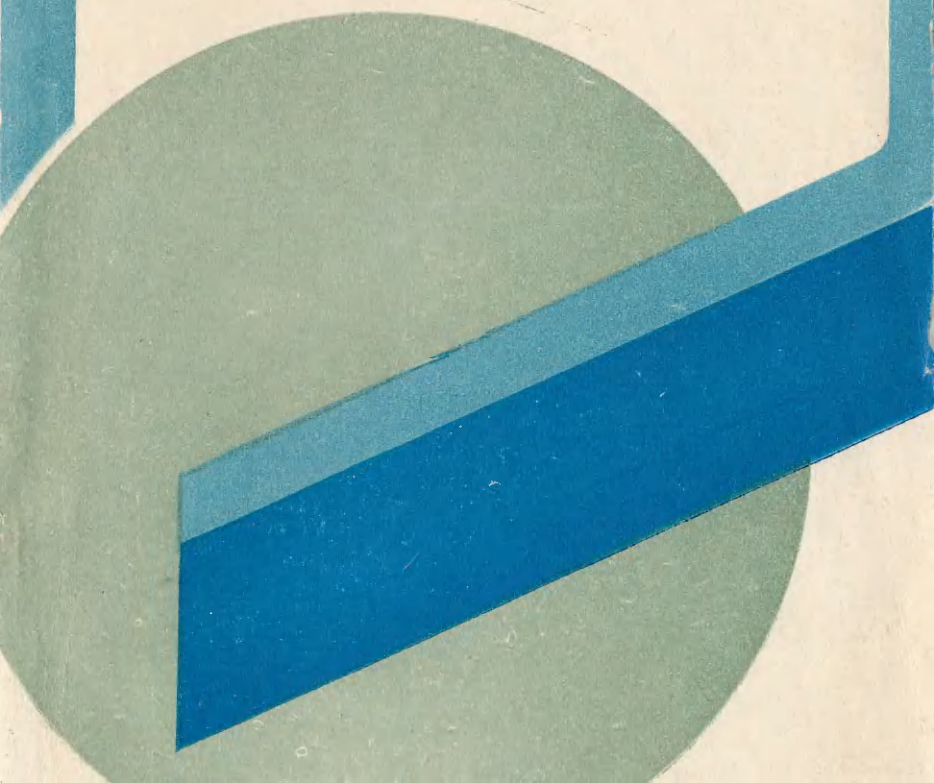


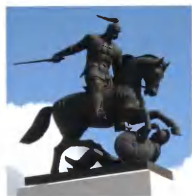
Н. В. АВДЕЕВ

МЕТАЛЛИРОВАНИЕ



Н. В. АВДЕЕВ

МЕТАЛЛИРОВАНИЕ



МОСКВА ● «МАШИНОСТРОЕНИЕ» ● 1978

6ПЧ.3

A18

УДК 621.79:669.8

Рецензент канд. техн. наук Я. Л. Клячкин

ИБ № 162

Николай Васильевич **Авдеев**

МЕТАЛЛИРОВАНИЕ

Сдано в набор 28.06.77. Подписано в печать 3.02.78. Т-03224. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Литературная гарнитура. Печать высокая Усл. печ. л. 9,66 Уч.-изд. л. 10,0 Тираж 16 000 экз. Зак. 1079. Цена 50 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

Редактор издательства Т. Е. Черешнева
Технический редактор Л. Т. Зубко
Обложка художника В. В. Воронина
Корректор О. Е. Мишина

Московская типография № 32 Союз-полиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Москва, К-51, Цветной бульвар, д. 26.

Авдеев Н. В.

A18 **Металлирование.** М., «Машиностроение», 1978.
184 с. с ил.

В книге изложены сущность, технология и практика применения нового способа нанесения покрытий, состоящего в нанесении сырого порошкового слоя или оболочки и последующей термической или термо-механической обработке. Описаны физико-химические процессы, происходящие при нанесении покрытий. Даны рекомендации по применению способа.

Книга предназначена для инженерно-технических работников предприятий и научно-исследовательских институтов.

A $\frac{31206-115}{038(01)-78}$ 115—78

6П4.3

© Издательство «Машиностроение», 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Нанесение покрытий — весьма важная область промышленного производства, без которой немислимы решения многих задач новой техники.

Все детали машин, механизмов и сооружений находятся во взаимодействии с окружающей средой — газами, жидкостями и твердыми телами (в том числе и с сопряженными). Вследствие этого 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. Надежность 90% деталей, определяющих ресурс работы машин и сооружений, зависит от интенсивности этих поверхностных процессов. Уменьшить скорость протекания поверхностных процессов или вообще устранить их можно 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. Использование материалов с повышенным сопротивлением внешним воздействиям (легированных сплавов, композиционных и других материалов с высокими и специфическими свойствами) способствует увеличению срока службы деталей в 1,5—3 раза и более. Однако в условиях высоких параметров внешнего воздействия однородный по всему объему детали материал в ряде случаев не может обеспечить желаемую надежность. Кроме того, материалы (сплавы, керметы, волокнистые материалы и т. п.), которые имеют наименьшую скорость поверхностных процессов, в большинстве случаев не обладают достаточным сопротивлением по отношению к другим (не поверхностным) воздействиям (ударным

или циклическим нагрузкам и т. д.), не удовлетворяют по технологическим свойствам (ковкости, обрабатываемости и т. д.) или технико-экономическим показателям. Последнее объясняется тем, что производство легированных сплавов, композиционных и других материалов с высокими свойствами связано с использованием дорогостоящих и дефицитных компонентов, что, естественно, ограничивает использование их в массовом производстве на широкой номенклатуре деталей. Вследствие этого наиболее целесообразно основную часть детали изготавливать из малodeфицитного (дешевого) материала с хорошими (достаточными) технологическими свойствами и высокой сопротивляемостью внутренним напряжениям, а поверхностный слой изготавливать из материала, который обладает высокой сопротивляемостью поверхностным процессам (коррозии, изнашиванию и т. д.). Деталь такой конструкции называется композитной. Композитные детали изготавливают с применением термической или химико-термической обработки, использованием биметалла и нанесением покрытий.

Поверхностная закалка — наиболее широко распространенный в данное время способ повышения сопротивляемости поверхностных слоев. Однако получаемая при термической обработке структура не обладает в большинстве случаев максимальной сопротивляемостью поверхностным процессам. Химико-термическая обработка — нитроцементация, борирование и т. п. — является более совершенным способом повышения свойств поверхностных слоев материала, и на ряде деталей достигается сопротивляемость поверхностным процессам, которая обеспечивает долговечность детали до планируемого срока работы машины или механизма [21]. Однако при химико-термической обработке за основу поверхностного слоя принимается материал изделия, а это является значительным ограничением в достижении максимальных требуемых свойств.

В данное время широко применяется при изготовлении композитных деталей многослойный материал (биметалл) [29]. Однако при производстве многослойного материала используют металлы (сплавы) с относительно высокой пластичностью, а этим свойством, к сожалению, не обладают многие материалы с высокой жаростойкостью, износостойкостью и другими защитными свойствами. Кроме этого, для многих деталей требова-

ния высокой сопротивляемости поверхностным процессам предъявляются лишь для отдельных участков поверхности, а применение биметалла экономически оправдано только в том случае, когда создаваемый слой «работает» по всей или значительной поверхности изделия (конструкции).

Наиболее универсальным и эффективным способом изготовления композитных деталей является такой способ, при котором применяется нанесение покрытий. Нанесение покрытий означает не просто повышение или улучшение эксплуатационных характеристик изделия, а создание, по существу, принципиально новой композиции, обладающей не суммой характеристик материалов основания и покрытия, а качественно иными, которые позволяют изменить конструкцию детали или узла и значительно повысить производительность машин и механизмов при увеличении их надежности. Нанесение покрытий дает возможность наиболее рационально и рентабельно использовать материалы по их свойствам, упростить в ряде случаев технологию изготовления деталей, заменить дорогостоящие и редкие металлы менее дефицитными материалами без снижения, а в большинстве — с повышением работоспособности деталей, конструкций и механизмов.

Дальнейшее развитие народного хозяйства связано с использованием большого, непрерывно возрастающего количества различных машин и механизмов. С увеличением мощности и быстроходности машин, с ростом автоматизации, усложнением условий эксплуатации задача повышения качества машин становится особенно важной. Повышение качества машин может быть достигнуто в результате применения как защитных, так и специальных покрытий: теплотехнических, светотехнических, электротехнических, барьерных, активирующих, физико-механических, преобразующих, декоративных и биохимических.

Нанесение покрытий играет первостепенную роль при восстановлении изношенных деталей и узлов. Нанесением покрытия возможно довести изделия до требуемых размеров. Используя для нанесения покрытий материал с высокими требуемыми свойствами, можно значительно увеличить 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. п. [31].

Однако слабым звеном ремонтного производства является технология восстановления изношенных деталей. Это приводит к значительным расходам материальных средств и приближает стоимость ремонта к стоимости новых машин и механизмов без повышения их долговечности. Созданием промышленной ремонтной базы на основе прогрессивных способов нанесения покрытий можно коренным образом усовершенствовать технологию восстановления деталей и сделать ремонтное производство высокорентабельным.

Нанесением покрытий занимаются многие технические и физико-химические научно-исследовательские и учебные институты и лаборатории. Наши ученые: В. Е. Иванов, В. А. Архаров, Г. В. Самсонов, А. А. Аппен, А. И. Борисенко, Е. П. Нечипоренко, Н. С. Горбунов, Н. В. Катц, И. И. Фрумин, В. И. Лайнер, И. Л. Роих и др. — разрабатывают теоретические основы процессов образования покрытий, механизма их взаимодействия с материалом основания и окружающей средой, явления фазообразования, диффузии, прочности сцепления и т. д.

За рубежом проблемой нанесения покрытий занимаются многие лаборатории — Международный институт сварки, фирмы «Метко», «Хром Эллой», «Пикатини», N. B. S., институт им. Ваттеля и др.

В данное время применяются и находятся в стадии внедрения различные способы нанесения покрытий: наплавка, осаждение, напыление, насыщение, припекание и окрашивание. Наплавка — широко применяемый способ нанесения покрытий. За последнее время в области наплавки достигнуто повышение производительности нанесения и улучшение качества наплавляемых слоев за счет дальнейшей автоматизации, использования более мощных источников теплоты, разработки новых наплавочных аппаратов и материалов. Основная область применения наплавки — нанесение износостойких покрытий в ремонтном производстве (на лемеха, валы, зубья и т. д.) [13, 31].

Значительные успехи достигнуты и в области нанесения покрытий, работающих при высоких температурах и агрессивных средах. Эти покрытия наносят осаждением из различных фаз, термическим напылением, диффузионным насыщением, плакированием, эмалированием и

другими способами. Промышленное применение получили покрытия трех типов: металлические, интерметаллические и керамические. Из металлических наибольшее применение получили покрытия на основе Ni—Cr—Si—B , платины на барьерном слое Al_2O_3 , Al—Cr—Si и т. п. [4, 6, 11, 27, 33]. Ведется разработка покрытий, рассчитанных на работу при 1370°C в течение 1000 ч и при 1800°C до 100 ч. В числе их — покрытия на основе MoSi_2 , Al—Si—TaAl_4 — X -фаза, MoSi_2 — NiCr_2 и др. [4, 6, 37]. Представляют интерес разработки промышленного способа изготовления покрытия из керамики, например из Al_2O_3 со стекловидной пленкой для ниобия и тантала (1370°C , 150 ч), из смеси 65% циркона и 35% стекла для вольфрама (1650°C , 10 ч) и др. [6, 17].

Широкое применение нашли покрытия, защищающие материалы в условиях атмосферной коррозии и специального назначения: декоративные, электротехнические и светотехнические. Они наносятся электро- и химическим осаждением, напылением и эмалированием [18, 35].

В условиях интенсификации технологических процессов большое значение приобретают покрытия, активизирующие процессы смачивания, поглощения, химического взаимодействия и т. д. или тормозящие диффузию, прохождение радиации и т. п. [6, 27]. Широкое применение новых материалов (полимеров, графита и т. д.) требует в отдельных случаях нанесения покрытий, повышающих прочность (контактную, на разрыв) изделия [31, 33]. Развитие светотехники и телевидения расширяет область нанесения «преобразующих» покрытий [35] — люминофорных, флуоресцирующих и т. п. Особое место в области нанесения покрытий приобретают биохимические покрытия — санитарно-гигиенические, ядо-химикатные, противообрастающие и т. д. Ученые МВТУ совместно с научными работниками медицинских учреждений разработали технологию нанесения на костную ткань покрытий, которые в зависимости от назначения рассасываются после выполнения своей функции или, регенерируясь, вживаются в организм.

Анализ практического применения покрытий говорит о том, что за последнее время учеными, инженерами и технологами сделано много для создания различных типов покрытий. Однако задачи, выдвигаемые производством, настолько велики, что достигнутые результаты не

могут быть признаны удовлетворительными. Последнее становится особенно очевидным, если отметить, что более 80% деталей, определяющих ресурс машин и конструкций, должны изготавливаться с покрытиями; фактически эта величина составляет несколько процентов. Исходя из этого, совершенствование существующих и создание новых способов нанесения покрытий является важной задачей машиностроения и других отраслей народного хозяйства.

В предлагаемой работе излагается прогрессивный способ нанесения покрытий, основанный на припекании к поверхности порошкового слоя, пластин или оболочек.

В работах В. В. Саклинского, М. К. Рыбальченко и автора высказаны предположения о возможности использования припекания порошкового слоя и оболочек к компактному основанию (металлирование) для изготовления биметаллических деталей. Отдельные разновидности технологии металлирования описаны и применяются как в нашей стране [9], так и за рубежом [33]. Однако описание закономерностей процессов нанесения сырого слоя и оболочек спекания порошкового слоя на компактном основании и припекания к нему оболочек и слоя в литературе отсутствует или представлено очень слабо.

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

МЕТАЛЛИРОВАНИЕ

СУЩНОСТЬ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

В условиях интенсификации производственных процессов повышение надежности деталей машин и механизмов — одна из важных проблем. Наиболее рационально использовать имеющиеся и вновь создаваемые материалы, повышать надежность деталей массового и единичного производства и получать при этом значительные экономические выгоды можно благодаря нанесению покрытий. Существующие способы нанесения покрытий совершенствуются путем создания нового оборудования, обеспечивающего повышение производительности процесса и улучшение свойств наносимых покрытий. Новые способы нанесения покрытий создаются на основе использования новых физико-химических или сочетания нескольких существующих процессов.

Надежность детали с покрытием обеспечивается работоспособностью (стойкостью) покрытия и механической прочностью детали как композитной конструкции. Работоспособность покрытия определяется главным образом химическим составом и структурой материала наносимого слоя. Высокой износостойкостью в условиях жидкостного трения обладают многофазовые сплавы, пористые и композиционные материалы; в условиях абразивного трения — твердые спеченные сплавы. К коррозионно-стойким относятся металлы с малым сродством к кислороду (Au, Pt), некоторые сплавы (нихром, окислы, силициды и др.), композиции Ni—Al₂O₃, Co—MoSi₂; хорошими электроконтактными свойствами обладают композиции W—Cu, W—Ag и т. д.

Большинство указанных материалов и изделия из них получают методами порошковой металлургии. Технология порошковой металлургии включает нанесение сырого порошкового слоя и последующую термообработку.

Недостаток многих способов наплавки, термического напыления и некоторых других способов с использова-

нием высокотемпературного нагрева — слабая защита исходного материала от окружающей среды, что приводит к насыщению наплавленного металла газами (O_2 , N_2 и т. д.). Последнее снижает пластические и некоторые прочностные свойства наносимого материала [31, 33]. В связи с этим совершенствование существующих способов нанесения покрытий, а также разработка новых способов должны осуществляться путем создания такой технологии, при которой основные физико-химические процессы нанесения протекали бы в защитной атмосфере.

«Горячие» методы нанесения покрытий (наплавка, напыление и т. д.) характеризуются быстрым нагревом, расплавлением исходного материала и резким охлаждением. Последнее объясняется большой разницей температур в момент нанесения исходного материала покрытия и основания (а также окружающей среды). Расплавление исходного материала не всегда желательно, так как при этом невозможно нанесение очень важных покрытий на основе композиционных материалов. Резкое охлаждение при нанесении покрытий создает в слое напряжения, которые не только снижают механические свойства покрытия, но иногда даже разрушают его. Кроме этого, значительное термическое влияние на материал основания при наплавке приводит к образованию в зоне сплавления 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 необходимо строго контролировать и принимать такими, которые не вызывали бы в покрытиях или основании нежелательных явлений (роста зерна, деформации и т. д.). Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяет операция спекания, применяемая в порошковой металлургии и выполняемая 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 образовании сцепления между ними. Такого явления можно достигнуть не только сплавлением, осаждением, но и схватыванием 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 — высокопроизводительный процесс, который займет должное место среди новых способов нанесения покрытий.

Для снижения величины давления и повышения при этом механических свойств покрытия в порошок можно вводить склеивающие вещества. Связь между частицами, а также между частицами и основанием происходит за счет склеивания и схватывания. Снижение величины давления при холодном припрессовании возможно также путем нанесения на исходный материал (порошок, гранулы, пластины) высокопластичного металла (Pb, Cu). Наиболее перспективно нанесение покрытий с использованием нагрева и давления — так называемое горячее припрессование — способ, основанный на термомеханической обработке. Горячее припрессование будет развиваться в направлении использования минимальной температуры нагрева, обеспечивающей необходимые свойства покрытию и его связь с основанием. Применение термомеханической обработки при нанесении покрытий может улучшить структуру и свойства материала 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 — термической или термомеханической обработкой — для некоторых пар материалов неосуществимо. Это объясняется тем, что необходимые для создания требуемых свойств покрытий режимы нагрева недопустимы для материала основания. Например, температура спекания вольфрама составляет $\sim 3000^{\circ}\text{C}$, а температура плавления стали $\sim 1500^{\circ}\text{C}$. Вследствие этого спекание вольфрама должно производиться отдельно от материала основания, а металлопокрытие — сводиться к созданию лишь связи предварительно изготовленной оболочки с основанием. Требуемая прочность сцепления слоя (оболочки) с основанием может быть достигнута за счет спекания, диффузионной сварки или пайки при темпера-

турах нагрева 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. Для снижения сложности и трудоемкости изготовления оболочки, а также термических напряжений ее можно изготавливать составной — из двух, трех или n частей. Составные части оболочки можно наносить поочередно или все вместе.

Исходя из вышеизложенного технология нового способа нанесения покрытий представляет собой сочетание операций нанесения «сырого» порошкового слоя или оболочки и последующей термической или термомеханической обработки. Данная технология нанесения покрытий названа металлизированием.

Металлизирование — термин, определяющий способ нанесения покрытий. Часть слова — «металл» определяет основной материал покрытия и металлический тип связи при образовании слоя и припекания его к основанию. Часть слова — «ирование» отражает технологию получения покрытий за счет нанесения порошкового слоя или оболочек и последующей термообработки. При металлизировании протекают специфические физико-химические процессы формирования слоя и припекания его к основанию — схватывание, склеивание, спекание в твердой фазе, горячее прессование и др.

Под «сырым» понимается слой из порошков, гранул, волокон, пластин, оболочек, армированных систем или композиции, нанесенный напрессовкой, пульверизацией или другим способом, со свойствами, достаточными лишь для транспортировки и других манипуляций, связанных с последующей обработкой. Покрытие при металлизировании образуется в процессе термообработки за счет спекания сырого слоя и припекания его к поверхности изделия.

Технология металлизирования (рис. 1) включает подготовку исходного материала (1), нанесение сырого слоя (2,а — порошкового, 2,б — оболочки) и последующую термическую (3,а) или термомеханическую (3,б) обработку. В подготовку входит очистка поверхности (1,а), нанесение подслоя (1,б), придание поверхности шероховатости и т. д. Сырой слой наносят напрессовкой

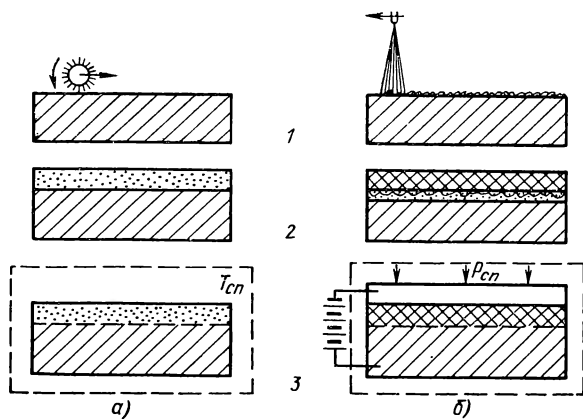


Рис. 1. Технология металлизации (T_{cn} — температура спекания, p_{cn} — удельное давление)

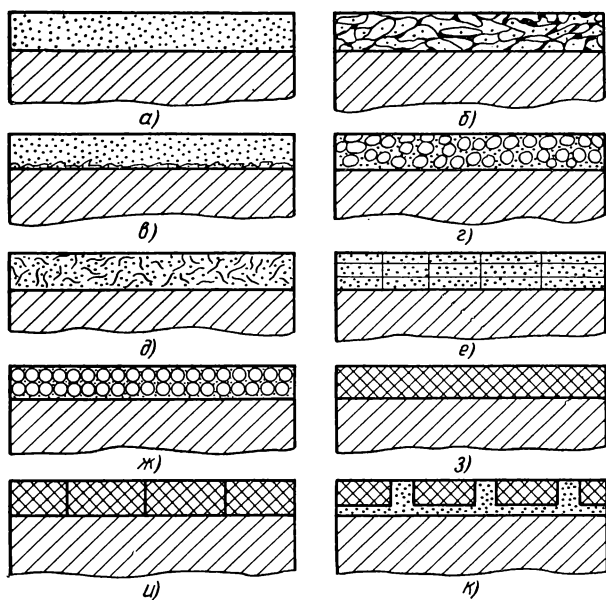


Рис. 2. Конструкции металлизированных покрытий

(2,а), комбинированным способом (2,б), пульверизацией и пр.

На рис. 2 представлены элементарные конструкции металлизированных покрытий. Порошковое покрытие (а) определяется обычно пористостью и равномерностью составляющих его частиц (порошинок). Напыленное покрытие (б) также порошковое, но отличается текстурой составляющих частиц, которая создается при нанесении сырого слоя. Порошковое с подслоем покрытие (в) отличается от порошкового наличием подслоя, который наносится в ряде случаев для повышения прочности сцепления слоя с основанием. Гранулическое покрытие (г) характеризуется тем, что основная масса слоя состоит из гранул (порошинок с $d \approx 0,2 \div 2$ мм), а остальная часть — порошок мелкого размера. Порошковое покрытие, армированное волокнами или короткими тонкими проволочками, называется волокновым (д).

В армированном порошковом покрытии (е) арматура представляет собой объемную проволочную сетку. В проволочном покрытии (ж) проволоку наматывают на цилиндрическое основание или плотно укладывают на плоскую поверхность. Основой покрытия, представленного на рис. 2,з, служит целая оболочка, изготовленная по форме и размерам покрываемой поверхности. Пластинчатое покрытие (и) состоит из отдельных пластин, соединенных с основанием. В пластинчато-порошковом покрытии (к) пластины разделены между собой и основанием порошковыми прослойками.

Маневрируя элементарными конструкциями, исходным материалом и режимами нанесения, можно получать комбинированные покрытия — покрытия с переменными в любом направлении свойствами. Создание металлизированием комбинированных покрытий, состоящих из нескольких слоев, с дискретными или постепенно изменяющимися свойствами как в плоскости основания, так и в перпендикулярном направлении позволяет решать многие сложные задачи техники.

ВЫБОР И ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Правильный выбор состава и технологии подготовки исходных материалов определяет эксплуатационные показатели деталей с покрытиями.

Постановка вопроса о выборе материала основания на первый взгляд может показаться странной, так как материал основания выбирают исходя из условий работы изделия, а материал покрытия — для повышения долговечности изделия. Однако материал основания представляет собой неотъемлемую часть системы «основание—покрытие» — системы композитной детали. Нанесение покрытия существенно изменяет условия работы материала основания. Покрытие, принимая на себя часть функций изделия (износостойкость, контактную прочность, коррозионную стойкость и пр.), снижает требования к свойствам материала основания. Вследствие этого основание может быть изготовлено из менее дефицитного и более дешевого материала, но с более высокими иными свойствами, которые необходимы для работы основания в композитной системе. Например, многие валы, пальцы изготавливают из среднеуглеродистых и даже легированных сталей. Износостойкие покрытия дают возможность изготавливать эти детали из низкоуглеродистых сталей, которые дешевле и обладают большей стойкостью против трещин.

Материал основания также должен обладать достаточной «покрываемостью» — способностью к нанесению требуемого состава покрытия в условиях принятой технологии. Покрываемость характеризуется совокупностью таких показателей, как прочность связи покрытия с основанием $\sigma_{св}$, напряженность слоя σ_1 и химическое взаимодействие исходных материалов. Таким образом, покрываемость зависит как от материала покрытия, так и материала основания. При неудовлетворительной покрываемости иногда целесообразнее заменить материал основания, чем материал покрытия. Например, при нанесении твердого сплава типа ВКЗ на тонкостенное основание из стали в нем возникают высокие напряжения, которые изгибают конструкцию. В этом случае в качестве основания можно использовать сплавы FeNi, MoNi и др., которые имеют температурный коэффициент линейного расширения, близкий к соответствующему коэффициенту твердого сплава ВК.

Материалы основания и покрытия должны обладать эксплуатационной совместимостью, которая характеризуется несущей способностью композитной конструкции — прочностью при статических и динамических нагрузках. Эксплуатационная совместимость исходных

материалов при высоких нагрузках (растяжении, кручении и т. п.) обеспечивается малой разницей ($\Delta\epsilon$) пластических свойств материала покрытия ϵ_1 и основания ϵ_0 ($\Delta\epsilon = |\epsilon_0 - \epsilon_1|$). Примером неудовлетворительной совместимости может служить композитная конструкция из высокопластичного материала основания и хрупкого покрытия. Если нагрузки относительно высокие, то вследствие их перераспределения возможно разрушение покрытия.

Таким образом, материал основания следует выбирать с учетом условий его работы в композитной системе, он должен обладать хорошей покрываемостью, эксплуатационной совместимостью, быть дешевым и недефицитным.

Поверхность изделий, предназначенных для нанесения покрытий, должна отвечать определенным требованиям. Эти требования направлены на создание условий, обеспечивающих при нанесении сырого слоя и термической (термомеханической) обработке те физико-химические процессы, которые при выбранных режимах создают необходимую прочность связи между покрытием и основанием. Прочность при металлизации обеспечивается за счет таких процессов, как схватывание, спекание, смачивание и т. п. Для протекания этих процессов кроме термодинамических условий необходима чистота поверхности. Подготовка поверхности при металлизации состоит главным образом в ее очистке. В ряде случаев в подготовку поверхности входят также создание шероховатости, нанесение интенсифицирующих или барьерных слоев, доведение заготовки до требуемых размеров, создание технологических канавок, закруглений и т. д.

Очистка поверхности предусматривает удаление органических соединений — жиров, смазки и т. п. 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 расплавах. К группе химических способов следует также отнести отжиг в восстановительной атмосфере. Физические способы подготовки поверх-

ности основаны на физических явлениях — тлеющий разряд, электроискровое нанесение, электролитическое растворение и т. д. К механическим способам относятся 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, обработку в барабанах с раствором щелочи, электроискровую обработку поверхности вращающейся металлической щеткой и др.

Выбор способа очистки поверхности определяется видом и характером производства, размерами детали (изделия), химическим составом и т. д. При изготовлении новых деталей основным способом подготовки поверхности служит механическая обработка (точение, фрезерование, шлифование и т. п.), которой предшествует предварительная (грубая) механическая обработка заготовок — отливок или поковок. В ремонтном производстве наиболее приемлемы 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 нескольких десятых долей микрометров до нескольких сотен микрометров на покрываемую поверхность наносят осаждением, напылением, натираем или другими способами. Наибольшее распространение получили химический, электрический, газовый и дуговой способы, а также натирание во вращающихся барабанах и вращающимися щетками из материала наносимого слоя.

