выполняют функцию трансформации лучей невидимого света в видимый, электронного луча в световой и т. д. К биохимическим относятся покрытия, которые активируют биологические процессы на поверхности изделия. Например, покрытия, которые активируют биологические процессы на поверхности изделия. Например, покрытия, которые активируют биологические процессы на поверхности изделия.

мическим характеристикам относятся показатели воздействия материала покрытий на человеческий организм и животный мир.

2. По способу нанесения покрытия подразделяются на наплавочные, напыленные, осажденные, припекаемые, диффузионные и нанесенные окрашиванием. Полная классификация покрытия основана на технологических приемах создания поверхностных слоев. Например покрытия, нанесенные напылением, подразделяются на газовые, дуговые, плазменные, детанационные и т. д. Аналогично подразделяются и другие виды покрытий.

3. По виду материала покрытия классифицируются на органические (пластмассовые и лакокрасочные), неорганические (металлические, оксидные, карбидные, боридные, силицидные и т. д.) и комбинированные (металлопластмассовые, металлоэмалевые и т. д.).

4. По строению слоя покрытия делятся на компактные или пористые, цельные или прерывистые (плиточные), однородные — с постоянными по всему сечению структурой и свойствами, неоднородные — с дискретно или постепенно изменяющимися структурой и свойствами.

Кроме указанных видов классификации, покрытия подразделяются по толщине и области применения. В зависимости от толщины покрытия бывают сверхтонкие (0—10 мкм), тонкие (0,01—0,5 мм), средней толщины (0,5—2,5 мм) и толстые (2,5 мм и выше). Иногда покрытия подразделяются по области их применения, покрытия химического машиностроения, радиотехнические и т. д.

1.2. Классификация и технико-экономическая оценка способов нанесения покрытий

Надежность и долговечность деталей и конструкций с покрытиями зависят от свойств поверхностного слоя, которые в значительной степени определяются методом и технологией (режимами) их нанесения. Необходимые (максимальные) свойства покрытия при учете экономической рентабельности возможно получить единственным, правильно выбранным способом. Выбор способа нанесения покрытий должен производиться (на ЭВМ) по специальной методике (программе), составленной на основании технико-экономических показателей (оценок) способов нанесения. Технико-экономические показатели покрытий характеризуются способом их нанесения (схема 2).

Основной признак подразделения способов нанесения — механизм образования слоя и его сцепления с изделием (кристаллизация, спекание, осаждение и т. д.). В приведенной классификации (схема 2) первое подразделение способов нанесения покрытий принято по исторически сложившимся названиям — наплавка, напыление и т. п. Каждое название объединяет группу способов нанесения покрытий с одним механизмом образования слоя. Дальнейшее подразделение способов нанесения зависит от вида и способа

введения энергии, технологических приемов или специфических физико-химических процессов нанесения.

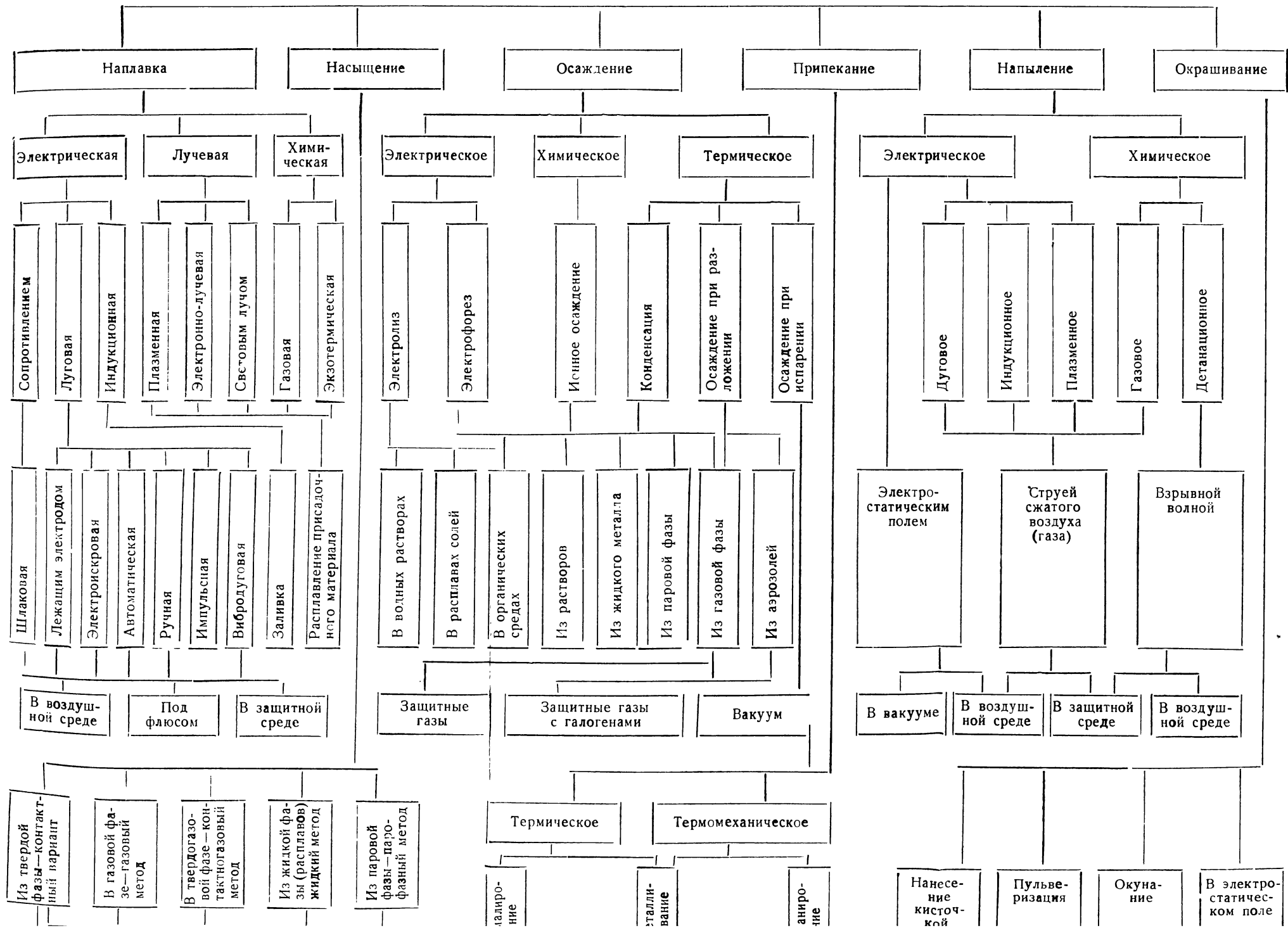
I. Наплавка — это технология нанесения покрытий, при которой слой образуется за счет затвердевания (кристаллизации) на поверхности основания специально расплавленного присадочного материала. Основные технические операции наплавки: расплавление присадочного материала и сопряжение (нанесение) его с поверхностью основания. Наплавленный слой сцепляется с основанием за счет сплавления жидкого присадочного материала с подплавленным поверхностным слоем изделия и последующего затвердевания. В отдельных случаях (т.в.ч., заливка) присадочный материал кристаллизуется непосредственно на твердой (нагретой и очищенной) поверхности изделия (напайка). Для расплавления присадочного материала и подплавления (или нагрева до предплавленного состояния) поверхностного слоя используется энергия электрического тока, электронных лучей и химических реакций. Химический состав покрытия определяется составом исходного материала и теми изменениями, которые происходят при нанесении вследствие испарения, окисления, раскисления, легирования, смешения и т. д.

II. Осаждение — это технология нанесения покрытия, при которой слой образуется за счет осаждения ионов (атомов) или высокодисперсных частиц при электрической разрядке, химическом разложении — восстановлении и конденсации (кристаллизации) [8, 9]. Протекание процессов осаждения обусловливается стремлением системы к минимуму энергии, т. е. к снижению химического потенциала частиц.

Движущей силой осаждения является энергия электрического тока, тепловая энергия частиц и химическое сродство. Первое подразделение способа осаждения, связанное с видом энергии (схема 2), не является абсолютным, так как при электроосаждении часто применяют подогрев, при термическом насыщении происходят химические реакции и т. д. Более того, при электротермохимическом способе ярко выражены все три основных вида энергии [8]. Следующее подразделение способов осаждения проведено по механизму образования слоя и технологическим признакам. Осаждение покрытий из растворов, расплавов и газовых смесей в большинстве случаев является защитной средой. При термических способах применяют специальные защитные атмосферы — защитные газы и вакуум.

Термическое напыление — технология нанесения покрытий, при которой слой образуется за счет схватывания или сплавления при ударе о покрываемую поверхность летящих с большой скоростью нагретых дисперсных частиц [17, 31]. Основными технологическими операциями напыления являются нагрев и распыление. Расплавление (нагрев) исходного материала осуществляется электрической дугой, т.в.ч. или плазмой. При химических способах частицы нагрет-

Способы нанесения покрытий



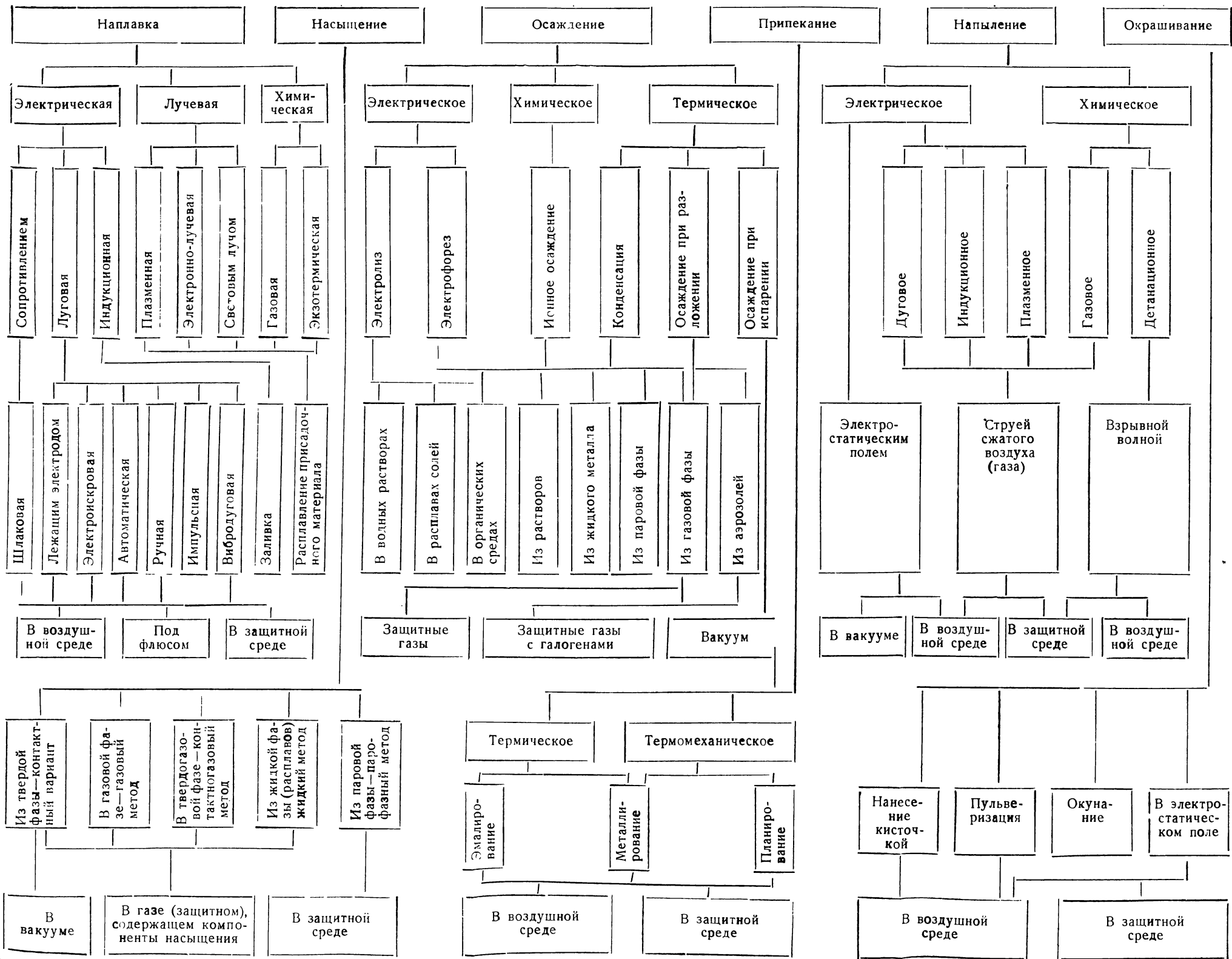


Схема 2. Классификация способов нанесения покрытий

Технико-экономическая оценка методов нанесения покрытий

Характеристика технико-экономической оценки	Наплавка			Термичес- распы-
	автомати- ческая	вибродуго- вая	индукцион- ная	дуговое (газовое)
I. Процесс				
Подготовка поверхности, балл*	2—4	2—4	3—5	4—5
Сложность процесса оборудования	3—4	3—4	4—5	3—4
Диапазон используемых материалов покрытия	3—4	4—5	5—6	4—5
основания	3	2	4	4
Степень использования исходного мате- риала, %	2	2	4	6
Влияние на исходный материал, балл покрытия	60—95	70—90	65—95	40—65
основания	—2, —3	—2, —3	—2, —3	—3, —5
Степень автоматизации, %	—2, —5	—2, —5	—2, —3	0
Производительность, кг/ч	65—95	75—85	75—95	10—85
Последующая обработка, балл	2—20	0,6—4,4	5—20	4—25
Себестоимость нанесения, коп/г (сред- няя)	2—7	2—5	2—6	0—2
Потенциальная вредность, балл опасность	0,28	0,36	0,75	0,19
	—2	—2	—2	—3
	—3	—2	—2	—3
II. Свойства				
Толщина, мм	2,5—8,0	0,5—5,0	0,3—5,0	0,1—3,5
Структура	Литая	Литая	Литая	Конгло- мерат ча- стиц с MeO
Пористость, %	0,1—0,3	0,05—0,5	2,0—6,0	7—35
Относительная прочность на разрыв, %	65—88	70—84	64—80	35—64
Твердость HRC	21—60	14—63	40—63	20—44
Пластичность (ст)	Низкая, средняя	Низкая, средняя	Низкая, средняя	Низкая
Прочность сцепления, МПа · 10 (кгс/мм)	20—70	20—40	8—45	0,3—1,8
Остаточное напряжение	Высокое	Высокое	Высокое	Высокое
Несущая способность	Средняя, высокая	Средняя, высокая	Средняя, высокая	Низкая
III. Изделие с				
Размеры	Средние, большие	Средние	Средние	Средние, большие
Сложность формы, балл	1—2	1—2	1—3	1—5
Несущая способность $\left\{ a_B \right.$	—(18—46)	—	—	(35—58)
изделия с покрытием, % $\left\{ \sigma^{-1} \right.$	—(27÷64)	—	—	—(20÷70)

* 7-балльная система.

** микротвердость [25].

*** HRA.

Таблица 1

кое ление	Осаждение			Диффузион- ное насы- щение	Припекание		Окрашива- ние
	вакуум- ное	гальвани- ческое	из паровой фазы		эмалиро- вание	металлро- вание	
плазменное							
нанесения							
4—5	4—6	5—7	4—6	2—4	3—6	1—5	1—5
5—6	4—5	3—4	4—6	2—3	2—3	2—6	1—2
6—7	6—7	4—5	5—7	3—4	2—3	3—7	1—4
5	3	3	3	3	2	6	3
6	6	3	4	4	4	6	7
35—65	30—65	—	30—65	—	90—100	80—100	90—100
—4,—6	0,—1	0,—1	—1,—3	—	—	0	—
0	0	0,—1	0,—1	+2,—2	—1	+2,—2	0
10—85	95	85	90	80—100	60—100	70—100	20—100
0,8—12,0	Низкая	0,01—0,07	0,01—0,2	Высокая	Высокая	10—100	Высокая
0—3	0—2	0—2	1—3	0—2	0—2	0—4	0—3
1,45	Высокая	34	Высокая	—	0,41	0,19—3,2	0,09
—5	0	—3	—2	—2	—1	(1÷3)	—2
—6	—1	—3	—3	—3	—1	—(1÷4)	—3
покрытий							
0,1—3,5	10—5÷10—20	0,05—0,50	0,01—0,35	0,05—0,25	0,05—3,0	0,1—10,0	0,1—4,0
Конгло- мерат ча- стиц с MeO	Одно- фазная	Одно- фазная	Одно- фазная	Одно- и много- фазные сплавы	Много- компе- нтная	Одно-и много- компо- нентная	—
7—25	0,05—0,1	0,5—6,0	0,05—0,40	0	0,5—2,0	0—60	0,05—1,5
32—65	—	82÷90	46—65	140—92	—	80—100	—
18—62	20—55	25—72	100—4000**	37—68	—	10—92***	—
Низкая	Средняя	Средняя	Средняя	Низкая, средняя	Низкая	Средняя, высокая	Высокая
0,5—2,0	1,5—4,2	0,8—3,0	0,2—4,1	Высокая	1,5—8,0	8—80	0,1—2,1
Высокое	Среднее	Среднее, высокое	Высокое	Среднее	Среднее высокое	Низкое среднее	Низкое
Низкая	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя, высокая	Низкая	Высокая	Низкая
покрытием							
Средние	Малые, средние	Малые, средние	Малые, средние	Малые, средние	Средние, большие	Малые, средние	Большие
1—5	1—4	1—4	1—4	1—6	1—5	1—6	1—7
—(38—70)	~0	—(7÷12)	—	—21,+10	—(42÷65)	—46,+16	~0
—(30÷70)	—1;—4[16]	—10;—40[25]	—	—20,+40	—(47÷57)	—38,+27	~0

(шум, излучение и т. д.) и другие факторы. Потенциальная опасность зависит от параметров и вида применяемых тока и горючих веществ, давления газов (воздуха) и других факторов.

Вторая группа характеристик — свойства покрытий.

11. Толщина покрытия сильно зависит от способа нанесения и химической принадлежности материала. Приведенные в табл. 1 пределы толщин не являются строго определенными и для некоторых материалов могут быть несколько больше или меньше.

12. В табл. 1 дана общая характеристика структур, которые имеют место при нанесении наиболее применяемых для данного способа материалов.

13. Приведенная в табл. 1 пористость покрытий определялась по ГОСТу 3264—46. Для отдельных способов данные по пористости приведены на основании обобщения литературных данных [6, 8, 17, 23].

14. Прочностные характеристики материала покрытия сильно зависят от способа и режимов нанесения и в большинстве случаев изменяются (снижаются) относительно соответствующих характеристик исходных (компактных) материалов вследствие пористости (индукционная наплавка, напыление и т. д.), напряженности (наплавка, осаждение и т. п.), неравномерности химического состава, структуры (наплавка, металлизирование и т. д.) и ряда других причин.

Относительная прочность на разрыв $a = \sigma_{в1} / \sigma_{в} 100\%$, где $\sigma_{в}$ — прочность на разрыв исходного материала в компактном (прокатанном) состоянии, $\sigma_{в1}$ — прочность материала покрытия на разрыв в отделенном от основания состоянии, определяемая по методике, описанной в [22].

Исходным материалом служила малоуглеродистая сталь; прочность покрытия, нанесенного из паровой фазы, определялась на молибдене. При этом следует отметить, что приведенные в п. 14 данные лишь частично отражают влияние способа на прочностные свойства исходного материала так, как действительная прочность покрытия в нанесенном состоянии отличается от прочности материала покрытия в отделенном состоянии на те напряжения, которые образуются при нанесении и сохраняются в покрытии вследствие жесткой его связи с основанием.

15. Показатели твердости наплавленных, осажденных, напыленных и нанесенных заливкой покрытий приняты на основании [1, 6, 8, 9, 17, 20, 25], а металлизированных — по опытным данным автора.

16. Пластичность покрытия сильно зависит от его исходного материала (табл. 1).

17. Прочность сцепления с основанием — важная характеристика, так как именно она определяет надежность детали в работе. Наплавка, насыщение и металлизирование гарантируют высокую прочность сцепления покрытия с основанием. Относительно низка прочность сцепления покрытия с основанием при термическом напылении, осаждении и эмалировании. Приведенные в табл. 1 дан-

ные по прочности сцепления покрытия с основанием определены по методике, описанной в [4].

18. Влияние покрытий на прочность и долговечность изделий тесно связано с действием остаточных напряжений. Они появляются в процессе нанесения покрытий при неравномерном изменении удельных объемов соседних зон изделия в связи с различными структурными, концентрационными, тепловыми (расширением), физическими (усадка), химическими превращениями металла в этих зонах. Вообще следует отметить, что напряжения, возникающие в процессах нанесения покрытий, могут превысить предел прочности материала поверхностного слоя (на разрыв) или прочность сцепления последнего с основанием. Это естественно приводит к образованию в покрытии трещин (наплавка) или к отслоению (напыление, осаждение). Остаточные напряжения, превышающие предел текучести σ_T , релаксируются, а ниже σ_T обладают высокой стабильностью.

Влияние остаточных напряжений на изделие зависит не только от величины, но и от их вида (знака). Напряжения в покрытиях, нанесенных наплавкой и напылением, имеют в подавляющем большинстве знак плюс, т.е. растяжение. Гальванические покрытия стального изделия тугоплавкими металлами (никель, кобальт, хром, платина и т.д.) вызывают в приповерхностной зоне изделия напряжений растяжения. Медь и серебро в зависимости от условий электролиза могут вызвать напряжения растяжения и сжатия. При покрытии легкоплавкими металлами (цинком, свинцом, оловом) возникают напряжения сжатия [16].