При металлизировании для нанесения покрытий применяют различные по химическому составу материалы в форме порошков и гранул, проволоки и волокон, пластин и оболочек. Выбор формы исходного материала определяется способом нанесения сырого слоя и последующей обработкой. Исходные материалы маркируют буквенно-числовыми обозначениями, используемыми в материаловедении.

Порошковые материалы подразделены на следующие группы: металлы и сплавы, интерметаллиды, карбиды, нитриды, бориды, силициды и пластмассы. При металлизации наиболее широко применяют порошки металлов и сплавов (табл. 1). Металлические компози-

Таблица 1. Порошки, применяемые при металлизации

Наименование порошков	ГОСТ, ОСТ или техническое условие	Марки
Железный	ГОСТ 9849—74	ПЖ0, ПЖ1, ПЖ2, ПЖ3, ПЖ4, ПЖ5, ПЖ6, ПЖ7
Медный	ГОСТ 4960—75	ПМ, ПМу, ПМА, ПМС-1, ПМС-Н, ПМС-В, ПМС-2
Титановый	ЧМТУ1-875—70 ЧМТУ1-866—70	ПТК ПТ
Никелевый	ГОСТ 9722—71	ПНК, ПНЭ
Кобальтовый	ГОСТ 9721—71	ПК-1, ПК2
Молибденовый	РС 1343—68 ТУ48-19-69—73	1, 2, 3 МПЧ
Вольфрамовый	РС1341—68 ТУ48-42-88—71 ТУ48-19-70—73	АВ1, ПВ2, ПВ3 В ВЧДК
Серебряный	ГОСТ 9724—61	ПС1 и ПС2
Свинцовый	ГОСТ 16138—70	ПСА
Оловянный	ГОСТ 9723—73	ПОЭ, ПО1, ПО2, ПО3
Алюминиевый	—	ПА0, ПА1, ПА2, ПА3, ПА4
Сплавы для наплавки	ГОСТ 21448—75	ПГ-С27, ПГ-С1, ПГ-УС25, ПГ-Ф6Х6-2, ПГ-АГ1, ПГ-СР2, ПГСР-3
Коррозионно-стойкая сталь	ГОСТ 14086—68	ПРОХ18Н10, ПРХ18Н9
Смеси	ТУ48-19-122—24	ПС-14-80, ПС-14-60, ПС-15-30
Сплав связи	ТУ48-19-123—74	ЛГС-1, ЛГС-2
Латунный	ТУ48-08-418—71	ПЛ-35
Никель-алюминиевый	ТУ48-5-76-73	—
Оловянно-свинцовый	ГОСТ 1499—70	ПОС-40
Титановый антикоррозионный	ТУ-48-10—975	ПТ
Сплав никель—хром—бор	—	СНГН

ции позволяют получать износостойкие, коррозионно-стойкие и другие покрытия.

Карбиды относятся к широкому классу соединений, обладающих рядом ценных свойств. Карбид вольфрама характеризуется очень высокой твердостью и износостойкостью. При металлровании карбиды вольфрама используют в виде стандартных твердосплавных шихт типа ВК и ТК (ВК3, ВК15, Т15К4) или вводят в состав шихты (3—30% массы). Карбид титана обладает малой плотностью, высокой твердостью и хорошими коррозионно-стойкими свойствами (стойкостью против окисления и теплового удара). При металлровании его используют как основу сплавов типа ТН (табл. 2) или в качестве легирующих добавок (3—20% массы).

Таблица 2. Состав порошковых шихт на основе карбида титана, %

Марка шихты	TiC	Ni	Fe	Другие элементы
МНТ-А2	90	8	—	2Mo
ЖНТ-А	30—50	1—12	30—67	0—10 Cr
НДТ	60—80	1—10	0—8	4—10 Cu

Нитриды окисляются больше, чем карбиды, они более хрупки и плохо смачиваются жидкими металлами. Поэтому при металлровании нитриды вводят в качестве добавок и другие материалы для улучшения некоторых характеристик.

Боридам свойственны малая летучесть, низкое электросопротивление, высокая твердость и хорошая теплопроводность. Бориды тугоплавких металлов имеют высокие температуры плавления, однако в агрессивной среде при температуре 1200—1500°C они начинают окисляться. В нейтральной и восстановительной атмосферах, а также в вакууме бориды используют как жаропрочные материалы [6]. Бориды железа, никеля, алюминия имеют сравнительно низкие температуры плавления, поэтому их можно использовать в качестве связки при жидкофазном спекании. Низкая плотность, высокая твердость и ряд других положительных свойств служат основой для широкого применения их в качестве исходного материала для покрытия. Однако промышленное применение боридов для металлрования еще ограничено, так как не найдены металлические фазы, которые могли бы служить для них связкой.

Силициды тугоплавких металлов MoSi_2 , WSi_2 , TaSi_2 и др. обладают относительно высокой твердостью, жаростойкостью (до 1500°C) и устойчивостью против воздействия химических соединений. Однако им присущи низкие механические свойства (хрупкость) и малое сопротивление термоудару: наиболее вероятно, что при металлизации силициды будут применяться в виде сложных твердых растворов ($\text{ZrB}_2 \cdot \text{MoSi}_2$) с металлической связкой.

Для металлизации наибольший интерес представляют тугоплавкие A_2O_3 , BeO , SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 и легковосстанавливаемые CuO , NiO , FeO окислы. Для тугоплавких окислов характерны стабильность в окислительной атмосфере, высокая температура плавления, низкая электро- и температуропроводность и значительная прочность при высоких температурах; при низких температурах это хрупкие кристаллы; их стоимость невелика. Порошки тугоплавких окислов с металлическим покровным слоем Ni , Co или в смеси с порошками металлов применяют для нанесения теплостойких (жаростойких) покрытий. Легковосстанавливаемые окислы вводят в шихту для интенсификации процесса спекания.

Пластмассы характеризуются малой плотностью, высоким электросопротивлением, стойкостью во многих средах и достаточной прочностью. Металлизацией можно наносить термопластичные и термореактивные пластмассы: полиэтилен, полиметилметакрилат, нейлон, пресс-порошок на основе фенолформальдегидных смол и т. д. При металлизации пластмассы можно использовать в виде металлизированных порошка, нити, пленки или пластин.

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°C [7]. Для металлизации распылением наиболее рационально готовить гранулы из сплавов на основе железа (Fe—C—Cr—Si—B) и никеля (Ni—Si—Cr—B). Гранулы можно получить распылением при малом давлении на металлизационных аппаратах. Исходным материалом для нанесения покрытий металлизацией могут служить отходы

дробеструйной обработки металлов — мелкая дробь и металлический песок ($\varnothing = 0,3 \div 2$ мм). Однако из многих материалов изготовить гранулы распылением расплавов невозможно из-за высоких температур плавления или большого сродства к кислороду. Кроме того, в ряде случаев гранулы, полученные распылением, имеют относительно низкие свойства по сравнению со свойствами гранул, полученных другими способами.

Универсальный способ изготовления гранул — способ, основанный на спекании порошков. Технология его включает изготовление сырых гранул, их спекание и дробление спека. Сырые гранулы изготавливают прессованием, гранулированием окатышей и пластифицированных рубленок.

Прессование из порошков сырых гранул осуществляют по общепринятой технологии порошковой металлургии на автоматах в пресс-форме, пуансоны которой имеют сферические углубления. Этот способ дает возможность получать шаровидные заготовки ($\varnothing = 2 \div 3$ мм) высокой прочности. Недостаток способа — низкая производительность, однако ее можно значительно повысить созданием специального многопостового автомата.

Сырые гранулы из шаровидных окатышей изготавливают по методам, принятым в производстве твердых сплавов [32]. Замешанную на пластификаторе и просушенную порошковую смесь протирают через сито (0,5—2,5 мм); полученным окатышам придают шаровидную форму обкаткой на вибросите или в барабане (грануляторе). Сущность другого способа состоит в том, что в заполненный исходными порошками шнековый барабан подают через капилляры струйками раствор каучука в бензине. При вращении шнека капельки вначале обволакиваются шихтой, а затем в процессе перемешивания из них образуются окатыши, которые сушат, просеивают через сито, гранулируют. Размеры гранул (0,2—2 мм) зависят от режима и оборудования (сито). Данный способ производства гранул называют шнековым (Ш).

Третий способ производства гранул получил название пластифицированно-прессовый (ПП). Пластифицированную парафином порошковую массу продавливают через отверстие диаметром 0,5—1,2 мм. На выходе она быстро охлаждается водой или газом (CO_2) и отрезается вращающимся ножом или резцом. Затем рубленки (цилиндрики) гранулируют. Чтобы пластифицированная масса

не слипалась, в гранулятор вводят 2—5% исходного порошка. Размеры получаемых гранул зависят от диаметра выходного отверстия и высоты отрезаемого цилиндрика (от 0,4 мм и выше).

Спекание гранул происходит в защитной атмосфере. Режимы спекания (температуру, продолжительность) принимают в зависимости от материала по рекомендациям порошковой металлургии. При спекании гранул образуется спек прочностью от нуля до значительных величин. Если спек имеет нулевую прочность, гранулы рассеиваются на фракции. Если же спек имеет некоторую прочность, его дробят в специальных установках (шаровых мельницах, молотковых дробилках). Чтобы предотвратить образование высокопрочного спека, применяют двухступенчатое спекание или спекание в инертной засыпке.

Таблица 3. Режимы спекания гранул из твердосплавных шихт и способность получаемого спека к разделению на отдельные гранулы

Марка исходного материала	Способ производ- ства гранул	Режимы спекания		Среда спекания	Способность спека к разделению
		Темпера- тура t , °C	Время, мин		
ВК3	Ш	1420	30	Водород	Хорошая
	ПП	1420	30	»	Отличная
ВК8	Ш	1400	30	»	Удовлетворительная
	ПП	1400	30	»	
ВК15	Ш	1400	30	»	Неудовлетворительная
	ПП	1400	30	»	
	ПП	1400	30	Засыпка*	Отличная
Т15К6	ПП	1400	30	Водород	Удовлетворительная
	Ш	1500	30	»	Хорошая
	ПП	1500	30	»	»
Т30К4	Ш	1420	60	Вакуум	Отличная
	ПП	1400	60	Водород	»
МНТ-А2	Ш	1400	30	»	»
	ПП	1360	60	Вакуум	Хорошая
	ПП	1400	30	Водород	Отличная
ЖНТ	ПП	1320	30	Засыпка*	Хорошая

* Засыпка — порошок $Al_2O_3 + 1,5\text{ C}$.

Гранулированный материал необходим для самых разнообразных покрытий. Наибольшее применение гранулы получают при нанесении износостойких покрытий. Поэтому большой интерес для практики представляют гранулы из твердосплавных шихт типа ВК, ТК, ТН.

Технология промышленного производства твердосплавных гранул включает изготовление сырых гранул, спекание и дробление спека (табл. 3, В. П. Петренко, Н. В. Авдеев). Наиболее рационально сырые гранулы изготавливать шнековым и пластифицированно-прессовым способом, спекать в графитных лодочках, в среде водорода или вакууме (рис. 3,а). Разделяемость спека улучшается с уменьшением содержания металла связки (Со) и увеличением содержания карбида титана.

Свойства твердосплавных гранул зависят от технологии изготовления сырых шаровидных частиц и режимов их спекания. Спеченные гранулы, сырые частицы которых изготовлены шнековым способом, характеризуются значительной шероховатостью, пористостью и меньшей насыпной массой (рис. 3,б). Гранулы, шаровидные частицы которых изготовлены пластифицированно-прессовым способом, характеризуются малой шероховатостью, высокой плотностью и большой насыпной массой. Физико-механические свойства последних близки к свойствам спеченных твердых сплавов (табл. 4, В. П. Петренко, Н. В. Авдеев).

Таблица 4. Некоторые свойства спеченных твердосплавных гранул

Марка гранул и способ производства	Размер гранул, мм	Насыпная масса, г/см ³	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Твердость HRA
ВК3 (Ш)	0,3—0,5	7,8—8,1	11,2—12,5	10—16	86
ВК3(ПП)	0,6—0,9	9,3—11,2	15,1	0,7—1,2	89
ВК8 (Ш)	0,3—0,5	8,0—8,3	~13,0	6—10	—
	0,5—1,2	8,3—8,5	~12,9	8—12	—
ВК8 (ПП)	0,5—0,7	—	15,0	0,8—1,3	87—88
ВК15 (Ш)	0,4—0,8	—	—	5—8	—
ВК15 (ПП)	0,6—0,8	8,6—8,9	13,8	0,5—1,2	86—87
Т15К6 (ПП)	0,6	7,1—7,3	11,0	0,5—0,8	90
Т30К4 (ПП)	0,6	6,0—6,2	9,0—9,3	0,6—1,0	90
МНТ (Ш)	0,3—0,5	2,7—2,9	—	6—16	—
МНТ (ПП)	0,7	3,0—3,2	5,0—5,2	—	90—91
ЖНТ	0,8	4,2—4,3	6,4—6,5	0,5	HRC 65—75

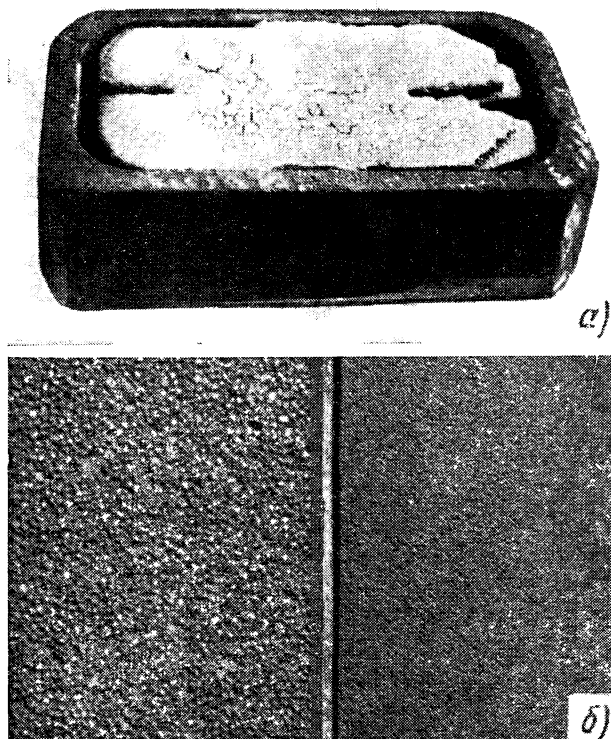


Рис. 3. Твердосплавные гранулы:

а — в графитовой лодочке после спекания; *б* — после отсева
 спека; слева — гранулы размером 0,56—2,1 мм, справа —
 0,16—0,56 мм

Сущность одного из возможных способов получения гранул — оплавления (сплавления) состоит в том, что твердые частицы неопределенной формы (стружка) подаются в зону высоких температур, где они оплавляются (расплавляются) и приобретают форму шара; после охлаждения форма частиц сохраняется. Известны способы получения гранул в результате оплавления исходных частиц в плазмотроне, вертикальной трубе и других установках. Автор исследовал и установил условия получения гранул из стружки различных сплавов путем рас-

плавления ее в инертной несмачиваемой среде (MgO , Al_2O_3) с одновременным легированием материала гранул компонентами W , TiC , вводимыми в засыпку.

При металлизации проволокой сырой слой наносят термическим напылением или намоткой. Для термического напыления используют «обычную», биметаллическую и порошковую проволоку диаметром 0,8—5, а для намотки 0,1—1,5 мм. Химический состав проволоки выбирают в зависимости от требуемых свойств покрытия, а диаметр — от технологии нанесения.

При нанесении покрытий металлизированием можно использовать волокна в виде непрерывных нитей, армирующих сеток и проволочек диаметром 0,5—200 мкм; химический состав их может быть самым разнообразным — металлы (W , Mo , Nb), окислы Al_2O_3 , силициды и т. д.

Пластины и оболочки — формы исходного материала, появившиеся в результате увеличения размеров частиц первоначального материала — порошка. Под оболочкой подразумевается тонкостенное изделие с формой покрываемой поверхности (плоской, цилиндрической, сложной). Размеры оболочки соответствуют размерам покрываемой поверхности. Толщина 0,1—6 мм и более. Пластины — составные части оболочки могут быть плоскими, цилиндрическими или другой конфигурации. Их размеры определяются технологией нанесения и свойствами исходных материалов. Размеры пластин: ширина 3—100 мм и более, толщина 0,1—6 мм.

Пластины и оболочки изготавливают из компактного материала горячей и холодной обработкой (штамповкой, прессованием, точением, фрезерованием) или из порошков методами порошковой металлургии. Заготовку получают прессованием или шликерным литьем [8] с последующим спеканием. Тонкая оболочка сложной конфигурации может быть изготовлена термическим напылением; металлизационный слой наносят на керамическую, графитовую или металлическую форму и затем снимают при нагреве [33].

Порошковые заготовки при нанесении слоя используют во многих случаях в сыром виде, т. е. нетермообработанные. Оболочки сложной конфигурации могут быть изготовлены также формовочным способом — внутренние полости формы заполняют (засыпкой на вибростоле) гранулами диаметром 0,3—0,5 мм и в собранном виде

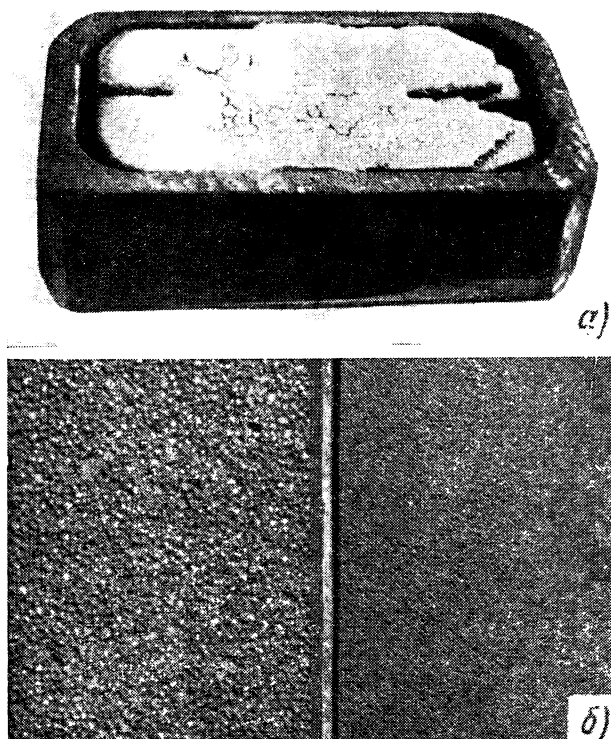


Рис. 3. Твердосплавные гранулы:

а — в графитовой лодочке после спекания; *б* — после отсева
 спека; слева — гранулы размером 0,56—2,1 мм, справа —
 0,16—0,56 мм

Сущность одного из возможных способов получения гранул — оплавления (сплавления) состоит в том, что твердые частицы неопределенной формы (стружка) подают в зону высоких температур, где они оплавляются (расплавляются) и приобретают форму шара; после охлаждения форма частиц сохраняется. Известны способы получения гранул в результате оплавления исходных частиц в плазмотроне, вертикальной трубе и других установках. Автор исследовал и установил условия получения гранул из стружки различных сплавов путем рас-

плавления ее в инертной несмачиваемой среде (MgO , Al_2O_3) с одновременным легированием материала гранул компонентами W , TiC , вводимыми в засыпку.

При металлизации проволокой сырой слой наносят термическим напылением или намоткой. Для термического напыления используют «обычную», биметаллическую и порошковую проволоку диаметром 0,8—5, а для намотки 0,1—1,5 мм. Химический состав проволоки выбирают в зависимости от требуемых свойств покрытия, а диаметр — от технологии нанесения.

При нанесении покрытий металлизированием можно использовать волокна в виде непрерывных нитей, армирующих сеток и проволочек диаметром 0,5—200 мкм; химический состав их может быть самым разнообразным — металлы (W , Mo , Nb), окислы Al_2O_3 , силициды и т. д.

Пластины и оболочки — формы исходного материала, появившиеся в результате увеличения размеров частиц первоначального материала — порошка. Под оболочкой подразумевается тонкостенное изделие с формой покрываемой поверхности (плоской, цилиндрической, сложной). Размеры оболочки соответствуют размерам покрываемой поверхности. Толщина 0,1—6 мм и более. Пластины — составные части оболочки могут быть плоскими, цилиндрическими или другой конфигурации. Их размеры определяются технологией нанесения и свойствами исходных материалов. Размеры пластин: ширина 3—100 мм и более, толщина 0,1—6 мм.

Пластины и оболочки изготавливают из компактного материала горячей и холодной обработкой (штамповкой, прессованием, точением, фрезерованием) или из порошков методами порошковой металлургии. Заготовку получают прессованием или шликерным литьем [8] с последующим спеканием. Тонкая оболочка сложной конфигурации может быть изготовлена термическим напылением; металлизационный слой наносят на керамическую, графитовую или металлическую форму и затем снимают при нагреве [33].

Порошковые заготовки при нанесении слоя используют во многих случаях в сыром виде, т. е. нетермообработанные. Оболочки сложной конфигурации могут быть изготовлены также формовочным способом — внутренние полости формы заполняют (засыпкой на вибростолу) гранулами диаметром 0,3—0,5 мм и в собранном виде

подают в печь. После спекания и разборки формы получается изделие — оболочка толщиной, равной величине формовочного зазора. Форму делают из металла (с барьерным покрытием), графита или керамики.

При спекании физико-химические процессы протекают как между поверхностными слоями компонентов покрытия (порошками, гранулами, пластинками и т. д.), так и между ними и основанием. Для интенсификации процессов припекания на исходные материалы наносят покровные слои толщиной 1—100 мкм.

Для нанесения металлических слоев на токопроводящие пластины и оболочки наиболее приемлем электроискровой способ наплавки. Нанесение стали на твердосплавные пластины и оболочки из сплавов ВК, ТК и ТН обеспечивает покрытия, прочно связанные с основанием. Недостаток этого способа — низкая производительность. Для нанесения покровных слоев на пластины и оболочки из металлов (преимущественно меди и ее сплавов), окислов и других материалов применяют термическое напыление. Однако при этом покрытия не прочно связаны с основанием. Поэтому напыленные заготовки необходимо подвергать восстановительному отжигу.

Насыщение применяют для получения порошков и гранул определенного состава (FeCr , FeW , NiCr), а также для создания на поверхности порошков, гранул, волокон, пластин и оболочек слоев из Cu , Al , Ni , Co . В процессе диффузионного насыщения иногда необходимы температуры, при которых возможно спекание свободно насыпанных порошков. Чтобы предупредить спекание порошковых материалов, в исходную шихту (порошки + легирующие компоненты + NH_4Cl) вводят инертные компоненты Al_2O_3 , которые после насыщения отсеиваются.

Основной способ нанесения покровных слоев — химическое и электрическое осаждение [6]. Этот способ высокопроизводителен и позволяет наносить одно- и многослойные покрытия из Cu , Ni и других металлов и их сплавов. К сожалению, сцепление наносимых слоев с поверхностью основания 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 [26] наиболее перспектив-

ным способом нанесения покровных слоев на дисперсные частицы считают термовакuumное осаждение. Этот способ более универсален, однако он имеет почти те же недостатки, что и предыдущие.

В последнее время разработан ряд новых методов осаждения. Одни из них основан на разложении металлосодержащих соединений. Например, метод нанесения алюминиевого покрытия на порошки различных материалов SiC , Al_2O_3 , W и т. п. позволяет получать качественное покрытие, хорошо сцепленное с каждой отдельной частицей конгломерата. Метод состоит в разложении гидрата алюминия AlH_3 на поверхности частиц при температуре 200°C в присутствии катализатора TiCl . Гидрат алюминия и катализатор наносят на частицы из растворов, в которых растворителями служат бензины, толуол, эфир и т. д. Толщина наносимого покрытия — около $0,2$ мкм.

Разработаны способ и аппаратура для нанесения металлических покрытий на частицы различных материалов; в основе способа лежит разложение газообразных соединений металлов. Через слои постоянно перемешивающихся частиц продувают пары соединения соответствующего металла (например, карбонила) при температуре, достаточной для его разложения.

Металлические покрытия на порошки можно наносить пиролизом металлоорганических соединений (МОС) на поверхности нагретых до определенной температуры частиц [26]. В качестве МОС используют полностью алкилзамещенные соединения металлов (триалкилалюминий, диалкилцинк), а также алкилзамещенные гидраты металлов. Порошки погружают в раствор МОС и нагревают до температуры $240\text{—}500^\circ\text{C}$ в инертной среде. Растворителями служат органические вещества, инертные к МОС, материалу основания, осаждаемому металлу и кипящие при более высокой температуре, чем температура разложения МОС. Таким способом можно наносить покрытия из Al , Ni , Zn , Mo , Ti , W , Cu , Cr и т. д. на любые материалы, устойчивые при температуре процесса.

Для металлизации наиболее приемлемы те 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 считается припекание (металлирование).

В барабан засыпают предварительно смоченные раствором каучука в 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 инертного вещества (Al_2O_3 , MgO). После непродолжительного перемешивания шихту засыпают в лодочки и она поступает в печь на отжиг. Отжиг происходит в защитной атмосфере при температуре 0,7—0,8 $T_{\text{пл}}$ материала порошка или при температуре, при которой порошок расплавляется и смачивает поверхность гранул. После отжига порошок инертной массы отсеивается.

Для нанесения покрытий используют порошки металлов, легковосстанавливаемые окислы и металлосодержащие компоненты, которые разлагаются 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 натираением мягкого металла в шаровых мельницах, дисковыми щетками и другими способами. При горячих способах исходный материал окунают в металлические расплавы (цинка, бронзы и т. п.).

Выбор способа нанесения покровных слоев зависит от химического состава, формы и размеров исходного материала, а также от назначения слоя. Покровные слои чаще всего наносят на тугоплавкие материалы (карбиды, окислы). Для покрытия используют сплавы с относительно невысокой температурой плавления, но с высокими механическими свойствами — сплавы на основе Cu и Ni . В ряде случаев необходимо нанесение тугоплавкого, но хорошо смачиваемого материала (Mo , Co и т. п.).

Свойства покрытий во многом зависят от равномерного распределения в них компонентов. Для составления шихты разнородные материалы или фракции смешивают механическим или химическим путем. Механическое смешивание осуществляют в барабанах, бочках или шаровых мельницах в течение 1—4 ч. Чтобы ускорить процесс приготовления шихты и защитить порошки 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 по технологическим свойствам шихты (ситовой состав, насыпная масса, текучесть, прессуемость, спекаемость) либо химическим и микрохимическим анализом проб.

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

НАНЕСЕНИЕ СЫРОГО СЛОЯ

Основное назначение этой операции — формирование на покрываемой поверхности заготовки слоя, из которого в процессе последующей обработки образуется покрытие. На покрываемой поверхности должен быть создан слой со свойствами, обеспечивающими целостность его как в подготовительном периоде, так и в процессе нагрева. Нанесение сырого слоя возможно описанными ниже способами (рис. 4).

Напрессовка. Порошковую массу (рис. 5) напрессовывают на покрываемую поверхность изделия, которое частично или полностью помещено в пресс-форму. Исходную шихту составляют из порошков, гранул или волокон. 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 на прессования упругое последствие. Введение пластификатора не должно вызвать вредного (нежелательного) химического взаимодействия с исходными материалами и с печной атмосферой, а также токсичности и взрыва.

В качестве пластификатора можно использовать парафин, воск, раствор каучука на бензине, смолы, крах-

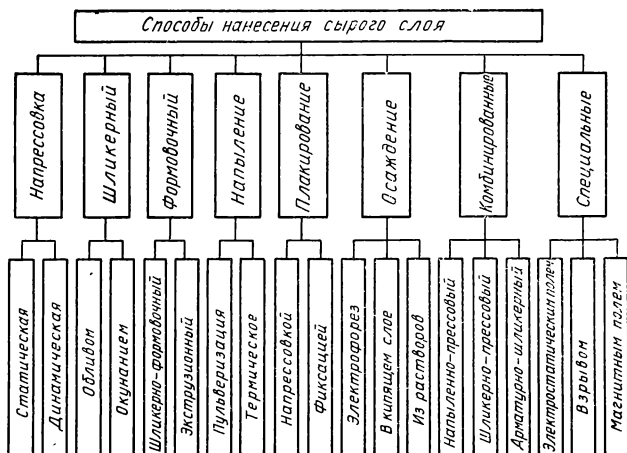


Рис. 4. Классификация способов нанесения сырого слоя

мал, растворы полимеров, глицерин, спирты, олеиновую кислоту, водные растворы хлорных соединений $[Ni-Cl, Al_2(PO)_3]$, каменноугольный пек, бакелит и другие материалы. Вид и количество пластификатора определяют экспериментально, исходя из химического состава и грануляции шихты, способа и режимов нанесения, смачиваемости и клейкости пластификатора. Для хорошо прессуемых порошков (ПЖ, ПМ и т. д.) рекомендуется использовать малodeфицитные и дешевые пластификаторы (парафин, глицерин, водные растворы) в количестве 0,5—4% (по массе).

Для труднопрессуемых шихт с большим содержанием карбидов, окислов количество пластификатора увеличивают до 5—10% или используют высокоэффективные пластификаторы (смолы, каучук и др.). Плохой прессуемостью обладают порошковые шихты, содержащие зна-

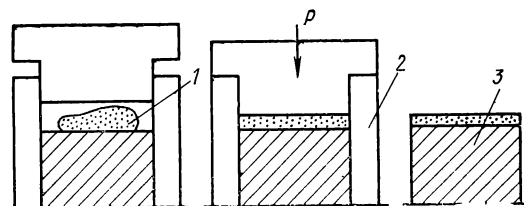


Рис. 5. Нанесение сырого слоя напрессовкой:

1 — пластифицированная порошковая масса; 2 — форма; 3 — основание

чительное количество ($>0,5\%$) свободного углерода (в виде сажи). Поэтому углерод желательно вводить в шихту в связанном состоянии в виде растворов или карбидов.

Различают статическое и динамическое напрессование. Статическое напрессование выполняют на прессах различных конструкций и мощностей (3—5000 т). Выбор усилия припрессования зависит от материала шихты и требуемых свойств слоя; на практике используют давления 50—700 МПа (0,5—7 тс/см²). При малом усилии припрессования ($P_{\text{п}}$) 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 (2—8 с) времени. Поэтому эта операция — высокопроизводительная и недорогостоящая. Динамическое напрессование производят на молотах, ротационных машинах или установках электромагнитного удара.

Шликерный способ. Исходный материал в виде жидкотекучей массы обливом или окунанием наносят на покрываемую поверхность. После удаления влаги из пленки образуется порошковый слой. Основными составляющими шликеров, применяемых в металлизации, служат 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 (HCl), щелочи (KOH), соли (алгинаты), органические соединения и т. д.

Приготовление шликера при металлизации основывается на опыте шликерного литья в порошковой металлургии и керамического производства. Отличительная особенность шликеров, применяемых для нанесения порошковых слоев, — высокая плотность и крупнозернистость исходных порошков, снижающие 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 такая же, как при эмалировании. Поэтому при металлизации можно использовать соответствующее обо-

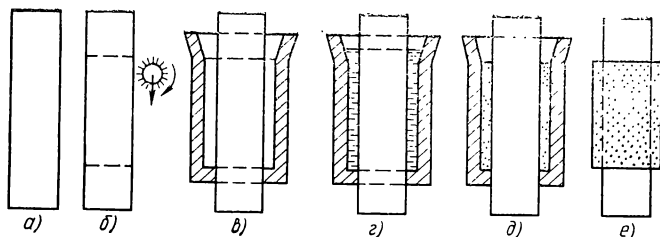


Рис. 6. Шликерно-формовочный способ нанесения сырого слоя:

а — изделие; б — подготовка поверхности (очистка); в — установка формы; г — заливка шликера; д — удаление влаги; е — изделие с порошковым слоем

рудование. Шликерным способом получают высокопористые слои толщиной 0,5—1,5 мм. Толщина слоя зависит от вязкости шликера и кратности нанесения.

Формовочный способ. На изделие устанавливают форму, между нею и покрываемой поверхностью оставляют зазор. В этот зазор подают материал, который и образует требуемый слой. Различают шликерно-формовочный и экструзионно-формовочный способы.

Шликерно-формовочный способ нанесения сырого слоя (рис. 6) состоит из следующих операций: подготовки поверхности (б), на которую наносят слой (очистка), установки формы (в), заливки шликера (г), выдержки, в период которой происходит отвердевание слоя (д), и снятия формы (е). Шликер при формовочном способе готовят из порошков, гранул, волокон или мелкой стружки, замешанных на воде, бензине, парафине, обеспечивающих текучесть шихты.

В шликеры,готавливаемые на воде из мелких порошков (<100 мкм), вводят различного рода дефлокирующие и стабилизирующие вещества. Необходимая текучесть шихты на парафине достигается подогревом ее до температуры 100°C . Шликер из высокоактивных порошков (Ti и др.) готовят на спирте, который предотвращает их окисление в период нанесения. В зазор шликер заливается под действием силы тяжести. Прочность слоя создается в результате отвердевания клеяющего материала при удалении растворителя или охлаждении парафина.

Выбор материала формы зависит от применяемой жидкости и времени ее удаления из порошковой массы. Если жидкость из шликера удаляется до термообработки

(вода, спирт), то необходимы пористые влаговпитывающие материалы: пластмассы, керамика. При использовании шликера на парафине форму можно изготавливать из пластмассы, металла и других материалов.

Чтобы предотвратить сцепление наносимого на изделие сырого слоя с формой, соответствующую ее поверхность делают гладкой, а в некоторых случаях покрывают тонким слоем эмали или хрома. Иногда перед введением шликера в зазор поверхность формы смазывают смазкой. Форму с изделия снимают после удаления влаги или охлаждения парафина. Этот процесс ускоряют в первом случае за счет подогрева или вакуумной обработки (10^{-1} мм рт. ст.), а во втором — за счет охлаждения водой или газом (CO_2).

Одно из перспективных направлений металлизации — нанесение сырого слоя путем заполнения шликером или порошковой шихтой зазора между покрываемой поверхностью и формой, которую не снимают, а подают вместе с изделием в печь (рис. 7). Ее снимают после термообработки. При такой технологии форму изготавливают из высокотемпературного материала: графита, керамики, молибдена. Чтобы исходный материал не припекся к металлической форме, на нее наносят барьерные слои (эмаль). Другая разновидность этого направления — изготовление формы из тонкостенного материала, который в процессе термообработки расплавляется и пропитывает покрытие.

При шликерно-формовочном способе важен выбор зернового состава порошковой шихты. Размер порошков при составлении металлических шликеров в порошковой металлургии составляет для Fe, Ni, 12X18H9T и других материалов менее 40 мкм, а для W, Mo и др. менее 3 мкм. Порошковые слои с мелкими частицами вызывают большие усадки, что неприемлемо для металлизиро-

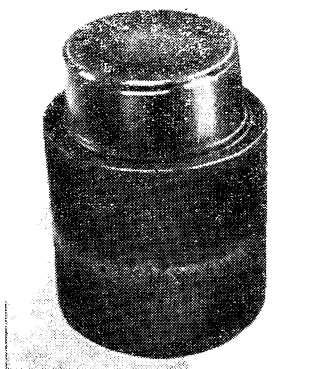


Рис. 7. Заготовка с сырым слоем в графитовой форме

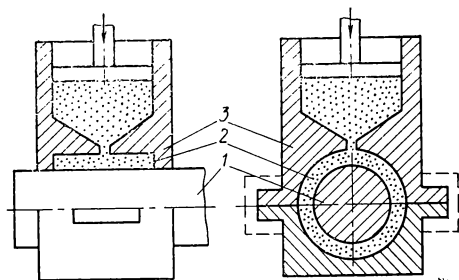


Рис. 8. Экструзионно-формовочный способ нанесения сырого слоя:
1 — заготовка (вал); 2 — пластифицированная порошковая масса; 3 — форма

вания. Малые усадки обеспечивают шихты из крупных частиц, однако механические свойства получаемых после термообработки покрытий очень низкие. В связи с этим шихта для покрытий должна состоять из трех и более фракций: 60—70% с наибольшим размером (100—300 мкм); около 6% каждой последующей фракции с отношением размеров $1/3,5$; $1/3,5^2$; $1/3,5^3$... 10—12% наполнителя (5 мкм).

Толщина наносимого шликерно-формовочным способом слоя 1,5—6 мм. Чтобы обеспечить равномерное и быстрое заполнение зазора порошковой массой, используют вибрацию. Параметры вибрации: частота колебаний 0,2—20 кГц, амплитуда колебаний 10^{-5} — 10^{-1} см. 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.

При экструзионно-формовочном способе высокопластифицированную порошковую массу подают в зазор между изделием и формой под давлением (рис. 8). Как только пластифицированная масса отвердеет, форму снимают и на изделии остается порошковый слой. Исходными материалами шихты служат порошки металлов или металлов с неметаллами размером 10—260 мкм, пластификаторами — парафин, растворы смол, хлорных соединений и другие материалы, обеспечивающие вначале необходимую текучесть шихты, а после выдержки — связанность. Необходимая текучесть порошковой массы достигается введением в нее соответствующего количества пластификатора (10—35% по объему), а в ряде случаев подогревом до температуры 100°C. Текучесть пластифи-

цированной массы повышается с увеличением степени шаровидности используемых порошков и уменьшением размеров частиц.

Плотность сырого слоя при экструзионном способе регулируется подбором зернового состава шихты и давлением экструзии. Требуемая плотность слоя достигается составлением шихты из нескольких фракций. Основная часть (60—70%) высокоплотных шихт должна состоять из гранул как можно большего размера R . Однако R ограничен величиной зазора: $R \leq 0,15h_1$.

Давление экструзии выбирают в зависимости от вязкости пластифицированной массы, сложности покрываемой поверхности и ширины зазора (10—300 ат). Необходимое для получения равномерной плотности слоя давление экструзии повышается с увеличением вязкости пластифицированной массы, сложности конфигурации покрываемой поверхности и уменьшением ширины зазора. Так, при нанесении на шейку вала ($d=62$ мм) сырого слоя толщиной 2,4 мм из парафинированной смеси 75% гранул 0,2—0,3 мм и 25% ПМ давление экструзии принималось 60 ат.

Конструкция формы зависит от покрываемой поверхности изделия, чаще ее изготавливают из металла составной. Экструзионное давление пластифицированной порошковой массы при нанесении сырого слоя создается прессом, конструкцию и мощность которого выбирают в зависимости от формы и размеров покрываемого изделия. Прототипами экструзионного способа может служить технология нанесения порошковой массы на металлические стержни при производстве сварочных электродов и мундштучное прессование.

Операция нанесения сырого слоя легко автоматизируется; продолжительность нанесения зависит от размеров покрываемой поверхности и составляет 2—12 с. Чтобы ускорить процесс, форму изготавливают с двумя—тремя и более вводами. Минимальная толщина наносимого слоя h_1 зависит от размера изделия: для деталей малых размеров — 1,5, средних — 2 и крупных — 3 мм.

Напыление. Различают две разновидности этого способа: пульверизацию и термическое напыление.

В процессе пульверизации исходную массу под действием сжатого воздуха напыляют на поверхность изделия (рис. 9,а). Жидкотекучую массу готовят из мелких порошков (<50 мкм) и растворов бакелита, каучука,

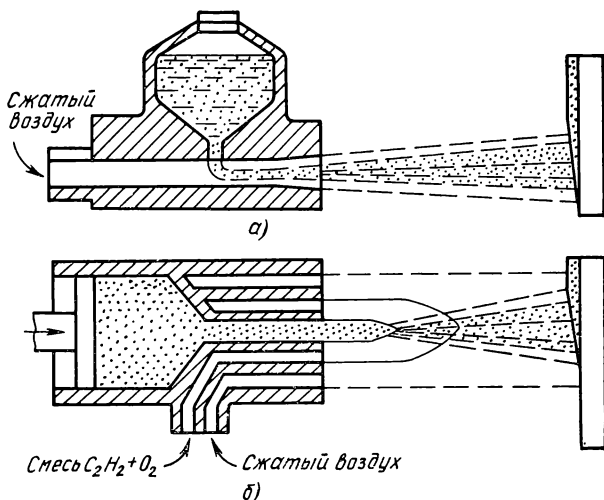


Рис. 9. Разновидности напыления

крахмала или смол. Эти компоненты обеспечивают наносимому слою целостность и хорошее сцепление с основой. Примером может служить жидкотекучая масса из 1 кг порошка ВК6 и 0,35 кг 10%-ного раствора каучука в бензине. Пульверизацией наносят слои толщиной 0,05—1,2 мм; многократным повторением операции толщину слоя можно увеличить до требуемых размеров.

При термическом напылении нанесенный материал представляет собой пористый конгломерат, состоящий из частиц металла и окислов. При металлизации термическое напыление используют как один из способов нанесения сырого слоя, а в большинстве случаев — как операцию нанесения подслоя. Чтобы расширить химический состав материалов для термического напыления и повысить производительность процесса, автор совместно с В. Мирзаевым предложил использовать в качестве исходного материала порошковую проволоку [3] и экструзионно-газотермический способ нанесения сырого слоя.

Технология производства порошковой проволоки для металлизации аналогична изготовлению порошковой проволоки для сварки. Исходным материалом оболочек служат ленты толщиной 0,5—1 мм из пластичных материалов (низкоуглеродистой стали, меди, никеля и т. д.),

наполнителем — порошки ферросплавов, твердосплавной смеси, окислов и т. д. (табл. 5). Для уменьшения окисления в шихту вводят углерод и водород (C_nH_m), отличающиеся высоким сродством к кислороду и образующие с ним газообразные продукты.

Сущность экструзионно-газотермического способа нанесения сырого слоя состоит в том, что порошковую пластифицированную массу (рис. 9,б) под давлением подают в зону максимальной температуры ацетилено-кислородного пламени. Расплавленные частицы подхватываются струей сжатого воздуха и наносятся на покрываемую поверхность. Свойства слоев, получаемых экструзионно-газотермическим способом, зависят от исходного материала и режимов нанесения, в общем они приближаются к свойствам покрытий, наносимых газовым термическим способом. Экструзионно-газотермический способ отличается высокой производительностью, им можно наносить покрытия из материалов в виде порошков.

Таблица 5. Состав некоторых марок порошковых проволок

Марка проволоки	Материал		Относительная масса шихты, %	Состав проволоки, %
	оболочки	шихты, %		
ППЖ24ВКЗ	Ст2	70ВКЗ, 30ПЖ1	34	24 W; 1,8 C; 0,6 Co, остальное Fe
ППН15Al ₂ O ₃	Никель	40 Al ₂ O ₃ , 56 Ni, 4 Al	38	15 Al ₂ O ₃ , 1,5 Al, остальное Ni
ППМ40W	Медь	80 W, 20 Cu	52	41 W, 59 Cu

Плакирующий способ. Заранее приготовленную по профилю покрываемой поверхности тонкостенную оболочку сопрягают с ней припрессованием (рис. 10) или фиксацией — механическим закреплением оболочки относительно основания (рис. 11).

Форма наносимой оболочки может быть плоской, цилиндрической и сложной. Изготовление и нанесение оболочек больших размеров и сложной конфигурации вызывает технологические трудности, поэтому такие оболочки выполняют составными из нескольких частей. Эти части (пластины) наносят на основание по одной, по несколько штук или все вместе.

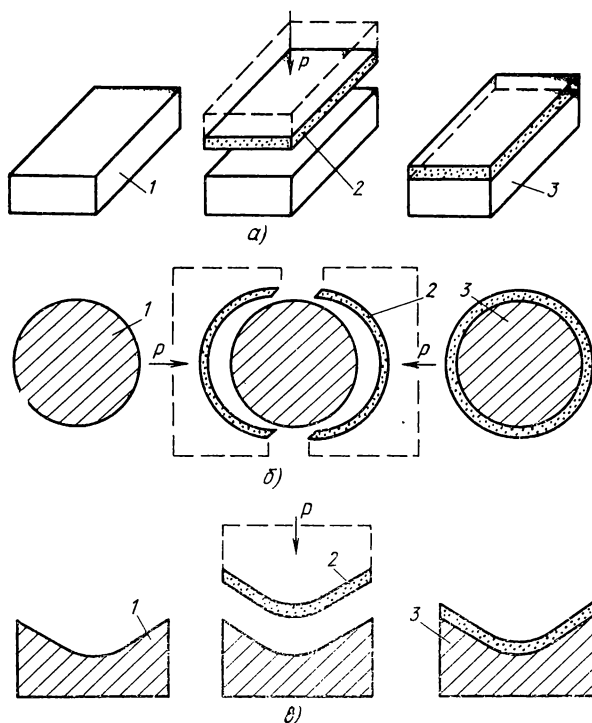


Рис. 10. Нанесение сырого слоя плакированием на поверхность: а — плоскую; б — цилиндрическую; в — сложной конфигурации: 1 — основание; 2 — оболочка; 3 — основание с нанесенным слоем

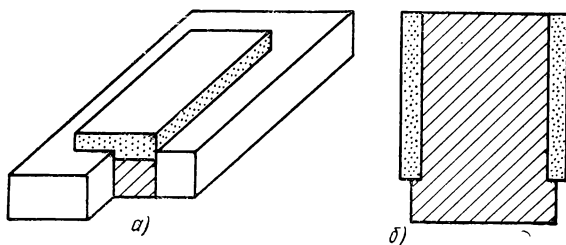
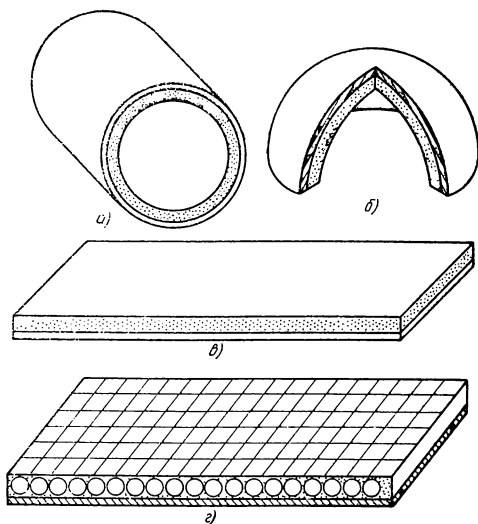


Рис. 11. Разновидности плакирующего способа нанесения сырого слоя: а — фиксация плоской оболочки; б — фиксация цилиндрической оболочки

Рис. 12. Гибкие оболочки:

а — порошковая на полиэтиленовой пленке для нанесения слоя на внешнюю цилиндрическую поверхность; *б* — порошковая на металлической фольге для нанесения слоя на внешнюю шаровидную поверхность; *в* — порошковая на полиэтиленовой пленке для нанесения слоя на плоскую и цилиндрическую поверхности; *г* — из композиционного материала (гранулы + порошок) на металлической фольге для нанесения слоя на плоскую поверхность



Весьма перспективно использование гибких оболочек, представляющих собой порошковый слой, нанесенный на полиэтиленовую пленку (рис. 12, *а* и *в*) или металлическую фольгу (рис. 12, *б* и *г*). Металлическую фольгу выбирают из металла с температурой плавления выше температуры спекания (Fe, Mo) при термомеханическом спекании. Фольга предохраняет пуансон от взаимодействия со слоем.

В ряде случаев используют фольгу из металла с $T_{пл} < T_{сп}$ (Zn, Al, бронза и т. п.); при нагреве фольга плавится, и жидкий металл, затекая в поры, интенсифицирует процесс спекания. Порошковый (гранулированный) слой наносят на оболочку напрессовкой, накаткой шликерным и другими способами, а слой из пластинок — шаговым пресс-автоматом. Форму покрываемой поверхности гибким оболочкам придают при их изготовлении или при нанесении. В первом случае оболочку изготавливают в виде целой детали (рис. 12, *а* и *б*), а во втором — в виде пленки различной ширины (рис. 12, *в* и *г*).

Технология нанесения гибкой оболочки на основание разнообразна. Ее можно припрессовывать давлением пуансона, гидростатическим давлением жидкости, приклеивать, накатывать и т. д. Давление припрессовывания

оболочки в зависимости от требуемых свойств слоя 0,5—12 тс/см².

Осаждение. К данной группе способов нанесения сырого слоя относятся электрофорез, осаждение в кипящем слое, осаждение из пересыщенных растворов и др. Техника осаждения электрофорезом предусматривает получение суспензии частиц дисперсностью 3—25 мкм в органическом диэлектрическом растворе и приложение постоянного напряжения 50—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 [11].

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 F или Cl, которые при взаимодействии с частицами образуют галоиды. Камера имеет нагреватели, поддерживающие температуру, при которой происходит разложение галоидов с выделением на изделиях слоя металла [6].

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

Выбор способа нанесения слоя зависит от характера производства, требуемых свойств и многих других факторов. Свойства, приведенные в табл. 6, в некоторой степени обобщенные, так как они даны без указания режимов нанесения и химического состава шихты. Описанные способы обладают высокой производительностью, дают возможность наносить слои из разнообразных материалов и различной толщины. Однако для некоторых из них характерны слои малой прочности и высокой пористости

Таблица 6. Некоторые характеристики способов нанесения и свойства получаемых ими слоев

Способ нанесения сырого слоя	Исходный материал		Проводи- тельность способа (относитель- ная оценка)	Свойства слоя		
				Толщина, мм	Порис- тость, %	Прочность
	Форма	Размер, мкм				
Напрессовка	Порошки, гранулы, стружка	1—2000	Высокая	0,5—10	5—25	2—16
Шликерный	Порошки	0,1—100	»	0,02—1,2	22—65	0,4—10
Формовочный	Порошки, гранулы	1—2000	»	1,5—8,0	18—45	0,6—12
Пульверизация	Порошки	1—100	»	0,06—1,2	25—65	0,4—6
Термическое напыле- ние	Порошки, прово- лока	1—5 мм	Средняя	0,1—4,0	5—20	50—200
Плакирование	Оболочки, пластины	Толщина 0,1—10 мм	Высокая	0,1—10,0	0—30	5—1000
Осаждение	Порошки	0,1—25	Средняя	0,10—2,0	3—25	—
Напыленно-прессовый	Порошки, гранулы, стружка	1—2000	Высокая	1,5—10	5—25	5—10
Напыленно-плакиро- вочный	Оболочки	0,1—10 мм	Высокая	0,4—10	0—30	5—1000
Шликерно-прессовый	Порошки	0,1—100	—	0,5—1,5	5—15	1,2—16
						0,4—2,6

Вследствие этого на практике нашли применение комбинированные способы нанесения сырого слоя: напыленно-прессовый, напыленно-плакировочный, шликерно-прессовый и др. Чтобы повысить прочность сцепления слоя, наносимого прессовым способом, на покрываемую поверхность термическим напылением наносят подслои толщиной 0,07—0,15 мм. Сочетание термического напыления с напрессовкой (напыленно-прессовый способ) обеспечивает слой с относительно высокими прочностными свойствами. Аналогичная цель преследуется нанесением подслоя при плакировочном способе.

Повышение плотности шликерных слоев достигается последующей подпрессовкой (шликерно-прессовый способ). Эту операцию выполняют обычно после удаления (возгонки) пластификатора. Сущность арматурно-шликерного способа нанесения сырого слоя состоит в том, что на покрываемой поверхности укрепляют арматуру, которую затем заполняют шликером или высокопластифицированной массой. При шликерно-плакировочном способе вначале наносят слой шликера, затем на него уже припрессовывают пластинки из исходного материала.

СПЕКАНИЕ

Основной технологической операцией металлизации является термическая или термомеханическая обработка — спекание, состоящая в нагреве исходных материалов в защитной (активной) среде или нагреве и приложении давления.

При спекании протекают различные физико-химические процессы: диффузия, химические реакции, усадка и пр. В результате спекания происходит улучшение (повышение) физико-механических свойств слоя и прочности его соединения с основанием. Процесс спекания состоит из нагрева, выдержки (спекания) и охлаждения.

Механические свойства металлизированных покрытий зависят не только от режимов спекания (температуры, продолжительности), но и от вида нагрева. Выбор вида нагрева определяется химическим составом исходных материалов, размерами изделия, режимами спекания, требуемыми свойствами, характером производства и т. д.

В зависимости от механизма передачи энергии различают конвективный лучистый и генерируемый нагрев. По характеру изменения скорости (v_n) нагрев может

проходить с постоянной скоростью $v_n = dT_n/dt = \text{const}$ (где T_n — температура нагрева, °C; t — продолжительность нагрева, с) и неравномерной скоростью $dT/dt \neq \text{const}$.

Скорость нагрева регулируется температурой и мощностью источника теплоты и может быть низкой (<1), средней (1—5) и высокой ($>5^\circ\text{C}/\text{с}$). Низкая скорость нагрева имеет место в двух-, трехзонных печах, в печах с периодическим нагревом и других установках. Средняя скорость нагрева характерна для однозонных печей и контактного нагрева. Высокая скорость нагрева достигается использованием ТВЧ, электронного луча и других источников. Скорость нагрева определяет продолжительность операций и целостность слоя. При низкой скорости нагрева увеличивается продолжительность, а при высокой возможно разрушение слоя за счет быстрого испарения пластификатора или различного расширения материала слоя и основания.

Градиент температуры dT/dx зависит от скорости нагрева, химического состава и структуры (пористости) исходных материалов, механизма нагрева, размеров заготовки и многих других факторов. Он повышается с увеличением скорости нагрева поверхности, уменьшением теплопроводности, увеличением размеров и т. д.

Нагрев бывает общий, частично-объемный и поверхностный. При общем нагреве весь объем заготовки нагревается до температуры спекания; при частично-объемном — выступающая часть заготовки (шейка оси, палец крестовины и др.), при поверхностном — наносимый слой и близлежащие к нему слои основания. Последний вид нагрева отличается от первого высоким градиентом температуры.

Классификация способов нагрева при металлизации (рис. 13) отражает технологические особенности, оборудование, вид и другие факторы нагрева. В данное время наибольшее применение в металлизации получило спекание в печах, характеризующееся нагревом всего изделия (заготовки со слоем) до температуры спекания. Один из перспективных способов — индукционный нагрев (ТВЧ), так как он обеспечивает нагрев слоя без значительного термического влияния на материал основания. Для спекания используют как поверхностный эффект, так и эффект близости. Источниками ТВЧ могут быть ламповые и двигатель-генераторные установки

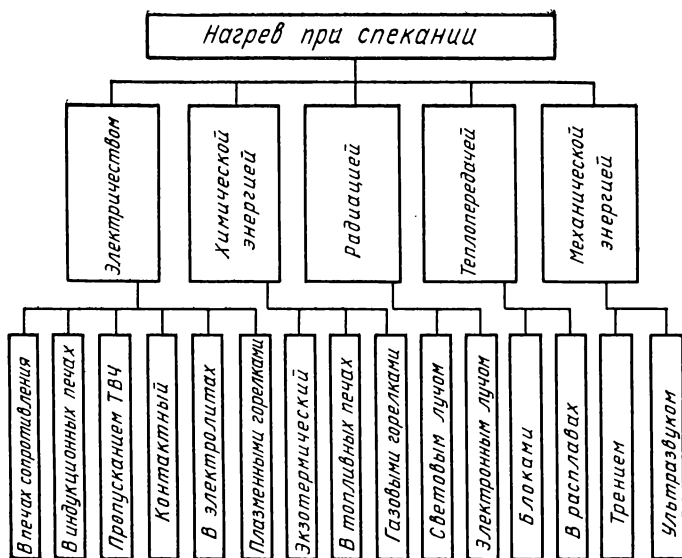


Рис. 13. Классификация способов нагрева при металлровании

ПВ-50-2500, ПВ-100-8000, ЛЗ2-67 и т. д. [30]. Термообработка при спекании происходит в защитной атмосфере, поэтому В. А. Мартыновым, Н. В. Авдеевым, В. П. Петренко, Р. Г. Березиным сконструировано несколько специализированных установок (МАПБ-1, МАПБ-2 и др.) с нагревом ТВЧ в среде водорода.

При электроконтактном нагреве наибольшее количество теплоты выделяется в слое, так как он вследствие пористости имеет обычно наибольшее сопротивление. Источниками электроконтактного нагрева могут служить преобразователи, предназначенные для контактной сварки. Источники малой мощности используют для нагрева слоя роликами или отдельных частей слоя (пластинок). Нагрев слоев значительных размеров требует источников большой мощности (100 кВт). Электроконтактный нагрев применяют обычно при термомеханической обработке.