Вакуумное осаждение вызывает в покрытии напряжения растяжения. Знак напряжений в покрытиях, нанесенных эмалированием, диффузионным насыщением и металлизированием, зависит от знака $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_1$, разности К.Т.Р., материала слоя α_1 и основания α_0 . Анализ литературных данных [3, 6, 8, 14, 16, 21, 25, 31, 35] и экспериментальные исследования автора показали сложную зависимость остаточных напряжений в поверхностных слоях изделий от химического состава исходных материалов, соотношения размеров слоя и основания, способа и режимов нанесения покрытий. В табл. 1 остаточные напряжения в покрытиях представлены относительной оценкой.

19. Несущая способность покрытия — это способность покровного слоя сопротивляться динамическим (циклическим) механическим воздействиям, характеризующаяся пределом выносливости материала слоя в отделенном от основания состоянии. Ввиду отсутствия единой методики и достаточных экспериментальных данных по многим покрытиям несущая способность в данных табл. 1 представлена относительной оценкой. Низкая несущая способность покрытий, нанесенных термическим напылением, объясняется их низкими пластическими свойствами при относительно невысокой прочности. Тонкие слои, нанесенные осаждением, слабо сопротивляются контактному нагружению, а хрупкость эмалированных покры-

тий резко снижает их несущую способность при ударных и изгибающих нагрузках.

20. Размеры. Нанести покрытия на детали самых различных размеров можно любым способом. Однако практика показала, что существующие способы приемлемы для деталей размеров, указанных в табл. 1.

21. Сложность формы поверхности детали, на которую наносят покрытия, оценена в табл. 1 семибалльной системой; при этом непрерывные поверхности цилиндрической и плоской формы оцениваются в 1 балл, а поверхности сложной конфигурации с разрывом (отверстиями, выточками и т. д.) — в 7 баллов.

22. Несущая способность изделия с покрытием отражает влияние процесса нанесения и самого покрытия на механические свойства изделия. В табл. 1 она определяется (оценивается) двумя коэффициентами a_b и b_{-1} :

1) a_b — коэффициент изменения предела прочности при статических испытаниях на разрыв (изгиб и т. д.), %:

$$a_b = \frac{\sigma_{b1} - \sigma_b}{\sigma_b} \cdot 100,$$

где σ_{b1} , σ_b — предел прочности образца с покрытием на разрыв и без покрытия соответственно, Па;

2) b_{-1} — коэффициент изменения предела выносливости (усталости), %:

$$b_{-1} = \frac{\sigma_{-1,1} - \sigma_{-1}}{\sigma_{-1}} \cdot 100,$$

где $\sigma_{-1,1}$, σ_{-1} — предел выносливости образца с покрытием и без покрытия соответственно, Па.

Эти коэффициенты показывают, насколько изменились пределы прочности и выносливости изделия (образцов) при нанесении покрытия. Если a_b и b_{-1} положительные, то происходит повышение пределов, а если отрицательные, то понижение; $\sigma_{-1,1}$ и σ_{-1} определялись по методикам, описанным в [16], или принимались из литературных источников [9, 16, 20, 31]. Приведенные в табл. 1 значения a_b и b_{-1} наиболее характерны для рассматриваемых способов нанесения, хотя возможные значения их вообще колеблются в более широких интервалах.

Анализ литературных данных и экспериментальных исследований показал, что изменения пределов a_b , b_{-1} зависят от размеров, формы и свойств материала покрытия, величины и вида остаточных напряжений, соотношения размеров и свойств материалов покрытия и основания n , m , l и других факторов.

При этом

$$n = E_1/E_0,$$

где E_1, E_0 — модель упругости материала покрытия и основания соответственно, Па;

$$m = h_1/h_0,$$

где h_1, h_0 — толщина покрытия и основания (изделия) соответственно, м;

$$l = \varepsilon_1/\varepsilon_0,$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_0$ — относительное удлинение материала покрытия и основания соответственно.

Остаточные напряжения могут повысить несущую способность основания (изделия) при статическом нагружении $a_b > 0$ в случае концентрации напряжения, если знак остаточных напряжений противоположен знаку наиболее опасных напряжений зоны концентратора, возникающих от внешнего нагружения, и, наоборот, остаточные напряжения снижают несущую способность изделия $a_b < 0$, если их направление совпадает с напряжениями, возникающими от внешнего воздействия. Рассматривая влияние остаточных напряжений при циклическом нагружении изделия, необходимо учитывать, что на выносливость влияют в первую очередь те остаточные напряжения, которые действуют в тех же плоскостях, что и циклически изменяющиеся нагружения.

Доказано [16], что остаточные напряжения сжатия играют положительную роль, повышая выносливость стали, а растягивающие снижают ее. Зная влияние остаточных напряжений на несущую способность, можно установить зависимость последней от параметров и свойств покрытия и основания. Однако соотношения размеров и свойств покрытия и основания влияют на несущую способность изделия при приложении внешней нагрузки также и независимо от остаточных напряжений.

Тонкие слои ($h_1 < 0,1$ мм), наносимые осаждением, мало влияют на предел прочности и текучести материала основания. Это объясняется повышенной их способностью к деформациям без разрушения. Гальванические покрытия стальных изделий любыми металлами мало влияют на механические свойства стали при простом одноосном растяжении кратковременно действующим силам [16]. Увеличение толщины покрытия приводит к снижению предела прочности изделия. Например, предел прочности на растяжении образцов, покрытых электролитическим железом толщиной 0,5—0,6 мм, меньше материала основания на 7—12%.

Изменение предела прочности изделия с покрытием значительно зависит от отношения свойств материала слоя и основания n, l и т. д. Если свойства покрытия совпадают со свойствами основания, то предел прочности и другие физико-механические характеристики изделия совпадают с материалом основания. Если $l \geq 1$, то a_b возрастает с n , хотя в общем остается небольшим. Так, при нанесении металлизированием свинцового покрытия на стальное основание $a_b = -(3-5)\%$. При $l < 1$ a_b понижается с уменьшением n и достигает значительных отрицательных значений (50—70% и более) при

$l \ll 1$. Характерным примером может служить малоуглеродистое стальное основание (Ст. 2) с покрытием (Ст. 7), нанесенным термическим напылением $l=0,05$, $a_b = -60\%$.

Положительные значения a_b имеют место при нанесении покрытия с высокими прочностными и пластическими свойствами (композиционные покрытия) и в тех случаях, когда в процессе нанесения улучшаются свойства основы за счет диффузионного легирования или термической обработки (планирование, металлизация).

Исследования, посвященные влиянию покрытий на прочность основания при динамической (циклической) нагрузке, имеют главным образом экспериментальный характер и относятся лишь к отдельным видам покрытий. Наиболее полно изучено и обобщено влияние диффузионных покрытий на прочность стали [16]. Большинство компонентов (C, B, Cr, Si) повышает предел усталости основания на 20—40%; при наличии концентраторов это увеличение может достичь значительных размеров (100—200%). Насыщение поверхности Al, Cu и некоторыми другими элементами снижает усталостную прочность стального основания на 15—20%.

При испытании на усталость образцов, наплавленных под флюсом проволокой из малоуглеродистой стали, установлено, что величина предела усталости таких образцов составляла при наплавке без подогрева около 36%, а при наплавке с подогревом до 400° 73% предела усталости основного металла [20].

Предел выносливости термически напыленных образцов зависит как от отмеченных факторов n , m , l , так и от вида подготовки поверхности основания и составляет 30—80% от предела выносливости материала основания [31].

Большинство гальванических покрытий снижает длительную и усталостную прочность стали на воздухе, особенно в коррозионных средах. Согласно данным А. В. Рябченкова [16] и его сотрудников, гальванопокрытия хромом и никелем снижают выносливость стали на воздухе на 22—35%, медью—на 13%, кадмием—на 9% и т. д.

Вакуумные покрытия незначительно снижают предел выносливости $b_{-1} \approx -(2 \div 5\%)$. Это объясняется, главным образом, малой толщиной и достаточной пластичностью покрытий Cu, Al. При нанесении хрупких материалов большой толщины b_{-1} резко снижается и достигает значительных (отрицательных) величин. Эмалированные покрытия в большинстве случаев имеют низкие пластические свойства, вследствие чего они сильно снижают предел выносливости основы. По данным [9], это снижение составляет 45—55%. Коэффициенты a_b , b_{-1} для металлизированных покрытий имеют широкий диапазон — от -40 до +30%.

В заключение следует отметить, что табл. 1 — первая попытка оценить способы нанесения покрытий по большому количеству характеристик. Она предназначена для определения области применения существующих способов нанесения покрытий и может использоваться при разработке технологии изготовления деталей машин и механизмов.

1.3. Пути развития технологии нанесения покрытий. Металлирование

Несмотря на большое количество способов нанесения покрытий (схема 2), применяющихся в соответствующих областях техники, в литературе нет сведений по объему их применения. Это объясняется тем, что сделать количественный анализ промышленного использования покрытий из-за отсутствия методики, трудности сбора производственных данных по покрытиям и по многим другим причинам практически невозможно.

Автор проанализировал применение существующих способов нанесения покрытий на ряде заводов общего машиностроения. Анализ показал, что если исключить окраску, покрытия которой незначительно влияют на надежность и долговечность деталей машин*, и насыщение, относящееся к способам создания слоя, а не способам нанесения покрытий, то:

- 1) на многих машиностроительных заводах нанесения покрытий при производстве основной продукции не применяется;
- 2) осаждение и другие способы нанесения покрытий применяются в машиностроении главным образом для нанесения декоративных и антикоррозионных покрытий, работающих в слабых агрессивных средах (атмосферной коррозии);
- 3) объем деталей с покрытиями в машиностроении (в весовом отношении) составляет менее 1%.

Наибольшее применение металлопокрытие нашло в ремонтном производстве, однако, по подсчетам экономистов, восстанавливается всего лишь 6% изношенных и подлежащих ремонту деталей. Следует отметить, что если совершенствование существующих способов нанесения покрытий расширяет номенклатуру восстанавливаемых деталей, то повышение требований, вызываемых интенсификацией производственных процессов, снижает ее.

Из вышеизложенного следует, что существующие способы нанесения покрытий в машиностроении применяются в небольшом объеме и в малозначительных целях. Это вытекает из анализа табл. 1:

- 1) одни способы нанесения (осаждения) дают покрытия малой толщины — обычно до 0,3 мм, другие (наплавка) — 2 мм и более. В машиностроении и ремонтном производстве наиболее необходимы покрытия толщиной от 0,3 до 2,0 мм;
- 2) некоторые способы приемлемы для нанесения покрытий лишь на детали простой формы, т. е. цилиндрические и плоские поверхности; многие же детали имеют поверхности сложной конфигурации;
- 3) трудность или невозможность использования в качестве исходных материалов многих композиционных материалов;

* Автор не умаляет значения окрашивания в защите металла от коррозии в атмосферных условиях. Однако ресурс работы машин определяется, главным образом, износостойкостью, жаростойкостью и т. п., что не обеспечивается окрашиванием.

4) отрицательное воздействие технологии нанесения на исходный материал (термическое распыление, наплавка и т. д.) исключает получение покрытий с максимально возможными защитными свойствами;

5) изделия с покрытиями, нанесенными многими способами, имеют низкую несущую способность, что объясняется низкой прочностью сцепления с основанием (термическое напыление), малой толщиной (осаждение), высокой напряженностью (наплавка) и другими причинами;

6) себестоимость существующих методов нанесения покрытий еще велика вследствие низкого коэффициента использования исходного материала, большого объема предварительной и последующей обработки, использования сложного оборудования и вспомогательного материала, недостаточной автоматизации и производительности процессов и других факторов. Таким образом, слабая и мало-значительная применимость покрытий в машиностроении объясняется в значительной степени относительно низкими технико-экономическими показателями существующих способов нанесения или недостаточными свойствами получаемых покрытий. Применение покрытий в других областях промышленного производства также неудовлетворительно [9, 31, 35].

Развитие промышленного производства связано с интенсификацией производственных процессов, т. е. с увеличением давлений, температур и скоростей. Над повышением в этих условиях надежности и долговечности деталей машин и механизмов работают ученые и инженеры различных областей науки и техники. Однако наибольшие возможности при непрерывно увеличивающемся объеме производства имеет область материаловедения, которая включает нанесение покрытий. Именно нанесение покрытий дает возможность наиболее рационально использовать имеющиеся и создаваемые материалы, повышать надежность и долговечность деталей массового и индивидуального производства со значительными экономическими выгодами. Способы нанесения покрытий будут совершенствоваться при создании нового оборудования, а новые создаваться на основе новых физико-химических или сочетания нескольких существующих процессов.

Надежность и долговечность детали с покрытием обеспечивается функциональной работоспособностью (стойкостью) покрытия и механической прочностью ее как композитной конструкции. Функциональную работоспособность покрытия определяют главным образом химический состав и структура материала наносимого слоя. Высокими износостойкими свойствами в условиях жидкостного трения обладают многофазовые сплавы, пористые и композиционные материалы; в условиях абразивного — твердые спеченные сплавы.

К коррозионностойким относятся металлы с малым сродством к кислороду (Au, Pt), сплавы (нихром, окислы, силициды и т. д.), композиции Ni—Al₂O₃, Co—MoSi₂, хорошими электроконтактными

свойствами обладают композиции Cu—W, Ag—W и т. д. Большинство отмеченных материалов и изделия из них производят методами порошковой металлургии. Таким образом, для нанесения покрытий необходимо использовать технологию порошковой металлургии, т. е. технологию, состоящую из нанесения сырого порошкового слоя и последующей термической обработки.

Недостатком многих способов наплавки, термического напыления и других способов, при которых происходит высокотемпературный нагрев, является слабая защита исходного материала от окружающей среды. Это приводит к насыщению наплавленного металла газами (O_2 , N_2 и т. д.), снижающему пластические и некоторые прочностные свойства наносимого материала [20, 31]. Следовательно, для совершенствования существующих способов нанесения покрытий и разработки новых необходима такая технология, при которой основные физико-химические процессы нанесения протекали бы в защитной атмосфере.

«Горячие» методы (наплавка, напыление и т. д.) характеризуются быстрым нагревом, расплавлением исходного материала и резким охлаждением. Последнее объясняется большой разницей температур исходного материала в момент нанесения и основания (а также окружающей среды). Расплавление исходного материала не всегда желательный процесс, так как исключает нанесение очень важных покрытий на основе композиционных материалов. Резкое охлаждение при нанесении покрытий создает в слое напряжения, которые не только снижают несущую способность покрытия, но иногда даже разрушают его. Кроме этого, при наплавке происходит значительное термическое влияние на материал основания. В зоне сплавления это «влияние» приводит к образованию крупнозернистости, пережогов и других нежелательных структур. Таким образом, нанесение покрытий должно проходить без расплавления исходных материалов, при низких градиентах температур и невысоких скоростях нагрева и охлаждения.

Режимы нагрева и охлаждения должны строго контролироваться и не вызывать в покрытиях или основании нежелательных явлений (роста зерна, деформации и т. д.). Эти требования в наибольшей мере могут быть удовлетворены операцией спекания, применяемой в порошковой металлургии, так как она проводится в защитной атмосфере, с контролируемой скоростью нагрева и охлаждения, без расплавления или с частичным расплавлением исходного материала.

Сущность нанесения покрытий состоит в формировании на поверхности основания из исходного материала слоя и образования сцепления между ними. Задача может быть решена не только сплавлением, осаждением, но и за счет схватывания при совместной пластической деформации исходных материалов. Если к специально подготовленному порошковому материалу, нанесенному на покрываемую поверхность, приложить давление, превышающее предел прочности, то в результате пластической деформации произойдет припрессование его к основанию.

Припрессование — это высокопроизводительный процесс, который займет должное место среди новых способов нанесений покрытий. Для снижения величины удельного давления и повышения при этом механических свойств покрытия в порошок можно вводить склеивающие вещества. Связь между частицами, а также между частицами и основанием в этом случае будет осуществляться за счет склеивания и схватывания. Снижение величины удельного давления при холодном припрессовании возможно также путем нанесения на исходный материал (порошок, гранулы, пластины) высокопластичного металла (Cu, Pb).

Наиболее перспективен способ нанесения покрытий с помощью нагрева и давления, т. е. горячее припрессование — способ, основанный на термомеханической обработке. Горячее припрессование будет развиваться на основе минимальной температуры нагрева, обеспечивающей необходимые свойства покрытию и его связь с основанием. Термомеханическая обработка при нанесении покрытий может улучшить и свойства основания.

Технология нанесения покрытий решает две задачи: формирование на поверхности изделия из исходного материала слоя с требуемыми свойствами и создание связи (сцепления) между формирующим слоем и основанием. Решение обеих задач одним технологическим процессом — предполагаемой термической или термомеханической обработкой — для некоторых пар исходных материалов не осуществимо. Это объясняется тем, что необходимые для создания требуемых свойств покрытий режимы нагрева недопустимы к материалу основания, например $T_{\text{сп}}(W) = 3000^\circ\text{C}$, $T_{\text{сп}} \text{T15K6} = 1500^\circ\text{C}$, а $T_{\text{пл.ст}} = 1500^\circ\text{C}$. Вследствие этого процессы (условия) формирования слоя должны быть отделены от самого изделия, а металлопокрытие сведено к созданию лишь связи предварительно изготовленной оболочки с основанием.

Требуемая прочность сцепления слоя (оболочки) с основанием может быть достигнута за счет сварки спеканием, диффузионной сварки или пайки [2] при режимах нагрева значительно меньших, чем при спекании, сплавлении и других процессах. Оболочки могут быть изготовлены механической обработкой (точением, фрезерованием и т. д.) или методами порошковой металлургии. Предполагаемые способы соединения оболочки с основанием требуют нагрева, поэтому для уменьшения сложности и трудоемкости производства и снижения термических напряжений при нанесении оболочки можно изготовить составной — из 2, 3 или n частей. Составляющие части оболочки можно наносить отдельно или одновременно.

Таким образом, технология одного из новых способов нанесения покрытий — это сочетание операции нанесения «сырого» порошкового слоя или оболочки и последующей термической или термомеханической обработки. Данная технология покрытий названа «металлированием».

Глава II

СУЩНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

2.1. Технология металлизации

Сущность металлизации состоит в нанесении на покрываемую поверхность «сырого» слоя с последующей термической или термомеханической обработки. Под «сырым»* понимается слой из порошков, гранул, волокон, пластин, оболочек, армированных систем или композиции, нанесенный на прессовкой, пульверизацией или другим способом, со свойствами, достаточными лишь для транспортировки и других манипуляций, связанных с последующей обработкой. Покрытие при металлизации образуется в процессе термической обработки за счет спекания сырого слоя и припекания его к поверхности изделия.

Теоретическими и технологическими основами металлизации являются теоретические и технологические разработки порошковой металлургии, сварки, машиностроения, термической и термомеханической обработки и существующих способов нанесения покрытий.

В. В. Саклинский, М. К. Рыбальченко [24] и автор [1, 2] высказали предположение о возможности использования припекания порошкового слоя к компактному основанию для изготовления композитных деталей. Отдельные разновидности технологии металлизации описаны как советскими исследователями [11, 24], так и зарубежными [31, 34]. Однако закономерности процессов нанесения сырого слоя, его спекание на компактном основании и припекания к нему слоя освещены в литературе очень слабо.

Автором данной книги проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих при металлизации, и на их основании разработаны и систематизированы технологические приемы и рекомендации по выбору режимов нанесения широкого класса покрытий с высокими технико-экономическими показателями.

Технология металлизации (рис. 1) состоит из подготовки исходного материала (1), нанесения сырого слоя (2) и последующей термической (3а) или термомеханической (3б) обработки. Метал-

* Термин, принятый из порошковой металлургии,— брикет (прессовка) или сырая заготовка.

лированием наносятся покрытия, строения (конструкции) которых представлены на рис. 2. Порошковое покрытие (2а) определяется исходным материалом и характеризуется обычно пористостью и равномерностью составляющих его частиц (порошинок). Напыленное покрытие (2б) также порошковое, но отличается текстурой составляющих частиц, которая создается при нанесении сырого слоя. Порошковое с подслоем покрытие (2в) отличается от порошкового подслоем, который наносится для повышения прочности сцепления слоя с основанием. У гранулического покрытия (2г) основная мас-

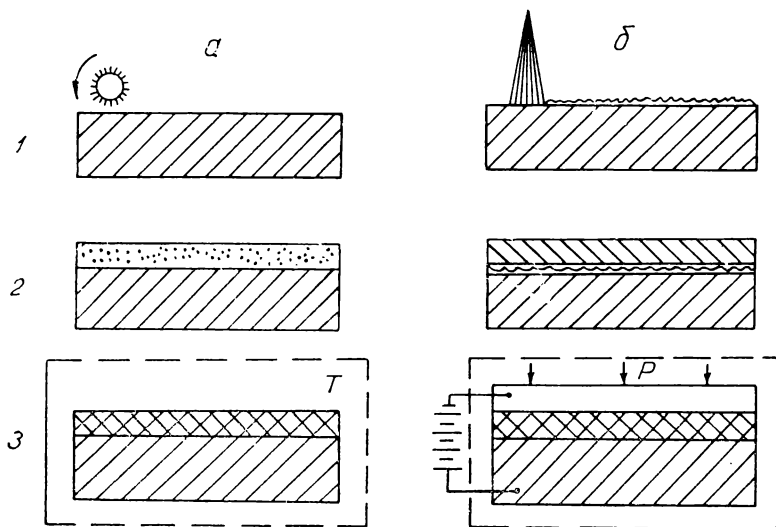


Рис. 1. Технология нанесения покрытий металлизацией:

1—подготовка поверхности (а—зачистка, б—нанесение подслоя); 2—нанесение сырого слоя (а—порошкового, б—оболочки); 3—обработка (а—термическая, б—термомеханическая—спекание).

са слоя состоит из гранул (порошинок $d \approx 0,2, -2,0$ мм), а остальная часть — порошок мелкого размера.

Порошковое покрытие, армированное усами или короткой тонкой проволочкой, называется волокновым (2д). Арматура армированного порошкового покрытия (2е) представляет собой проволочный каркас — объемную проволочную сетку. Основа проволочного покрытия (2ж) — проволока, наматываемая на цилиндрическое основание или укладываемая плотно друг к другу на плоскую поверхность. Основа покрытия, представленная на рис. 2з, — целая оболочка, изготовленная по форме и размерам покрываемой поверхности. Пластинчатое покрытие (2к) состоит из отдельных пластин, соединенных с основанием. В пластинчато-порошковым покрытии (2л) пластинки разделены между собой и основанием порошковыми прослойками.

Выбор исходных материалов и подготовка. К исходным материалам металлизации относятся материал основания и материала

лы, используемые для нанесения покрытий. Нанесение покрытий количественно и качественно изменяет условия работы материала основания. Покрытие, выполняя часть функций изделия (износо-

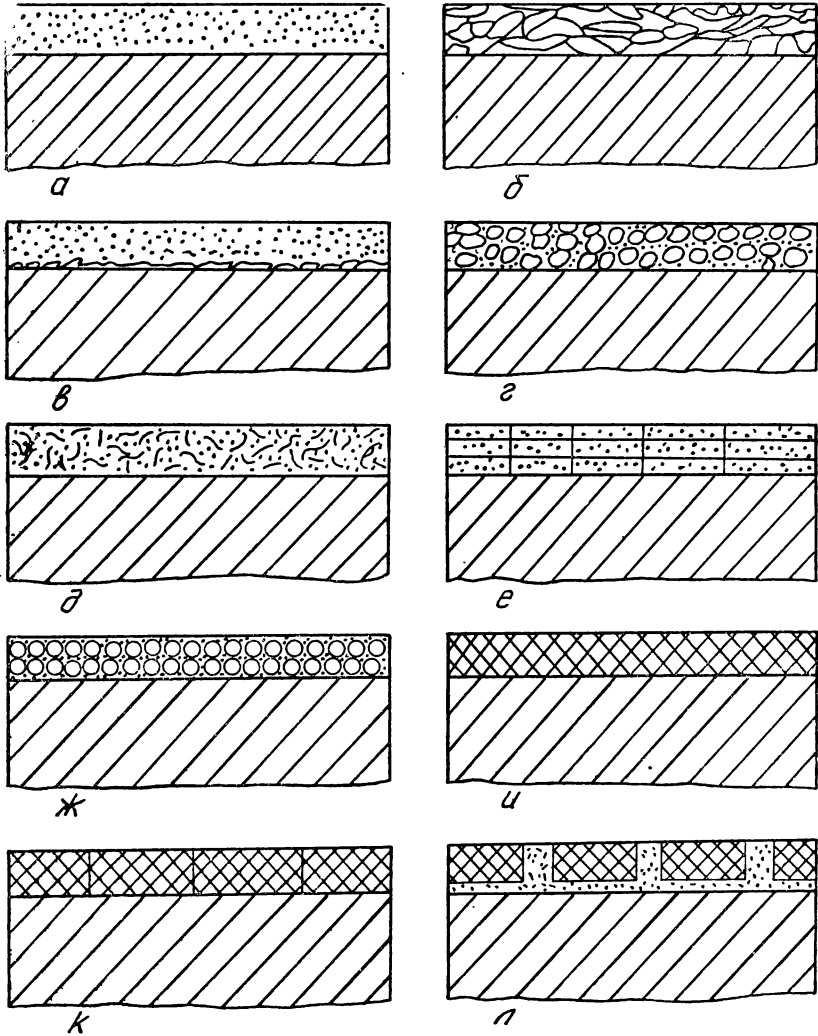


Рис. 2. Конструкция металлизированных покрытий:

а — порошковое; *б* — напыленное; *в* — порошковое с подслоем; *г* — гранулическое; *д* — волокну-
вое; *е* — армированное, *ж* — проволочное; *и* — оболочковое; *к* — пластинчатое; *л* — пластинча-
то-порошковое.

стойкость, контактную прочность, коррозионностойкость и т. д.), снижает требования к свойствам материала основания. Основание может быть изготовлено из менее дефицитного и более дешевого

материала, но с высокими свойствами, необходимыми для работы основания в композитной системе. Износостойкие покрытия дают возможность изготавливать некоторые детали (валы, пальцы и т. д.) из металлоуглеродистых сталей, которые дешевле и обладают большей стойкостью против трещин.

Для создания нужной прочности связи между покрытием и основанием изделий необходима подготовка основания. Отметим, что прочность при металлизации обеспечивается за счет процессов схватывания, спекания, смачивания и т. п. Для протекания этих процессов, кроме термодинамических условий, необходима чистота поверхности. В подготовку поверхности к металлизации входит главным образом очистка, а также создание шероховатости, нанесение интенсифицирующих или барьерных слоев требуемых размеров, технологических канавок, закруглений и т. д.

Очистка поверхности предусматривает удаление с нее как органических соединений (жиров, смазки и т. п.), так и неорганических пленок окислов, солей, гидратов и прочих загрязнений. Способы подготовки поверхности подразделяют на химические, физические, механические и комбинированные — физико-химические, химико-механические и физико-механические. Химические способы очистки поверхности предполагают обезжиривание и травление изделий в органических и неорганических растворах кислот, щелочей, а также в расплавах. К химическим способам следует также отнести отжиг в восстановительной атмосфере. Физические способы подготовки поверхности основаны на физических явлениях — тлеющий разряд, электроискровое нанесение, электролитическое растворение и т. д. Механические способы — снятие поверхностного слоя изделия механическим путем на токарных, фрезерных и других станках, дробеструйная обработка, обработка в барабанах, очистка щетками, наждачной бумагой и т. п. Комбинированные способы подготовки поверхности включают травление в растворах с наложением ультразвуковых колебаний, отжиг с электроискровым нанесением шероховатости, отжиг с последующей зачисткой щеткой, обработки в барабанах с раствором щелочи, электроискровую обработку поверхности вращающейся металлической щеткой и т. д.

Выбор способа очистки поверхности определяется видом и характером производства, размерами детали (изделия), химическим составом и т. д. При производстве новых деталей основным способом подготовки поверхности является механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование и т. п.). Эта операция совмещается с предварительной (грубой) механической обработкой заготовок — отливок или поковок.

В ремонтном производстве наиболее приемлемыми способами очистки являются химическое травление, дробе(песко)струйная обработка или восстановительный отжиг.

Шероховатость поверхности придается грубой проточкой, дробеструйной, электроискровой обработкой, глубоким травлением или термическим напылением. Интенсифицирующие или барьерные

слои толщиной от десятков долей до нескольких сот микрометров на покрываемую поверхность наносят осаждением, напылением, натиранием или другими способами. Наибольшее распространение получили химический, электролитический, газовый и дуговой спо-

Т а б л и ц а 2

Порошки металлов и сплавов, наиболее широко применяемых при металлизации

Порошок	ГОСТ или технические условия	Марка или сорт	Химический состав		Гранулический состав
			основного элемента	других элементов	
Железо восстановленное	ГОСТ 9849-61	ПЖ1	98,5 98,0 98,0	C=0,08 C=0,12 C=0,15	OM < 0,16 M < 0,25 C < 0,55, K > 0,55 мм
Сталь малоуглеродистая распыленная	ТУ-ФМ 17-64	— —	— —	C=0,6 O ₂ =2,8 ÷ 5,8	0,5—1,2 мм
Медь	ГОСТ 49-60-68	ПМ1 ПМ2	99,5	Pв=0,05 Fe=0,02	~0,05 мм
Никель карбонильный	ГОСТ 4922-61	ПНК-1 ПНК-2	99,7 99,5	— —	~0,05 мм
Молибден восстановленный	МРТУ 48-16-3-66	—	99,65	Ni=0,4 Fe=0,2	Частиц до 5 мкм 92% Остаток 0,071 ≤ 4%
Кобальт	ГОСТ 9721-71	ПК1	99,2	—	—
Шестикомпонентный сплав МНТ-А2	ГОСТ 5200-50	Cu=72% TiC=90	—	Si, Ni, Fe, Mn, Zn Ni=8 Mo=2	— —
Никелевый сплав	—	СНГН,	Ni=70— —75	r=13—20 B=2—4 Si=3—5, Fe—4	—
MoSi ₂	—	MoSi ₂ =100	—	—	—

собы, а также натирание в барабанах и вращающимися щетками из материала наносимого слоя.

Для нанесения покрытий металлизацией применяют различные по химическому составу материалы в форме порошков и гранул, проволоки и волокон, пластин и оболочек. Форма исходного материала выбирается способом нанесения сырого слоя с последующей обработкой. Исходные материалы маркируют буквенно-числовыми обозначениями, применяемыми в материаловедении.

Порошковые материалы делятся на группы: металлы и сплавы, интерметаллиды, карбиды, нитриды, бориды, силициды и пластмассы. При металлизации наиболее широко применяются порошки металлов (табл. 2). Металлические композиции дают возможность получить износостойкие, коррозионноустойчивые, теплотехнические и другие покрытия.

Окислы. Для металлизации наибольший интерес представляют тугоплавкие Al_2O_3 , BeO , SiO , ZrO_2 , TiO_2 и легковосстанавливаемые окислы CuO , NiO , FeO . Для тугоплавких окислов характерны стабильность в окислительной атмосфере, высокая температура плавления, низкая электропроводность и значительная прочность при высоких температурах; при низких температурах это хрупкие кристаллы, их стоимость невелика. Порошки тугоплавких окислов с металлическим покровным слоем [33, 35] или в смеси с порошками металлов применяют для нанесения теплостойких (жаростойких) покрытий. Легковосстанавливаемые окислы вводят в шихту для интенсификации процесса спекания.

Пластмассы характеризуются малым удельным весом, высоким электрическим сопротивлением, стойкостью во многих средах и достаточной прочностью. Металлизацией можно наносить термoplastичные и терморeактивные пластмассы: полиэтилен, полиметилметакрилат, нейлон, пресс-порошок на основе фенолформальдегидных смол и т. д. При металлизации пластмассы могут использоваться в виде металлизированных порошка, нити, пленки или пластин.

Гранулы. Строгого разграничения между порошками и гранулами нет. Под гранулами подразумевают мелкие (160—2000 мкм) частицы округленной, квадратной, треугольной или хлопьевидной формы. Гранулы получают распылением расплавов, спеканием порошков, дроблением стружки и другими способами. Наиболее производительный способ — распыление расплавов из материалов с температурой плавления ниже $1600^\circ C$. Для металлизации распылением наиболее рационально изготовлять гранулы из сплавов на основе железа ($Fe-Cr-Si-B$) и никеля ($Ni-Si-Cr-B$). Гранулы из низко- и высокотемпературных материалов можно получить распылением при малом давлении на металлизационных аппаратах типа ЭМ6, МПП-2, а также на специальной установке НПЧ-1. Универсальный способ изготовления гранул основан на спекании порошков. Его технология состоит из изготовления сырых гранул, их спекания в печах с защитной атмосферой и дробления спека. Сырые гранулы вырабатывают прессованием (П), сферидизацией окатышей (Ш) и пластифицированных рубленок (ПП). Автор совместно с инж. В. П. Петренко исследовали условия получения и свойства твердосплавных гранул (табл. 3).

Проволока. При металлизации сырой слой из проволоки наносят термическим напылением и намоткой. Для термического напыления берут «обычную», биметаллическую и порошковую проволоку диаметром 0,8—5 мм, для намотки — 0,1—1,5 мм. Химический состав проволоки выбирается в зависимости от требуемых свойств покрытия, а диаметр — от технологии нанесения. Для нанесения слоя может быть применен весь «арсенал» существующих марок проволок — от свинцовых до вольфрамовых и различных сплавов.

Волокна. При нанесении покрытий металлизацией воло-

на используются в виде непрерывных нитей, армирующих сеток и дискретных проволочек диаметром 0,5—200 мкм; химический состав их может быть самым разнообразным [27] — металлы (W, Mo, Nb), окислы (Al_2O_3), силициды и т. д.

Пластины и оболочки — формы исходного материала металлизации, которые появились в результате увеличения размеров частиц первоначального материала — порошка. Последовательность развития следующая: порошок—гранулы—пластины—оболочки. Оболочка — тонкостенное изделие с формой покрываемой

Т а б л и ц а 3

Некоторые свойства спеченных твердосплавных гранул

Марка гранул и способ производства	Размер гранул, мм	Насыпной вес, кг/м ³ ×1000	Удельный вес, кг/м ³ ×1000	Пористость, %	Твердость HRA
ВКЗ (Ш)	0,3—0,5	7,8—8,1	11,2—12,5	10—16	—
ВКЗ(ПП)	0,6—0,9	9,8—11,2	15,0	0,7—1,2	89
ВК8(ПП)	0,5—0,7	—	—	0,8—1,3	87—88
ВК15 (Ш)	0,4—0,8	—	—	5—8	—
ВК (ПП)	0,6—0,8	8,6—8,9	13,8	0,5—1,2	86—87
T15K6 (Ш)	0,6	7,1—7,3	11,0	0,5—0,8	—
T30K4 (ПП)	0,6	6,0—6,2	9,0—9,3	0,6—1,0	90
MHT (ПП)	0,7	3,0—3,2	5,0—5,2	—	90—91
Ферро-TiC	0,8	4,2—4,3	6,4—6,5	0,5	70—72 HRC

поверхности — может быть плоской, цилиндрической или сложной конфигурации. Размеры оболочки соответствуют размерам покрываемой поверхности, их толщина 0,1—6 мм и более.

Пластинки — составные части оболочки. Как и оболочка, они могут быть плоскими, цилиндрическими или другой конфигурации. Их размеры определяются технологией нанесения и свойствами исходных материалов (К.Т.Р. основания и покрытия). Размер пластинки по ширине 3—100 мм и более, толщина 0,1—6 мм.

Пластинки и оболочки изготовляют из компактного материала горячей и холодной обработкой (штамповкой, прессованием, точением, фрезерованием) или из порошков методами порошковой металлургии. Заготовку делают прессованием или шликерным литьем [12] с последующим спеканием.

Рассмотрим операции нанесения на исходные материалы пленочных покрытий, приготовление шихты (смешивание) и пластифицирование. Для нанесения покровных слоев, которые улучшают технологичность процесса и расширяют диапазон свойств покрытий, получаемых металлизацией, могут быть использованы почти все способы нанесения покрытий. Термическое напыление применяется для нанесения покровных слоев на пластинки и оболочки из металлов (преимущественно меди и ее сплавов), окислов и дру-

гих материалов. Однако этот способ дает покрытия, не прочно связанные с основанием, поэтому напыленные заготовки должны пройти восстановительный отжиг.

Основной способ нанесения покровных слоев — химическое и электрическое осаждение [8, 25] — высокопроизводителен и дает возможность наносить одно- и многослойные покрытия из Cu , Ni и других металлов и их сплавов. К сожалению, сцепление наносимых слоев с основанием из карбидов и окислов недостаточно прочно. Кроме того, в ряде случаев осаждение происходит не на чистые (ювенильные) поверхности, а на трудновосстанавливаемые в технических атмосферах окислы, что резко снижает эффективность спекания.

И. Л. Ройх и Н. Н. Новиков [23] наиболее универсальным способом нанесения покровных слоев на дисперсные частицы считают термовакuumное осаждение, однако он имеет почти те же недостатки, что и предыдущие.

Для металлизации наиболее приемлемы способы нанесения покровных слоев, которые обеспечивают органическую (химическую) связь слоя с основанием из многих материалов. Поэтому одним из перспективных способов нанесения покрытий на гранулы, пластины и оболочки является припекание (металлирование). В барабан засыпают предварительно смоченные раствором каучука на бензине гранулы (0,2—2 мм) и мелкий порошок наносимого материала. Во время вращения гранулы обволакиваются порошком. Удалив значительное количество бензина, в барабан вводят мелкий порошок инвертного вещества (Al_2O_3 , MgO). После непродолжительного перемешивания шихту засыпают в лодочки и она поступает в печь на отжиг в защитной атмосфере при температуре 0,7—0,8 $T_{\text{пл}}$ материала порошка или при температуре, при которой порошок расплавляется и смачивается поверхность гранул. После отжига порошок инертной массы отсеивается. При нанесении используют порошки металлов, легковосстанавливаемые окислы и металлосодержащие компоненты, разлагающиеся при нагреве; в исходную шихту вводят также активаторы (NH_4Cl) и флюсы. Таким способом наносят Cu , Ni , Co и их сплавы на гранулы из ВК, ТК и ТН. Толщина наносимого слоя 10—200 мкм.

На пластины и оболочки покровные слои наносят осаждением, напылением или натиранием мягкого металла в шаровых мельницах, дисковыми щетками и другими способами. Одним из производительных способов нанесения покровных слоев является «горячий способ» — исходный материал окунают в металлические расплавы (цинка, бронзы и т. п.). Технология нанесения покровных слоев на волокна и проволоку изложена в специальной литературе [27].

В заключение следует отметить, что выбор способа нанесения покровных слоев зависит от химического состава, формы и размеров исходного материала, а также от назначения слоя. Как показала практика, в покровных слоях нуждаются прежде всего туго-

плавкие материалы (карбиды, окислы). Исходным материалом при этом служат сплавы с относительно высокой температурой плавления, но с высокими механическими свойствами на основе Cu, Ni.

Приготовление шихты (смешивание). Свойства покрытий во многом зависят от равномерного распределения исходных компонентов. Для составления шихты разнородные материалы или фракции смешивают механическим или химическим путем. Механическое смешивание производится в барабанах, бочках или шаровых мельницах, его продолжительность 1—4 ч. Для ускорения процесс приготовления шихты и защиты исходных порошков от окисления применяют мокрое смешивание. В барабан, мельницу и т. п. заливают спирт, бензин, камфору или воду (если шихта не подвержена окислению). Химический метод смешивания заключается в осаждении из растворов на поверхности частиц металла за счет выпаривания его из одного раствора соли при одновременном интенсивном перемешивании.

Результаты смешивания контролируют либо по технологическим свойствам шихты (ситовой состав, насыпной вес, текучесть, прессуемость, спекаемость), либо химическим и микрохимическим анализом проб.

Пластифицирование — введение в исходную шихту пластификаторов. Технология пластифицирования зависит от вида и грануляции шихты. Шихта мелкой грануляции пластифицируется после окончательного смешивания в шнековых или лопатчатых смесителях. В шихту из порошков средних размеров (0,1—0,2 мм) пластификатор вводят в конце смешивания. Шихта, содержащая гранулы (0,2—2,4 мм), пластифицируется в любой период смешивания.

Нанесение «сырого» слоя. Основное назначение этой операции — формирование на покрываемой поверхности заготовки слоя, образующего в процессе последующей обработки покрытие. На покрываемой поверхности из требуемого материала должен быть создан слой, связь с основанием которого должна обеспечить ему целостность как в подготовительный период, так и в процессе нагрева. Эти требования удовлетворяются относительно невысокими прочностными свойствами, поэтому наносить «сырой» слой можно напрессовкой, напылением, осаждением, шликерным, формовочным, и другими способами.

Напрессовка. Порошковую массу (рис. 3 а) припрессовывают к покрываемой поверхности изделия, которое частично или полностью помещается в пресс-форму. Исходная шихта состоит из порошков, гранул или волокон. Форма напрессованного слоя отличается от формы брикета порошковой металлургии тонкостенностью и значительными размерами в двух других направлениях. Создание на поверхности заготовки слоя требует введения в шихту пластификатора, который должен придавать шихте текучесть, необходимую для заполнения тонких мест формы, обеспечивать равномерную плотность, снижать создаваемое при высоких давлениях припрессования упругое последствие. Пластификатором может

служить парафин, воск, каучук на бензине, смолы, крахмал, растворы полимеров, глицерин, спирты, алейновая кислота, водные рас-

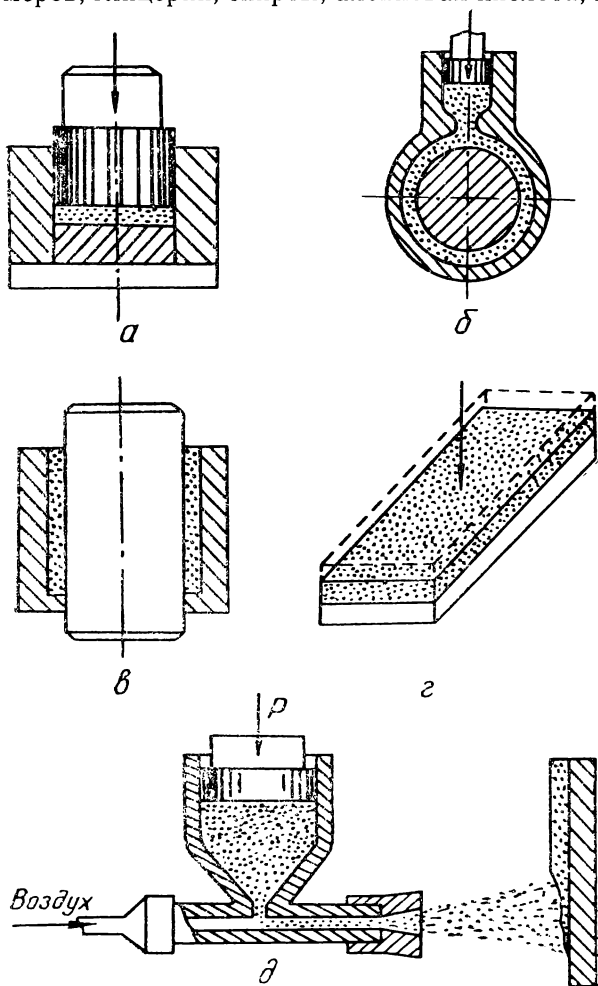


Рис. 3. Способы нанесения сырого слоя:

а — напрессовка, *б* — экструзионно-формовочный, *в* — шликерно-формовочный, *г* — плакирующий, *д* — напыление.