Нагрев слоя сопротивлением в электролитах происходит за счет теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока через газовую прослойку, которая соз-

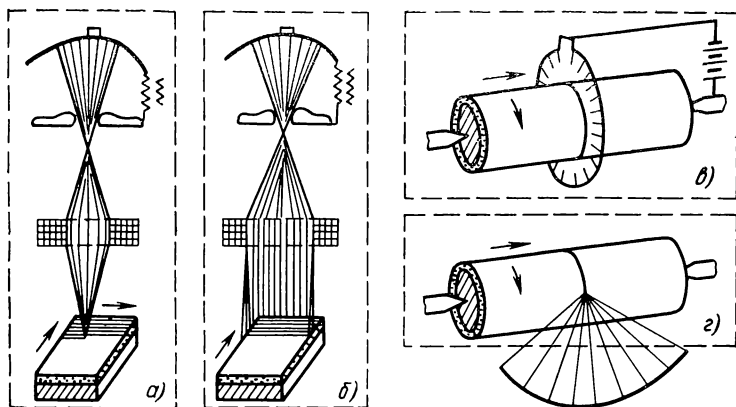


Рис. 14. Радиационные способы нагрева:

а, б — электронным лучом с ускоряющим электродом (анодом); *в* — то же без ускоряющего электрода; *г* — концентрированным лучом света

дается на поверхности изделия при выделении из раствора водорода. При нагреве погружением заготовку или ее часть окунают в расплавы флюса или материал пропитки. В качестве исходных компонентов флюса используют соли, окислы и т. п., которые обычно применяют при производстве сварочных флюсов и флюсов для пайки [30]. Материалы пропитки — сплавы металлов (припой) или сплавы окислов и солей, применяемых при эмалировании.

Нагрев электронным лучом происходит за счет перехода кинетической энергии электронов в тепловую при их ударе о поверхность. Энергия электронов проникает достаточно глубоко и расплавляет металл на глубине 50—100 мм. Регулируя скорость электронов и интенсивность электронного луча, можно добиться, чтобы основная часть его энергии шла на нагрев слоя.

Обычный электронный луч имеет коническую форму. Для металлизации желательно иметь такое фокусирующее устройство, которое обеспечило бы прямоугольную форму пятна с равномерной интенсивностью электронного потока (рис. 14, б). На схемах *а* и *б* представлена система формирования пучка (пушки) с разгоняющим анодом, на схеме *в* — однокаскадная система без ускоряющего электрода, в которой разгоняющее напряжение создано между катодом и изделием. Эта схема

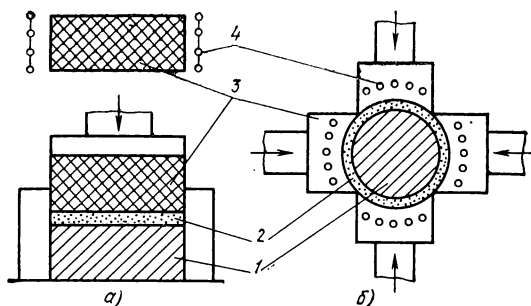


Рис. 15. Нагрев блоками:

а—с переменной температурой; *б*—с постоянной температурой; 1—основание; 2—сырой слой; 3—блок; 4—нагреватель

применяется при нанесении покрытий на ответственные детали цилиндрической формы. Исследование возможности использования схемы *в* для нагрева поверхностей плоской и сложной конфигурации дало положительные результаты.

Большой интерес для спекания сырых слоев вызывает применение сфокусированной лучистой энергии различных источников — солнца, вольтовой дуги, кварцевых ламп и т. п., излучающих энергию в оптическом диапазоне частот. Нагрев слоя лучом света имеет некоторые преимущества по сравнению с другими способами, а именно: возможность термообработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактный подвод энергии к изделию (причем источник и нагреваемый объект могут быть расположены на значительном расстоянии друг от друга); передача энергии через оптически прозрачные оболочки, что позволяет проводить спекание в контролируемой газовой атмосфере и в вакууме. В установках для термообработки сырых слоев световым лучом можно использовать такие источники излучения, как солнце, угольная дуга и дуговые газоразрядные лампы.

Газовые и плазменные горелки, применяемые для резки и сварки металлов, могут быть использованы и для нагрева слоя при металлизации. При этом горелки с ацетилено-кислородным пламенем для нагрева слоев с самофлюсующей шихтой (Ni—Cr—B, FeB, FeP, CuP и т. д.), а плазменные — для нагрева в среде защитных газов (Ar, H₂, N₂).

Своеобразный вид нагрева слоев при их термообработке — нагрев блоками (рис. 15). Сущность его заключается в том, что блок, нагретый до 0,75—0,95 темпера-

туры плавления материала слоя, прижимают к покрываемой поверхности. Существуют две разновидности нагрева блоками: с переменной температурой — блок нагревается до необходимой температуры (в печи), прижимается к покрываемой поверхности и охлаждается вместе с заготовкой (рис. 15, а); с постоянной температурой — внутри блока находится нагревательное устройство, которое поддерживает температуру блока на постоянном уровне (рис. 15, б).

К специальным способам нагрева слоя относятся экзотермический, ультразвуковой и трением. Если шихта слоя состоит из экзотермической смеси, в процессе химической реакции происходит выделение теплоты, которой в ряде случаев достаточно для повышения температуры слоя до температуры спекания. Если выделяемой теплоты недостаточно для получения качественного покрытия, основание подогревают. Экзотермический способ нагрева экономичен, производителен, не ограничен по сложности конфигурации деталей.

В отдельных случаях нанесение покрытий сводится к образованию связи между оболочкой (пластинами) и основанием. Эта операция может быть осуществлена сваркой трением или ультразвуком. Прочное соединение при сварке трением образуется в результате возникновения химических (металлических) связей между ювенильными контактирующими поверхностями при их совместной пластической деформации. Для получения требуемой деформации металл доводят до состояния повышенной пластичности с помощью теплоты, возникающей при трении. Механическая энергия преобразуется в тепловую строго локализованно в тонких приповерхностных слоях металла. Эта особенность процесса предопределяет основные преимущества метода нагрева трением в металлизации.

В начальный момент действия ультразвуковых колебаний на контактирующих поверхностях возникает сухое трение, приводящее к разрушению окисных пленок и пленок из адсорбированных газов и жидкостей. После появления ювенильных поверхностей процесс сухого трения переходит в чистое трение, которое сопровождается выделением теплоты. Нагрев при использовании ультразвука происходит в результате трения, вызванного микроскопическим возвратно-поступательным перемещением трущихся поверхностей.

С технологической точки зрения спекание — это выдержка материала слоя, а соответственно и материала основания в условиях температуры спекания. В период этой выдержки самопроизвольно вследствие неравномерности химического потенциала и стремления системы к минимуму энергии протекают физико-химические процессы (диффузия, ползучесть, усадка и др.), которые и определяют свойства материала покрытия.

Основные параметры спекания — температура и продолжительность нагрева ($T_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}$). Относительно температуры плавления материала слоя ($T_{\text{пл1}}$) температура спекания может быть низкой (0,4—0,55), средней (0,55—0,8) и высокой (0,8—0,95 $T_{\text{пл1}}$), а относительно температуры плавления материала основания ($T_{\text{пл.о}}$) соответственно 0,4—0,5, 0,5—0,75 и 0,75—0,9 $T_{\text{пл.о}}$. По продолжительности спекание бывает кратковременное (<10), малой продолжительности (10—300), средней продолжительности (300—1200) и большой продолжительности (>1200 с). В большинстве случаев $dT_{\text{сп}}/dt_{\text{сп}}=0$, т. е. $T_{\text{сп}}=\text{const}$. Однако имеются режимы, при которых $dT_{\text{сп}}/dt_{\text{сп}}\neq 0$. Так, например, для активации спекания принимают циклическое изменение ее в зоне температур структурных превращений, сверхпластичности и т. д.

Кроме этого, спекание характеризуется температурным полем в слое и основании — температурными градиентами:

$$\frac{dT_{\text{сп}}}{dz(x, y)} = f(x, y, z).$$

При малой скорости нагрева или продолжительной выдержке

$$dT_{\text{сп}}/dz(x, y) \approx 0; \quad \Delta T_{xyz} = \text{const}.$$

Если со стороны покрытия имеется источник теплоты, а с противоположной — сток (холодильник), то в период спекания может установиться переменное поле температур $dT_{\text{сп}}/dx(y, z) \neq 0$, в котором температура каждой точки остается постоянной, т. е. $dT_{xyz}/dt_{\text{сп}}=0$.

Припекание сырых слоев к основанию с использованием переменных температурных полей обеспечивает снижение термического влияния на материал основания и получение покрытий с малыми напряжениями.

Средой спекаемого изделия может быть газообразная атмосфера, жидкость, твердое вещество или их сме-

си. Существуют три типа атмосфер: нейтральная, активная и вакуум. Нейтральная атмосфера выступает в роли защитной среды. Для ее создания используют 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, так же как и активные газовые среды, защищает исходные материалы от окисления и способствует удалению окислов. Понижения в атмосфере парциального давления кислорода, а соответственно повышения восстановительной способности среды достигают многократным вакуумированием с последующим заполнением нейтральным газом.

При спекании сырых слоев в качестве среды, обеспечивающей защиту от окисления и восстановление окислов, можно использовать жидкость флюсовую и металлическую. В зависимости от физико-химических свойств исходных материалов применяют следующие компоненты флюса: соли $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, KCl , NaCl , NaF , окислы SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , кислоты (HCl), а также вещества органического происхождения. Состав флюса подбирают с учетом того, чтобы температура его активного состояния равнялась температуре спекания. Металлическая жидкая среда представляет собой расплавы металлов или их сплавов, наибольшее применение из которых находят сплавы (припой) на основе серебра (PCr90 , PCr45), меди (ПМЦ 48 , ПМЖФ , ...) и никеля (Ni—В—Cr—Si , Ni—Mn).

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. При

спекании деталей небольших и средних размеров часто используют засыпку из смеси порошков окиси алюминия и 1—3% С.

Охлаждение, так же как и две предыдущие операции, влияет на свойства покрытия и всей детали, на которую наносится покрытие. Характеристики охлаждения следующие:

1) скорость охлаждения $v_{ox} = dT_{ox}/dt_{ox}$, где T_{ox} — температура при охлаждении, °С; t_{ox} — продолжительность охлаждения, с. Скорость охлаждения бывает очень низкая ($<0,2$), низкая ($0,2—1$), средняя ($1—10$), высокая ($10—50$) и очень высокая ($<50^\circ\text{C}/\text{c}$);

2) температурное поле в слое и основании — температурные градиенты dT_{ox}/dz . При очень малой и малой скорости охлаждения $dT_{ox}/dz \simeq f$, где f — относительно небольшая величина. При наличии мощных стоков теплоты (охлаждающей среды) градиенты температуры достигают значительных размеров. Создавая искусственно необходимое поле температур во весь период охлаждения, можно значительно снизить или свести к нулю возникающие в покрытии термические напряжения;

3) среда; охлаждение обычно происходит в той же среде, что и спекание. Однако с изменением температуры изменяются и свойства среды. В некоторых случаях активная среда при температуре спекания становится нейтральной и даже окислительной при низких температурах. Например, при температуре 1250°C водород (с точкой росы -20°C) по отношению к хрому — активная среда, а при температуре менее 1000°C — окислительная среда.

Среда отдельных операций спекания может быть различной; например, нагрев 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 термообработке слоев интенсифицирует процессы спекания и припекания их к основанию. Вследствие этого давление значительно влияет на свойства получаемых покрытий. Прикладываемое при термомеханической обработке давление характеризуется видом действующей силы, величиной и продолжительностью действия.

В зависимости от характера действия силы создается статическое или динамическое давление (рис. 16).

Рис. 16. Характеристика давления при термомеханической обработке:
 а — статическое; б — динамическое; 1 — без приложения колебаний; 2 — с приложением колебаний; 3 — ударное; 4 — виброударное

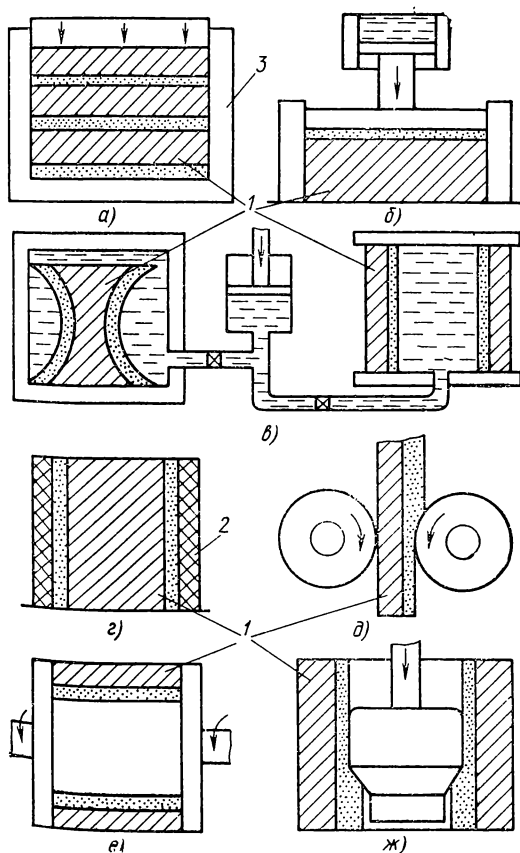
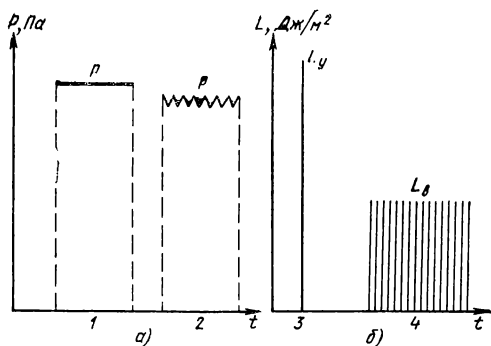


Рис. 17. Способы приложения статической нагрузки:
 1 — заготовка (основание); 2 — графитовая форма; 3 — лодочка

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 (рис. 17) может быть создано под действием веса покрываемой детали или специально устанавливаемого груза (*а*); силы прессового механизма (*б*); гидростатического или газостатического давления (*в*); сил, вызываемых различным расширением сопряженных при нагреве материалов со значительно отличающимися коэффициентами линейного расширения (*г*); прокатки между валками, накатки роликами и т. д. (*д*); сил инерции при быстром вращении втулки (*е*); прогонки нагретой заготовки через конусные пресс-формы (для цилиндрических изделий — через фильтры) или прошивки (*ж*).

Давление при статическом сжатии бывает низкое (2,0), среднее (2—300) и высокое (>300 МПа), а при динамическом соответственно 50, 50—500 и более 500 кДж/м².

По продолжительности действия давление может быть мгновенное (<1 с), кратковременное (1—60 с), средней продолжительности (1—15 мин), продолжительное (>15 мин). Низкое статическое давление применяют обычно при высокотемпературном продолжительном спекании. Высокие статические давления применяют кратковременно при средних температурах нагрева. Ударное воздействие протекает мгновенно, а виброударное — кратковременно.

ТЕХНОЛОГИЯ СПЕКАНИЯ

Технологию спекания классифицируют в зависимости от характера нагрева, величины и способа приложения нагрузки и других факторов (рис. 18). Спекание подразделяют на термическое и термомеханическое. При термообработке 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.

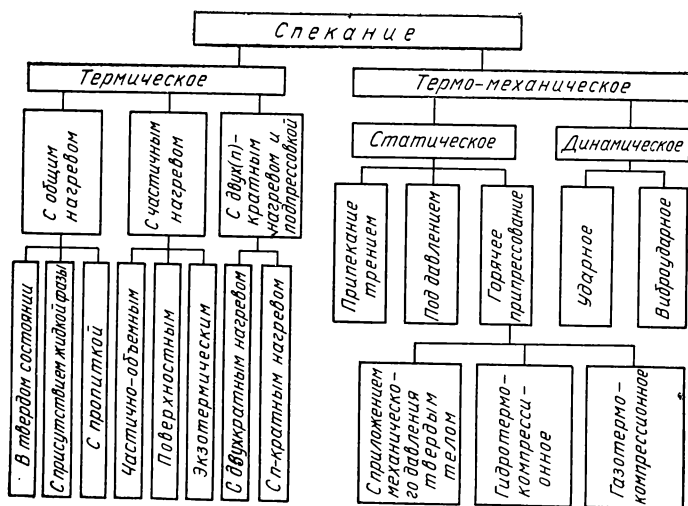


Рис. 18. Классификация способов спекания сырого слоя при металлровании

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

Спекание с общим нагревом — нагрев в защитной атмосфере всей заготовки. В отличие от порошковой металлургии режимы спекания выбирают с учетом не только материала слоя ($T_{пл1}, \alpha_1$), но и материала основания ($T_{пл.о}, \alpha_о$, где $\alpha_о, \alpha_1$ — температурный коэффициент линейного расширения соответственно материала основания и слоя, $1/^\circ\text{C}$).

На выбор режимов спекания слоя в основном влияют соотношения $T_{пл1}/T_{пл.о}, \alpha_1/\alpha_о$, а также их химическое взаимодействие при температуре спекания. Если $T_{пл.о} > T_{пл1}$ то принимают высшие пределы рекомендуемых температур спекания ($0,85\text{—}0,95 T_{пл1}$) и минимальную выдержку (10—25 мин); при $T_{пл.о} \approx T_{пл1}$ выбирают средние пределы рекомендуемых $T_{сп}, t_{сп}$, а при $T_{пл.о} < T_{пл1}$ — низкий по температуре и максимальный по времени. При $\alpha_о \gg \alpha_1$ применяют переменное поле температур или другие приемы.

На рис. 19 представлены разновидности режимов нагрева, спекания и охлаждения порошковых слоев при металлровании. Режим *a* характеризуется постоянной

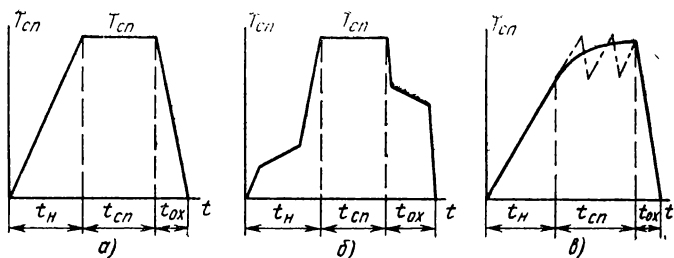


Рис. 19. Термические режимы спекания:

a — $v_n = \text{const}$; $T_{cn} = \text{const}$; $v_{ox} = \text{const}$; *б* — $v_n \neq \text{const}$; $T_{cn} = \text{const}$; $v_{ox} \neq \text{const}$; *в* — $v_n = \text{const}$; $T_{cn} \neq \text{const}$; $v_{ox} = \text{const}$

скоростью нагрева, постоянной температурой спекания и постоянной скоростью охлаждения. При спекании слоя по технологии с общим нагревом принимают обычно низкие скорости нагрева и охлаждения. В некоторых случаях (*б*) скорости нагрева и охлаждения подбирают неравномерными: при нагреве — замедленная в зоне температур испарения (выгорания) пластификатора, а при охлаждении — замедленная в зоне температур структурных превращений, связанных с изменением объема.

Режим *в* характеризуется неравномерностью температуры спекания. Режим, соответствующий сплошной линии, обеспечивает равномерную и относительно малую скорость усадки, а следовательно, и малые напряжения, возникающие при спекании. Режим, соответствующий штриховой линии, обеспечивает интенсификацию процесса спекания (усадку, рост плотности и т. д.) и снижение вредного термического воздействия на материал основания.

Спекание с общим нагревом подразделяют на спекание в твердом состоянии, с присутствием жидкой фазы и с пропиткой. Хотя в основу этого разделения положено различие фазового состояния в процессе спекания, оно отражает также и технологические особенности каждой операции.

Спекание с общим нагревом производят в печах или специальных установках, где через заготовку пропускают электрический ток. В простейшем случае для спекания пригодны обычные печи, предназначенные для термообработки деталей. Спекаемые изделия загружают в коробки и добавляют специальные засыпки, создающие инертную или восстановительную атмосферу внут-

ри коробки. Для обеспечения высокой производительности и качества необходимы специализированные печи с защитной атмосферой.

Печи для металлизации подразделяют 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 единичном и мелкосерийном производстве, специальные — при крупносерийном и массовом производстве. К универсальным обычно относят печи периодического воздействия — 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 (рис. 20). В таких печах ло-

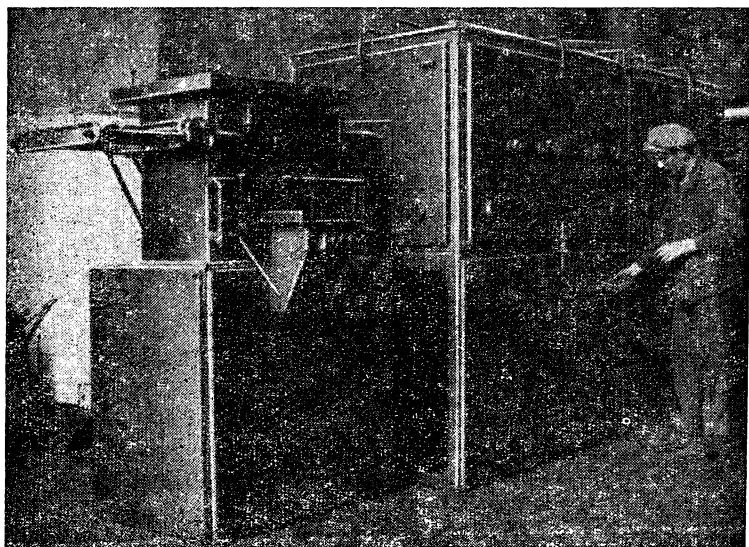


Рис. 20. Трехзонная печь с защитной атмосферой типа СШЗ

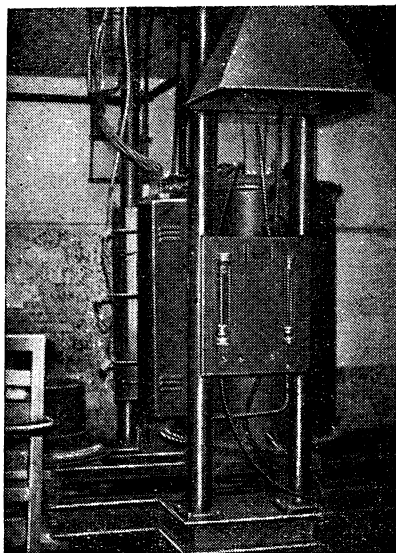


Рис. 21. Колпаковая печь БМЗ-12

дочки или поддоны со спекаемыми изделиями проталкиваются толкателем или двигаются по конвейеру из загрузочного тамбура через нагретую зону спекания печи в холодильник и затем вручную или при помощи конвейерной ленты выдаются наружу.

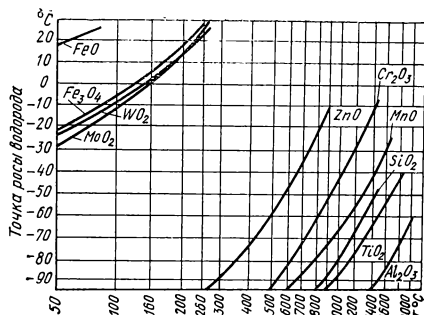
Конвейерные роликовые печи обычно работают до температур 1100—1150°C, а при более высоких температурах используются толкательные печи, в которых поддоны (лодочки) движутся непосредственно по поду

печи. Толкательные печи используют обычно для деталей малых и средних размеров. Детали средних и крупных размеров спекаются в камерных и колпаковых печах (рис. 21). В массовом производстве для металлизации можно применять печи, отапливаемые природным газом как наиболее дешевым источником энергии.

Все применяемые для спекания с общим нагревом печи должны иметь защитную атмосферу (табл. 7). Основное требование к атмосфере спекания — обеспечение таких условий, при которых не происходило бы нежелательных взаимодействий исходных материалов (слоя и основания) с элементами окружающей среды (насыщение газами, контактное взаимодействие и т. д.).

В большинстве случаев желательно, чтобы присутствующие в печи газы восстанавливали окислы. Вероятность и скорость восстановления окислов исходных материалов зависят от насыщенности газа влагой (точки росы) и температуры спекания (рис. 22). Для Fe, Cu, Ni, Co, W, Mo равновесное содержание паров H_2O могут составлять при обычных температурах спекания несколько десятков процентов. Поэтому наличие влаги в атмосфере в количествах, не превышающих равновесные,

Рис. 22. Зависимость точки росы водорода от температуры обратимых реакций между окислителями металлов и водородом [30]



не препятствует протеканию спекания, хотя в этих условиях может замедляться восстановление окислов.

Для ряда высокоактивных по отношению к кислороду металлов (Cr, Ti, Be и др.) присутствие малейших следов кислорода или паров воды недопустимо в связи с образованием окислов, затрудняющих спекание и снижающих пластичность. Вследствие этого металлы, имеющие высокое сродство к кислороду, спекаются в защитной атмосфере с газообразными флюсами или в вакууме.

Газообразный флюс получают в специальном диссоциаторе, из которого его подают в зону спекания. Иногда продукты, при термическом разложении которых образуется газообразный флюс, вносят непосредственно в контейнер, печь и т. п. Газообразные флюсы получают из фтористого аммония NH_4F , хлористого аммония NH_4Cl разложением их при нагреве до температуры 700—950°C. На практике газообразные флюсы добавляют в инертные или активные атмосферы в количестве 0,2—0,5 %, а в засыпку или в шихту слоя вводят NH_4F , NH_4Cl в количестве 0,2—0,5 %.

Одно из преимуществ использования печей с газовой атмосферой — возможность совмещения спекания слоя

Таблица 7. Состав (%) и точка росы газовых сред

Атмосфера	H_2	CO	N_2	H_2O	Точка росы, °C
Водород	100	—	—	0,01	—15,—60
Диссоциированный аммиак	75	—	25	0,02	+5,—40
Продукты неполного сгорания аммиака	7—20	—	Остальное	0,01	—15,—40
Продукты сгорания горючего газа	14—15 38—40	9—10 17—19	70—71 41—55	0,8 0,1	+20,—10 +5,—20

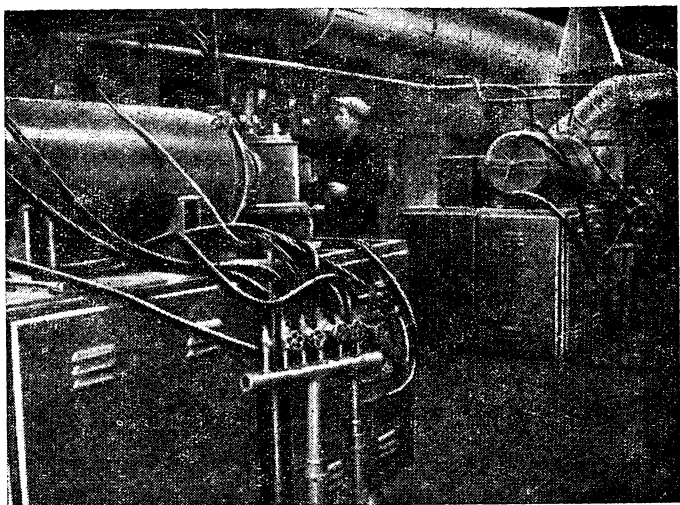


Рис. 23. Однокамерная вакуумная печь; $T_{\text{ж}} = 1250^{\circ}\text{C}$; вакуум — 10^{-4} — $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

с его химико-термической обработкой — науглероживанием, азотированием, борированием и т. п. Легирующие компоненты подают в атмосферу печи в виде газообразных соединений (C_nH_m) или порошка (B_4C) в засыпку (Al_2O_3).

Наиболее высокими свойствами обладают покрытия, полученные после спекания в вакууме. Это объясняется возможностью испарения и диссоциации окислов и вообще благоприятными условиями для рафинирования при вакуумном спекании. Материалы с малым сродством к кислороду (Fe, Cu, Ni, Mo, W) спекаются в вакууме 10^{-2} — 10^{-3} , а с большим сродством (Cr, Ta) в вакууме 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст. Однако по экономическим соображениям вакуум используют только в случаях, когда другие газовые атмосферы не дают нужных результатов.