воры хлорных соединений NiCl , $\text{Al}_2(\text{PO})_3$ каменноугольный пек, бакелит и другие материалы.

Для хорошо прессуемых порошков (ПЖ, ПМ и т. д.) рекомендуется использовать малодифицитные и дешевые пластификаторы (парафин, глицерин, водные растворы) — 0,5—4% (по весу). Для труднопрессуемых шихт с большим содержанием карбидов, окислов количество пластификатора увеличивается до 5—10% или ис-

пользуются высокоэффективные пластификаторы (смолы, каучук и др.). Плохой прессуемостью обладают порошковые шихты, содержащие значительное количество ($>0,5\%$) свободного углерода (в виде сажи), поэтому углерод желателно вводить в шихту в связанном состоянии в виде растворов или карбидов.

Различают статическое и динамическое припрессование. Статическое припрессование производится на прессах различных конструкций и мощностей (3—5000 т). Выбор усилия припрессования зависит от материала шихты и требуемых свойств слоя; на практике удельное давление принимают 50—700 МПа (0,5—7 т/см²). При малом усилии припрессования (P_n) слой имеет относительно высокую пористость; с увеличением усилия припрессования плотность и механические свойства слоя повышаются. Напрессовка легко автоматизируется и вследствие малого хода пуансона (несколько миллиметров) требует небольшого времени (2—8 с), поэтому является высокопроизводительной и недорогостоящей. Динамическое припрессование производится на молотах, ротационных машинах или установках электромагнитного удара.

Шликерный способ. Исходный материал в виде жидкотекучей массы обливом или окунанием наносится на покрываемую поверхность. После удаления влаги из пленки образуется порошковый слой. Основными составляющими шликеров, принимаемых в металлизации, являются порошки металлов или металлов с неметаллами размером до 100 мкм. Шликер готовят, перемешивая порошок с жидкостью (водой, спиртом, бензином и т. д.). Чтобы придать шликеру требуемые свойства (текучесть, устойчивость, однородность), в него вводят дефлокирующие, стабилизирующие, активирующие вещества: кислоты (НСl), щелочи (KOH), соли (алгинаты), органические соединения и т. д.

Приготовление шликера при металлизации основывается на опыте шликерного литья в порошковой металлургии и керамического производства [6, 12]. Отличительная особенность шликеров, применяемых для нанесения порошковых слоев,— высокий удельный вес, снижающий их способность удерживаться на покрываемой поверхности. Вследствие этого в шликер вводят компоненты, повышающие его способность к прилипанию (крахмал, растворы смол). Техника нанесения шликерного слоя при металлизации та же, что при эмалировании, поэтому можно использовать соответствующее оборудование [6]. Шликерным способом получают высокопористые слои толщиной 0,05—1,5 мм в зависимости от вязкости шликера и кратности нанесения.

Формовочный способ. На изделие устанавливают форму, которая образует с покрываемой поверхностью зазор. Подаваемый в нее материал образует требуемый слой. Различают шликерно-формовочный и экструзионно-формовочный способы.

Шликерно-формовочный способ нанесения сырого слоя (рис. 3 в) состоит из следующих операций: подготовки поверхности, на которую наносится слой (очистка), установки форм, заливки шликера,

выдержки в период отвердевания слоя и снятия формы. Шликер при формовочном способе приготавливается из порошков, гранул, волокон или мелкой стружки на воде, бензине, парафине, обеспечивающих текучесть шихты. В шликеры, приготавливаемые на воде из мелких порошков (<100 мкм), вводятся различного рода дефлюкирующие и стабилизирующие вещества.

Форма при шликерно-формовочном способе изготавливается из пластмассы, металла и других материалов. Для предотвращения сцепления наносимого на изделие сырого слоя с формой соответствующую ее поверхность делают гладкой, а в некоторых случаях покрывают тонким слоем эмали или хрома. Толщина наносимого шликерно-формовочным способом слоя 2,0—6 мм и более. Равномерное и быстрое заполнение зазора порошковой массой обеспечивают вибрацией. Параметры вибрации: частота колебаний 0,2—20 кГц, амплитуда колебаний 10^{-5} — 10^{-1} см. При этом чем меньше размер частиц порошка, тем выше частота колебаний и меньше амплитуда. Шликерно-формовочный способ нанесения порошкового слоя отличается высокой производительностью и не требует сложного оборудования.

Экструзионно-формовочный способ. Высокопластифицированную порошковую массу подают в зазор между изделием и формой под давлением (рис. 3 б). Как только пластифицированная масса отвердеет, форму снимают и на изделии остается порошковый слой. Исходными материалами шихты являются порошки металлов или металлов с неметаллами размером 10—260 мкм. Пластификаторами служат парафин, растворы смол, хлорных соединений и другие материалы, которые обеспечивают вначале необходимую текучесть шихты, а после выдержки — связность. Необходимая текучесть порошковой массы достигается введением в нее соответствующего количества пластификатора (10—35% по объему), а в ряде случаев подогревом до 100°C . Текучесть пластифицированной массы повышается с увеличением степени сферичности используемых порошков и уменьшением размеров частиц.

Давление экструзии выбирается в зависимости от вязкости пластифицированной массы, сложности покрываемой поверхности и ширины зазора и принимается от 1 до 30 МПа (10—300 ати).

Напыление. Различают две разновидности этого способа: пульверизация и термическое напыление. В процессе пульверизации исходную массу под действием сжатого воздуха напыляют на поверхность изделия (рис. 3 д). Жидкостную массу готовят из мелких порошков ($d < 50$ мкм) и растворов бакелита, каучука, крахмала или смол. Эти компоненты обеспечивают наносимому слою целостность и хорошее сцепление с основой. Примером может служить жидкотекучая масса из 2 кг порошка ВК6 и 0,35 кг 10%-ного раствора каучука в бензине. Пульверизацией наносят слой толщиной 0,05—1,2 мм; многократным повторением операции толщину слоя можно увеличить до требуемых размеров.

Термическое напыление подробно описано в литературе [17, 31]. Напыленный материал — пористый конгломерат, состоящий из частиц металла и окислов. А. Ф. Троицкий отмечал, что металлизационный слой аналогичен как по строению, так и по свойствам порошковой прессовки (сырому брикету). Вследствие этого при металлизации термическое напыление используется как один из способов нанесения сырого слоя. Однако в большинстве случаев термическое напыление при металлизации используется как операция нанесения подслоя.

Для расширения химического состава материалов для термического напыления и повышения производительности автором совместно с инж. В. Мирзаевым предложено принять за исходный материал порошковую проволоку.

Плакирующий способ. Приготовленную по профилю покрываемой поверхности тонкостенную оболочку сопрягают с ней припрессованием (рис. 3 *г*) или фиксацией — механическим закреплением оболочки относительно основания. Форма наносимой оболочки может быть плоской, цилиндрической и сложной. Изготовление и нанесение оболочек больших размеров и сложной конфигурации сопряжено с технологическими трудностями, поэтому такие оболочки делаются составными из нескольких частей. Эти части (пластинки) наносят на основание по одной, по несколько штук или все вместе.

Одно из перспективных направлений плакирующего способа — использование гибких оболочек, которые представляют собой порошковый слой, нанесенный на полиэтиленовую пленку (рис. 4 *а, в*) или на металлическую фольгу (рис. 4 *б, г*). Технология нанесения гибкой оболочки на основание разнообразна. Она может припрессовываться механическим давлением пуассона, гидростатическим давлением жидкости, приклеиваться и т. д. Давление припрессования оболочки в зависимости от требуемых свойств слоя 50—1200 МПа (0,5—12 т/см²).

Осаждение. К данной группе способов нанесения сырого слоя относятся электрофорез, осаждение в кипящем слое, из пересыщенных растворов и т. д. Техника осаждения электрофорезом предусматривает получение суспензии частиц дисперсностью 3—25 мкм в органическом диэлектрическом растворе и приложение постоянного напряжения 40—500 В между электродами. В зависимости от растворителя и присадок частицы имеют положительный или отрицательный заряд и поэтому осаждаются на один из электродов.

Данная технология применима к нанесению сплавов, керметов и других составов; сплошное покрытие имеет относительно хорошее сцепление с основанием; можно быстро (за 5—500 с) нанести слои толщиной от нескольких микрометров до миллиметров; расход электроэнергии мал; процесс применим для изделий сложной формы.

Сущность другого способа осаждения состоит в том, что изделие помещают в камеру, в которой создается кипящий газовый объем, содержащий мельчайшие твердые частицы металла. В камеру вместе с инертным газом подается парообразный галоид, образующий при взаимодействии с частицами галоиды. Камера имеет

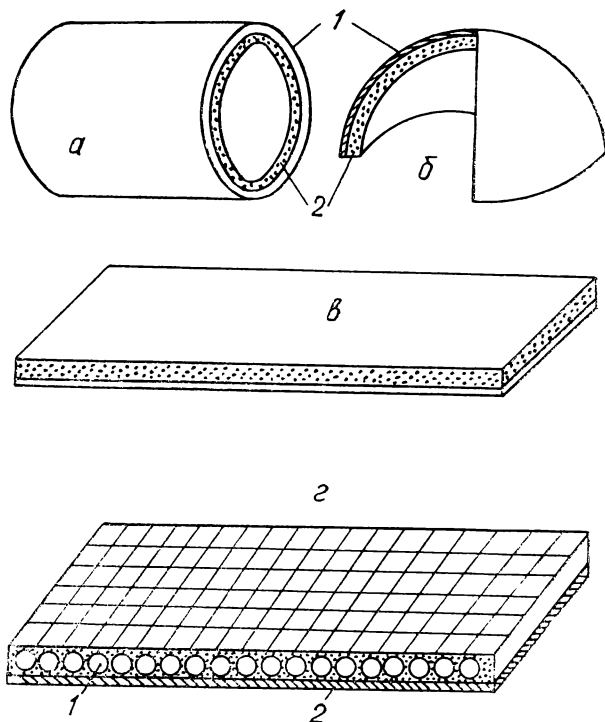


Рис. 4. Гибкие оболочки:

а, б — порошковые на полиэтиленовой пленке (1 — пленка, 2 — сырой слой), *с* — гранулическая на тонкой стальной пленке (1 — гранулы, 2 — стальная фольга).

нагреватели, поддерживающие температуру, при которой галоиды разлагаются, выделяя на изделиях слой металла.

Комбинированные способы нанесения слоев. К комбинированным способам относятся напыленно-прессовый, напыленно-плакировочный, шликерно-прессовый, арматурно-шликерный, шликерно-плакировочный и т. д. Сочетание различных способов позволяет повысить прочность и уменьшить пористость слоя.

Выбор способа нанесения слоя зависит от характера производства, требуемых свойств и многих других факторов. Некоторые характеристики рассмотренных способов нанесения и свойства получаемых слоев приведены в табл. 4. Эти свойства являются обобщен-

ными, так как они даны без указания режимов нанесения и химического состава шихты.

Из данных табл. 4 следует, что описанные способы обладают высокой производительностью, дают возможность наносить слои из

Т а б л и ц а 4

Некоторые характеристики способов нанесения и свойств получаемых ими слоев

Способ нанесения	Исходный материал		Производительность	Свойства слоя			
	Форма	размер, мкм		толщина, мм	пористость, %	прочность	
						на разрыв слоя, Мн/м ²	связи, Мн/м ²
Напрессовка	Порошки, гранулы, стружка	1—2000	Высокая	0,5—10	5—25	2—10	0,6—2,4
Шликерный	Порошки	0,1—100	Высокая	0,02—1,2	22—65	0,4—26	0,2—1,0
Формовочный	Порошки, гранулы	1—2000	Высокая	>1,5	18—45	0,3—26	0,2—1,5
Пулверизация	Порошки	1—100	Высокая	0,05—1,2	25—65	0,4—2,0	0,4—1,5
Напыление	Порошки	1—300	Средняя	0,1—7,0	5—20	50—200	5—25
	Проволока	1—5 мм	Средняя				
Плакировка	Оболочки пластины проволока	Толщина 0,1—10 мм	Высокая	0,1—10,0	0—30	25—2000	0,8—5,0
Осаждение	Порошки	0,1—25	Средняя	0,01—2,0	3—25	—	—
Напыленно-прессовый	Порошки, гранулы, стружка	1—2000	Высокая, средняя	0,5—10	5—25	5—10	10—30
Напыленно-плакировочный	Оболочки	0,1—10	Высокая	0,1—10	0—30	25—2000	10—80
	порошки	0,1—100	Высокая	0,2—1,5	5—15	1,2—6,0	0,4—1,6

разнообразных материалов и различной толщины. Однако для некоторых из них характерны слои малой прочности и высокой пористости. Вследствие этого на практике применяются комбинированные способы нанесения сырого слоя: напыленно-прессовый, напыленно-плакировочный, шликер-прессовый и т. д. Чтобы повысить прочность сцепления слоя, наносимого прессовым способом, на покрываемую поверхность термическим напылением наносят под-

слой толщиной 0,07—15 мм. Сочетание термического напыления с напрессовкой (напыленно-прессовый способ) дает слой с относительно высокими прочностными свойствами. Аналогичная цель преследуется нанесением подслоя при плакировочном способе.

Повышение плотности шликерных слоев достигается последующей подпрессовкой (шликерно-прессовый способ). Эта операция производится обычно после удаления (возгонки) пластификатора. Сущность арматурно-шликерного способа нанесения сырого слоя состоит в том, что на покрываемой поверхности укрепляется арматура, которая затем заполняется шликером или высокопластифицированной массой (рис. 2 е). При шликерно-плакировочном способе вначале наносят слой шликера, затем на него припрессовывают пластинки из исходного материала (рис. 2 л).

Спекание. Основной технологической операцией металлизации является термическая или термомеханическая обработка — спекание. Сущность спекания состоит в нагреве исходных материалов в защитной (активной) среде или в нагреве и приложении давления. Основные параметры спекания: температура ($T_{сп}$), продолжительность ($\tau_{сп}$), давление (P_r) и среда. Относительно температуры плавления материала слоя ($T_{пл1}$) температура спекания может быть низкой — 0,4—0,55, средней — 0,55—0,8 и высокой 0,8—0,95 $T_{пл1}$, а относительно температуры плавления материала основания ($T_{пл0}$) соответственно 0,4—0,5; 0,5—0,75 и 0,75—0,9 $T_{пл0}$.

По продолжительности спекание бывает кратковременное — 10, малой продолжительности — 10—300, средней продолжительности — 300—1200 и большой продолжительности — >1200 с. Средой спекаемого изделия может быть газообразная атмосфера, жидкость, твердое вещество или их смеси.

Существует три типа атмосфер: нейтральная, активная и вакуум. Нейтральная атмосфера выступает в роли защитной среды. Для ее создания используются нейтральные газы: аргон, гелий, азот и т. д. Активные газовые среды, применяемые при спекании, не только защищают металлы от окисления, но и восстанавливают окислы, если они образовались в слое при его нанесении (термическое напыление и т. п.). Активные газовые среды подразделяют на восстановительные газовые среды и газообразные флюсы. К восстановительным газовым средам относятся водород, окись углерода и газовые смеси, содержащие эти газы. К газообразным флюсам условно относят газовые среды, содержащие компоненты, способствующие удалению окислов в процессе спекания, трехфтористый бор, хлористый водород, фтористый водород и т. д.

Вакуум, как и активные газовые среды, защищает исходные материалы от окисления и способствует удалению окислов. Понижение в атмосфере парциального давления кислорода, а соответственно повышение восстановительной способности среды, достигается многократным вакуумированием с последующим заполнением нейтрального газа (промывкой).

При спекании сырых слоев средой, обеспечивающей защиту от окисления и восстановление окислов, может служить жидкость двух видов — флюсовая и металлическая. В зависимости от физико-химических свойств исходных материалов применяют следующие компоненты флюса: соли $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, KCl , NaF , NaCl , окислы SiO , B_2O_3 , BeO , кислоты HCl , а также вещества органического происхождения. Состав флюса подбирается с учетом того, чтобы температура его активного состояния равнялась температуре спекания. Сведения о температурах плавления исходных компонентов флюса и их смесей можно найти в литературе по сварке и пайке [28]. Металлическая жидкая среда — это расплавы металлов или их сплавов. Наибольшее применение в качестве исходных компонентов жидкой металлической среды находят сплавы (припой) на основе серебра (ПСр90, ПСр45), меди (ПМЦ 48, ПМЖФ 3,7) и никеля (NiBCrSi , NiMn).

Твердая среда, применяемая при спекании, представляет собой инертную засыпку из окиси алюминия или магния, графитовой крупки или других материалов, не реагирующих со спекаемыми изделиями. Для усиления защитной способности засыпок к ним добавляют активные вещества, способные поглощать кислород. Для небольших и средних размеров деталей наибольшее применение в качестве среды находят активированная засыпка, помещенная в защитный газ — $\text{Al}_2\text{O}_3 + 1,0 \div 1,5 \text{ C}$ в атмосфере водорода или эндо (экзо)-термического газа.

Следует отметить, что среда отдельных операций спекания может быть различной. Например, нагрев осуществляется в окислительной, спекание — в активной, а охлаждение — в нейтральной, или нагрев — в нейтральной, спекание (ударное припрессование) — в окислительной, а охлаждение — в активной.

Давление (сжатие) при термической обработке слоев интенсифицирует процессы спекания и припекания их к основанию и вследствие этого значительно влияет на свойства покрытий. Прикладываемое при термомеханической обработке давление характеризуется видом действующей силы, величиной удельного давления и продолжительностью действия.

В зависимости от характера действия силы создается статическое или динамическое давление. Статическое давление бывает без приложения каких-либо колебаний и с приложением колебаний в виде ультразвука высокой частоты. Динамическое давление бывает ударное — одно- или двукратный удар большой мощности и виброударное — многократные удары малой мощности.

Статическое сжатие слоя при его спекании может быть создано под действием веса покрываемой детали или специально установленного груза, силы прессового механизма, гидростатического или газостатического давления, прокатки между валками, накатки роликами и т. д.

По продолжительности действия давление может быть мгновенное — $< 1 \text{ с}$, кратковременное — $1-60 \text{ с}$, средней продолжитель-

ности—1—15 мин., продолжительное > 15 мин. Низкое статическое удельное давление применяется обычно при высокотемпературном продолжительном спекании. Высокие статические давления применяются кратковременно при средних температурах нагрева. Удар-

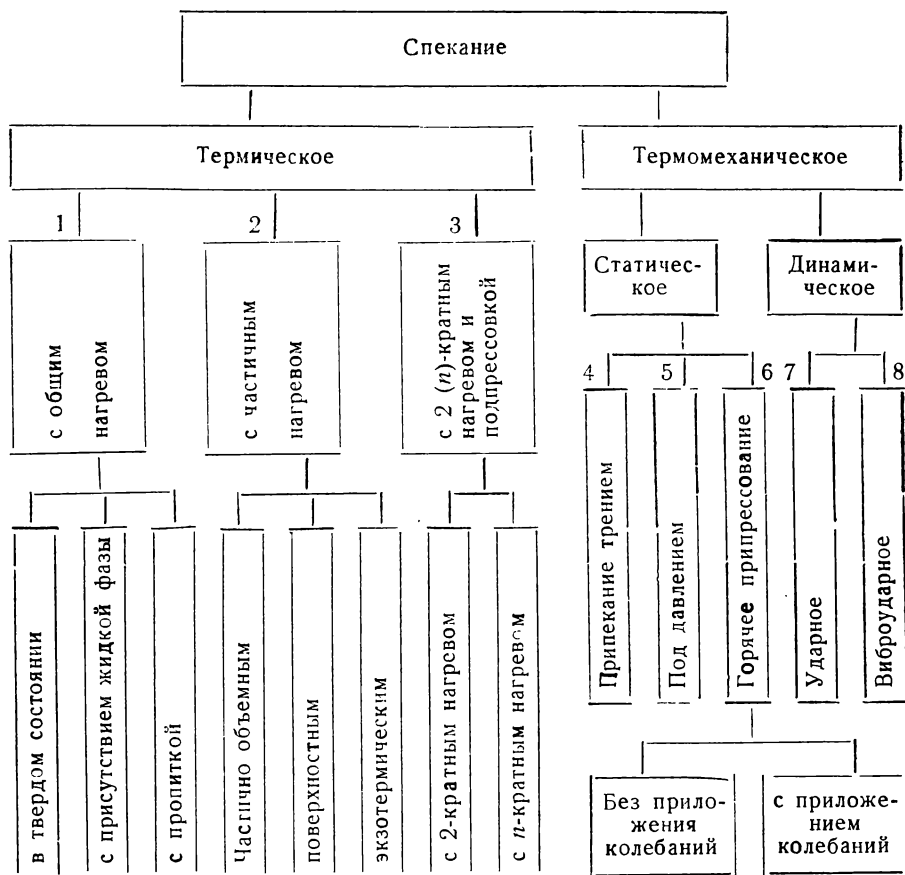


Схема 3. Классификация способов спекания сырого слоя при мегалдировании

ное воздействие протекает мгновенно, а виброударное — кратковременно.

Технология спекания классифицируется в зависимости от характера нагрева, величины и способа приложения нагрузки и других факторов (схема 3). Согласно приведенной классификации, спекание подразделяется на термическое и термомеханическое. При термической обработке физико-химические процессы спекания слоя (диффузия, ползучесть, усадка, химические реакции и т. д.) определяются главным образом нагревом (термическим воздействием), а

при термомеханической — тепловым и механическим воздействием.

Термическое спекание слоя подразделяется на спекание с общим нагревом, с частичным нагревом и неоднократным нагревом и подпрессовкой между ними.

Спекание с общим нагревом — нагрев в защитной атмосфере всей заготовки от $0,6—0,85 T_{пл,1}$ материала наносимого слоя при выдержке $10—240$ мин. В отличие от порошковой металлургии режимы спекания выбирают с учетом не только материала слоя ($T_{пл,1}, \alpha_1$), но и материала основания ($T_{пл,0}, \alpha_0$), где $T_{пл,0}$ — температура плавления материала основания; α_0 — тепловой коэффициент линейного расширения, соответственно материала основания и слоя, град.

Основной фактор, определяющий влияние материала основания на выбор режимов спекания слоя, соотношение температур плавления исходных материалов $T_{пл,1}/T_{пл,0}, \alpha_1/\alpha_0$, а также их химическое воздействие при температуре спекания. Если $T_{пл,0} > T_{пл,1}$, то принимаются высшие пределы рекомендуемых температур ($0,85—0,95 T_{пл,1}$) и минимальная выдержка ($10—25$ мин.); при $T_{пл,0} \approx T_{пл,1}$ выбираются средние пределы рекомендуемых $T_{сп}, \tau_{сп}$, а при $T_{пл,0} < T_{пл,1}$ низкий по температуре и максимальный по времени.

При $\alpha_1 \gg \alpha_0$ применяется переменное поле температур или другие мероприятия. Спекание с общим нагревом производится в печах или специальных установках, где через заготовку пропускают электрический ток. В простейшем случае для спекания пригодны обычные печи, предназначенные для термической обработки деталей. Спекаемые изделия загружают в коробки и добавляют специальные засыпки, создающие инертную или восстановительную атмосферу внутри коробки. Однако для обеспечения высокой производительности и качества необходимо использовать специализированные печи с защитной атмосферой. Печи для металлизации подразделяются по технологическим признакам на универсальные и специальные; по принципу работы — на периодические и непрерывного действия; по конструктивным признакам — на камерные, колпаковые, элеваторные, вертикальные (шахтные), однозонные, многозонные и т. д.; по источнику нагрева — на газовые и электрические (печи электросопротивления и индукционные).

Универсальные печи применяют при штучном и мелкосерийном производстве, специальные — при крупносерийном и массовом производстве. К универсальным обычно относятся печи периодического действия — колокольные, муфельные, вакуумные и индукционные. В них нагрев, выдержка и охлаждение изделия происходят вместе с печью. При крупносерийном и массовом производстве наиболее приемлемы высокопроизводительные печи непрерывного действия — толкательные и конвейерные — типа СШЗ [28].

Печи с общим нагревом, применяемые для спекания, должны иметь защитную атмосферу. Основное требование к атмосфере спекания — обеспечение условий, при которых не происходило бы нежелательных взаимодействий исходных материалов (слоя и осно-

вания) с элементами окружающей среды (насыщенные газами, контактное взаимодействие и т. д.). Данные о химическом составе и точке росы газовых сред, применяемых при спекании, приведены в табл. 5.

Преимущество использования печей с газовой атмосферой заключается в возможности совмещения спекания слоя с его химико-термической обработкой — науглероживанием, азотированием, борированием и т. п. Легирующие компоненты попадают в атмосферу печи в виде газообразных соединений ($C_n H_m$) или порошка (B_4C) в засыпку (Al_2O_3). Наиболее высокие свойства покрытий, по-

Т а б л и ц а 5

Химический состав и точка росы газовых сред

Атмосфера	Химический состав, %				Точка росы, °С
	H ₂	CO	N ₂	H ₂ O	
Водород	100	—	—	0,01	—15, —60
Диссоциированный аммиак	75	—	25	0,1 0,02 0,01	+ 5, —40
Продукты неполного сжигания аммиака	7—20	—	Остальное	0,01	—15, —40
Продукты сгорания горючего газа	14—15	9—10	70—71	0,8	+20, —10
	38—40	17—19	41—55	—0,1	+ 5, —20

лученных после спекания в вакууме, объясняются испарением и диссоциацией окислов и вообще благоприятными условиями для рафинирования при вакуумном спекании.

Спекание с пропиткой. С технологической точки зрения существует несколько разновидностей операции спекания с пропиткой. Первая разновидность — материал пропитки в виде пластифицированной массы, оболочки и т. д. наносится на сырой слой и нагревается (рис. 5 а); в процессе расплавления образующаяся жидкость заполняет поры спекаемого слоя. Материал пропитки по другой разновидности размещается в воронках, откуда он при нагреве вытекает и заполняет поры слоя (рис. 5 б). В отдельных случаях в зазор между изделием и формой заливают жидкий металл. Наиболее перспективным способом спекания с пропиткой является погружение заготовки с сырым слоем в расплавы металлов (рис. 5 в).

Температура спекания с пропиткой принимается выше $T_{пл}$ материала пропитки на 50—150°С и более; продолжительность 3—15 мин. При спекании с поверхностным нагревом нагревается сырой и поверхностный слой основания, на которые наносится покрытие. В поверхностном слое основания с помощью высококонцентрированных источников тепла и мощных стыков тепловой энергии создается высокий градиент температур. Высококонцентрированными источниками тепла при поверхностном нагреве служат токи высокой частоты, электронный луч, высокотемпературные блоки и т. д.

Стоком тепла могут быть массы изделия (для средних и крупных деталей) или искусственно создаваемые холодильники в виде медных охлаждающих колодок, проточной воды (газа) и других устройств.

Механизм нагрева наносимого материала токов высокой частоты (т.в.ч.) при металлизации отличается от нагрева т.в.ч. при наплавке. В последнем случае присадочный материал расплавляется от тепла, генерируемого т.в.ч. в поверхностном слое основания.

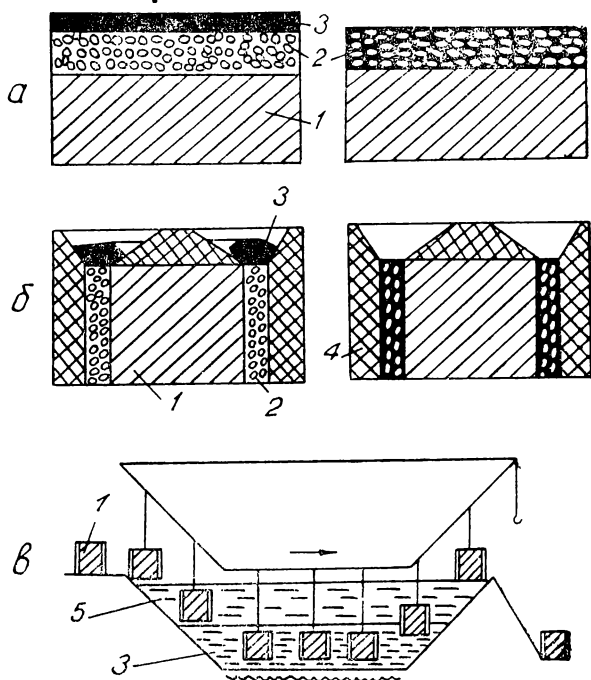


Рис. 5. Спекание с пропиткой за счет:

а—расплавления верхнего слоя, *б*—заливки расплава, *в*—погружение в расплав; 1—основание, 2—порошковый слой, 3—материал пропитки, 4—форма, 5—флюс.

При металлизации же тепло генерируется непосредственно в сыром слое. Это достигается тем, что сырой слой наносится плакировкой с использованием оболочек (пластин) с высокой плотностью или другими способами, но перед спеканием производится выжигание пластификатора (200—500°C) и подпрессовка, обеспечивающие слою необходимые электромагнитные свойства.

Перспективная разновидность поверхностного спекания — технология с применением самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (с.в.с.). Если на поверхность заготовки нанести порошковый слой экзотермической смеси и инициировать (возбу-

диль) их взаимодействие, то в результате реакции создается новое вещество, из которого и образуется покрытие, прочно сцепленное с основанием. Исходными компонентами (термитной) смеси служат, с одной стороны, порошки Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb и т. д., а с другой — элементы N, C, Si, B, H или химические вещества типа SiC, B₄C и т. д.

Термомеханическое спекание (т. м. с.). Сущность т. м. с. состоит в нагреве слоя и приложении к нему давления ($P_{сп}$). При таком спекании свойства покрытия формируются при одновременном воздействии тепловой и механической энергии. При т. м. с. процессы спекания слоя (усадка, рост контактов и т. д.) протекают гораздо быстрее, поэтому для достижения заданных свойств возможно применять температуры более низкие, чем при обычном спекании. Важнейшим преимуществом т. м. с. является получение покрытий с более высокими, чем при спекании с общим нагревом, свойствами: плотностью, пределом прочности при разрыве, твердостью, электропроводностью и т. д. Согласно классификации (см. схему 3), термомеханическое спекание подразделяется на статическое и динамическое. Статическое т. м. с. характеризуется медленным нагружением и относительно продолжительной выдержкой изделия под нагрузкой. Для динамического т. м. с. характерно мгновенное однократное или многократное приложение нагрузки в виде удара.

Различают несколько разновидностей статического т. м. с. Спекание с давлением характеризуется температурой нагрева $0,6—0,75 T_{пл}$ наносимого материала; выдержкой — 30—60 мин., удельным усилием прижатия — $0,1—1,0$ МПа ($1—10$ кг/см²). Давление при данном спекании предотвращает коробление слоя и интенсифицирует процессы спекания. На практике давление в пределах указанных величин создается грузом при укладке изделий в лодочки или специальными устройствами (рис. 6 а). Спекание с давлением применяется для обработки деталей малых и средних размеров. Наиболее приемлем этот способ для деталей плоской формы — направляющие, пластины, лемеха и т. д. Давление указанной величины можно создать при нагреве также за счет разности расширения материалов с различными КТР (рис. 6 г) — стальное цилиндрическое основание имеет КТР равными $12 \cdot 10^{-6}$, а графитовая втулка — $5 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Этот способ приемлем для изделий любой конфигурации.

Горячее припрессование характеризуется относительно низкой температурой нагрева — $0,5—0,7 T_{пл}$ материала покрытия, небольшой выдержкой — 5—600 с и высоким усилием прижатия 20—300 МПа ($200—3000$ кг/см²).

Горячее припрессование подразделяют на спекание с приложением давления через твердое тело, гидротермокомпрессионное и газотермокомпрессионное. Механическое давление в первом варианте осуществляется на прессах горячего прессования, установках диффузионной сварки или специально сконструированных установ-

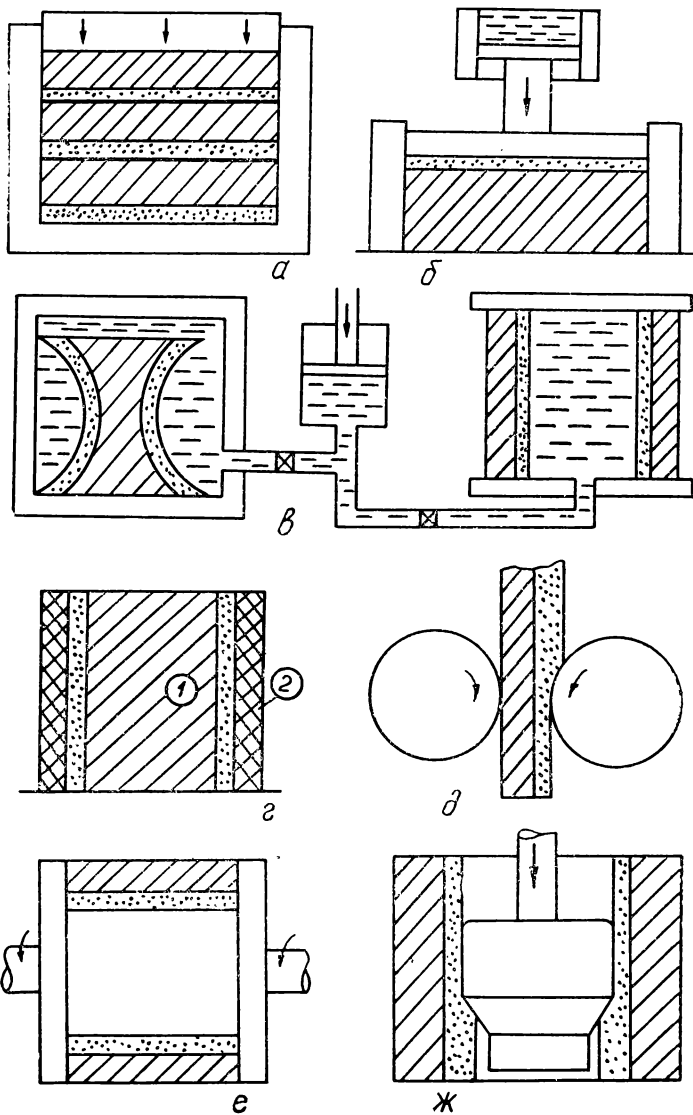


Рис. 6. Технологические приемы приложения нагрузки при статическом и термомеханическом спекании:

а — весом груза, *б* — механическим давлением, *в* — гидравлическим давлением, *г* — за счет различного расширения сопряженных материалов при нагреве, *д* — прокаткой между роликами, *е* — центробежным усилием, *ж* — прошивкой.

ках, которые обеспечивают нагрев в защитно-восстановительной атмосфере и при указанных давлениях (рис. 6 б).

Разновидности горячего припрессования проката нагретых заготовок со слоем через валки, накатка профильными роликами, протяжка цилиндрических заготовок с нагретым слоем через фильеры и т. д. (рис. 6 д, ж). Рабочее пространство прокатных станов, прошивных процессов и других установок, используемых для горячего припрессования, должно иметь защитную атмосферу (вакуумные прокатные станы). Однако, если продолжительность самого процесса горячего припрессования (накатки, прокатки, штамповки) исчисляются несколькими секундами (1—7), то для многих материалов он может проводиться в обычной, воздушной атмосфере.

При гидротермокомпрессионном спекании (рис. 6 в) в качестве жидкости используют расплавы металлов (сплавов) с температурой плавления, равной $0,75—0,85 T_{сп}$. При этом, если в процессе гидротермокомпрессионного спекания предусматривается пропитка, то сырой слой должен иметь открытую пористость (10—30%), а жидкость должна смачивать его материал. Если же пропитка не предусматривается, то сырой слой должен иметь высокую плотность или наноситься с использованием гибкой оболочки на металлической фольге. При газотермокомпрессионном спекании сырой слой наносится с использованием гибких оболочек на металлической основе (фольге), причем торцы должны герметизироваться специальным клеем или пайкой.

Припекание трением характеризуется нагревом исходных материалов в зоне их соприкосновения трением и сжатием для их соединения. Припекание трением — это сварка трением. Специфическая особенность такой сварки состоит в том, что соединяемой частью служат тонкостенная оболочка или составляющие ее пластинки. Для припекания подбирают технологические режимы обычной сварки трением и ультразвуком.

Ударное припрессование. На покрываемую поверхность наносят шихту, затем заготовку нагревают в защитно-восстановительной атмосфере до соответствующей температуры в течение 2—20 мин. и в нагретом состоянии подвергают ударному воздействию.

Припрессовка покрытий должна производиться без значительного воздействия на размеры основания. Это условие выполняется за счет снижения веса бойка (с увеличением количества ударов), припрессования в пресс-формах, поверхностного нагрева. Использование виброударов с массой бойка от 3 до 50 кг дало возможность получить покрытия высокой плотности без практически ощутимого воздействия процесса припрессования на размеры основания. Припрессовка в пресс-формах исключает деформацию основания, позволяет применять высокую степень деформации материала покрытия.

При ударном припрессовании на молотах в обычной воздушной среде или на специальных установках нагрев, обработка и охлаждение производятся в защитной атмосфере. Один из прогрессивных способов виброударного спекания — технология с использованием ротационного обжигания. Такое обжигание сырого слоя при металлизации осуществляется на стандартных (типовых) ротационно- и радиальнообжимных машинах.

Маркировка покрытий и технология их нанесения. Маркировка технологии нанесения покрытий металлизированием зависит от способа нанесения слоя и операции его спекания и производится буквенно-цифровыми обозначениями. Вначале ставят букву, определяющую операцию нанесения сырого слоя: Ш — шликерный способ, Э — экструзионный, Н — напрессовка, М — напыление, О — осаждение, П — плакировка, Ф — формовочный, К — комбинированный, С — специальные.

Операции спекания маркируют цифрами: 1 — с общим нагревом, 2 — с частичным, 3 — с двукратным нагревом и подпрессовкой между ними, 4 — припекание трением, 5 — спекание под давлением, 6 — горячее припрессование, 7 — спекание с ударной нагрузкой, 8 — спекание с виброударной нагрузкой. Таким образом, технологию покрытия, порошковый слой которого нанесен шликерным способом, а спекание проведено под давлением, маркируют Ш5.

Полная маркировка технологии нанесения покрытий включает режимы нанесения слоя и его спекания: давление припрессования сырого слоя (в МПа) стоит в скобках после буквы Н, а горячего припрессования после цифры 5; затем указана температура нагрева (°С), время выдержки в минутах и среда. При этом водород обозначен Н₂, аргон — Аг, эндотермический газ — Энд., вакуум — Вк, жидкая и твердая среда отмечается в виде химического обозначения материала ВаСl, Бр, Al₂O₃ и т. д. Например, Н (300) 5(0,5) — 900—30—Н₂ — технология нанесения покрытий, сырой слой которого нанесен напрессовкой с давлением 300 МПа и спечен под давлением 0,5 МПа, в среде водорода при 900°С в течение 30 мин.

Металлизированные покрытия маркируют также на основе буквенно-цифровых обозначений. Сначала ставят буквы, определяющие форму исходного материала: П — порошок, Г — гранулы, А — армирующие пластинки, О — оболочка, В — волокна, проволока, С — стружка мелкая. Химический состав порошков обозначают соответственно маркировке, принятой в порошковой металлургии: ПЖ — железный порошок, ПМ — медный порошок и т. д. Химический состав гранул, пластин, оболочек, проволоки маркируется соответственно обозначениям, принятым в материаловедении (металловедении): ОН — никелевая оболочка, АВК8 — пластины из твердого сплава ВК8 (92 WC+8Co). Шихту сложного состава маркируют составным обозначением ГВК6+18ПН — шихта, состоящая из 82% гранул из ВК6 (94 WC+6Co и 18% порошка никеля; СЧ — стружка чугунная и т. д.

При маркировке покрытий после химического состава следуют обозначения технологии нанесения: ГВК6+12ПМ—Ф1—1150—15—Н₂ — покрытие из гранул ВК6 и 12% меди, сырой слой которого нанесен формовочным способом, а спечен в среде водорода при температуре 1150°C в течение 15 мин; ПН+12 Al₂O₃—Ш6 (20) — 1250—10—Вк — композиционное покрытие из никеля с 12% окиси алюминия, сырой слой нанесен шликерным способом, горячее припрессование $T_{сп}=1250^{\circ}\text{C}$, усилие припрессования 20 МПа, среда — вакуум. Для уточнения технологии нанесения сырого слоя и его спекания иногда ставят вторую букву: ФЭ — экструзионно-формовочный способ нанесения сырого слоя, Ш — спекание с пропиткой и т. д. Если после спекания применяют подпрессовку, то в конце ставится Пд; калибровка отмечается буквой К.

2.2. Свойства металлизированных покрытий

Металлизированием можно наносить покрытия с самыми разнообразными свойствами по прочности — $\sigma_{в1}=50\text{—}1200$ МПа, твердости ЗОНВ — 93 НРА, пористости 0—60%, структуре и другим характеристикам. Свойства покрытий зависят от химического состава и плотности исходного материала, вида и режимов нанесения сырого слоя и его спекания.

Физико-механические свойства. Плотность покрытия (ρ_1). Если исходным материалом сырого слоя служит компактная оболочка, покрытие компактно. При использовании порошков плотность покрытия возрастает с плотностью исходной шихты, давления припрессования (рис. 7 а), $T_{сп}$ — температуры (рис. 7 в), $P_{г}$ — давления горячего припрессования (рис. 7 б) и $\tau_{сп}$ — продолжительности спекания (рис. 7 в).

Механические свойства покрытий — прочность, твердость и т. д. — определяют надежность и долговечность изделий. Прочность компактных покрытий равна прочности исходного материала $\sigma_{в}$. Прочность пористых покрытий $\sigma_{в1}$ пропорциональна его плотности, т. е.

$$\sigma_{в1} = \rho_1^n \sigma_{в}, \quad (1)$$

где n — коэффициент, равный 1,5—2. Из формулы (1) следует, что прочность покрытия зависит от режимов нанесения аналогично плотности (рис. 7).

При нанесении однородных компонентов (Fe, Ni, Cu и т. д.) относительная твердость покрытия $НВ_{отн} = НВ_1/НВ_0$ (где $НВ_1$, $НВ_0$ — твердость слоя и компактной части исходного компонента соответственно) пропорциональна плотности. Следовательно, $НВ_{отн}$ зависит от режимов спекания также, как и плотность (рис. 7). Характер изменения твердости покрытия при взаимодействии его материала со средой и основанием определяется их химической принадлежностью и степенью (полнотой) протекания процессов взаимодействия.