Вакуумные печи, так же как и печи с газовой атмосферой, подразделяются по технологическим признакам на универсальные и специальные; по принципу работы — на периодические и поточные; по конструктивным признакам — на колпаковые, однокамерные, многокамерные и т. д. (рис. 23). Спекание покрытий в вакууме развивается в двух направлениях: использование многокамер-

ных печей со ступенчатым изменением вакуума; применение специальных печей, форма и размеры камер которых соответствуют покрываемому изделию.

Общий нагрев применяют главным образом для спекания сырых слоев, нанесенных напрессовкой с большим давлением, плакированием, термическим напылением и электрофорезом. Наибольшее применение спекание с общим нагревом нашло для слоев, шихта которых при температуре спекания содержит жидкую фазу.

С технологической точки зрения существуют несколько разновидностей операции спекания с пропиткой. Материал пропитки в виде пластифицированной массы, оболочки и т. д. наносят на сырой слой и нагревают (рис. 24, а); в процессе его расплавления образуется жидкость, которая заполняет поры спекаемого слоя. Материал пропитки можно размещать в воронках, откуда он при нагреве вытекает и заполняет поры слоя (рис. 24, б). В отдельных случаях в зазор между изделием и формой заливают жидкий металл. Наиболее перспективен способ спекания с пропиткой погружением заготовки с сырым слоем в расплавы металлов (рис. 24, в).

Температуру спекания с пропиткой принимают выше $T_{пл}$ материала пропитки на 50—150°C и более. Продолжительность пропитки $t_{п}$ можно определить по формуле, составленной на основании уравнения Пуазейля:

$$t_{п} = k_1 k_2 \pi^2 \frac{h_1 \eta}{\sigma_{п} r},$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий технологические факторы (среда, скорость нагрева и т. д.), $k_1 = 1,05 \div 1,3$; k_2 — коэффициент увеличения времени, необходимого для выравнивания химического состава (свойств), $k_2 = 1,05 \div 1,2$; h_1 — толщина сырого слоя; η — вязкость жидкой фазы; r — средний радиус капилляров; $\sigma_{п}$ — поверхностное натяжение жидкой фазы.

На практике принимают $t_{п} = 5 \div 20$ мин.

При металлизации в качестве пропитывающего материала используют материалы, применяемые для этих целей в порошковой металлургии, и припой. Скорость пропитки зависит от смачиваемости (θ), которая, в свою очередь, определяется химическим составом исходных материалов, состоянием поверхности частиц порошка и режимами спекания. Повышение скорости и качества пропитки достигается нанесением на поверхность частиц

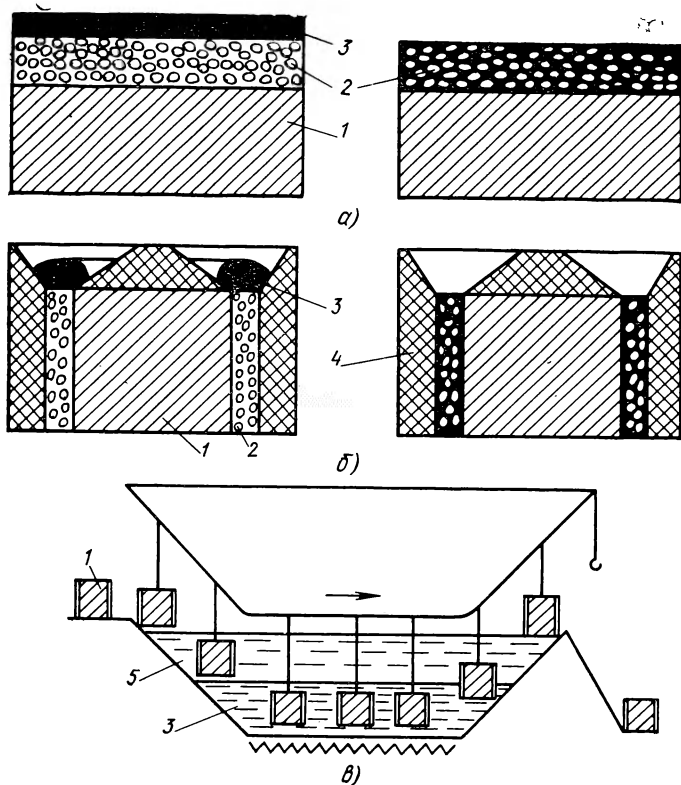


Рис. 24. Спекание с пропиткой:

а — при расплавлении верхнего слоя; *б* — при затекании (заливке) расплава; *в* — при погружении в расплав; 1 — основание; 2 — порошковый слой; 3 — материал пропитки; 4 — форма; 5 — флюс

активирующих прослоек, применением вакуумной обработки и т. д. Количество материала пропитки принимается исходя из требуемых свойств конечного материала покрытия и из ограничений, связанных с его пористостью.

Спекание с пропиткой займет должное место в практике металлопокрытия, так как пропитка слоев проходит быстро, а получаемые механические свойства высокие даже при использовании порошков крупной градации или гранул.

Спекание с частичным нагревом возможно путем нагрева слоя и той части заготовки, к которой прилегает

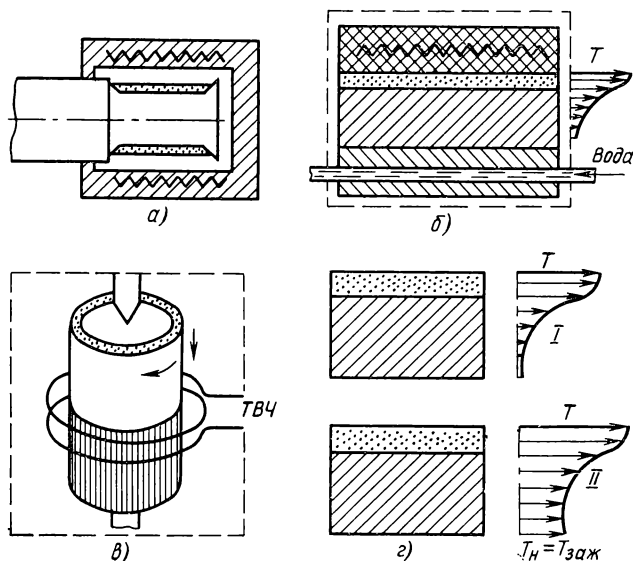


Рис. 25. Спекание:

а — с частично объемным нагревом в муфельной печи; б — с поверхностным нагревом (блоком) с одной стороны и охлаждением с другой; в — поверхностным нагревом ТВЧ; г — экзотермическим нагревом

покрытие. Спекание с частичным нагревом подразделяют на спекание с частично объемным нагревом, спекание с поверхностным нагревом и экзотермическое спекание.

В процессе спекания с частично объемным нагревом нагревают лишь ту часть заготовки, на которую нанесен сырой слой (выступающие части изделия — концевые шейки осей, пальцы кронштейнов и т. п.). Спекание с частично объемным нагревом требует меньше энергии, снижает объем материала изделия, подвергаемого термическому влиянию, и т. д. Для нагрева используют специальные муфельные печи, рабочая зона которых соответствует размерам и форме покрываемой части изделия (рис. 25, а).

При спекании с поверхностным нагревом нагревается сырой слой и поверхностный слой основания, на который нанесено покрытие. При этом в поверхностном слое основания создается высокий градиент температур. Это достигается использованием высококонцентрированных

источников теплоты и мощных стоков тепловой энергии. В качестве высококонцентрированных источников теплоты при поверхностном нагреве используют ТВЧ, электронный луч, высокотемпературные блоки и др.

Сток теплоты может происходить через массу изделия (для средних и крупных деталей) или искусственно создаваемые холодильники (медные охлаждающие колодки, проточная вода, газ и т. п.) (рис. 25, б). Заготовку с сырым слоем устанавливают на медный охлаждаемый водой холодильник. Сверху на сырой слой укладывают блок с постоянной температурой ($T=1,02 \div 1,1 T_{\text{сп}}$), выдерживают 10—60 мин в камере с защитной атмосферой. Материал блока — графит или керамика, в отдельных случаях молибден с покрытиями, предотвращающими взаимодействие молибдена с материалом слоя.

Более характерно для спекания с поверхностным нагревом использование ТВЧ. Заготовки с сырым слоем устанавливают в камеру с защитной атмосферой (рис. 25, в). ТВЧ подают к неподвижно закрепленному индуктору. Для равномерного и полного прогрева материала слоя исходную заготовку вращают и перемещают относительно одно- или двухвиткового индуктора (рис. 26). Возможно применение многовитковых индукторов, охватывающих всю покрываемую поверхность. В этом случае необходимо вращение и для отдельных деталей — охлаждение (через внутреннее отверстие вала пропускают воду). Отвод теплоты для деталей плоской конфигурации осуществляется по схеме, представленной на рис. 25, б. Управление процессами вращения, перемещения, выключения должно быть полностью автоматизировано. Процесс спекания контролируется визуально (через глазок) или автоматически специальными устройствами, установленными в камере.

Механизм нагрева наносимого материала ТВЧ при металлизации отличается от нагрева ТВЧ при наплавке. В последнем случае присадочный материал расплавляется от теплоты, генерируемой ТВЧ в поверхностном слое основания. При металлизации же теплота генерируется непосредственно в сыром слое. Это достигается тем, что сырой слой наносят плакированием с использованием оболочек (пластин) с высокой плотностью или другими способами, но перед спеканием осуществляют выжигание пластификатора (200—500°C) и под-

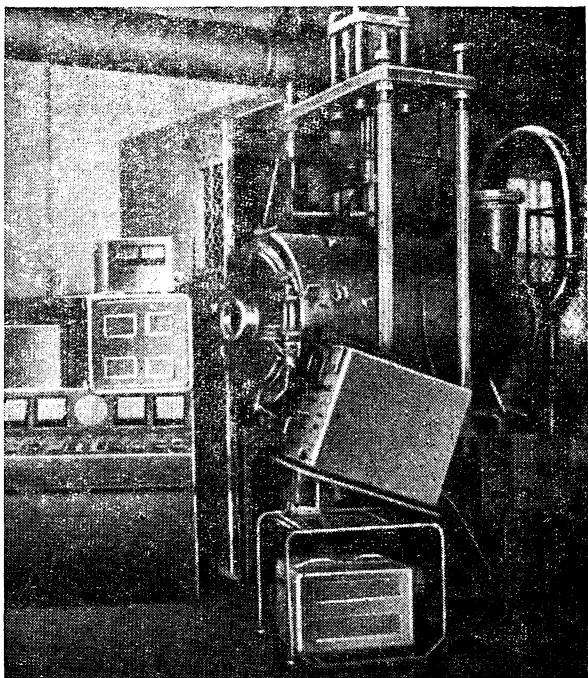


Рис. 26. Установка для спекания с поверхностным нагревом сырого слоя

прессовку, которые и обеспечивают слою необходимые электрические свойства.

Спекание с поверхностным нагревом возможно также использованием энергии электронного и световых лучей. Промышленность выпускает установки для электронной сварки (УВ, ЭЛУ-1 и т. д.). Их с успехом можно применить для нанесения покрытий на плоские поверхности по схеме рис. 14, а и на цилиндрические по схеме рис. 14, г. Наибольшая производительность достигается при использовании установок типа С248М и т. п., в которых нагрев осуществляется электронным лучом по однокаскадной схеме (см. рис. 14, в). Изготовление специализированных установок с автоматическим управлением процессом обеспечит высокую производительность припекания покрытий на детали средних и крупных разме-

ров. Производительность можно повысить, используя одновременно два, три катода и более.

Перспективно поверхностное спекание с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Если на поверхность заготовки нанести порошковый слой экзотермической смеси и инициировать (возбудить) их взаимодействие, то в результате реакции создается новое вещество, из которого и образуется покрытие, прочно сцепленное с основанием. Для компонентов смеси (термитной) используют с одной стороны порошки (Ti, Zr, Hf, V, Ta, Nb и др.), а с другой — элементы (N, C, Si, B, H) или химические вещества (SiC, B₄C и т. п.).

Порошковый слой может также состоять из смеси двух металлов: Ni—Al, Fe—Al и т. п., при взаимодействии которых образуются интерметаллические соединения. Смесь порошков Ni—Al (3—20 мкм) напрессовывали на стальную пластину толщиной 25 мм под давлением 100, 500, 1000 МПа (1, 5, 10 тс/см²). Реакция взаимодействия Ni—Al возбуждалась нагревом (электронным лучом).

Определяли условия самопроизвольного протекания реакции и свойства покрытий. Реакция химического взаимодействия тонких слоев высокой пористости протекала лишь при нагреве основания выше температуры зажигания $T_{\text{заж}}$ под воздействием распушенного электронного луча ($T_{\text{заж}}$ — температура начала активного химического взаимодействия исходных компонентов термитной смеси). В высокоплотных слоях большой толщины реакция протекает самопроизвольно от места зажигания при условии нагрева основания до температуры, близкой к $T_{\text{заж}}$.

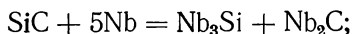
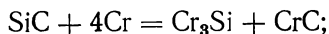
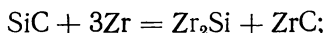
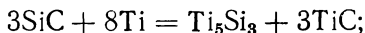
Эксперименты показали следующее: количества теплоты, выделяемого при протекании реакции Ni—Al (12—15 ккал/г—ат), недостаточно для непрерывного протекания реакции от центра зажигания, так как значительная часть его отводится в основание; спекание с помощью экзотермической смеси Ni—Al должно сопровождаться нагревом основания до $T_{\text{заж}}$ смеси, т. е. до 600—800°C (рис. 25, г).

Металлирование предъявляет к термитным смесям дополнительные требования: наличие высокого изобарно-изотермического потенциала реакции (ΔZ), отсутствие кислородосодержащих соединений, безгазовость

процесса и относительно низкие значения температуры зажигания.

Образование тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов) металлов IV—VI групп сопровождается значительными тепловыми эффектами. Однако использование реакции синтеза бескислородных соединений осложняется заметной летучестью при высоких температурах атомов неметаллов и высокой $T_{\text{зж}}$. В связи с этим представляет интерес исследование возможностей применения при металлизации системы B_4C-Me и $SiC-Me$ (где $Me-Ti, Zr, Cr, Nb$). Результаты термодинамического анализа [17] свидетельствуют о том, что наиболее вероятны реакции:

в системе $SiC-Me$



в системе B_4C-Me

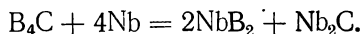
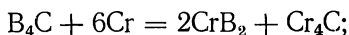
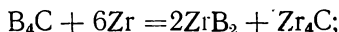
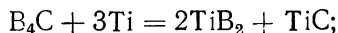


Таблица 8. Термодинамические характеристики реакций экзотермических смесей [17]

Система	Температура, °C		ΔZ , ккал/моль	Количество теплоты, выделяемой при взаимодействии 1 кг исходного материала, ккал
	зажигания $T_{\text{зж}}$	горения $T_{\text{гор}}$		
B_4C-Ti	1000—1100	1900—2100	—105,72	780
$SiC-Ti$	1300—1400	1600—1800	—65,5	407

При взаимодействии приведенных в табл. 8 смесей выделяется такое количество теплоты, которого достаточно для проведения процесса спекания слоя и припекания его к основанию. Применение при металлизации B_4C-Ti , B_4C-Zr и других подобных смесей показало

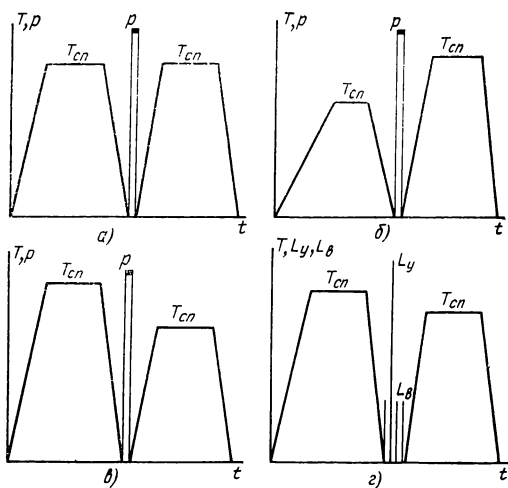


Рис. 27. Спекание с двукратным нагревом и подпрессовкой между ними: $T_{сп}$ — температура; p — давление; L_y — мощность удара; L_b — мощность виброударов

хорошую технологичность процесса спекания с экзотермическим нагревом и практически приемлемые свойства получаемых покрытий.

Спекание с неоднократными нагревами и подпрессовкой — это формирование необходимых свойств покрытия под воздействием тепловой и механической энергии. Технология такого варианта включает операции спекания с общим или поверхностным нагревом, подпрессовку и вторичное спекание. Этот вариант отнесен к термическим способам спекания, так как подпрессовка после спекания выполняет по сути дела ту же функцию, что и напрессовка. Кроме этого, данный вариант можно представить как способ, состоящий из последовательно проводимых двух операций спекания с общим нагревом.

Режимы спекания с двукратным нагревом и подпрессовкой между ними выбирают в зависимости от материала слоя и требуемых свойств покрытия (рис. 27). Из разновидностей технологии спекания с двукратным нагревом вариант *а* иллюстрирует общую сущность этой технологии спекания. Вариант *б* характеризуется относительно низкой температурой первого нагрева и высокой — второго. Первый нагрев служит для выжигания пластификатора, восстановления поверхностных окислов и частичного спекания (спекания с усадкой, не вызывающей разрушения слоя).

Первый нагрев производят обычно в печах с малой скоростью нагрева. Давление подпрессовки выбирают так, чтобы получить слой высокой (85—95%) плотности. Величину давления принимают 500—1200 МПа (5—12 тс/см²). Подпрессовку выполняют на прессах, гидростатических установках, прокатных станах и др. Температуру второго нагрева выбирают из условия получения требуемой структуры при минимальном термическом воздействии на материал основания.

Примером спекания с двукратным нагревом может служить покрытие из мелкой чугунной стружки с 40% железного порошка. Пластифицированную шихту шликерным способом наносят на стальное основание; первый нагрев до 800°C, затем подпрессовка при 700 МПа (7 тс/см²) и поверхностный нагрев (ТВЧ) до 1200°C.

Вариант *в* — температура первого нагрева высокая, а температура второго — низкая. Температура первого спекания должна обеспечить формирование необходимых свойств покрытия. Подпрессовка уплотняет слой, а вторичный нагрев обеспечивает получение требуемой структуры как слою, так и материалу основания. Вариант *г* — уплотнение слоя после первого нагрева динамическим нагружением — ударом (L_y) или виброударной нагрузкой ($\bar{L}_b$), или импульсной нагрузкой — взрывной волной или электромагнитным ударом.

Спекание с двукратным нагревом хотя и состоит из трех или более операций — высокопроизводительный способ, так как все операции очень просты и могут быть полностью автоматизированы.

Термомеханическое спекание (ТМС) состоит в нагреве слоя и приложении к нему давления. При спекании свойства покрытия формируются под одновременным воздействием тепловой и механической энергии.

Процессы спекания слоя при ТМС (усадка, рост контактов и т. д.) протекают гораздо быстрее, и поэтому для достижения заданных свойств можно применять более низкие температуры, чем при обычном спекании, а это очень важно для металлизации, так как снижается термическое влияние на материал основания. Кроме того, ТМС позволяет значительно сократить продолжительность выдержки и сделать процесс более производительным.

Важнейшее преимущество ТМС — получение покрытий с более высокими, чем при спекании с общим нагре-

вом, свойствами: плотностью, пределом прочности при разрыве, твердостью, электропроводностью и т. д. Согласно классификации (см. рис. 18) термомеханическое спекание подразделяется на статическое и динамическое. Статическое ТМС характеризуется медленным нагружением и относительно продолжительной выдержкой изделия под нагрузкой. Для динамического ТМС характерно мгновенное однократное или многократное приложение нагрузки в виде удара.

Различают следующие разновидности статического ТМС: спекание под давлением, горячее прессование (припрессование) и припекание трением.

При спекании с давлением температура нагрева равна $0,6 - 0,75 T_{пл}$ наносимого материала; выдержка в течение 30—60 мин, удельное усилие прижатия $0,1 - 1$ МПа ($1 - 10$ кгс/см²). Давление при данном спекании предотвращает коробление слоя и интенсифицирует процессы спекания. На практике давление в указанных пределах создается грузом при укладке изделий в лодочки или специальными устройствами (см. рис. 17, а).

Спекание с давлением применяют для обработки деталей малых и средних размеров. Наиболее приемлем этот способ для деталей плоской формы — направляющих, пластин, лемехов и т. д. Указанные давления можно создать при нагреве также за счет разности расширения материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения.

При горячем припрессовании температура нагрева относительно низкая ($0,5 - 0,7 T_{пл}$ материала покрытия), выдержка небольшая (5—600 с), усилие прижатия высокое ($200 - 3000$ кгс/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 установках, обеспечивающих нагрев в защитно-восстановительной атмосфере и указанные давления (рис. 28). Специфическая особенность установки МАПБ-3 состоит в том, что для интенсификации процесса припекания в ней имеются устройства для приложения вибрации и ультразвука.

Разновидности горячего припрессования: прокатка нагретых заготовок со слоем через валки, накатка про-

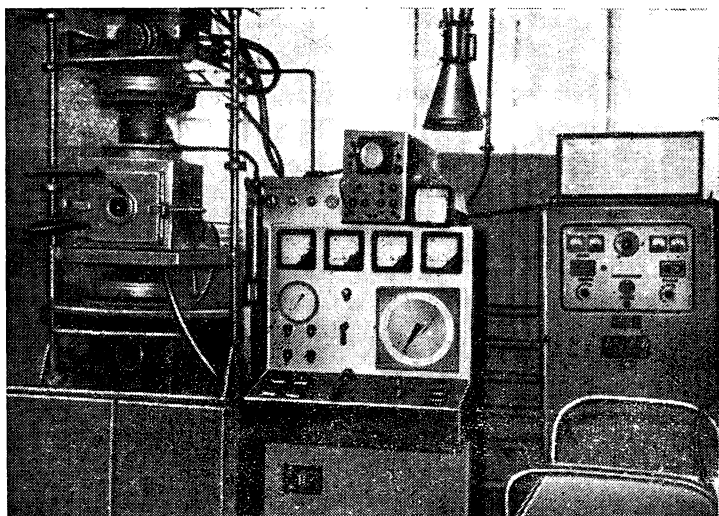


Рис. 28. Установка горячего припрессования МАПБ-3

фильными роликами, протяжка цилиндрических заготовок с нагретым слоем через фильеры и т. д. Рабочее пространство прокатных станов, прошивных и других установок, используемых для горячего припрессования, должно иметь защитную атмосферу. Однако если продолжительность самого процесса горячего припрессования (накатки, прокатки, штамповки) исчисляется несколькими (1—7) секундами, то для многих материалов процесс может проводиться в обычной воздушной атмосфере.

При гидротермокомпрессионном спекании в качестве жидкости используют расплавы металлов (сплавов) с температурой плавления, равной $0,75\text{--}0,85 T_{\text{сп}}$. Если в процессе гидротермокомпрессионного спекания предусмотрена пропитка, то сырой слой должен иметь открытую пористость (10—30%), а жидкость должна хорошо смачивать его материал. Если же пропитка не предусмотрена, то сырой слой должен иметь высокую плотность или наноситься с использованием гибкой оболочки на металлической фольге. При газотермокомпрессионном спекании сырой слой наносят с использованием гибких оболочек на металлической основе (фольге), при-

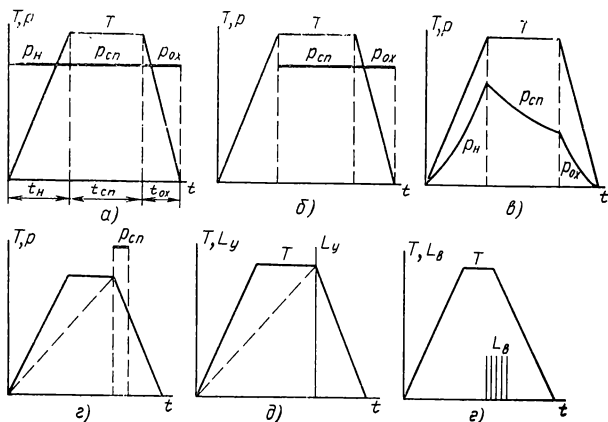


Рис. 29. Характер приложения нагрузки при термомеханическом спекании

чем торцы следует герметизировать специальным клеем или пайкой.

Свойства покрытий, полученных горячим припрессованием, зависят от технологических параметров ($T_{\text{сп}}$, $p_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}$, среда) и характера изменения величины давления (p) в различных периодах термомеханического спекания ($t_{\text{н}}$, $t_{\text{сп}}$, $t_{\text{ох}}$). Существуют режимы, при которых давление на всех этапах спекания одинаково, т. е. $p_{\text{н}} = p_{\text{сп}} = p_{\text{ох}}$, где $p_{\text{н}}$ — давление при нагреве; $p_{\text{ох}}$ — то же при охлаждении (рис. 29, а). Для удаления (возгонки) пластификатора давление прикладывают после нагрева (рис. 29, б), т. е. $p_{\text{н}} = 0$, а $p_{\text{сп}} = p_{\text{ох}} = p$. В ряде случаев давление $p_{\text{ох}}$ необходимо для предотвращения коробления, когда изделие тонкое, а $\alpha_0 \gg \ll \alpha_1$. Чтобы сократить продолжительность горячего припрессования, во многих случаях принимают режим, при котором $p_{\text{н}} = p_{\text{ох}} = 0$, а $p_{\text{сп}} = p$ (рис. 30).

Возможны случаи, когда давление горячего припрессования меняется на всех этапах спекания. Этот вариант реализуется в технологии спекания, в которой давление создается разностью расширения при нагреве материалов с неодинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения (рис. 29, в). При нагреве $p_{\text{н}}$ возрастает с повышением $T_{\text{н}}$; в период спекания

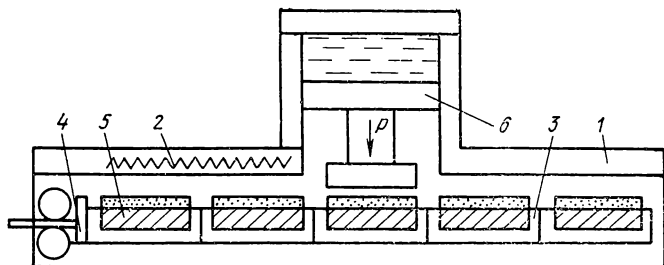


Рис. 30. Печь горячего припрессования, в которой $p_{\text{н}} = p_{\text{ох}} = 0$; $p_{\text{сп}} = p$:

1 — корпус печи; 2 — нагревательное устройство; 3 — лодочки; 4 — механизм перемещения лодочек; 5 — заготовка; 6 — механизм приложения давления

$T_{\text{сп}} = \text{const}$ и $p_{\text{сп}}$ вследствие релаксации снижается; в период охлаждения p снижается до нуля. На рис. 29, г показан режим, при котором заготовка нагревается в защитной атмосфере, а припрессование происходит на воздухе. Давление при таком припрессовании принимается высоким (4—12 тс/см²), продолжительность 1—10 с. Ударное и виброударное припрессование (рис. 29, д, е) производят в защитной среде, а для материалов с малым сродством к кислороду на воздухе.

Технология горячего припрессования характеризуется также коэффициентом B_p , равным отношению площади F_p , к которой прикладывается давление за один цикл механического воздействия, ко всей покрываемой поверхности заготовки $F_{\text{п}}$, т. е. $B_p = F_p / F_{\text{п}}$. Коэффициент B_p отражает технологические приемы механического воздействия при спекании (рис. 31):

1) $B_p = 1$, $F_p = F_{\text{п}}$ — давление за один цикл механического воздействия прикладывается по всей покрываемой поверхности (рис. 31, а);

2) $B_p < 1$, $F_p < F_{\text{п}}$ — давление за один цикл механического воздействия прикладывается на некоторой части покрываемой поверхности (рис. 31, б). Термодинамическое спекание слоя в этом случае состоит из 2, 3 ... n циклов механического воздействия:

$$n = Z(1/B_p) + 1,$$

где Z — целая часть числа.