Так, при припекании ПЖІС+ЗОРЖМ в среде $V_4C+60\%$ буры ($T_{сп}=1050^{\circ}C$) микротвердость покрытия достигла 12800 МПа.

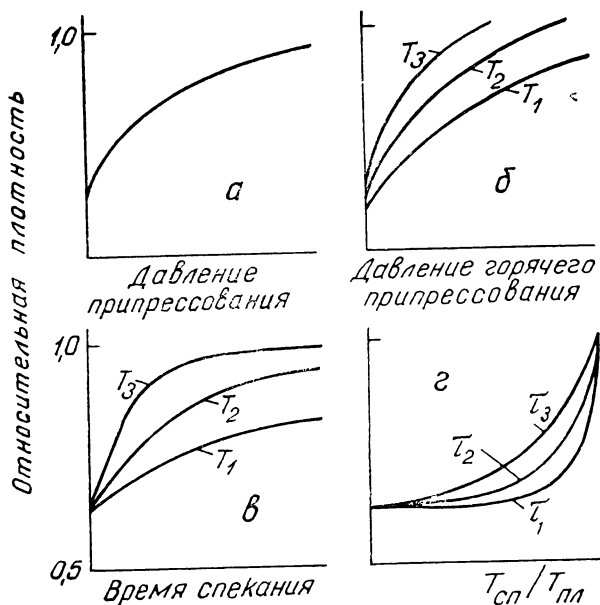


Рис. 7. Зависимость плотности покрытия от режимов нанесения:

а—давления припрессования сырого слоя, *б*—давления горячего припрессования, *в*—время спекания, *г*—относительной температуры спекания; $T_1 < T_2 < T_3$, $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$.

Твердость покрытия, полученного припеканием составной шихты, зависит от взаимодействия составляющих шихты в процессе

Таблица 6

Зависимость химического состава и твердости покрытия из ПЖІС+ЗОРЖМ+0,9С от температуры припекания

	Температура спекания, °С				
	800	900	1000	1100	1200
Свободный углерод, %	0,88	0,70	0,27	0,08	0,04
Связанный углерод, %	0,0	0,19	0,60	0,80	0,83
Твердость НВ	48	62	114	130	154

Примечание. Давление припрессования 540 МПа, $\tau_{сп}=60$ мин, среда N_2 +коррекс ($Al_2O_3+1,5 C$).

спекания. В табл. 6 показано изменение химического состава и твердости от температуры припекания, откуда видно, что твердость

возрастает с увеличением связанного углерода, т. е. степени химического взаимодействия железа с углеродом. Если образец, спеченный при 1200°C, проковать, то получим твердость покрытия более 50 HRC.

Из рис. 8, где представлена зависимость твердости покрытия ПЖ1С+10ПЖС14+ВКЗ от содержания ВКЗ, видно, что увеличение содержания твердосплавной смеси приводит к повышению твер-

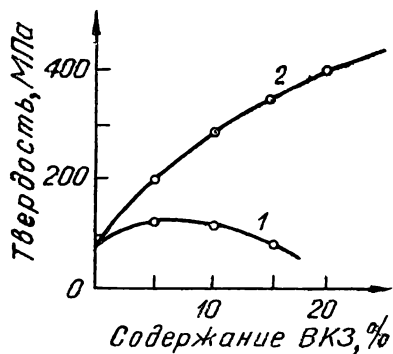


Рис. 8. Зависимость твердости покрытия ПЖ1С+10ПЖС14+ВКЗ от содержания ВКЗ:

1— $T_{\text{сп}} = 1150^\circ \text{C}$, 2— $T_{\text{сп}} = 1250^\circ \text{C}$.

дости твердости покрытия при условии протекания между исходными компонентами химического взаимодействия. Твердость композиционных покрытий определяется твердостью составляющих шихты. Так, при нанесении гранулических покрытий ГВК6+1ПН+16ПМ микротвердость гранул равна 14000—15000 МПа, а связи — 520 МПа (рис. 9 а).

Высокая твердость покрытий при использовании значительного количества карбидов, боридов, силицидов и окислов может быть достигнута при жидкофазном спекании и при горячем припрессовании. В первом случае температура спекания выбирается из условия хорошей смачиваемости, а во втором—из условия достижения необходимой текучести исходного материала. На рис. 9 б показана микроструктура ВК15+12ПЖЗМ+3СНГН—Н1—1320—60—Н₂, твердость покрытия 76—78 HRC. Твердость покрытий, наносимых из пластин и оболочек, определяется твердостью последних и достигает 90 и более HRA (рис. 9 в). Основным фактор, определяющий возможность практического применения наносимых покрытий, это прочность их связи с основанием.

Сырые порошковые слои, нанесенные напылением, напрессовкой и экструзионным способом, контактируют с основанием через контакты с химической связью (0,3—8,0% площади), окислы и другие неметаллические соединения (40—85%), пластификатор и пустоты (5—50%). Контактное взаимодействие с основанием порошкового слоя, нанесенного шликерным способом, происходит главным образом через окислы и те химические соединения, которые осаждаются на контакты при удалении влаги и пластификатора (рис. 9 г).

Прочность сцепления, гарантирующая надежность и долговечность металлизированной детали при работе под нагрузкой, может быть обеспечена относительно высокой площадью контакта с химической связью типа металлической, ковалентной или ионной. Вследствие этого теория припекания рассматривает механизм и закономерности роста контактной площади с химической связью. Основ-

ными механизмами роста контактной площади между частицами и основанием являются вязкое течение, объемная и поверхностная диффузии, перенос вещества через газовую фазу и сдвиговая деформация (под действием внешних сил).

Исследования показали, что прочность сцепления покрытия с основанием увеличивается с $T_{сп}$, $\tau_{сп}$, $P_{сп}$ и количеством жидкости

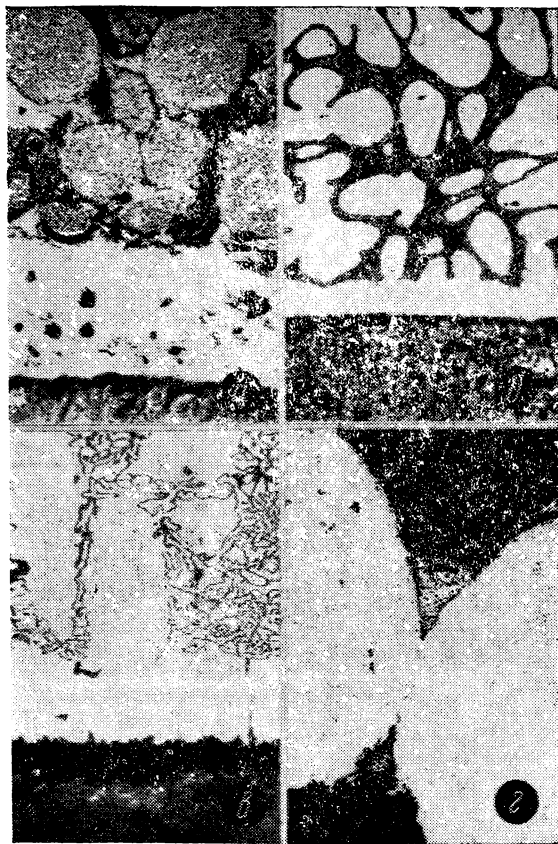


Рис. 9. Микроструктуры покрытий:

a—ГВК6+16ПМ+1ПН; *б*—ВК15 ПЖМ+ЭСНГН; *в*—Т1С+ТiВ₂;
г—контактирование порошинок при шликерном способе нанесения
сырого слоя.

(рис. 10). Оптимальные режимы обеспечивают связь слоя с основанием прочностью 80—600 МПа и выше. Особенно высокую прочность связи с основанием имеют покрытия, нанесенные т.м.с.

Антифрикционные и износостойкие свойства. Основной причиной выхода из строя многих деталей машин и механизмов является износ при трении. Следовательно, износостойкость покрытий — одно

из важных свойств, определяющих надежность и долговечность многих изделий.

Характеристики трения и износостойкости металлизированных покрытий зависят от исходных материалов и технологии их нанесения. В то же время технология нанесения в определенной степени зависит от применяемого материала. Вследствие этого вопросы трения и износа металлизированных покрытий будут рассмотрены с уче-

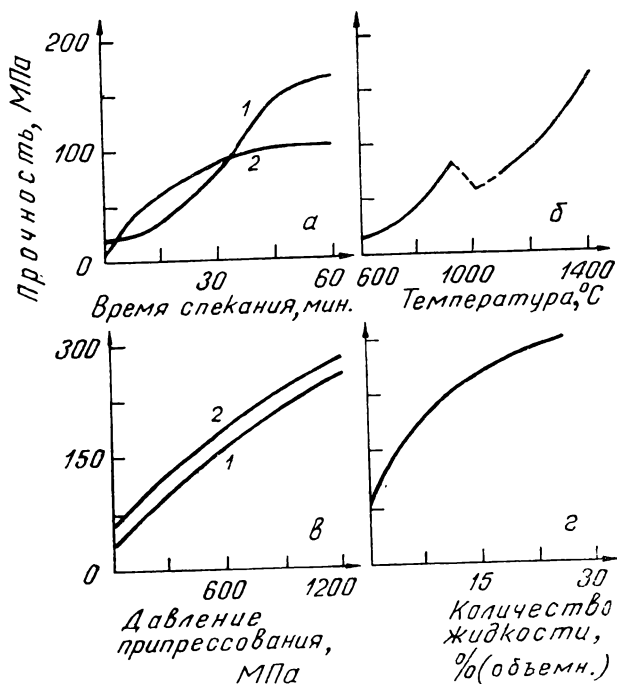


Рис. 10. Зависимость прочности связи покрытия с основанием:

а — от времени спекания (1 — СВО8 — М1 — 1200 — Н₂; 2 — ПЖ1С + 10ПЖМ — Н1 — 1200 — Н₂); *б* — от температуры спекания: ПЖ1С + 10ПЖМ — Н1 — (Т) — 60 — Н₂; *в* — от давления горячего припрессования (1 — ПЖ1С + 10ПЖМ — Н6 — 800 — 5 — Н₂, 2 — ПЖ1С + 10ПЖМ — Н6 — 900 — 5 — Н₂); *z* — от количества жидкости ПЖ1С + 10ПЖМ — Н1П (Л68) — 1080 — Н₂ (5% Л68 вводилось в шихту).

том используемых материалов. Характеристики жидкостного трения (f — коэффициент трения, $\epsilon_{ж}$ — относительная износостойкость) устанавливались на машине МИ-1М, а сухого (абразивного) — на ХБ-4.

Свинец, олово или сплавы на их основе (ПОС) применяются главным образом для нанесения напылением слоев при восстановлении вкладышей и приработке тяжелонагруженных подшипников. Покрытия из легкоплавких металлов (Pb, Sn), нанесенные по технологии МЗ, обладают коэффициентом трения и износостойкостью,

близкими к соответствующим показателям литых исходных материалов. Покрытия на основе Al (сплавов), наносимые по технологии МЗ—540—90—Н₂, рекомендуются взамен баббитов и бронз в паре с закаленной сталью при отсутствии одновременного действия ударов и больших радикальных и осевых зазоров. Особенно хорошие результаты получаются при использовании алюминиевых покрытий в обратной паре, т.е. когда покрытие из Al наносится на вал, а подшипник изготавливается из стали.

Бронзовые покрытия наносятся по технологии НЗ, ШЗ, МЗ. Исходным материалом служит бронзовая (предварительно измель-

Т а б л и ц а 7

**Физико-механические свойства и коэффициент трения
металлированных бронзовых покрытий**

Покрытие	Пористость, %	Свойства		$\sigma_{св}$, МПа	Предельная нагрузка, МПа		Коэффициент трения
		$\sigma_{в1}$, МПа	твёрдость НВ		$v=1м/с$	$v=4м/с$	
СБрОСЦ+ЗПСИ-ШЗ-820-15-Н ₂ подпрессовка	1—2	96	48—57	62	1850	2100	0,022
СБрОСЦ—НП (ПОС)-820-15-Н ₂	2—3	55	26—28	48	2000	2100	0,020

ченная до 0,5—1,2 мм) стружка или стружка с добавками порошка Pb и Sn в количестве 3—6%. В табл. 7 приведены свойства металлизированных бронзовых покрытий.

Покрытия на основе железа наносятся всеми способами металлизирования как при производстве новых, так и при восстановлении изношенных деталей. В табл. 8 приведены данные о механических свойствах, коэффициенте трения и относительной износостойкости металлизированных покрытий на основе железа. В результате можно сделать следующие выводы:

1) твердость в большинстве случаев является критерием износостойкости;

2) высокая пористость (20—25%) резко снижает износостойкость покрытия как при жидкостном, так и при сухом трении;

3) пористость в пределах 10—13% повышает износостойкость покрытия при жидкостном трении, если оно достаточно прочное. Это происходит за счет снижения коэффициента трения — пористая поверхность лучше смачивается;

4) при сухом (абразивном) трении пористость снижает износостойкость — пропорционально ее величине;

5) при одинаковой макротвердости многофазность для жидкостного трения является положительным фактором, т.е. повышает

износостойкость, при абразивном — фактором, снижающим износостойкость.

К износостойким относятся покрытия из сплава на основе никеля, содержащего бор, хром, марганец и кремний — СНГН. Согласно литературным данным [6, 31], износостойкие покрытия на основе никеля наносятся термическим напылением с последующим оплавлением на воздухе. Однако исследования автора показали, что по-

Т а б л и ц а 8

Свойства металлизированных покрытий на основе железа и никеля

Покрытие	Свойства покрытия			Характеристика трения		
	пористость, %	прочность, МПа	твердость	жидкостного		сухого °с
				<i>f</i>	$\epsilon_{ж}$	
Сталь 45 закаленная (эталон)	0	600	57 HRC	0,01	1	1
ПЖИС-Н1-1200-30-Н ₂	23	28	42—52 HB	0,012	0,31	0,1
ПЖИС-Н3-920-240-СО (спекание с цементацией)	4—6		48—52 HRC		1,2	0,8
ПЖИС+16ВК, 0, 8С-Н7-1250—60—Н ₂ (закалка)	0,5		63 HRC		2,8	2,1
ПР18-Ш6-1220-10-Н ₂	1,5		60 HRC			2,6
ПЖИС+30ПВ, 30ПК, Н2 (ЭЛ)-1480-Вк (электронно-лучевой нагрев)	0	720	65 HRC 52 HRC			3,1 2,4
СНГН-Ф2 (ТВЧ)-Н ₂			58—62 HRC			3,6
СНГН-20МНТ-Н6-1200-10—Вк			36 HB 0,005			
ППМС25-М1						
ПП 20ВК+2ПМ-МП (ВПр4)-1150-10—Н ₂	2—3		—	0,01	2,7	1,0

крытия из СНГН приобретают высокие свойства лишь при термической обработке (спекании) их в условиях, при которых хром, марганец и кремний не окисляются (табл. 8).

К композиционным относятся покрытия: порошковые с упрочненными частицами, псевдосплавные, стружко-порошковые, гранулические, провололочные, многослойные, сотовые и т. д. (табл. 9).

Фрикционные покрытия. Фрикционные материалы по своей природе имеют обычно низкие прочностные свойства ($\sigma_{\text{в}}$), поэтому наиболее рационально их наносить тонким слоем на сталь. В табл. 10 приведены технология нанесения и свойства фрикционных покрытий, нанесенных металлизированием. Эксплуатационные испытания показали, что покрытия на основе твердосплавных гранул обладают высокими фрикционными свойствами.

Электроконтактные покрытия. Материал контактов должен обладать высокой дугостойкостью, износоустойчивостью, механической прочностью, тепло- и электропроводностью. Эти требования в наибольшей степени могут быть удовлетворены композиционными материалами на основе меди, серебра и вольфрама (табл. 11).

Термостойкие покрытия обеспечивают защиту покрываемого металла от окисления при высоких температурах в течение требуемого

Т а б л и ц а 9

Свойства твердосплавных металлизированных покрытий

Покрытие	Свойства			Относительная стойкость	
	пористость, %	прочность, МПа	твердость	жидкостное трение	абразивный износ
Сталь (эталон)	0	600	57 HRC	1	1
СЧ+50ПЖИС-Н1-1180-60-Н ₂	10	94	362 НВ	0,9	0,55
СЧ+35ПЖ+5ВК6-Н2-1320-Н ₂ (нагрев ТВЧ)	2	280	54HRC	1,6	1,2
СР18+10ПЖ+1ПМ+1Мо-Н8-1200-30-Н ₂	1,5		512 НВ	2,1	2,7
ГВКЗ+10БрОС-ШЗ-1080-15-Н ₂ (ГВКЗ пористые 8%)	12—14		—	8,5*	—
ГТ30К6+15СНГН-Ш7-1260-15-Н ₂ (гранулы компактные)	1		—		18—20
ВК15+5ПЖ+2ПН+1ПМ-Н1-1320-30-Н ₂	0,5		76—78HRC	—	18—24
ОВК15—П6-1050-5-Н ₂	0		87 HRA	—	46—50*
О МНТ—П6-1050-5-Н ₂	0		91 HRA	—	50—60

* Эксплуатационные испытания.

времени, выдерживают тепловые удары и некоторую пластическую деформацию без ухудшения защитных свойств. В качестве исходных материалов для нанесения термостойких покрытий принимают металлы с малым сродством к кислороду Au, Pt, сплавы NiCr, MoSi₂, СНГН, Со—Al₂O₃ и т. п., и металлизированные (покрыты тонким металлическим слоем), окислы Al₂O₃, BeO, Zr—Hf—Re—O и т. д.

Жаропрочные покрытия повышают прочность конструкции при высоких температурах. Эти покрытия наносят обычно на изделия, изготавливаемые из жаро-, кислотостойких и других материалов, но с низкими технологическими или отдельными прочностными свойствами — керамику, графит и т. д. Исходным материалом служат жаропрочные сплавы и композиционные материалы, армированные волокном. Материал покрытия должен подбираться таким образом, чтобы его тепловой коэффициент линейного расширения был равен

или близок к соответствующему коэффициенту материала основания. Например, трубочка из Al_2O_3 с композиционным покрытием из

Т а б л и ц а 10

Свойства фрикционных покрытий

Покрытия	Механические свойства			Фрикционные свойства (коэффициент трения)*
	плотность, $кг/м^3 \cdot 10^3$	твёрдость НВ	прочность, МПа	
ПЖ1+20ПМФ7+7 Al_2O_3 -Н7-1100	7,3	210	60—80	0,3
ПН+3ОПК+12 Al_2O_3 -Ш6-1350-15- H_2	7,3	160		0,28
ГМНТ+20ВПр 13+ MoS_2 -ШЗ-1160-15- H_2	6,0	140—2000**	160	0,33

* Материалы контрола ЧМНХ.

** Микротвёрдость.

нимоника, армированным вольфрамом, может работать под давлением при температуре более $1000^\circ C$.

Теплопроводные покрытия наносятся для придания поверхности изделия повышенной теплопроводности. В большинстве случаев

Т а б л и ц а 11

Свойства электроконтактных покрытий

Покрытия	Плотность, $кг/м^3 \cdot 10^3$	Твёрдость НВ	Электросопротивление, Ом·м	Предел прочности, $Мн/м^2$	Удлинение, %
СМ502-Н1П-1000-15- H_2	9,7	85	0,0170	—	—
СМ703-Н1П-1000-10- H_2	9,3	105	0,0175	—	—
СВ502-П6-980-5- H_2	13,0	160	0,041	3,50	3,0
СВ703-П6-980-10- H_2	15,0	230	0,045	450	1,0
МВ502-П6-1000-5- H_2	12,0	150	0,08	430	9,5
МВ703-П6-1000-10- H_2	14,0	185	0,09	565	9,0
ОВН-П6-1000-10- H_2	17,0	315	0,158	—	—
ВК15+20ПМ-Н1П-1200-10- H_2	13,3	100—1200HV	0,292	—	—

они повышают отвод тепла из активной зоны нагрева. В качестве исходного материала для нанесения теплопроводных покрытий применяют материалы с высокой теплопроводностью и достаточной жаростойкостью в условиях работы изделия Ag, Cu, Ni. Так, покрытия их ВПр-1 на гранулах повышают теплоотвод из зоны трения композиционного материала из твердосплавных гранул (МНТ).

2.3. Несущая способность металлизированных деталей

Работоспособность металлизированных деталей определяется допустимой величиной износа или ее несущей способностью. Проанализируем несущую способность детали с покрытием.

Изделия с покрытием, как композитная конструкция (биметалл), имеет свои предельные состояния механической прочности $\sigma_{вк}$, $\sigma_{тк}$, E_k , μ_k и т. д., которые отличаются от предельных состояний материала основания и покрытия (рис. 11 а).

На рис. 11 б представлены кривые деформирования исходных материалов и композитного листа, где можно выделить четыре участка, характерных для деформирования системы основание — покрытие. На первом участке материалы основания и покрытия деформируются упруго. Модули композитного листа могут быть выражены на основании теории упругости многослойных материалов или волокнистого композита [27] через модули исходных компонентов.

На рис. 11 в приведены экспериментальные кривые деформирования композитного листа: основание — медь, покрытие — легированная сталь с $\sigma_{т1} = 420$ МПа. Для данной пары металлов можно с точностью до 1—3% записать

$$E_k = (E_1 h_1 + E_0 h_0) / h_k, \quad (2)$$

$$\sigma_{тк}^I = (\sigma_{т1}^I h_1 + \sigma_{т0} h_0) / h_k, \quad (3)$$

где $\sigma_{тк}^I$ — предел текучести композитного листа на первом участке;

$\sigma_{т1}^I$ — напряжение, соответствующее пересечению кривой деформации материала покрытия (2) с линией, разделяющей участки I и II (рис. 11 б).