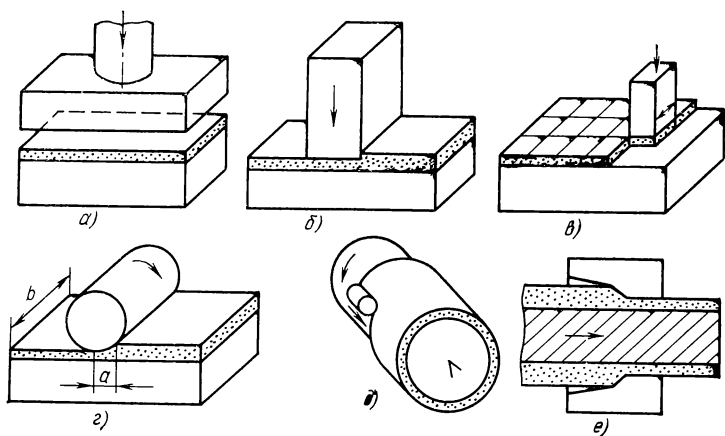


Рис. 31. Технологические приемы приложения нагрузки при статическом термомеханическом спекании

3) $B_p \ll 1$, $F_p \ll F_n$ — давление за один цикл механического воздействия прикладывается на небольшую часть покрываемой поверхности (рис. 31, в). С увеличением n уменьшается общее усилие, необходимое для термодинамической обработки слоя, а соответственно снижается мощность требуемого оборудования. При накатке, обжатии и т. п. $F_p = ab$, где b — ширина поверхности соприкосновения вала, ролика или обжимки со слоем на направлении перемещения обжимного инструмента относительно покрываемой поверхности (рис. 31, г—е).

Производительность горячего припрессования зависит от величины коэффициента B_p и частоты приложения давления $\omega = 1/t_0$, где t_0 — время одного цикла; при прокатке оно зависит от B_p и скорости перемещения v_n обжимного инструмента относительно изделия. Горячее припрессование — один из высокопроизводительных способов металлизации.

При припекании трением исходные материалы нагреваются в зоне их соприкосновения трением и соединяются при сжатии. В принципе припекание трением — это сварка трением, отличающаяся тем, что в качестве соединяемой части с одной стороны используется тонкостенная оболочка или составляющие ее пластины. Для припекания подбирают технологические режимы обычной сварки трением и ультразвуком. Однако специфика ме-

таллирования требует решения следующих проблем: припекаемость к стали высоколегированных сплавов, карбидов, окислов, обладающих плохой свариваемостью при сварке трением; закрепление в зажимах тонких (1—3 мм) оболочек; расширение номенклатуры изделий, на которые можно наносить покрытия.

Чтобы повысить припекаемость, на поверхность оболочки со стороны ее присоединения наносят тонкой (0,01—0,12 мм) слой пластичного металла (Cu, Fe, Ni). Тонкие оболочки закрепляют в специальных кулачках с вакуумными присосками. Номенклатуру покрываемых изделий расширяют за счет использования пластин.

Режимы припекания трением (частота вращения, усилие сжатия, продолжительность нагрева, величина осадки) зависят от свойств исходных материалов и конфигурации изделия. В первом приближении они могут быть приняты по рекомендациям сварки трением. Этим способом наносят кольцеобразные пластины на седла, клапаны и подобные детали. Операции проводят на машинах типа МСТ (МСТ 35, МСТ 51 и т. д.).

Пластины четырехугольной и других форм припекают к основанию трением с использованием возвратно-поступательных колебаний высокой частоты — ультразвука (см. рис. 31, в). Режимы припекания с использованием ультразвука подбирают в соответствии с рекомендациями для ультразвуковой сварки. Оборудование — машины типа КТУ и МТУ (КТУ-1,5, МТУ-4 и т. д.). Ультразвуковое припекание можно применять для нанесения покрытий из пластин размером $3 \times 3 \times 0,4$, $5 \times 5 \times 0,6$, $7,5 \times 7,5 \times 1$ мм и др.

При ударном припрессовании вначале на покрываемую поверхность наносят шихту, затем заготовку нагревают в защитно-восстановительной атмосфере до соответствующей температуры, выдерживают 2—20 мин и в нагретом состоянии подвергают ударному воздействию.

При составлении технологии ударного припрессования рассчитывают температуру спекания, энергию и число ударов. Температуру спекания принимают равной температуре высокопластического состояния материала наносимой шихты, т. е. $0,7—0,8 T_{пл}$ материала слоя. Энергию и число ударов припрессования определяют по формулам, выведенным на основании закономерностиковки.

Для припрессования под молотом энергию удара определяют по формуле

$$L = \frac{A}{\eta_y \eta_p},$$

где η_y — коэффициент полезного действия удара, равный 0,85—0,95; η_p — коэффициент распределения энергии, $\eta_p = E_0/(E_0 + E_1)$; A — работа деформации (Дж); E_0 и E_1 — модули упругости материала основания и покрытия;

$$A = \omega_c f \sigma_{\text{в}} \varepsilon_1 V_1$$

ω_c — скоростной коэффициент, зависящий от скорости хода машины.

Скорость хода машины,

м/с	0,1—0,25	0,25—0,75	1,0 и выше	Ударное воздействие
---------------	----------	-----------	------------	---------------------

Значение ω_c (по

С. И. Гуткину)	1,2—1,6	1,6—2	2,5	3—4
--------------------------	---------	-------	-----	-----

ε_1 — степень деформации слоя, для ударного припрессования

$$\varepsilon_1 = \frac{h_{1\text{н}} - h_{1\text{к}}}{h_{1\text{н}}} = \theta_{\text{н}} - \theta_{\text{к}},$$

$h_{1\text{н}}$, $h_{1\text{к}}$ — соответственно толщина слоя до удара и после него; $\theta_{\text{н}}$, $\theta_{\text{к}}$ — начальная и конечная пористость слоя, т. е. пористость до и после удара; V_1 — объем деформируемого материала слоя, м^3 ; $\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности материала на сжатие при температуре деформации, Па; f — коэффициент трения сопряженных материалов.

Число ударов молота n_y , необходимое для получения покрытий требуемой пористости, определяют по формуле

$$n_y = \frac{1}{\eta_y \eta_p} \left(2g \frac{A}{Gv^2} \right)^2,$$

где G — масса бойка, кг; v — скорость в момент удара, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

В табл. 9 приведены примерные значения удельной (на единицу площади) энергии удара в МДж/м², рекомендуемые для ударного прессования.

Припрессовку покрытий следует производить без значительного воздействия на размеры основания. Это условие можно выполнить путем снижения массы бойка (с увеличением числа ударов), припрессования в пресс-формах, поверхностного нагрева. Использование вибро-

Таблица 9. Значения удельной энергии удара (МДж/м^2), рекомендуемые для ударного припрессования

Материал шихты	Температура нагрева, °C		
	600—850	850—1100	1100—1250
Железо и сплавы	0,5—0,7	0,3—0,5	0,1—0,3
Сплавы на основе Ni, Co с высоким содержанием W, Mo и т. д.	—	0,4—0,6	0,2—0,4
Сплавы на основе меди	0,1—0,2	—	—

ударов с массой бойка 3—50 кг позволяет получать покрытия высокой плотности без практически ощутимого воздействия процесса припрессования на размеры основания.

Припрессовка в пресс-формах исключает деформацию основания, позволяет применять высокую степень деформации при использовании полузакрытых (рис. 32) и закрытых форм (рис. 32, а). Форма поверхности, на которую наносят покрытия ударным припрессованием, может быть плоской (а, б), цилиндрической (в, г) и сложной. В последнем случае желательно, чтобы угол между направлением удара и перпендикуляром к поверхности не превышал 30° .

В соответствии со схемой ударного припрессования на цилиндрическую поверхность (рис. 32, в) нагретая до соответствующей температуры заготовка с напрессованным покрытием вращается, а фигурные бойки передают удар-

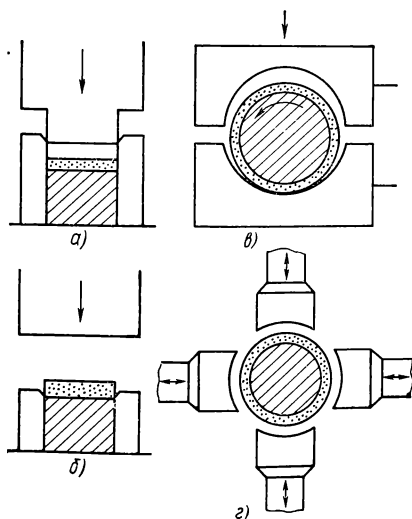


Рис. 32. Технологические приемы приложения нагрузки при динамическом термомеханическом спекании

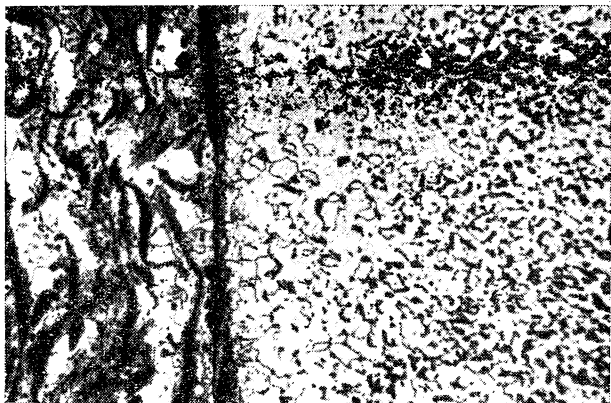


Рис. 33. Микроструктура зоны перехода покрытия ПЖ1С+7ПМ в стальное основание (сталь 20), нанесенное динамическим припрессованием; $\times 100$

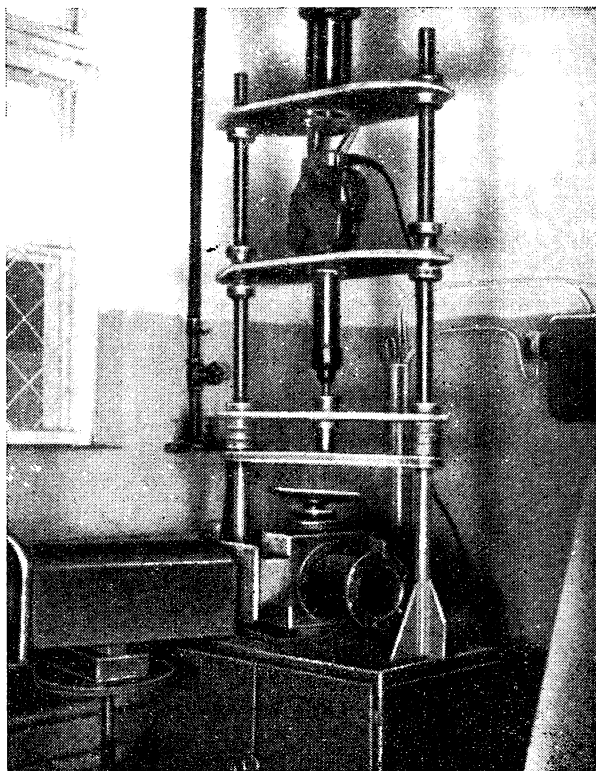


Рис. 34. Установка для виброударного припрессования МАПБ-4

ные нагрузки. Поверхностный нагрев ТВЧ (электронно-лучевой и т. д.) снижает $\sigma_{в1}$ без изменения $\sigma_{в.о.}$ Это приводит к тому, что $\epsilon_1 \gg \epsilon_0$ (где ϵ_0 — деформация основания), а такое сочетание является условием малой деформации основания. Поверхностный нагрев особенно эффективен при ударном припрессовании покрытий на цилиндрические основания (шейки валов, осей и т. д.).

Динамическое горячее припрессование также влияет на структуру материала основания (рис. 33). Термомеханическая обработка в подавляющем большинстве случаев улучшает механические свойства основания.

Ударное припрессование осуществляют на молотах в обычной воздушной среде или на специальных установках в защитной атмосфере. На специальных установках для виброударного припрессования нагрев, обработку и охлаждение производят в защитной атмосфере (рис. 34). Виброударную обработку деталей малых и средних размеров из материалов, не обладающих большим сродством к кислороду, можно осуществлять на воздухе.

Один из прогрессивных способов виброударного спекания — ротационное обжигание сырого слоя на стандартных (типовых) ротационно- и радиально-обжимных машинах [24] с использованием специальных обжимного инструмента и режимов обжигания (степень обжигания). Дело в том, что сырой слой с его низкими механическими свойствами не допускает нагрузок на свободных от бойка участках C_1C_2 и C_3C_4 (рис. 35); значительных растягивающих напряжений в зоне между основанием и бойком — на участках $C_1A_1C_4$ и $C_2A_2C_3$. Следовательно, необходимы такие бойки и режимы, которые создавали бы в слое объемное сжатие или сжатие в

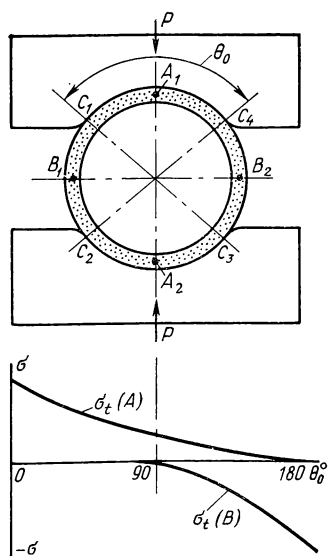


Рис. 35. Зависимость тангенциального напряжения в точках $A_1(A_2)$ и $B_1(B_2)$ от величины угла обжигания бойка заготовки θ_0

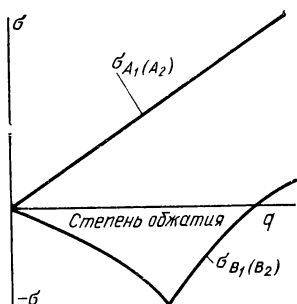


Рис. 36. Зависимость тангенциального напряжения в точках $A_1(A_2)$ и $B_1(B_2)$ от степени обжатия q

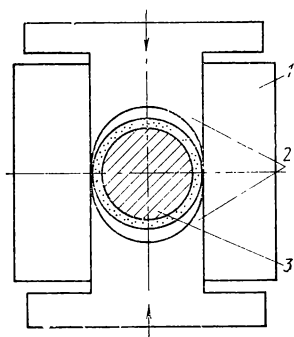


Рис. 37. Схема механизма обжатия с ограниченным уширением: 1 — пресс-форма; 2 — бойки; 3 — заготовка с сырым слоем

радиальном направлении, а в нормальном направлении — растяжение, по величине не превышающее прочность слоя (σ_{B1}). Ротационное обжатие должно обеспечить обработку сырого слоя без изменения или с незначительным изменением размеров основания.

На рис. 35 и 36 показано изменение тангенциальных напряжений в точках A и B в зависимости от угла обхвата бойка θ_0 и степени обжатия q . С увеличением угла обхвата $\sigma_t(A)$ уменьшается от μp до 0, где μ — коэффициент Пуассона; p — удельное усилие обжатия; $\sigma_t(B)$ имеет знак «минус», и с ростом θ_0 значение $|\sigma_t(B)|$ повышается. С увеличением степени обжатия повышается и давление p . При достижении $p > \sigma_{T1}$ (где σ_{T1} — предел текучести материала основания) $|\sigma_t(B)|$ начинает снижаться вследствие растяжения C_1C_2 и C_3C_4 . Дальнейшее увеличение q может привести к изменению знака $\sigma_t(B)$, и вместо сжатия будет растяжение.

Ротационное обжатие при металлизации следует производить четырьмя-шестью бойками с малым (30 — 45°) углом обхвата и низкой степенью обжатия. Хорошие результаты получаются при использовании бойков с радиусом несколько (1 — 5 мм) больше радиуса заготовки и режимов с переменной степенью обжатия — вначале минимальной, а затем увеличивающейся. Перспективно для виброударного спекания ротационное обжатие с ограниченным уширением (рис. 37).

Ротационное обжатие применяют при нанесении покрытий на сплошные и полые удлиненные изделия типа валов, осей, втулок, конусов и им подобных, имеющих очень широкий диапазон размеров. Так, на ротационно-обжимных машинах обрабатывают изделия диаметром 4—320 мм, на радиально-обжимных — до 600 мм. На ротационно- и радиально-обжимных машинах можно наносить покрытия на заготовки не только круглые, но и граненые, овальные и сложного сечения. Для сложного сечения, как правило, используют машины, у которых инструмент не вращается вокруг заготовки. Ротационное обжатие можно применять и для металлизации деталей малой длины, пропуская их непрерывно через бойки одну за другой.

К перспективным видам ударного горячего припрессования можно отнести также технологию спекания, в которой используется энергия взрыва. Опробованы две технологические схемы: взрывная волна оказывает динамическое давление непосредственно на сырой слой, нанесенный в виде пленки на металлической основе (фольге); энергия взрыва передается слою через боек, имеющий конфигурацию, негативную по отношению к покрываемой поверхности. Ударное припрессование с использованием взрыва — высокопроизводительный способ спекания, обеспечивающий покрытие с высокими механическими свойствами. Процесс не требует нагрева до высоких температур или выполняется вовсе без нагрева при соответствующей подготовке поверхности основания и исходных порошков (гранул, пластин).

МАРКИРОВКА ПОКРЫТИЙ

Технологию нанесения покрытий металлизированием маркируют в зависимости от способа нанесения слоя и операции его спекания. Маркировка основана на буквенно-цифровых обозначениях. 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. Операцию спекания маркируют цифрами: 1 — общим нагревом, 2 — с частичным нагревом, 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 проводилось под давлением, маркируют Ш5.

Полная маркировка технологии нанесения покрытий включает в себя 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 указывают температуру нагрева (°С), время выдержки в минутах и среду. При этом водород обозначают Н₂, аргон — Аг, эндотермический газ — Энд., вакуум — Вк; жидкую и твердую среды отмечают в виде химического обозначения материала ВаС1, БрОС—5—7, Al₂O₃ и т. д. Так, 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.

Металлированные 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 в соответствии с маркировкой, принятой в порошковой металлургии: ПЖ — железный порошок, ПМ — медный порошок и т. д. Химический состав гранул, пластин, оболочек, проволоки маркируют в соответствии с обозначениями, принятыми в материаловедении (металловедении): ОН — никелевая оболочка, АВК8 — пластины из твердого сплава ВК8 (92 WС, 8Сo). Шихту сложного состава маркируют составным обозначением. ГВК6+ +18ПН — шихта, состоящая из 82% гранул из ВК6 (94 WС, 6Сo) и 18% порошка никеля; СЧ — стружка чугунная и т. д.

Полная маркировка покрытий состоит из маркировки химического состава и технологии: 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 $T_{\text{сп}}=1150^{\circ}\text{C}$, 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, го-

рячее припрессование $T_{\text{сп}}=1250^{\circ}\text{C}$, усилие припрессования 20 МПа, среда — вакуум. Чтобы уточнить технологию нанесения сырого слоя и его спекания, иногда ставят вторую букву: ФЭ — экструзионно-формовочный способ нанесения сырого слоя, 1П — спекание с пропиткой, ЭЛ — электронно-лучевой нагрев, Э — экзотермический нагрев и т. д. Если после спекания применяют подпрессовку, то в конце ставят Пд; применение калибровки отмечается буквой К.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

ОБРАЗОВАНИЕ СЫРОГО СЛОЯ И СЦЕПЛЕНИЕ ЕГО С ОСНОВАНИЕМ

Сырой слой и сцепление его с основанием создаются при сближении исходных материалов и приложении энергии. Связь как между исходными порошинками, гранулами, пластинками и т. д., так и между ними и основанием образуется за счет адгезии, прилипания или механического зацепления. Эти явления обуславливаются зацеплением, возникновением Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения, химической связи (ионная, ковалентная, металлическая и т. д.), действием электромагнитных полей и другими процессами, протекающими на границах составляющих.

Большое разнообразие способов нанесения сырого слоя предопределяет многообразие процессов сближения исходных материалов и видов энергии для их соединения. При напрессовке и экструзии используют механическую энергию давления, при пульверизации и напылении — энергию удара, при электрофорезе — энергию электрического поля, при осаждении — энергию химического сродства, при шликерном способе — энергию давления и свободной поверхности и т. д.

Механизм и закономерности образования сырого слоя зависят от способа его нанесения. При напрессовке механизм формирования порошкового слоя аналогичен механизму формирования порошкового брикета. В связи с этим при изучении закономерностей формирования порошкового слоя в ряде случаев можно использовать работы, относящиеся к порошковой металлургии [5]. Форма слоя характеризуется малой (1—6 мм) толщиной и значительными (10—1000 мм) размерами в двух других направлениях. Чтобы обеспечить слою равномерную плотность, в шихту вводят пластификатор (1—15%). Эти отличия изменяют кинетику уплотнения пористого слоя.

Плотность напрессованного слоя ρ_c зависит от плотности исходной шихты $\rho_{ш}$, относительного объема плас-

тификатора $\rho_{\text{п}}$ и давления припрессования $p_{\text{п}}$. Если $p_{\text{п}} < p_{\text{в}}$, то

$$\rho_{\text{с}} = \rho_{\text{ш}} + \rho_{\text{п}} + (1 - \rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{п}}) \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}},$$

где $p_{\text{в}}$ — давление прессования (припрессования), при котором начинается выдавливание пластификатора, МПа (тс/см²).

Если $p_{\text{в}} < p_{\text{п}} < p_{\text{max}}$, то

$$\rho_{\text{с}} = 1 - \rho_{\text{п}} \left(1 - \frac{p_{\text{п}} - p_{\text{в}}}{p_{\text{max}} - p_{\text{в}}} \right),$$

где p_{max} — давление, соответствующее уплотнению шихты до компактного состояния (а точнее, близкое к такому состоянию), МПа (тс/см²).

Значения $p_{\text{в}}$ и p_{max} зависят от химического состава, формы и размеров исходного материала и пластификатора, их соотношения и температуры нанесения (табл. 10).

Таблица 10. $p_{\text{в}}$ и p_{max} для шихт, содержащих 15% (об.) парафина, МПа (тс/см²)

Материал	$p_{\text{в}}$	p_{max}
ПЖ1	320(3,2)	1120(11,2)
ПМ1	230(2,3)	880(8,8)
ВК6 + 29ПЖ1 + 10ПМ	300(3,0)	1500(15,0)

В порошковой металлургии прочность сырых брикетов изучена недостаточно. Это объясняется тем, что малые размеры заготовок и относительно большая толщина стенок гарантируют им целостность при транспортировке. Прочность сырых брикетов образуется за счет зацепления и схватывания частиц при их совместном пластическом деформировании и составляет 2—7 МПа.

Прочность указанного порядка вполне бы обеспечивала напрессованным порошковым слоям целостность при их транспортировке и нагреве. Однако после снятия нагрузки и изъятия из формы изделия со слоем упругие деформации в нем снимаются лишь в направлении прессования. Сцепление слоя с компактным основанием предотвращает снятие упругих деформаций в плоскости нанесения, что приводит к возникновению остаточных

напряжений, которые при нанесении порошков мало-пластичных металлов разрушают слой или отрывают его от основания.

Чтобы снизить это упругое последствие в слое при его припрессовании, в исходную шихту вводят пластификатор. Введение в шихту пластификатора изменяет механизм взаимодействия порошинок при их напрессовке и соответственно изменяет свойства нанесенных слоев (табл. 11, 12). Пластификатор снижает упругое последствие, повышает плотность и равномерность слоя.

Таблица 11. Свойства¹ нанесенных прессованием сырых слоев из ПЖ1С + 20ПЖ1М

Свойства при давлении припрессования, МПа	Без пластификатора	Количество парафина, %		
		1	4	8
Упругое последствие, %:				
100	1,25	0,72	0,32	0,27
300	1,54	0,82	0,42	0,31
600	1,82		0,48	0,45
1000	2,02			
Прочность на разрыв, МПа:				
100	0,8	0,5	0,4	0,4
300	2,4	1,6	1,1	0,9
600	3,6	2,1	1,5	1,6
1000	6,2	3,0	2,8	1,8
Прочность ² сцепления на отрыв, МПа:				
100	0/0,7	0,3/0,6		
300	0/1,8	0/0,8	0,16/0,8	0,35/0,9
600	0/2,6	0/1,9	0,35/1,2	0,4/1,3
1000	0/4,2	0,6/2,2	0,9/2,8	
Плотность, % (без учета парафина):				
100	59,8	62,4	64,5	65,2
300	74,6	76,2	77,4	77,8
600	88,4	88,8	90,4	—
1000	92,4	92,8	93,0	—
Равномерность плотности, %;				
100	84,4	93	97	98
300	86,4	95	98	99
600	88,5	97	99	100
1000	92,8	98	100	100

¹ Прочность на разрыв и плотность определены по методикам из работ [25, 32]; прочность сцепления — по методике, описанной в работе [2].

² В числителе — прочность сцепления сырого слоя с проточенной поверхностью стального основания, в знаменателе — то же с шероховатой поверхностью, созданной нанесением термическим напылением подслоя.

Таблица 12. Зависимость свойств напрессованных слоев от вида пластификатора, материал ПЖ1С, + 20ПЖ1М, давление припрессования 300 МПа

Свойства	Пластификатор			
	6% фенола	5% раствора каучука в бензине	9% раствора Ni—Cl в воде	6% раствора эпиксидной смолы
Упругое последствие, %	0,56	0,38	0,86	0,47
Прочность на разрыв, МПа	1,9	2,2	3,9	13,0
Прочность сцепления, МПа	0,3/1,2	0,4/1,6	1,6/2,1	4,7/9,1
Плотность (без учета пластификатора), %	75,4	75,2	74,8	76,1

Однако отдельные пластификаторы (парафин, фенол и др.) снижают также прочность слоя на разрыв и прочность сцепления его с основанием (для слоев, нанесенных на подслои).

При напрессовке сырого слоя в качестве пластификатора широко применяют растворы смол, каучука и других материалов, которые после удаления растворителя проявляют склеивающие свойства. В этом случае прочность слоя и его сцепление с основанием создаются не только зацеплением и схватыванием, но и склеиванием: связь проходит непосредственно между соединяемыми частицами, а также по манжетам, окружающим места их соединения. Прочность слоя и его связь с основанием в этом случае достигают значительных размеров (табл. 13). Для сырых слоев характерно то, что при нагреве парафин плавится и прочностные свойства слоя снижаются. Поэтому парафинированные слои спекают в засыпке (Al_2O_3) или добавляют крепители (Pb, CuO и т. д.).

При экструзионно-формовочном способе порошковый слой образуется так же, как и при напрессовке, т. е. за счет зацепления, схватывания и склеивания. При экструзии давление значительно меньше, чем при напрессовке, вследствие этого и прочностные свойства экструдированных слоев ниже, чем напрессованных (табл. 13).

Механизм образования слоя при шликерном и шликерно-формовочном способах зависит от ионного обмена

Таблица 13. Свойства сырых слоев, нанесенных различными способами

Материал, способ и условия нанесения	Плотность, %	Прочность на разрыв, МПа	Прочность связи, МПа
<i>Экструзионно-формовочный</i>			
1. Материал ПЖ1С + 20ПЖ1М, пластификатор—парафин 5%, давление экструзии 12 МПа	54	0,8	0,3—0,4
2. Материал ПЖ1С + 20ПЖ1М, пластификатор — раствор смолы 10%, давление экструзии 12 МПа	56	9,1	6—7
3. Материал—порошок ВК6, пластификатор—парафин, давление экструзии 12 МПа	40	2,2	1,6
<i>Шликерный</i>			
1. Материал ПЖ1С + 20ПЖ1М, шликер на парафине (температура 100 °С)	42	0,6	0,3
2. Материал ПЖ18Н9, шликер на водном растворе NiCl	63	9,4	8
3. Материал ПЖ1С+20ПЖ1М, шликер на растворе смолы в бензине	50	10	6—8
<i>Плакирование</i>			
1. Материал ПЖ1С+20ПЖ1М, оболочка, изготовленная шликерным способом, отжиг, давление припрессования 500 МПа	88	14	8—10
2. Материал—гранулы ВК+20ПМ, оболочка, изготовленная шликерным способом, отжиг ($T_{отж} = 1200\text{ °С}$), давление припрессования 250 МПа	86	42	10—12

между его составляющими. Составы шликеров, применяемых в металлизировании, очень разнообразны — металлы, сплавы металлов с неметаллами, металлизированные окислы и полимеры, а также кислоты, хлориды, различные растворители и т. п. Сцепление частиц между собой и с основанием происходит за счет зацепления, склеивания и холодного припекания. Последнее представляет собой связь, создаваемую осаждением при удалении влаги растворенного вещества (NiCl, Fe—Cl и т. д.) на стыках частиц в виде твердых манжет. Эти манжеты,

прилегающие к обеим частицам, создают связь между ними.