Закономерности (2), (3) можно использовать для других пар материалов.

На втором участке материал основания деформируется пластически, а покрытия — упруго. Для определения условного предела текучести композитного листа $\sigma_{тк}^{II}$ используется уравнение «смеси».

$$\sigma_{тк}^{II} = (\sigma_{т1} h_1 + \sigma_{т0} h_0) / h_k. \quad (4)$$

Если оба компонента композитного листа деформируются пластически (участок III), разрушение его определяется условиями устойчивости. На участке IV покрытие разрушается. Последует ли за разрушением покрытия немедленное разрушение композитного листа, зависит от предельных деформаций исходных компонентов, толщины покрытия, прочности связи покрытия с основанием и чувствительности материала основания к концентраторам напряжения. Если предельные деформации равны или отличаются незначительно, то предел прочности листа $\sigma_{вк}$ равен

$$\sigma_{вк} = (\sigma_{в1} h_1 + \sigma_{в0} h_0) / h_k. \quad (5)$$

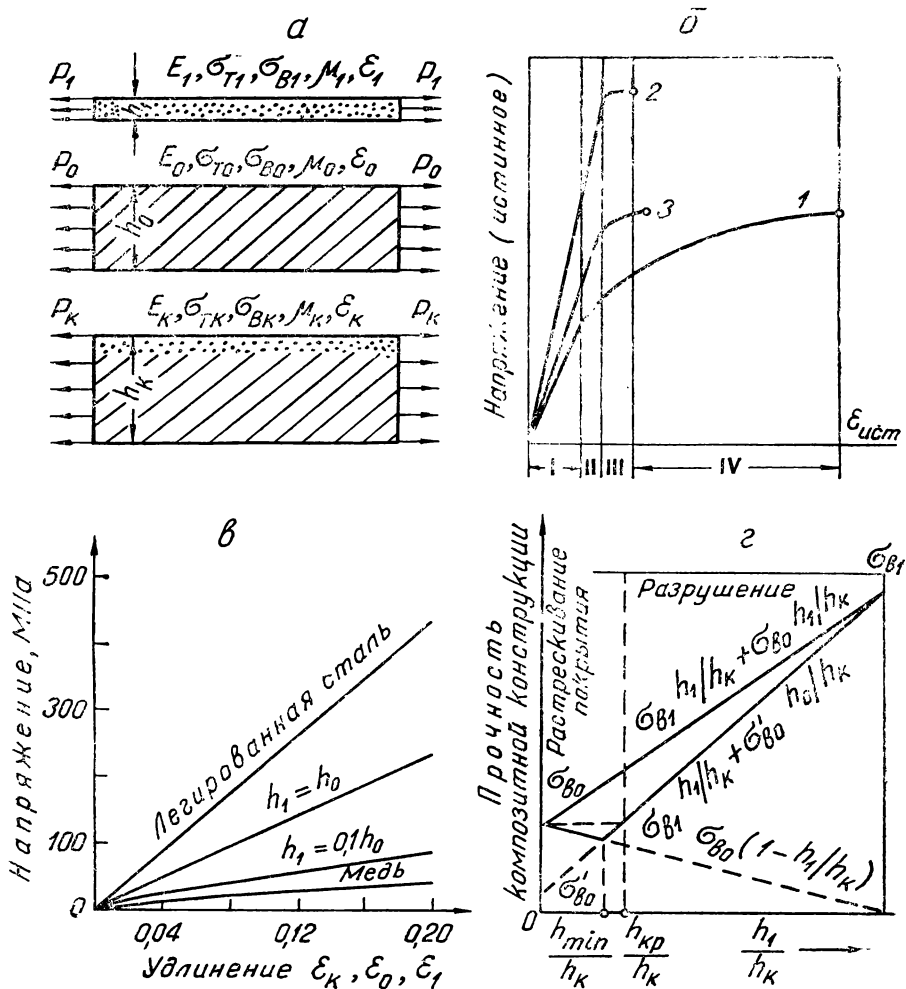


Рис. 11. Деформационные кривые:

a—модель композитного листа, *б*—деформационные кривые: 1—материала основания, 2—материала покрытия, 3—композитного листа; *в*—экспериментальные кривые деформирования композитного листа: основание—медь, покрытие—легированная сталь; *г*—зависимость прочности композитного листа от соотношения h_1/h_K .

Если же предельная деформация покрытия намного меньше предельной деформации основания и $\sigma_{в1} h_1 \gg \sigma_{в0} h_0$, то

$$\sigma_{вк} = \left[\sigma_{в1} h_1 + \sigma'_{в1} (h_K - h_1) \right] / h_K, \quad (6)$$

где $\sigma'_{в0}$ — напряжение в основании при достижении предельной деформации покрытия.

Когда σ_K становится больше $\sigma_{вк}$, происходит разрушение слоя, а с

ним и всего композитного листа. Одновременное разрушение композитного листа с разрушением покрытия имеет место, когда основание изготовлено из графита, пластмассы и других материалов. Аналогичная картина наблюдается также, когда толщина основания, изготовленного из малопрочных металлов Zn, Al, Cu соизмерима с толщиной покрытия. Формула (6) справедлива лишь при

$$\sigma_{вк} \geq \sigma_{во} (1 - h_1 / h_k) \quad (7)$$

и применима только при $h > h_{min}$, где h_{min} определяется выражением

$$h_{min} = \frac{\sigma_{во} - \sigma'_{во}}{\sigma_{в1} + (\sigma_{во} - \sigma'_{во})} h_k = \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_{в1} - \sigma_{\omega}} h_k, \quad (8)$$

$\sigma_{\omega} = \sigma_{во} - \sigma'_{во}$ — полное приращение номинального напряжения, которое может быть получено при пластическом деформировании основания. При $h_1 < h_{min}$ прочность композитной конструкции дается выражением

$$\sigma_{вк} = \sigma_{во} (1 - h_1 / h_k). \quad (9)$$

Из расчетной зависимости прочности композитного листа от отношения h_1/h_k (рис. 11 з) следует, что если $\epsilon_0 \approx \epsilon_1$ и $\sigma_{в1} > \sigma_{во}$, то упрочнение композитного листа по отношению к материалу основания пропорционально h_1 (см. формулу 5); при $\epsilon_0 \gg \epsilon_1$ и $\sigma_{в1} > \sigma_{во}$ прочность конструкции $\sigma_{вк}$ с увеличением h_1 вначале снижается (см. формулу (6), но по достижению $h_1 = h_{min}$ начинает повышаться: первоначальное значение $\sigma_{вк} = \sigma_{во}$ достигает при $h_{кр}$:

$$h_{кр} = \frac{\sigma_{во} - \sigma'_{во}}{\sigma_{в1} - \sigma_{во}} h_k = \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_{в1}} h_k. \quad (10)$$

Таким образом, упрочнение композитного листа должно производиться покрытием с $\sigma_{в1} > \sigma_{во}$ и $\epsilon_1 \approx \epsilon_0$ или $\sigma_{в1} > \sigma_0$, $\epsilon_1 < \epsilon_0$, но с $h_1 < h_{min}$. Если материал основания пластичен и слабо реагирует на концентраторы напряжения, то в области с $h_1 < h_{min}$ композитная конструкция может удлиняться до деформации, намного превышающей предельную деформацию покрытия, т.е. $\epsilon_1 \ll \epsilon_k < \epsilon_0$. В этом случае покрытие разрывается на отдельные секции, которые удерживаются на основании за счет связи $\sigma_{св}$. Если эта связь недостаточная, покрытия отслаиваются без нарушения основания.

На характер деформации и разрушения композитного листа влияют остаточные напряжения. Исследования автора и анализ литературных данных [16, 27] показали, что если знак внешней нагрузки совпадает со знаком остаточных напряжений в покрытии, то композитный лист имеет меньшую деформационную способность и разрушается при меньших нагрузках, чем без остаточных напряжений. И наоборот, если знак внешней нагрузки противоположен знаку остаточных напряжений в покрытии, то композитный лист

имеет большую деформационную способность и разрушается при нагрузках значительно больших, чем при отсутствии остаточных напряжений.

Покрываютия, нанесенные на основание, изменяют сопротивляемость композитного изделия (листа, цилиндра и т. д.) на изгиб и кручение. Как известно, напряжения от приложенного изгибающего или крутящего момента распределяются по сечению изделий неравномерно: в центре изделия напряжения равны нулю, а максимального значения они достигают в поверхностных слоях. Вследствие этого покрытие с прочностью большей, чем у основания, повышает изгибную прочность, прочность при кручении и контактную прочность изделия. Однако это положение имеет место при условии, когда деформационная способность слоя изделия больше или равна деформационной способности материала основания.

К сожалению, износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия, наносимые из легированных сталей, карбидов, окислов и т. п., обладают малыми пластическими свойствами. Это приводит к снижению несущей способности композитной конструкции по сравнению с несущей способностью, соответствующей детали без покрытия. Остаточные напряжения одного знака с напряжениями, возникаемыми от действия внешних сил, снижают прочность композитной конструкции на изгиб и кручение, а противоположного — повышают.

В заключение следует отметить, что металлизирование дает возможность наносить покрытие, с одной стороны, с минимальными или требуемыми остаточными напряжениями, с другой — с хорошими пластическими свойствами (композитные). Эти факторы определяют высокую работоспособность металлизированных изделий.

2.4. Классификация деталей и рекомендации по выбору способа металлизирования

Металлизирование применяется для нанесения износостойких, коррозионностойких, фрикционных, жаростойких и других покрытий на металлы, керамику и графит. Выбор материала и оптимальной технологии* нанесения должен исходить из формы и размеров покрываемой поверхности, материала, основания, эксплуатационных условий и вида производства изделий.

Различают элементарные, усложненные, составные и сложные формы покрываемой поверхности (рис. 12). К элементарным относятся плоские (а), цилиндрические (б), конические (в) и шаровидные (г) поверхности. Элементарные поверхности также подразделяются на наружные (1) и внутренние (2). К усложненным относятся поверхности, имеющие незначительное отклонение от элемен-

* Технология с минимальными режимами нанесения сырого слоя и его спекания ($P_n \cdot T_{сп}, \tau T_{сп}, P_{сп}$ и т. д.), которые обеспечивают получение композитной детали с требуемыми надежностью и долговечностью.

тарной поверхности (3 в, г) или с разрывами в элементарной поверхности (3 а, б). Составные поверхности состоят из двух или более элементарных поверхностей (4 а, б). К поверхностям сложной формы относят гиперболические, параболические и т. д. (4 в), а также те, которые не описываются какой-либо закономерностью (4 г).

По размерам покрываемые поверхности подразделяют на малые — $a, b < 0,02$, средние — $0,02 < a, b < 0,3$, большие — $0,3 < a, b < 1,0$

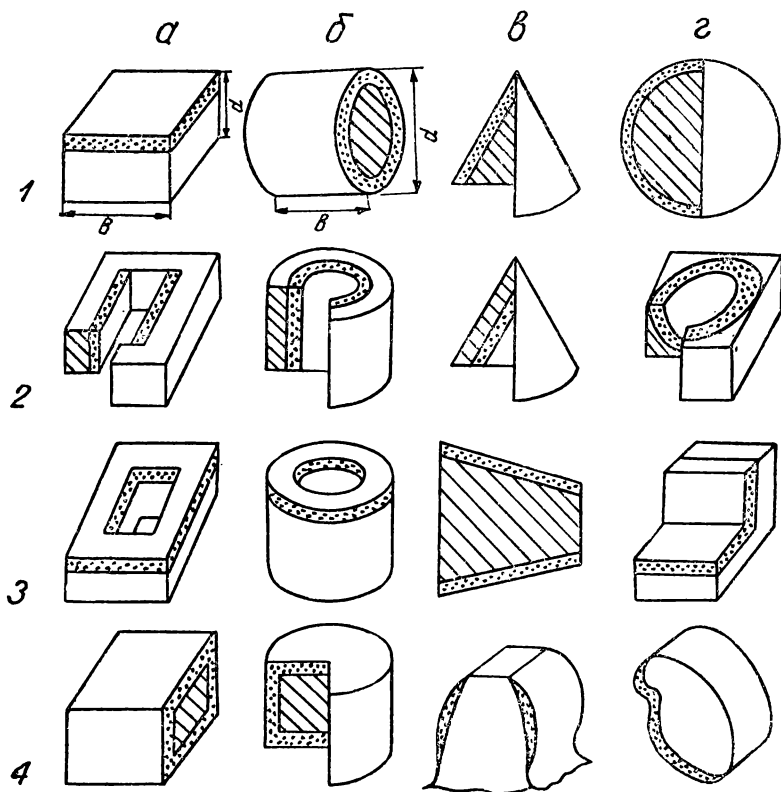


Рис. 12. Классификация форм покрываемой поверхности:

1—наружные элементарные формы: а—плоская, б—цилиндрическая, в—коническая, г—шаровидная; 2—внутренние элементарные формы: а—плоская, б—цилиндрическая, в—коническая, г—шаровидная; 3—усложненные: а—плоская, б—торцевая, в—усеченного конуса, г—плоскопересекающая; 4—сложные формы: а—плоскосоственная, б—плоскоцилиндрическая, в—эвольвентная, г—параболоидная.

и очень большие — $a, b > 1,0$ м. Если один из размеров выходит за пределы указанных грани, то градацию определяют по наибольшему размеру. Выбирая вид и режимы нанесения, а также оборудование, учитывают относительный коэффициент покрываемой поверхности: $S_{10} = S_1/S_0$, где S_1 — площадь покрытия; S_0 — площадь поверхности изделия, м².

Основные параметры внешнего воздействия, влияющие на работоспособность покрытия: величина и характер действующих сил, температура и химический состав окружающей среды. Контртело покрытия может быть твердым, жидким, газообразным или состоять из их смеси. Твердое тело бывает цельным или составным; в последнем случае оно характеризуется степенью закрепленности, формой и размерами частиц.

Нагрузка, действующая непосредственно на покрытие (при трении) подразделяется на малую — $P < 2$, среднюю — $2 < P < 20$ и высокую $P > 20$ МПа. По характеру действия различают постояннодействующие, переменные (циклические) и ударные нагрузки. По термическим условиям внешняя среда подразделяется на низкотемпературную < 0 , комнатную 20 , с повышенной температурой $100—500$ и высокотемпературную $> 500^{\circ}\text{C}$. Среда, в которой работают изделия с покрытием, может быть самой разнообразной; вакуум, воздух или другие газы, вода, масла, кислоты, щелочи или другие жидкости. В ряде случаев сама среда является телом, через которое осуществляется механическое воздействие на покрытие — пульпа, вода и т. д.

Выбор технологии металлизации зависит также от вида и характера производства. Последнее подразделяется, во-первых, на производство новых деталей и ремонтное производство, во-вторых, по серийности — на массовое крупносерийное, серийное, мелкосерийное и единичное.

Материалы и технологию металлизации можно выбирать также по виду трения и определяющего износа: граничное трение (схватывание 1-го рода), сухое трение (плоскостей), абразивный износ без ударов, ударноабразивный износ, гидроабразивный износ, окислительный износ в агрессивной среде, высокотемпературное окисление, эрозионный, эрозионно-тепловой износ, кавитационный износ и т. д.

Таким образом, систематизация деталей относительно выбора технологии нанесения покрытий с учетом их размера, материала, условий работы, характера производства и других факторов требует разработки специальной классификации.

Первая группа — это детали, рабочая поверхность которых имеет малые размеры ($a, b < 20$ мм) — пуансоны, толкатели, электродконтакты, электроды контактных машин, измерительный и специальный инструмент, клапаны малых размеров и другие детали машин и механизмов. Покрытия наносятся по технологии П6 или П8. Оболочка (пластинка) толщиной $0,3—3,0$ мм выбирается из материала с максимальной или достаточной стойкостью в условиях работы изделия.

При сухом трении, абразивном износе без ударов и гидрообразном износе лучше использовать высоколегированные чугуны, спеченные твердые сплавы (ТЗОК6, МНТ и т. п.), бориды и другие сверхтвердые материалы. При ударноабразивном износе лучше работают высоколегированные стали (У14Х17Н2 и т. п.), спеченные

твердые сплавы с высоким содержанием кобальта (ВК25—ВК35), композиционные, армированные молибденом сплавы типа ТЗОК4 и т. д. При нанесении покрытия на электроконтакты необходимо использовать пластинки из псевдосплавов Ag—Cu, W—Ag, W—Cu и благородных металлов Ag, Pt. Во всех вышеотмеченных случаях оболочки должны быть компактными или иметь малую пористость. Чтобы прочность связи покрытия с основанием была выше, на пластинки наносят интенсифицирующие слои из Ag, Cu и т. д.

Вторая группа — детали средних и больших размеров — подразделяется на подгруппы, в которые объединены детали со свойствами им конфигурацией и условиями работы. Первая подгруппа объединяет детали с плоской поверхностью, работающей на трение. Это направляющие, вкладыши, скользящие, пресс-формы, лемеха, ножи и т. д. При жидкостном трении используют многокомпактную шихту на основе порошка железа или стружки легированных сплавов. К ним добавляют порошки ферросплавов FeW, FeMo, FeCr и т. д., карбиды TiC, WC, бориды TiB и другие твердые компоненты.

Для повышения прочностных и технологических свойств покрытия (смачиваемости) в шихту вводят порошки или стружку бронзы (БрФ7, БрОСЦ), легкоплавкие сплавы на основе цинка или свинца. Для высокоизносостойких покрытий используют твердосплавные пористые гранулы из ТК, ТН (ТЗОК4, МНТ-2А) с добавками порошков бронзы и элементов твердой смазки MoS₂ или оболочки из мелких (3—8 мм) твердосплавных пластинок с бронзовой связкой.

Нанесение сырого слоя и его спекания можно производить всеми описанными способами. Однако, если $\alpha_1 \approx \alpha_0$ и шихта содержит легкоплавкую компоненту, хорошо смачивающую основной материал, то лучше применить технологию Н1 или П1 (в последнем случае оболочка сырая). Если $\alpha_1 \gg \alpha_0$, то используется технология ШЗ. При этом уплотнение в холодном состоянии производят прессовкой, прокаткой или ударной нагрузкой. Высокопроизводительной является также технология Н (Н1), П, особенно если исходным материалом служат гранулы. Сотовые оболочки припекают по технологии П5 и П8 (например, направляющие кулачки кривошипного механизма). На рабочую поверхность наносят покрытия СЧ+25ПЖ+5 FeW+7 БрОС-ШЗ-1180-20-Н₂.

От покрытия при сухом трении, абразивном, гидро(ударно) абразивном износе требуются высокие механические свойства (твердость, прочность и т. д.). Такие свойства при металлизации достигаются, во-первых, использованием шихт из высоколегированных сплавов (ПР18+5ПЖ+25 TiC; СНГН+30ПЖ+20 ВК8 и т. д.), гранул из высоколегированных сталей (чугунов) и твердосплавных смесей (ТЗОК4, МНТ-2А), оболочек из твердых и сверхтвердых материалов, во-вторых, за счет применения режимов спекания, при которых получается максимальная плотность — спекание с присутствием жидкой фазы, термомеханическое спекание.

Термическое спекание сочетается с напрессовкой и формовочным способом нанесения сырого слоя. Нагрев предпочтителен поверхностный. Термомеханическое спекание сочетается со всеми способами нанесения сырого слоя, наиболее приемлемыми при массовом производстве П, И, Ф, Ш) 6, 7, 8 (см. схему 3). Горячее припрессование применяется в виде прокатки или накатки, например, изготовление направляющих баков ковочных машин, поверхность которых работает в условиях сухого трения при 300—400°С. мате-

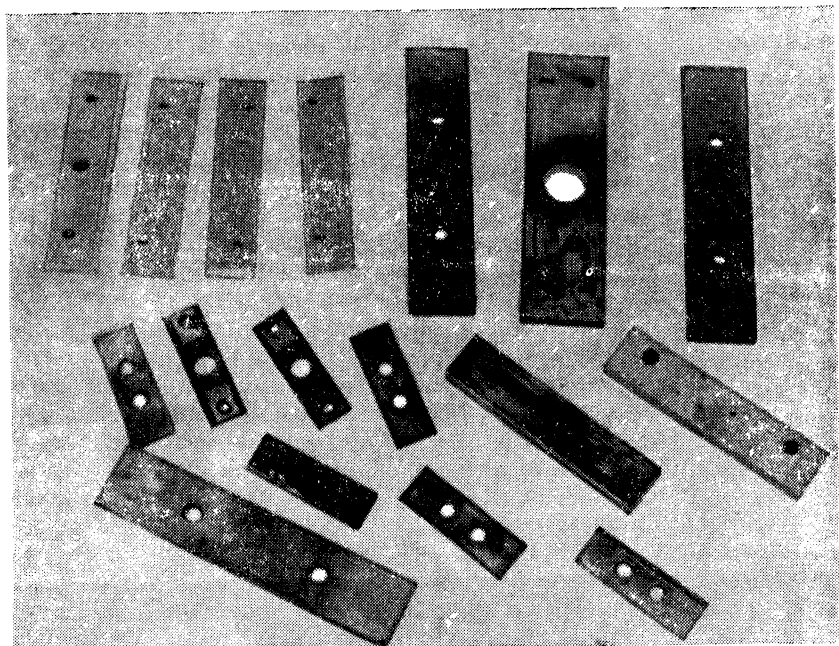


Рис. 13. Направляющие баков ковочных машин с износостойкими покрытиями.

риал основания — сталь 45. На рабочую поверхность наносится покрытие ПЖ+30ВК10-Н6-1250-Н₂ (прокатка через валки в нагретом состоянии) (рис. 13).