Формирование сырого слоя при плакирующем способе зависит от свойств оболочки и характера ее нанесения. При механическом закреплении (фиксации), а также при использовании компактной оболочки свойства слоя не зависят от операции нанесения, а определяются свойствами исходного материала. Например, при нанесении твердосплавных пластин из спеченного сплава ВК6 свойства слоя определяются свойствами исходных пластин. При напрессовке пористые оболочки уплотняются, площадь контактов с химической (металлической) связью увеличивается, что и способствует повышению прочностных свойств.

Главная цель напрессовки при плакирующем способе — создание связи сырого слоя с изделием. Основной механизм сцепления слоя с поверхностью заготовки — связь, создаваемая за счет схватывания при совместном деформировании сопряженных материалов. Усилие припрессования, которое необходимо для достижения требуемой прочности связи слоя с основанием, значительно меньше, чем при холодной сварке аналогичных компактных материалов. Это объясняется меньшей прочностью пористого материала, сдвигом, который происходит при заполнении пор, и соответствующей подготовкой поверхности заготовки (нанесение подслоя).

Механизм образования слоя и его сцепления с поверхностью основания при напылении зависит от технологии его нанесения. При пульверизации сцепление частиц между собой и с основанием возникает за счет прилипания и склеивания. При газотермическом напылении состояние частиц (температура, структура и т. д.) в момент удара о покрываемую поверхность зависит от режимов нанесения (параметров электрического тока, давления сжатого воздуха, расстояния нанесения и т. д.).

При металлизации термическое напыление используют для нанесения подслоя или сырых слоев на детали больших размеров и сложной конфигурации. Основное требование в этих случаях — малая напряженность слоя, что достигается распылением с больших (200—300 мм) расстояний, когда металлические частицы ударяются об основание в твердом состоянии [33]. Исходя из последнего можно предположить, что сцепление частиц между собой и с основанием происходит за счет зацепления и

схватывания при совместном деформировании ударяющихся частиц и поверхности заготовки.

Прочность $\sigma_{св}$ сцепления напыленного газотермическим способом слоя с основанием зависит от химического состава исходных материалов, подготовки поверхности и режимов нанесения:

$$\sigma_{св} = k_{п} \frac{\sigma_{вт}}{\alpha_2^2} \left[\frac{\pi^2}{2} \frac{\gamma v^2}{\alpha_1 g} \frac{(1 - \mu^2)}{\sigma_T} \right]^{1/3},$$

где $k_{п}$ — коэффициент, зависящий от состояния поверхности, $k_{п}=0 \div 1$; α_1 — коэффициент, характеризующий степень деформации частиц, $\alpha_1=0,5 \div 0,9$; α_2 — относительное увеличение радиуса частиц (r) при ударе, $\alpha_2=1,5 \div 3$; v — скорость частиц, м/с; γ — плотность материала частиц, н/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; μ — коэффициент Пуассона; σ_T — динамическое давление текучести, Па, $\sigma_T=1,2 \div 1,25 \text{ НВ}$ материала основания; $\sigma_{вт} = \min (\sigma_{в1}, \sigma_{в.0})$; $\sigma_{в1}$ — прочность на разрыв исходного материала покрытия, Па; $\sigma_{в.0}$ — то же для материала основания.

Формула учитывает главные факторы напыления и поэтому хорошо согласуется с опытными данными (табл. 14).

Таблица 14. Прочность сцепления с основанием слоев, нанесенных газотермическим напылением, МПа

Наносимый материал ¹	Материал основания*	Данные автора	Данные работы [38]	Расчетные значения
СВ08	Сталь	12,8±2,5	30±5	12,0
	Al	10,5±2,5	18±1	10,2
	Cu	16±3,0	13±5	19,8
Al	Сталь	9,5±1,5	19±3,0	10
	Al	10,5±2	9±4,0	9,2
	Cu	13±3	15±1	12,5
Cu	Сталь	10±1,2	8,0±0,7	9,8
	Al	8,0±1,5	8,0±1,4	8,6
	Cu	11,5±2	7,8±0,4	10,2
Mo	Сталь	20±2,5	14,2±2,8	18
ППСЧВ8НА	Сталь	21±2,5	—	16

¹ Толщина наносимого слоя 2 мм; нанесение электродуговым металлizado-
ром ЭМб, расстояние 150 мм, давление воздуха 5 ат.

² Подготовка — дробеструйная очистка.

СПЕКАНИЕ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ, НАНЕСЕННОГО НА КОМПАКТНОЕ ОСНОВАНИЕ

Исследованию спекания посвящено много научных работ, которые внесли существенный вклад в развитие этой сложной проблемы. Описанию процесса спекания как одного из проявлений самодиффузии посвящены работы Я. И. Френкеля, К. Херринга, Г. Кучинского, И. М. Федорченко и др. Теория спекания за счет процессов диффузии вакансий и диффузионно-вязкого течения изложена в трудах Ю. Я. Пинеса, Я. Е. Гегузина, И. М. Лифшица и его школы. В основе теории спекания, развиваемой В. В. Скороходом, М. Н. Тикканеном, Ленелем, лежат дислокационно-вязкие механизмы переноса массы. Однако многие экспериментальные данные по кинетике спекания вступают в противоречие с теорией спекания, что, видимо, объясняется еще недостаточно правильным представлением о механизме спекания.

Порошковый слой при нагреве спекается. Спекание — это процесс развития межчастичного сцепления и формирования свойств материала, полученного нагревом сформированного или свободно-насыпного порошка или волокна без расплавления основного компонента.

Формулировки термина «спекание» предлагали ряд авторов, [5, 32], однако ни одна из них не является исчерпывающей. Более того, высказываются сомнения в возможности определения этого термина из-за сложности процесса и многообразия процессов, происходящих при спекании [32]. Отсутствие удовлетворительного определения этого термина объясняется тем, что отдельные авторы пытаются вложить в него как технологическую, так и физико-химическую сущность, другие же отражают не основной физико-химический процесс, а его следствие — развитие механического сцепления, усадку и связанные с ними формирования свойств. Разноречивые определения свидетельствуют о том, что еще нет полного представления о закономерностях процесса спекания.

Применимость спеченных материалов определяет физико-механические свойства, которые и должны быть количественной мерой процесса спекания. Брикет перед спеканием представляет собой пористое тело, состоящее из частиц порошка, соединенных между собой химической связью и механическим зацеплением. Основной фи-

зико-химический процесс при нагреве порошкового брикета — перенос масс и рост вследствие этого переноса межзеренных контактов. К причинам, вызывающим перенос массы при спекании, относятся физико-химическая неоднородность и внешние силы.

Физическая неоднородность обусловлена действием поля поверхностных сил, сил остаточных напряжений, различием концентраций вакансий близ перешейка и на выпуклых поверхностях частиц, различием энергетических положений атомов в зоне перешейка и на поверхностях частиц, разностью равновесных давлений пара близ вогнутых и выпуклых участков поверхностей контактирующих частиц.

Химическая неоднородность определяется главным образом концентрацией исходных компонентов и их сродством. Перенос массы (атомов) при спекании осуществляется также под действием неравномерности тепловых и электрических полей.

Физико-химическая неоднородность количественно характеризуется химическим потенциалом μ . Энергия силовых полей входит в химический потенциал как составляющая часть. В отдельных случаях перенос материала определяется только действием силовых полей. Силы, вызывающие перенос, подразделяются на внутренние и внешние. К внутренним относятся силы поверхностного натяжения и силы остаточного напряжения, к внешним — силы давления, трения и гравитационные. Результат действия внутренних и внешних сил зависит от их величины, химического состава исходного материала, внешних (термодинамических) условий и других факторов. Как внутренние, так и внешние силы осуществляют перенос материала за счет диффузии и пластической деформации.

Таким образом, спекание можно представить как атомный и коллективный перенос массы под действием активированных сил физико-химической неоднородности. При этом под атомным переносом массы подразумевается диффузия атомов (молекул) — поверхностная, объемная, через газовую фазу и т. д., под коллективным — перенос массы частиц при вязкой и сдвиговой деформации. Атомный и коллективный перенос массы качественно и количественно изменяет межчастичный контакт и связанные с ним свойства материала, форму и размеры исходного образца.

Для математического описания процесса спекания необходимо принять систему координат (базис), определить термодинамические условия, провести схематизацию рассматриваемого тела (составить модель), определить движущие силы и характер термодинамического процесса.

Выбор исходных закономерностей для описания процесса спекания определяется химическим составом тел системы, термодинамическими условиями и характером протекающих внутри системы процессов. Схематизация системы и процессов спекания — один из важнейших моментов теории.

При спекании в вакууме чистых компонентов (Fe, W и т. д.) в первом приближении система может быть определена как закрытая, адиабатическая, изолированная ($T_{\text{образца}} = T_{\text{среды}}$). При строгом подходе система является открытой (исходный материал испаряется) и неизолированной (диссипация энергии приводит к тому, что температура образца становится больше температуры среды).

При спекании в газовой среде (H_2 , CO и т. д.) система открыта — исходный материал взаимодействует с газами (восстановление окислов, науглероживание и т. д.). Систему в последнем случае можно закрыть, если в нее внести атмосферу или описать краевые условия. Математическое описание спекания в значительной степени затруднено нестационарностью протекающих процессов.

Перенос масс при спекании порошковых материалов — это неравновесный процесс с определенной степенью необратимости. Термодинамика необратимых процессов (в том виде, какого она достигла в настоящее время) представляет собой приближенную феноменологическую теорию. Основы феноменологического описания процесса спекания заложены Я. И. Френкелем. Идея феноменологического описания как обобщенно-вязкого течения заключается в составлении баланса убыли свободной поверхностной энергии системы и работы диссипативных сил. Однако в реализации процессов спекания (переноса масс) принимают участие наряду со свободной поверхностной энергией также многие другие виды энергии.

Ниже приведено уравнение баланса энергии, выведенное для спекания порошкового слоя:

$$\begin{aligned} & \sigma_{\Pi} \frac{d\Omega_{\Pi}}{dt} + \Sigma \sigma_r \frac{d\Omega_r}{dt} + G \frac{dV \bar{u}^2}{dt} + \sum_l E_l \frac{dN_l}{dt} + \\ & + mg \frac{dh_{\Pi}}{dt} + \sigma_{i\text{сн}} \frac{dy_{i\text{сн}}}{dt} + \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + \sigma_{i\xi} \varepsilon_{i\xi} - \\ & - \sum_k \mu_k \frac{dm_k}{dt} = -T \int_V \operatorname{div} (\bar{J}_s' + \rho s \omega) dV + \\ & + T (J_Q X_Q + \Sigma J_{Dj} X_{Dj} + \Sigma \omega_{Ri} X_{Ri} + \sum_m^3 \sum_n^3 \Pi_{mn} X_m), \end{aligned}$$

где σ_{Π} — удельная поверхностная энергия; Ω_{Π} — площадь поверхности частиц слоя; σ_r — удельная граничная энергия r -го вида (межзеренная, межблочная и т. д.); Ω_r — площадь границы r -го вида; G — энергия кристаллической решетки, приходящаяся на единицу ее искажения; u — искажение кристаллической решетки; E_l — энергия дефекта l -го вида; N_l — число дефектов l -го вида; h_{Π} — высота центра массы слоя; m — масса слоя; g — ускорение свободного падения; σ_{ij} — компоненты напряжений, вызванные внешними силами j , $i=1, 2, 3$; ε_{ij} — компоненты скорости деформаций, вызванных внешними силами; $\sigma_{i\xi}$ — компоненты внутренних напряжений, $i=1, 2, 3$, $\xi=1, 2$; σ_{i1} — напряжения, вызванные торможением (замораживанием) упругого последствия при напрессовке слоя; σ_{i2} — напряжения в слое, вызванные различным расширением при нагреве слоя и основания вследствие различия их температурных коэффициентов линейного расширения; $\varepsilon_{i\xi}$ — компоненты деформации, соответствующие внутренним напряжениям; $\sigma_{i\text{сн}}$ — напряжения, вызванные торможением усадки ($y_{i\text{сн}}$) при спекании; μ_k — химический потенциал k -го компонента; m_k — масса k -го компонента; T — температура спекания; $\bar{J}_s'$ — вектор плотности потока энтропии; ρ — плотность слоя; s — удельная энтропия; ω — вектор скорости движения среды; V — объем образца; J_Q — поток теплоты; J_{Dj} — диффузионный поток вещества, обусловленный происходящими в системе физико-химическими процессами j ; ω_{Ri} — поток i -й химической реакции; Π_{mn} — необратимая или вязкая составляющая потока импульса; X_Q , X_{Dj} , X_{Ri} , X_{mn} — соответствующие потокам обобщенные силы.

Данное уравнение отличается от уравнения баланса энергии для процесса спекания порошкового брикета двумя членами:

$$\sigma_{i\varepsilon} \varepsilon_{i\varepsilon} + \sigma_{i\text{сп}} \frac{dy_{i\text{сп}}}{dt};$$

первый член $\sigma_{i\varepsilon} \varepsilon_{i\varepsilon}$ представляет собой энергию диссипации работы внутренних сил, вызванных упругим последствием и различным расширением тел при нагреве вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения исходных материалов (рис. 38). Упругое последствие вызывает в слое напряжение растяжения σ_{i1} , которое снижает усадку, плотность, прочность и другие свойства покрытия. Однако величина этих напряжений при спекании, вследствие их релакса-

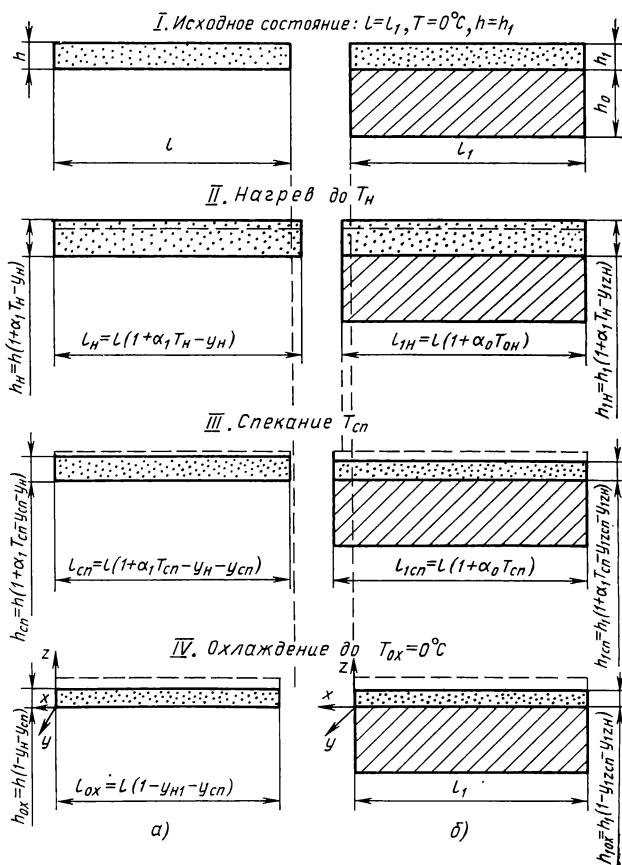


Рис. 38. Изменение размеров при спекании порошкового брикета (а) и порошкового слоя (б)

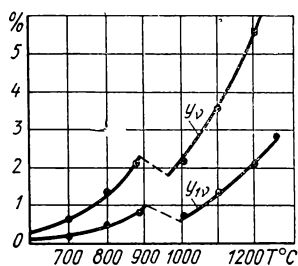


Рис. 39. Зависимость объемной усадки (%) порошкового брикета y_v и слоя y_{1v} от температуры спекания ($p=300$ МПа, $t=90$ мин)

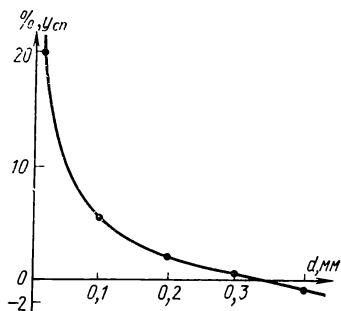


Рис. 40. Зависимость усадки порошкового брикета из твердосплавной смеси ВК8 от размеров порошинок ($T_{cn}=1400^\circ\text{C}$, $t_{cn}=30$ мин)

ции еще при нагреве, незначительна. Напряжение, вызванное различным расширением слоя и основания σ_{i2} , пропорционально α_0 — α_1 . При этом, если $\alpha_1 < \alpha_0$, то в слое возникают напряжения растяжения, снижающие усадку, и т. д.; если же $\alpha_1 > \alpha_0$, то в слое возникают напряжения сжатия, которые способствуют увеличению усадки и т. д.

Второй член $\sigma_{i\text{ сп}} \frac{dy_{i\text{ сп}}}{dt}$ представляет собой энергию, которую замораживает реакция основания. Эта энергия пропорциональна усадке, которая тормозится связью слоя с основанием (см. рис. 38). Реакция связи слоя с основанием вызывает в слое напряжения растяжения $\sigma_{i\text{ сп}}$, уменьшающие усадку, прочность и т. д.

Спекание порошкового слоя исследовали на основании изучения общепринятых характеристик термообработки пористых материалов — определяли усадку, пористость, прочность и другие свойства покрытий и сравнивали с соответствующими показателями спеченного порошкового брикета. На рис. 39 представлена зависимость объемной усадки порошкового брикета y_v и слоя y_{1v} из ПЖ1С от температуры спекания. При твердофазном спекании усадка слоя по толщине y_{1z} почти равна линейной (аксиальной) усадке при спекании порошкового брикета y_z , т. е. $y_{1z} \approx y_z$.

Линейные усадки в плоскости основания (радиальные) вследствие связи слоя с основанием равны нулю, т. е. $y_{1x} = y_{1y} = 0$. Отсюда следует, что объемная усадка слоя равна линейной по оси z , т. е. $y_{1v} \approx y_{1z}$ и примерно в 3 раза меньше усадки брикета, т. е. $y_{1v} \approx y_v/3$.

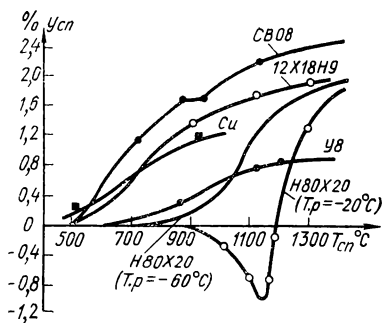


Рис. 41. Температурная зависимость линейной усадки металлизационного материала; $T.p.$ — точка росы

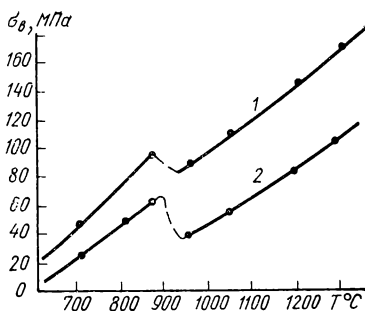


Рис. 42. Температурная зависимость прочности на разрыв спеченного из ПЖ брикета (1) и слоя (2)

Исходя из этого величина усадки порошкового покрытия y_{lv} может быть определена на основании экспериментальных данных по усадке порошковых брикетов y_v , спеченных при аналогичных условиях. Усадка при спекании порошковых материалов зависит от размеров порошинок (гранул). Эта зависимость для виброуплотненных и прессованных при давлении 300 МПа брикетов из твердосплавной шихты ВК8 приведена на рис. 40, откуда видно, что шихта, состоящая из гранул 0,35—0,45 мм, имеет усадку, близкую к нулю. Этот факт широко используют в металлизации.

Усадку металлизационных материалов, данных по которым нет в порошковой металлургии, определяли на отделенных от основания слоях, нанесенных термическим напылением (рис. 41). Усадка увеличивается не только с повышением температуры спекания, но и с увеличением содержания в исходном слое окислов. Примером может служить усадка СВ08 и У8. Усадка СВ08 в 1,5 раза больше, так как содержит окислов в 2 раза больше. Данная закономерность имеет место в случае, если при спекании происходит восстановление окислов, в противном же случае размеры слоя не уменьшаются, но даже увеличиваются (например, спекание металлизационного материала из нихрома при температуре до 1180°C в среде водорода с точкой росы — 20°).

Кинетика роста контактов между частицами порошкового слоя, нанесенного на компактное основание, иная,

чем при спекании обычного порошкового брикета. Это отличие обусловлено торможением вследствие фиксации частиц в плоскости основания тех механизмов роста контактов, которые должны сопровождаться сближением центров частиц в плоскости нанесения, а именно: механизма вязкого течения и объемной диффузии атомов в зону контактов. Меньшая скорость роста контактной площади между частицами слоя приводит к получению меньшей прочности материала покрытия по сравнению с прочностью порошкового материала, спеченного при тех же режимах (рис. 42).

Эксперименты показали, что отношение прочности покрытия на разрыв $\sigma_{в1}$ к прочности спеченного при аналогичных условиях порошкового брикета $\sigma_{в}$ пропорционально отношению их усадок, т. е. $\sigma_{в1}/\sigma_{в} \sim y_{1v}/y_v$. Эта закономерность характерна и для многих других свойств (твердости, электропроводности и т. д.). Повышение свойств покрытий должно идти по пути интенсификации усадки y_{1v} или снижения y_v . Первый путь — активированное спекание, второй — использование шихт с нулевой усадкой, при этом $y_{1v}/y_v \rightarrow 1$.

Появление при нагреве внутри порошкового материала жидкой фазы изменяет механизм и кинетику его спекания. Жидкая фаза внутри слоя образуется вследствие расплавления легкоплавкой составляющей шихты, контактного расплавления соответствующих компонентов шихты или составляющих шихты и материала основания, химического воздействия материалов шихты (Cr), основания (Fe), среды (CO), пропитки и т. д.

Процессы жидкофазного спекания еще недостаточно изучены. Современная теория базируется на моделях, в которых принимают, что жидкая фаза полностью смачивает твердую, а растворимость вещества твердой фазы в жидкой ограничена. Существующие представления сводятся к тому, что различают три стадии (механизма) спекания в присутствии жидкой фазы: перегруппировку частиц под влиянием течения жидкости, растворение — осаждение и образование жесткого скелета [10].

Автор данной книги исходит из того, что механизм спекания порошкового слоя с присутствием жидкой фазы аналогичен механизму жидкофазного спекания порошковых брикетов. Однако связь слоя с основанием изменяет кинетику спекания, а соответственно изменяет свойства покрытия относительно спеченного брикета.

При жидкостном спекании порошкового слоя образующиеся мениски в виде манжет создают, так же как и при спекании брикетов, усилия, которые стягивают частицы. Если учесть, что жидкость, обладая хорошей смазывающей способностью, уменьшает трение и заклинивание, то можно утверждать, что стадия перегруппировки (п) частиц в слое аналогична стадии перегруппировки при жидкофазном спекании брикетов. Вследствие этого уплотнение слоя на этой стадии процесса $y_{1v}(п)$ может описываться уравнением Кингери

$$y_{1v}(п) = k_1 t^{n_1},$$

где n_1 — постоянная несколько больше единицы.

Однако влияние связи слоя с основанием сказывается на уменьшении коэффициента k_1 относительно соответствующего коэффициента спекания порошкового брикета. Условия процесса растворение—осаждение (р—о) при спекании слоя те же, что и при спекании порошкового брикета. Поэтому для слоя можно записать

$$y_{1v}(р—о) = k_2 t^{n_2},$$

где n_2 — постоянная меньше единицы.

Если двухгранный угол в системе достаточно велик, то происходит непосредственный контакт твердых частиц без прослойки жидкой фазы на нем. Контактируемые твердые частицы срастаются и образуют непрерывный жесткий скелет. Порошковый слой в этом случае будет уплотняться со скоростью твердосплавного (тв) спекания слоя

$$y_{1v}(тв) = k_3 t^{n_3},$$

где n_3 — постоянная больше единицы.

Общая усадка слоя

$$y_{1v} = y_{1v}(п) + y_{1v}(р—о) + y_{1v}(тв).$$

Отношение $a = y_{1v}/y_v$ для жидкофазного спекания зависит от соотношения $y_{1v}(п) : y_{1v}(р—о) : y_{1v}(тв)$. Чем больше $y_{1v}(п)$ и $y_{1v}(р—о)$ по сравнению с $y_{1v}(тв)$, тем больше a и тем ближе свойства покрытия, спеченного в присутствии жидкой фазы, к свойствам брикета, спеченного при аналогичных условиях.

Величина $y_{1v}(п)$ пропорциональна стягивающей частицы силе F_θ , которая, в свою очередь, пропорциональна

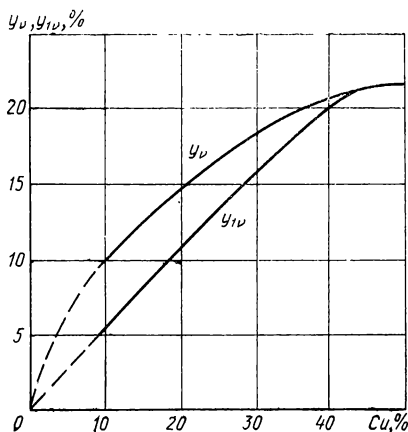


Рис. 43. Зависимость объемной усадки из W—Cu брикета $y_v[10]$ и слоя y_{1v} от содержания меди ($T_{сп} = 1300^\circ \text{C}$)

смачиваемости ($\cos \theta$) и количеству жидкости ($\sin \theta$). Таким образом, усадка слоя при жидкофазном спекании в значительной мере определяется свойствами

границ раздела фаз системы (твердое тело — жидкость, твердое тело — газ и жидкость — газ) и их количественным соотношением. На рис. 43 видно, что с увеличением количества жидкости отношение $y_{1v}/y_v \rightarrow 1$.

При спекании слоя гранулы МНТ—А2+20% Си при 1150°C медь выпотекает и усадка изменяется по закону твердосплавного спекания. Это объясняется отсутствием смачиваемости. Следовательно, закономерности жидкофазного спекания проявляются только при условии смачиваемости жидкости твердой фазы.

Смачиваемость при металлизации повышается введением в шихту флюсов (Ni—Cl , FН_2 и т. д.), специальной подготовкой частиц (гранул) шихты (очисткой и нанесением на поверхность гранул тонких слоев Cu , Ni и т. д.), повышением восстановительной способности среды и приложением давления. Окислы, силициды и бориды в отличие от эмалирования используют с интенсифицирующими покровными металлическими слоями или в смеси с металлическим порошком. Таким образом, окислы и подобные материалы при металлизации связываются между собой через металлические прослойки. Этому также способствует давление, создаваемое при термомеханическом спекании (прокатке, накатке и т. д.).

Механизм и кинетика горячего припрессования порошкового слоя согласно работам М. С. Ковальченко, В. А. Мартынова и автора аналогичны механизму и кинетике горячего припрессования брикетов, поэтому их свойства после спекания одинаковы.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИПЕКАНИЯ СЛОЯ

В данном разделе рассмотрено взаимодействие при спекании исходных материалов со средой и между собой, образование новых фаз и рост зерна.

Взаимодействие при спекании исходных материалов со средой зависит от их химических составов и температуры нагрева. Термообработку при металлизации проводят в защитной (восстановительной) среде, следовательно, насыщения газами (O_2 , N_2 и т. д.) большинства материалов слоя и основания не происходит. Более того, при введении в шихту окислов (с относительно малым родством к кислороду) происходит их восстановление (рис. 44). При твердофазном спекании исходные материалы почти не насыщаются водородом. При жидкофазном спекании насыщение материала покрытия водородом зависит от химического состава и количества жидкости. В большинстве случаев это насыщение незначительно и не оказывает существенного влияния на свойства покрытий.