Ко второй подгруппе относятся также детали, рабочая поверхность которых представляет собой плоское кольцо — клапаны, седла, пятники и т. д. В большинстве случаев условия их работы — сухое трение и гидро- или просто абразивный износ. Наиболее приемлемой технологией нанесения покрытий на детали такого типа является П4 или П6. При нанесении покрытий по технологии П4 оболочка изготавливается из компактного материала или спеканием из порошков. При П6 возможно использовать как сырые, так и спеченные оболочки. Лучше использовать поверхностный нагрев (Т.В.Ч. или

блоками) в сочетании с холодильниками для обеспечения переменного поля температур. Например, седло и клапан задвижки химической аппаратуры. Условия работы — гидроабразивный износ — перекачка щелочной пульпы с WO_3 , давление 20 ати, температура — 150—200°C. На рабочую поверхность наносится слой ОВК20-П6-1200-5- H_2 .

В третью подгруппу входят детали с плоской рабочей поверхностью, работающей в условиях окислительного износа в агрессивной среде и высокотемпературного окисления — лодочки, лопатки и т. д. Основные способы нанесения сырого слоя — напыление, шликерный способ и осаждение. Спекание производится с общим нагревом или под давлением. Главный момент разработки технологии нанесения покрытий — выбор материала. Исходным материалом служат благородные металлы Ag, Au, Pt, металлы с малым сродством к кислороду — Ni, Co и сплавы на их основе — NiCr, металлизированные окислы Al_2O_3 , Cr_2O_3 , карбиды TiC, силициды $MoSi_2$ и другие материалы. Например, лодочка из Ni для восстановления вольфрама из WO_3 (рис. 14), рабочая температура 1250°C, среда H_2 , H_2O , CO.

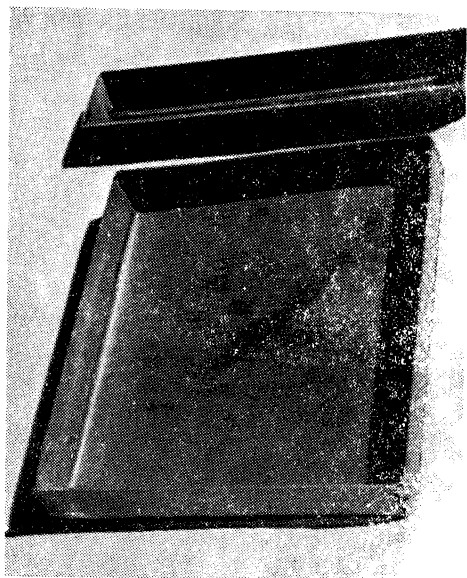


Рис. 14. Лодочка с жаростойким покрытием.

Покрытие наносится для создания барьерного слоя, предотвращающего взаимодействие W с Ni. На исходную заготовку размером $280 \times 280 \times 3$ с обеих сторон термическим напылением наносят NiCr толщиной 0,1 мм. Затем пульверизацией на подслое напыляют шликер, фритта которого состоит из $Ni + 25 Al_2O_3$ с интенсифицирующим покровным слоем из NiCl. После удаления влаги заготовки нагревают до 1200—1250°C и прогоняют через валки. Хорошие результаты показывают эксперименты, в которых вместо Al_2O_3 использовались $MoSi_2$ и $Al + 80 CrSi$.

В четвертую подгруппу входят детали цилиндрической формы — валы, оси, пальцы, втулки, цилиндры, шкивы, прессформы, стволы и т. д., которые подразделяются еще на две части. К одной части относятся детали с внутренней рабочей поверхностью, к другой — с наружной.

Для нанесения слоя на поверхности цилиндрической формы наиболее распространены формовочный способ и плакировка. При нанесении порошков мелкой градации применяют экструзионный, для крупной градации — шликерно-формовочный способ. При плакировке используют целые, изготовленные по месту оболочки пластинки с радиусом основания, гибкие оболочки и проволока (намотка). Широко распространены также шликерный способ, напыление и осаждение. Напрессовка для нанесения сырого слоя на удлиненные цилиндрические детали малого диаметра аналогична технологии нанесения покрытий на сварочные электроды. Специфическим способом нанесения сырого слоя на детали с внутренней цилиндрической поверхностью является центробежный.

Спекание сырого слоя, нанесенного на цилиндрическое основание, производится различными способами. Из термических способов широко применяются спекание с общим, поверхностным (т.в.ч., электронно-лучевой) и двухступенчатым нагревом. Обжигание в последнем случае производится посредством прогонки через фильеру (при нанесении на наружную поверхность) и прошивкой (внутренней поверхности) в холодном состоянии. Из термомеханических наиболее распространены спекание под давлением, горячее и виброударное припрессование. Давление в первом случае осуществляется за счет различного расширения при нагреве материала основания и формы. Нагрузка при горячем припрессовании достигается прогонкой (прошивкой) в горячем состоянии или накаткой. Виброударная нагрузка может прикладываться как по всей покрываемой поверхности, так и по небольшой ее части.

Третья группа — детали сложной конфигурации: корпусные детали, лопатки турбин, кулачки, шестеренки, отдельные детали прессформ, сопла и т. д. Сырой слой наносят шликерным и формовочным способами, напылением или осаждением. Термическое спекание производится с общим или поверхностным (изотермическим) нагревом, термомеханическое спекание — в гидро- или газостатах. В отдельных случаях возможно осуществить спекание под давлением (за счет разности расширения при нагреве материалов основы и формы), горячее припрессование или виброударную обработку нагретой заготовки.

Четвертая группа — детали и узлы крупных размеров: направляющие станины, конусы, валы, цилиндры, корпуса, резервуары и т. д. Тонкие слои наносятся напылением, осаждением или шликерным способом, толстые сырые слои — плакировкой, формовочным, прессованием и другими способами. Термическое спекание производят с общим нагревом (в специальных печах) или с поверхностным нагревом (т.в.ч., экзотермический), термомеханическое спекание — под давлением (под грузом), горячим припрессованием (накатка) или с приложением виброударной нагрузки. Для нанесения покрытий на детали крупных размеров наиболее приемлема плакировка с использованием пластин или гибкой пленки, а спекание — местным нагревом за счет пропускания электрического тока, тре-

ния (ультразвука), или использования блоков; сжатие осуществляется за счет статического давления или виброударной нагрузки.

Металлирование в ремонтном производстве дает возможность восстанавливать первоначальную работоспособность изношенной детали или увеличить ее в несколько (несколько десятков) раз. При выборе исходного материала, вида и режимов нанесения покрытий на ремонтные детали следует исходить из того, чтобы при термической обработке не снижались или снижались в допустимых пределах свойства материала основания и несущая способность детали. В связи с этим при ремонте применяют спекание с пропиткой, спекание с поверхностным нагревом и с подпрессовкой между двумя нагревами. Наиболее распространено термомеханическое спекание.

Примеры практического применения.

1. Валик балансира ($d=50$, $l=350$ мм, сталь 45). Условия работы — полужидкостное трение. Наносится покрытие ПП30С4+6FeW 2СBr-М8-1200-10-Н₂. Стойкость увеличилась в 1,6 раза (рис. 15).

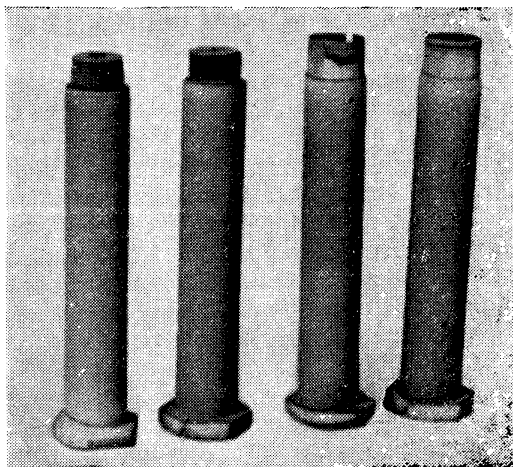


Рис. 15. Балансирные валики, восстановленные металлизацией.

2. Распределительный шкив протяжного стана ($d=180$, $h=25$ мм, сталь Л. 35). Условия работы — сухое трение о молибденовую проволоку. Наносят покрытие ГМНТ—А2—8ПЖ+1ПН+8ПМ-Н1-1180-30-Н₂. Последующая нормализация. Стойкость увеличилась в 5,2 раза.

3. Тяговый барабан ($d=70$, $l=140$ мм, сталь Х9). Условия работы — сухое трение о вольфрамовую проволоку. Наносят покрытие ОВК6-П2-1150-10-Н₂. Стойкость увеличилась в 18—20 раз.

Металлизацией восстанавливают клапаны, седла, сопла, детали штампов и пресс-форм, контакты, направляющие, валы и многие детали машин и механизмов. Один из вариантов восстановления изношенной детали состоит в следующем: изношенная втулкообразная деталь обжимается для уменьшения внутреннего диаметра до размера, который менее требуемого на величину припуска при последующей механической обработке. Одновременно с этим уменьшается наружный диаметр детали. Для увеличения этого диаметра, превышающего требуемый на величину припуска, при последующей механической обработке используется металлизирование.

Детали плоской формы также относительно легко могут быть восстановлены до альбомных размеров с работоспособностью рабочей поверхности в пределах, рекомендуемых для новой детали. К этой группе деталей относятся направляющие, скользуны, пластины и т. д. Покрытие наносится на поверхность с обратной стороны рабочей поверхности. Увеличение толщины изделия дает возможность восстанавливать рабочую поверхность простой механической обработкой (шлифовкой). Покрытие восстановленных таким образом деталей работает на сжатие, вследствие чего оно может быть нанесено из малodeфицитного материала самыми разнообразными технологическими приемами металлизации.

2.5. Экономическое обоснование металлизации

Экономическая целесообразность применения металлизации определяется абсолютной суммой экономической эффективности и размером экономии по себестоимости (в денежном выражении), сокращением расхода металлов, высвобождением оборудования и рабочих. При более полных и детальном расчетах экономическая эффективность определяется в сфере эксплуатации за счет увеличения моторесурса, срока службы узлов машин и агрегатов, сокращения эксплуатационных расходов. В экономических расчетах были использованы формулы и табличные данные справочной литературы (М. А. Брауна, Б. В. Воскресенского, М. И. Ипатова [15] и других), основные методические положения по расчету экономической эффективности производства и применения изделий из металлических порошков и новых специальных материалов.

Себестоимость изготовления детали с покрытием C_n может быть определена непосредственно по техническим нормам или в сравнении с себестоимостью изготовления стандартной детали, т. е. без покрытия

$$C_n = C_o + Q_{in} \Pi_{in} + b_{in} \tau_{in} (1 + H_i) - (G_o - G_{on}) \Pi_o - G_{on} (\Pi_o - \Pi_{on}), \quad (11)$$

где Q_{in} , Π_{in} — веса и стоимости материалов, необходимых для нанесения покрытий на одну деталь;

b_{in} , τ_i — тарифные ставки исполнителей и продолжительность работ (i), связанных с нанесением покрытий;

H_i — коэффициент, учитывающий накладные, связанные с использованием дополнительного оборудования, приспособлений, площадей и т. д.;

G_o , G_{on} — вес заготовки, соответственно, для изготовления детали без покрытия и детали с покрытием;

Π_o , Π_{on} — цена 1 кг материала основания детали, изготовленной по технологии без нанесения покрытия и с покрытием соответственно.

Количество материала, необходимого для нанесения покрытий (Q_1 , кг), зависит от площади покрываемой поверхности и толщины слоя:

$$Q = sh_1\gamma_1 = sh_1(1 - \Theta)\gamma_m, \quad (12)$$

где γ_1 , γ_m — удельный вес покрытия и компактной части покрытия соответственно, кг/м³;

Θ — относительная пористость.

Для деталей, работающих на износ, толщина покрытия принимается равной

$$h_1 = t + K_n + l_p, \quad (13)$$

где t — величина допустимого износа (м), принимаемая по справочнику (ремонтника) или из технических условий эксплуатации соответствующего узла в большинстве случаев равной $t = 0,3 - 3$ мм;

l_p — перекрытие основного металла, м; $l_p = 0,05 - 0,2$ мм;

K_n — припуск на механическую обработку, м; принимается в зависимости от разновидности спекания: при спекании с поверхностным и общим нагревом $K_n = 0,5 - 1,2$, при т.м.с. $K_n = 0,3 - 0,5$, а при использовании калибровки — $K_n = 0 - 0,3$ мм.

Для жаро(кислото)- и т.п. стойких покрытий

$$h_1 = v\tau_y, \quad (14)$$

где v — скорость окисления (растворения), м/ч;

τ_y — устанавливаемый срок службы изделия, ч.

Технико-экономические расчеты показали, что стоимость исходного материала составляет от 10 до 60% стоимости металлизации.

Третьей составляющей C_n является $b_{in}\tau_{in}(1 + H_t)$.

Практика применения металлизации еще не может дать значения H_t , поэтому она принимается равной соответствующей величине из области порошковой металлургии.

Из формулы (11) видно, что для многих деталей $C_n > C$, так как

$$b_{in}\tau_{in}(1 + H_t) > (G_o - G_{он})C_o + G_{он}(C_o - C_{он}).$$

Однако, как было уже отмечено, применение металлизации дает возможность уменьшить металлоемкость детали или заменить материал основания на менее дорогостоящий. В этом случае возможно $C_n \leq C_o$.

Годовая экономия применения металлизации при изготовлении или восстановления деталей равна

$$\Delta = \left(\frac{C_o}{D} - \frac{C_n}{D_n} \right) D_o, \quad n = (K_n C_o - C_n) n, \quad (15)$$

где D , D_n — объем работы, выполненный машиной (агрегатом) в период гарантийного по надежности времени работы

- соответственно стандартной детали и детали с покрытием;
- D_o — объем работы машины, для которой определяется эффективность, обычно $D_o = D_n$;
- n — количество деталей, изготавливаемых (восстанавливаемых) с применением металлизации;
- K_n — коэффициент относительной износостойкости:

$$K_n = D_n / D$$

Таблица 12

Эффективность применения металлизации (восстановление деталей)

Деталь	Стоимость, руб		K_n	Экономия на 1 деталь	
	C_o	C_n		$K_n C_o - C_n$, руб	$(K_n - 1) C_o$, кг
Направляющие бакена	1,22	1,12	11	12,30	У8—4,0
Седло и клапан задвижки	52,6	62,9	50	2400	СТ—450
Прокатный вал	28	89	16	364	9Х—360
Тяговый барабан	1,52	3,16	5,5	5,20	9Х—30
Лодочка*	11,2	13,52	4,5	35,0	Н1—2,4

* Изготовление новой детали

В табл. 12 приведены примеры экономии денежных средств и металла при изготовлении новых и восстановления изношенных деталей с применением металлизации. Если учесть сокращение простоя оборудования при смене деталей, сокращения ремонтников и т. д., то уточненные цифры будут еще выше, чем приведенные в табл. 12.

Широкое внедрение металлизации обеспечит экономию денежных средств, исчисляемую миллионами рублей и большого количества металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев Н. В. Металлизация распылением с последующим спеканием, Сб. «Организация процессов сварки, резки, наплавки и металлизации», вып. 21, М., ЦИТЭМ, 1961.
2. Авдеев Н. В. Основные понятия металлизации, Сб. материалов по итогам научно-исследовательских работ ТашПИ за 1972—73 гг., вып. 102, Ташкент, 1973.
3. Авдеев Н. В. Взаимодействие металлизационного слоя с цилиндрическим основанием и определение напряжения. Труды ВНИИАвтогенМаш., вып. XII, М., Машиностроение, 1963.
4. Авдеев Н. В., Березин Р. Г., Петренко В. П., Мартынов В. А. Методы определения прочности сцепления покрытия с основанием при металлизации, «Заводская лаборатория», 1974, т. 40, № 2.
5. Андреев Н. Х., Малахов А. И., Фуфаев Л. С. Новые материалы в технике, М., «Высшая школа», 1968.
6. Аппен А. А. Температурустойчивые неорганические покрытия, М., «Химия», 1967.
7. Астров Е. И. Плакированные и многослойные металлы, М., «Металлургия», 1965.
8. Вишенков С. А. Химический и электрохимический способы осаждения металлопокрытий, М., «Машиностроение», 1975.
9. Высокотемпературные неорганические покрытия. Под ред. Дж. Гуменика, М., «Металлургия», 1968.
10. Горбунов Н. С. Диффузионные покрытия на железе и стали, М., Изд. АН СССР, 1958.
11. Дорожкин Н. И., Кашицын Л. П. Физико-механические характеристики износостойких покрытий, «Порошковая металлургия», Киев, 1974, № 3.
12. Добровольский А. Р. Шликерное литье, М., «Металлургия», 1967.
13. Еременко В. Н. Поверхностные явления и их роль в процессах жидкофазного спекания и пропитки пористых тел, В кн. Современные проблемы порошковой металлургии, Киев, «Наукова думка», 1970.
14. Износостойкость и структура твердых сплавов. М., «Машиностроение», 1971.
15. Ипатов М. И. Расчеты себестоимости проектируемых машин, М., «Машиностроение», 1968.
16. Карпенко Г. В., Похмурский В. И., Далисов В. Б. и др. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий, Киев, «Наукова думка», 1971.
17. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. Металлизация распылением, М., Машиностроение, 1966.
18. Кипарисов С. С., Нарва В. К., Даляев Л. И. Новые износостойкие металлокерамические материалы с использованием карбида титана, М., Металлургия, 1972.

19. Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Бершадский Л. И., Караулов А. К. Надежность и долговечность машин, Киев, «Техника», 1975.
20. Основы технологии механизированной наплавки. Составители: Фрумин И. И., Лейначук Е. И., Юзвенко Ю. А., Нероденко М. М., М., Профтехиздат, 1961.
21. Работнов Ю. Н., Милейко С. Г. Кратковременная ползучесть, М., «Наука», 1970.
22. Раковский В. С., Саклинский В. В. Порошковая металлургия в машиностроении, Справочник, М., Машиностроение, 1973.
23. Ройх И. Л., Новиков Н. Н. Нанесение металлических покрытий на порошки методом напыления в вакууме, «Порошковая металлургия», Киев, 1975, № 8.
24. Саклинский В. В. Производство металлокерамических вкладышей, Сб. «Порошковая металлургия», Ярославль, 1956.
25. Самсонов Г. В., Эпик А. П. Тугоплавкие покрытия, М., «Металлургия», 1975.
26. Скороход В. В. Теория твердофазного спекания металлокерамических изделий, Сб. «Современные проблемы порошковой металлургии», Киев, «Наукова думка», 1970.
27. Современные композиционные материалы. Под редакцией Л. Броутмана и Р. М. Крока, М., «Мир», 1970.
28. Справочник по пайке. Под редакцией С. Н. Лоцмана, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова М., «Машиностроение», 1975.
29. Спринг С. Очистка поверхности металлов, М., «Мир», 1966.
30. Федорченко И. М., Андиревский Р. А. Основы порошковой металлургии, Киев, АН УССР, 1961.
31. Хасуй А. Техника напыления (пер. с японского), М., «Машиностроение», 1975.
32. Эйчис А. П. Покрытия и техническая эстетика, Киев, «Техника», 1971.
33. Campbell J. E. Vapor deposition of high-temperature coatings. High-temperature — a tool for future. Proceedings of the Symposium. 1956, p. 177.
34. Franben A. Pulvermetallurgisch plattierte Gleit Reibwerkstoffe. «T. Z. für praktische Metallbearbeitung», 1965. v. 59 N 7 S. 454—458.
35. Gibaut W. A. Bartlett E. S. Coating of high-temperature Materials, ed Hasher H. H. Plenum Press. N 4 1966 p. 155, 229.
36. Matting A. und Hans Nieter Steffens. Metallspritzschichten aus Stahl und Nichteisenmetallen und Prüfung ihrer Haftfestigkeit. Stahl und Eisen 85/1965 N 20r Oktober.
37. Smith Nukl. Sci and Enging 2, 3 152, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Назначение, технико-экономический анализ и пути развития технологии нанесения покрытий	4
1.1 Назначение и классификация покрытий	4
1.2. Классификация и технико-экономическая оценка способов нанесения покрытий	10
1.3. Пути развития технологии нанесения покрытий, Металлирование	21
Глава II. Сущность и применение металлирования	25
2.1. Технология металлирования	25
2.2. Свойства металлизированных покрытий	50
2.3. Несущая способность металлизированных деталей	59
2.4. Классификация деталей и рекомендации по выбору способа металлирования	62
2.5. Экономическое обоснование металлирования	70
Литература	73

6П4.5

A 18

Авдеев Н. В.

Теория и практика метал-
лирования /Н. В. Авдеев; Отв. ред.:
Н. Бабасев; МВ и ССО УзССР,
Ташк. политех. ин-т
им. Абу Райхана Беруни.—
Т., «Фан», 1978.—76 с.
Лит.: с. 73—74.

6П4.52

Николай Васильевич Авдеев

Теория и практика металлирования

*Утверждено к печати Ученым Советом
Ташкентского политехнического института
им. Абу Райхана Беруни*

Редактор *И. Н. Боева.*
Художник *И. Цыганов.*
Технический редактор *О. Остроухова.*
Корректор *Л. П. Водолазская.*



ИБ № 576

Р05226. Сдано в набор 23/XI-77 г. Подписано в печать 21/I-78 г. Формат 60×90^{1/16}.
Бум. тип. № 1. Печ. л. 4,75. Бум. л. 2,375. Уч.-изд. л. 4,7 (1 вклейка.) Изд. № В—101.
Тираж 1000. Цена 70 коп.

Типография _____ льства «Фан» УзССР, Ташкент, проспект Горьк 79. Заказ 304.

Адрес издательства: Ташкент, ул. Гоголя, 70.