Испарение при твердофазном спекании практически отсутствует, при жидкофазном оно зависит от режимов ($T_{сп}$, $t_{сп}$) и составляет 1—6% легкоплавкого компонента (например, Zn из Л68). В отдельных случаях испарение используют, чтобы удалить легкоплавкие компоненты и повысить жаростойкость, прочность и другие свойства покрытия.

В процессе спекания взаимодействие покрытия с основой определяется их химическими составами и режимами термообработки. При твердофазном спекании это взаимодействие осуществляется на основе взаимной диффузии. При нанесении ряда покрытий взаимная диффузия способствует ускорению процессов спекания защитного слоя и припекания его к основанию без снижения, а в отдельных случаях даже с повышением служебных свойств основания.

Однако при нанесении ряда других покрытий, особенно покрытий со специфическими (специальными) свойствами (электропроводных, жаростойких и т. п.), диффузия металла основания в материал покрытия снижает их специальные свойства и, следовательно, нежелательна. Нежелательна в ряде случаев также диффузия материала покрытия в материал основания, так как она

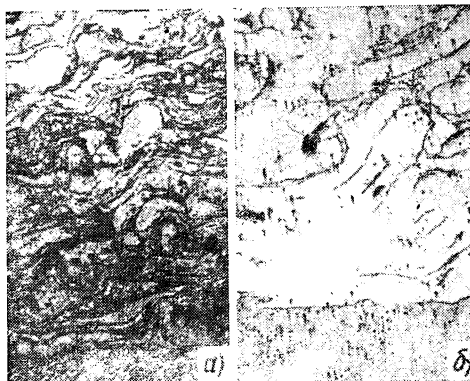


Рис. 44. Восстановление окислов при спекании СВ08—М1—1200—30—Н₂: а—до спекания; б—после спекания -

может снизить прочность, пластичность и т. д., т. е. уменьшить несущую способность конструкции. Следовательно, для металлизации очень важно знать степень (глубину и концентрацию) диффузии материала основания в покрытие и наоборот.

Кинетика диффузии при металлизации в общем описывается уравнениями диффузии в металлах и сплавах. Поток атомов в направлении нормали к границе раздела (z) равен

$$J_1 = -M_{11} \frac{d\mu_1}{dz} - M_{12} \frac{\partial \mu_2}{\partial z} - \dots - M_{1n} \frac{\partial \mu_n}{\partial z} - M_{1T} \frac{\partial T}{\partial z} - M_{1p} \frac{\partial p}{\partial z},$$

где $\frac{\partial \mu_i}{\partial z}$; $\frac{\partial T}{\partial z}$; $\frac{\partial p}{\partial z}$ — градиенты в направлении оси z химического потенциала i -го элемента, температуры и давления.

При сопряжении двух веществ концентрация $C(z, t)$ на глубине z_1 в момент t равна

$$C(z_1, t) = C_0 [1 - \Phi(\omega)],$$

где C_0 — концентрация при $z=0$ и $t=0$; $\Phi(\omega)$ — трансцендентная функция Крампа, аргумента ω ; $\omega = z_1/2\sqrt{Dt}$, D — коэффициент диффузии.

Однако применение этих формул для металлизации требует изменения величины коэффициентов диффузии, которые зависят от пористости (θ) покрытия

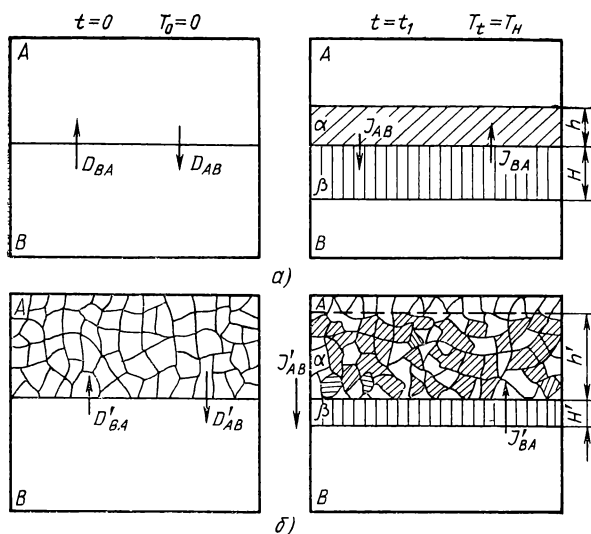


Рис. 45. Влияние пористости на взаимную диффузию сопряженных металлов:

а — компактных; б — пористого с компактным

(рис. 45). Интенсивность диффузионного потока атомов из пористого слоя в компактное основание J'_{AB} меньше, чем потока из компактного материала в компактный I_{AB} . Это объясняется меньшей площадью соприкосновения, через которую происходит взаимная диффузия. Следовательно, коэффициент диффузии атомов материала слоя в основание $D'_{AB} < D_{AB}$. В пределах пористости слоя 0—30% $D'_{AB} = (1 - \theta)^{1/2} D_{AB}$. Исходя из того, что $J'_{AB} < J_{AB}$, имеем $H' < H$.

Диффузионный поток материала основания в пористый слой $J'_{BA} < J_{BA}$. Однако поверхностная (по порам) диффузия и диффузия по границам порошинок дает дополнительный, ощутимый вклад в общую диффузию, поэтому

$$\frac{D'_{BA}}{1 - \theta} > D_{BA}.$$

При этом $D'_{BA} = (1 - \theta)^{1/2} D_{BA}$ (для $\theta = 0 \div 30\%$), а следовательно, $h' > h$.



Рис. 46. Образование микропористости в поверхностном слое основания при высоких режимах спекания СВ08—М1—1320—120—Н₂; $\times 100$

Рис. 47. Обезуглероживание поверхностного слоя основания (сталь 30) вследствие восходящей диффузии углерода в покрытие, содержащее вольфрам и хром; $\times 100$

Если в соединении компактных материалов, для которых $D_{AB} \approx D_{BA}$, заменить один компактный материал пористым (например, А), то $D'_{AB} < D'_{BA}$. Последнее приводит к образованию в компактной части (в основании при высоких режимах спекания $T_{сп}$, $t_{сп}$) пористости (рис. 46). Я. Е. Гегузин объясняет это явление стремлением системы к равновесию.

В ряде случаев при металлизации градиенты химического потенциала компонента и его концентрации в исходных материалах имеют разные знаки (различная активность компонента в присутствии других элементов). Это обуславливает восходящую диффузию в сторону уменьшения химического потенциала. Если в шихте содержатся элементы, имеющие большее сродство к компоненту, находящемуся в материале основы, то при определенных режимах спекания этот компонент из ос-

нования перейдет в покрытие, хотя в нем концентрация этого элемента больше, чем в основании.

Подтверждением сказанного может служить диффузия углерода. Для износостойких покрытий в шихту иногда вводят Сг. В этом случае углерод основания (сталь 30) переходит в покрытие, в котором концентрация углерода больше, чем в основании (рис. 47). Восходящая диффузия углерода вызывается также полем напряжения, температурным полем и одновременным полиморфным превращением.

Материал слоя проникает в основание посредством диффузии через зерна и по их границам. Наблюдаются три вида проникновения материала слоя или его элементов между границами зерен основания: преимущественная диффузия элементов слоя по границам зерен в твердом состоянии; диффузионное проникновение элементов слоя с образованием по границам зерен легкоплавкой структуры (реактивная диффузия); проникновение жидкой фазы слоя по границам зерен.

Необходимое и достаточное условие проникновения жидкой фазы слоя по границам зерен основания: $2\sigma_{тж} < \sigma_{тт}$, где $\sigma_{тж}$ и $\sigma_{тт}$ — поверхностное натяжение на границах твердая — жидкая фаза и твердая — твердая фаза.

Условие данного соотношения удовлетворяется при припекании к стальному основанию слоя, состоящего из жидкой латуни с высоким содержанием цинка (Л52). Жидкая медь не проникает в виде сплошной пленки между границами зерен сплавов на основе железа, так как не удовлетворяет этому условию. Поэтому в зоне перехода наблюдается резкая граница раздела между сталью и прослойкой меди (рис. 48).

Появление жидкой фазы между границами зерен металла основания возможно в результате диффузии в зону границ отдельных элементов из материала покрытия или самих зерен с образованием эвтектической жидкой фазы. Подобный процесс наблюдается при продолжительном припекании к высокоуглеродистой стали при $T=1180^{\circ}\text{C}$ покрытия, содержащего значительное количество сплава СНГН (Ni—Cr—В—Si). Диффузионное проникновение В и Сг в данном случае приводит к образованию на границах зерен эвтектики Fe—В—Cr—C (рис. 49).

При припекании слоев, элементы которых сильно

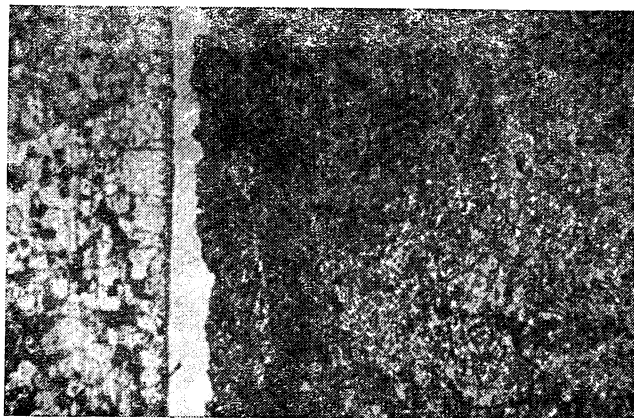


Рис. 48. Зона перехода стального порошкового слоя в стальное основание. Светлая зона — медный подслоя; $\times 100$

растворимы в металле основания, межкристаллитное проникновение выражено слабо или вообще отсутствует. Так, например, при заметной растворимости никеля в железе межкристаллитного проникновения не наблюдается. Межзеренного проникновения также не наблюдается при жидкофазном припекании к стали слоя, содержащего легкоплавкие, слабо растворимые в основе металлы Ag, Pb и т. п.



В результате взаимной диффузии в зоне перехода слоя в основание образуются твердые растворы, эвтектики и химические соединения, обладающие обычно более повышенными прочностными свойствами при пониженной пластичности.

Рис. 49. Образование эвтектики по границам зерен в поверхностном слое основания; $\times 300$

Особенно резко снижаются пластические свойства поверхностных слоев при образовании на них хрупких интерметаллических соединений.

Из характера двойных диаграмм состояния конструкционных металлов и компонентов применяемых на практике шихт следует, что хрупкие интерметаллические прослойки в зоне сопряжения при спекании могут возникать, в частности, при следующих сочетаниях: сталей с шихтами, содержащими Zn, Al, Si; меди и медных сплавов с шихтами, содержащими Zn, Al и др.; титановых сплавов с шихтами, содержащими значительное количество Cu, Fe и т. д.

Вероятность образования прослойки интерметаллидов в зоне сопряжения определяется химическим родством компонентов слоя и основания. Припекание к стали слоев, содержащих значительное количество кремния, приводит к образованию интерметаллида FeSi. Для предотвращения этого в шихту вводят небольшое количество никеля, который имеет родство к кремнию большее, чем железо (Ni_3Si). Цинк, обладающий значительно меньшим родством с железом, чем со многими компонентами наносимого слоя (Cu, Sn, Si и т. д.), не образует интерметаллических прослоек даже при значительном его содержании в шихте.

Влияние интерметаллических прослоек на свойства основания и прочность связи его с покрытием зависит не только от природы образующего вещества, но и от толщины прослойки. Прослойки толщиной до 2 мкм обычно не снижают свойства основания и прочность связи с ним покрытия. Толщина интерметаллической прослойки δ зависит от времени и температуры спекания и может быть определена из известного соотношения, которым описывается рост диффузионных слоев:

$$\delta^2 = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) t_{\text{сп.}}$$

Уменьшить толщину хрупких прослоек возможно за счет снижения температуры T и времени спекания $t_{\text{сп.}}$. Чтобы в процессе спекания не появились интерметаллические прослойки в зоне сопряжения, наносят подслой из материала, не образующего химических соединений с материалом основания в шихты.

Исходный материал сырого слоя (порошки, напыленный слой и т. д.) имеет мелкозернистое строение. В про-



Рис. 50. Рекристаллизация материала слоя при спекании ПЖ1+3ПМ—Н1—1200—90—Н₂; $\times 100$

цессе спекания происходит рекристаллизация и рост зерна слоя (рис. 50). Применяемые на практике режимы спекания значительного роста зерна материала слоя в большинстве случаев не вызывают.

При нанесении покрытий металлизированием на сталь она нагревается от 600 до 1300°C. При нагреве выше температуры 950°C начинается рост зерна. Укрупнение зерна в стали снижает ударную вязкость и некоторые другие динамические характеристики материала основания. Чтобы предотвра-

тить рост зерна при металлизировании, в качестве материала основания используют стали с наследственно-мелкозернистой структурой или легированные стали (40Х, 35ХГС), сокращают выдержку до 10—20 мин, применяют поверхностный нагрев или термомеханическое спекание. Зерно (если оно выросло при спекании) размельчают последующей термической (отжиг) или термомеханической обработкой.

Важное значение при металлизировании приобретает активированное спекание, которое достигается применением вибрации и ультразвука, введением в шихту активирующих добавок, повышением восстановительной способности среды. В качестве активирующих добавок, вводимых в исходную шихту при припекании, используют окислы, хлориды и тому подобные компоненты, которые при $T_{\text{сп}}$ восстанавливаются, разлагаются или расплавляются и образуют жидкую фазу. Активирование спекания порошкового слоя возможно также за счет циклического изменения температуры нагрева в зоне полиморфного превращения или восстановительной способности среды.

ПРИПЕКАНИЕ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ И ОБОЛОЧЕК К ОСНОВАНИЮ

Основной фактор, определяющий возможность практического применения наносимых покрытий, — это прочность их связи с основанием. Усиление связи между слоем и основанием при спекании характеризуется припекаемостью — способностью материалов образовывать в определенных условиях технологического процесса соединения слоя с основанием, свойства которого соответствуют свойствам исходного металла или требованиям технических условий. Припекаемость определяется процессами, происходящими на границе соприкосновения материалов. Эти процессы зависят от химического состава материалов основы и слоя и режимов спекания.

Сырые порошковые слои, нанесенные напылением, напрессовкой и экструзией, сопряжены с основанием через контакты с химической связью (0,3—8,0% площади), окислы и другие неметаллические соединения (40—85%), пластификатор и пустоты (5—40%). Сопряжение 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.

Прочность сцепления, которая гарантирует надежность metallизированной детали при работе под нагрузкой, может быть обеспечена химической связью типа металлической, ковалентной или ионной. Вследствие этого теория припекания рассматривает механизм и закономерности роста контактов с химической связью. Рост последних согласно теории спекания [28, 32] определяется диффузией, ползучестью и другими физико-химическими процессами, для активации которых необходимо вводить энергию. При metallизировании для этого используется тепловая и механическая энергия.

При нагреве и выдержке в зоне перехода слоя в основание протекают процессы, влияющие на прочность их сцепления: испарение и выгорание (влаги, пластификатора), восстановление окислов и разложение химических соединений, релаксация напряжений, образование контактов с химической связью, «структурная подстройка» (отдых), диффузия, рекристаллизация, рост зерна, образование твердых растворов и химических соедине-

ний, рост существующих и вновь образованных контактов.

На ранней стадии припекания образуются контактные мостики, которые соединяют отдельные места порошкового слоя с основанием, до того не находившиеся в непосредственном контакте. Существуют два механизма образования и роста мостиков: образование и рост усов из газовой фазы, зарождающихся на выходах винтовых дислокаций, и образование между порошковым слоем и основанием новой фазы при восстановлении окислов и разложении химических соединений типа $Ni-Cl$ и т. д. Образование мостиков легко наблюдается при припекании порошковых слоев, нанесенных шликерным и экструзионным способами.

Основные механизмы увеличения контактной площади между частицами и основанием — вязкое течение, объемная и поверхностная диффузия, перенос вещества через газовую фазу и сдвиговая деформация (под действием внешних сил).

Р. Г. Березин на основании экспериментальной зависимости прочности соединения металлизированных слоев со сталью Ст3 от температуры и времени спекания оценил эффективную энергию активации образования соединения. Полученные значения эффективной энергии активации образования соединения приведены ниже:

Прочность соединения, МПа	60	70	80	90	100
Эффективная энергия активации (Ea), эв . . .	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8

На основании этих данных с учетом анализа микроструктур возможно предположение, что образование и рост контактов на ранних стадиях термообработки осуществляются при помощи поверхностной диффузии. С развитием процесса благодаря наличию градиента концентрации вакансий и действию сил поверхностного натяжения получают развитие механизмы диффузионно-вязкого течения по границам зерен и зернограницной самодиффузии. Кроме того, на данной стадии термически активируется процесс зернограницной диффузии в компактном основании ($Ea=1,4$ эВ). Подход атомов к зоне контакта со стороны основания способствует расширению площади контактов.

На начальной стадии горячего прессования происходит уплотнение порошкового слоя и заполнение частица-

ми слоя неровностей поверхности основания. Затем в участках соприкосновения частиц с поверхностью основания протекает пластическая деформация с образованием активных центров и установлением между ними химической связи. Дальнейшее развитие процесса приводит к инициированию зернограничного диффузионно-вязкого течения (по механизму Кобле), переходящего в объемное диффузионно-вязкое течение в зоне соединения, со стороны порошкового слоя, и зернограничной диффузии в компактном основании. Причем для медного порошкового слоя объемное диффузионно-вязкое течение протекает по механизму Набарро-Херинга.

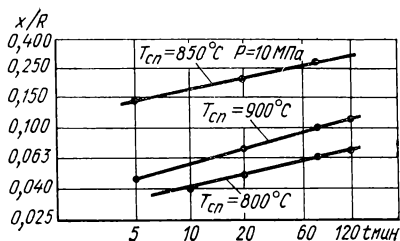


Рис. 51. Зависимость хорды припекания от времени спекания

При динамическом горячем прессовании (ДГП), как показывает анализ зоны соединения после испытания на разрыв, характер взаимодействия порошкового слоя с основанием аналогичен статическому горячему прессованию. Однако время воздействия при ДГП недостаточно для протекания релаксационных явлений, и поэтому в порошковом слое наблюдается большое количество несовершенств, причем чем больше энергия удара, тем больше и число несовершенств.

Кинетика роста контактной площади изучалась также по изменению x/R (x — размер шейки, R — диаметр частиц) при припекании порошковых слоев, нанесенных на пластину из сферических частиц. На рис. 51 представлены зависимости хорды припекания от времени выдержки в координатах $\lg x/R$, $\lg t$. При припекании сферических частиц выполняется закон $x^5 \sim t$, а при приложении давления — закон $x^4 \sim t$. Это соответствует исследованиям Дж. Кучинского и М. С. Ковальченко.

Прочность сцепления покрытия с основанием повышается с увеличением $T_{сн}$, $t_{сн}$, $p_{сн}$ и количеством жидкости (рис. 52). Применение оптимальных режимов обеспечивает получение связи слоя с основанием прочностью 80—600 МПа и выше. Особенно высокую проч-

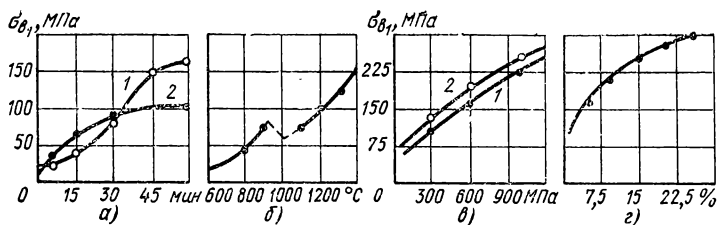


Рис. 52. Зависимость прочности связи покрытия с основанием:

a — от времени спекания; 1 — СВ08—М1—1200—Н₂; 2 — ПЖ1С+10ПЖМ+0,2 NiCl—Н1—1200—Н₂; *б* — от температуры спекания: ПЖ1С+10ПЖМ—Н1—(Т_{сп})—60—Н₂; *в* — от давления горячего припрессования: 1 — ПЖ1С+10ПЖМ—Н6—800—5—Н₂; 2 — ПЖ1С+10ПЖМ—Н6—900—5—Н₂; *г* — от количества жидкости ПЖ1С+10ПЖМ—Н1П (Л168)—1080—Н₂ (5% Л168 введено в шихту)

ность связи с основанием имеют покрытия, нанесенные ТМС (рис. 53, 54).

Прочность связи покрытия с основанием ($\sigma_{св}$) зависит также от химического состава и состояния поверхностного слоя основания. Хорошей припекаемостью обладают металлы, окислы которых относительно легко восстанавливаются в процессе спекания (Fe, Ni, Cu, Mo

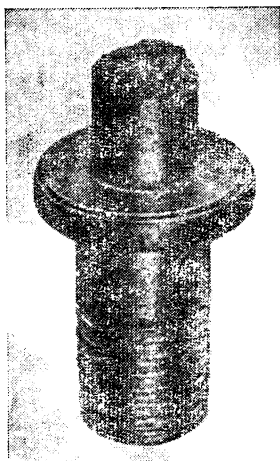


Рис. 53. Штырь после отрыва его от металлизированного покрытия ПЖС+35ПМ—Н5—1160—10—Н₂. Отрыв произошел по материалу покрытия

Рис. 54. Микроструктура зоны перехода покрытия ПЖ1С+35ПМ—Н5—1160—10—Н₂ в стальное основание; прочность связи 300 МПа; $\times 100$

и т. п.); худшей припекаемостью обладают покрытия, нанесенные на Ti, Cr и т. д.

Припекаемость покрытий к сплавам зависит от химического состава и количества легирующих компонентов. Компоненты, повышающие диффузию, снижающие температуру плавления или восстановления окислов основного металла, улучшают припекаемость, а компоненты, образующие на поверхности трудновосстанавливаемые окислы, уменьшают диффузию — ухудшают припекаемость.

Влияние примесей зависит также от режимов и среды спекания. Углерод в небольшом количестве (до 0,8%) незначительно влияет на прочность связи покрытий, нанесенных на сталь. Углерод в количестве 3—5% снижает прочность связи покрытий, наносимых при относительно низких температурах (до 900°C), и значительно повышает при высоких (более 1000°C). Хром при относительно невысоких температурах спекания образует на поверхности (12X18H9T) трудновосстанавливаемые окислы, чем снижает припекаемость; при высоких температурах и активной среде он восстанавливается и выступает активатором роста контактов.

Припекание к основанию слоев, состоящих из пластин и оболочек, осуществляется горячим припрессованием (диффузионной сваркой), пайкой, термодиффузионным способом (сваркой спеканием) и другими способами.

В процессе сварки спеканием поверхности соединяемых частей сопрягаются через порошковый слой и нагреваются в защитной атмосфере. Порошковый слой наносят напылением, шликерным и другими способами на одну или обе соединяемые поверхности. Толщина порошкового слоя 0,1—1 мм. В качестве исходного материала используют высокопластичный металл или сплав, имеющий $T_{пл1} < T_{пл2}$ (бронзу СМГН и т. д.). Под сопряжением подразумевается операция, которая создает связь исходных материалов с прочностью, достаточной для сохранения их связанности при последующих операциях — транспортировке и нагреве. Сопряжение осуществляют сжатием или механическим закреплением. При сжатии соединение образуется за счет схватывания.

Режимы сварки спеканием: давление $p_{п}$ выбирают из условия $\sigma_{в1} < p_{п} < \sigma_{в2}$, температура нагрева $T_{н} = 0,75 \div 0,95 T_{пл}$ материала порошкового слоя, продолжительность выдержки при температуре обработки $t = 3 \div 15$ мин.

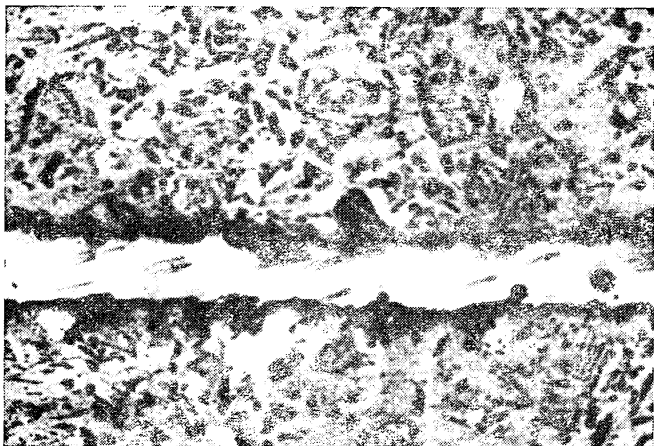


Рис. 55. Микроструктура зоны соединения, полученного сваркой спеканием стальных заготовок; прослойка БрОСЦ5-5-5; $\times 100$

Сварка спеканием — разновидность, которая включает в себя отдельные элементы холодной сварки (сдавливание) металлокерамической пайки (использование промежуточного слоя) и диффузионной сварки (нагрев, но без приложения давления). На рис. 55 приведена микроструктура соединения, полученного сваркой спеканием.

Повышение прочности связи покрытия с основанием при оптимальных режимах спекания при максимально допустимых $T_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}$ или $p_{\text{сп}}$ возможно за счет увеличения истинной поверхности основания; изменения химического состава поверхностного слоя — обезуглероживания, окисления, диффузионного насыщения и т. д.; нанесения подслоя.

Увеличение площади контактов, приходящихся на 1 см^2 поверхности, повышает прочность связи спекленного покрытия с основанием. Прочность связи покрытия с опескоструенной или избирательно протравленной поверхностью в 1,3—2 раза выше, чем со шлифованной поверхностью. Повышение прочности связи покрытия с чугуном осуществляется выжиганием поверхностного углерода. Если металл основания образует с кислородом восстанавливаемые в применяемых средах окислы, то активирование процесса роста контактов возможно за счет создания на покрываемой поверхности

тонкого слоя окислов (нагрев на воздухе). При восстановлении этих окислов в процессе спекания образуются активные атомы, которые, осаждаясь на перешейках, расширяют тем самым площадь контактов.

Наиболее эффективно повышение прочности связи покрытия с основанием нанесением подслоя. В качестве исходного материала при этом используют припой. Тонкий слой (0,1—0,2 мм) припоя наносят различными способами. Однако наиболее приемлемо термическое напыление, так как оно обеспечивает необходимую шероховатость.

Активирование припекания возможно также за счет тех процессов, которые применяют для активации процесса спекания слоя — приложения вибрации, введения в шихту активированных добавок, повышения восстановительной способности среды и т. п.

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ МЕТАЛЛИРОВАНИИ

Деформации и внутренние напряжения определяют качество наносимых покрытий. Напряжения в слое (покрытии) при металлизировании возникают на всех этапах: нагреве, выдержке (спекании) и охлаждении.

Деформации и напряжения в слое при нагреве. Относительное линейное изменение размеров порошкового брикета при нагреве (см. рис. 31)

$$\varepsilon_n = \alpha_1 T_n - y_n + \delta_n.$$

Относительное изменение размеров основания (без слоя) при нагреве

$$\varepsilon_{он} = \alpha_0 T_{он} + \delta_{он},$$

где T_n и $T_{он}$ — температура нагрева материала брикета и основания, °C; y_n — линейная усадка брикета при нагреве; δ_n и $\delta_{он}$ — относительное линейное изменение размеров брикета и основания, вызванное структурным превращением его материала.

При нагреве изменение размеров слоя, нанесенного на компактное основание, зависит от направления относительно последнего. Относительное изменение размеров слоя в направлении, перпендикулярном к основанию, т. е. деформация ε_{1zn} равна

$$\varepsilon_{1zn} = \alpha_1 T_{1n} - y_{1zn} + \delta_{1n},$$

где $y_{1\text{хн}}$ — линейная усадка слоя при нагреве по оси z .

Деформационные условия порошкового слоя при нагреве отличаются от деформационных условий при нагреве порошкового брикета. Это отличие определяется связью порошкового слоя с основанием. Изменение при нагреве линейных размеров, порошкового слоя по оси x , т. е. в плоскости нанесения $\epsilon_{1\text{хн}}$ при условии $h_0 > h_1$ и $E_0 \gg E_1$, происходит по закону теплового расширения основания, т. е. $\epsilon_{1\text{хн}} = \epsilon_{1y\text{н}} = \epsilon_{0\text{н}}$.

Связь порошкового слоя с основанием изменяет деформацию слоя относительно деформации порошкового брикета на $\Delta\epsilon_{1\text{хн}}$:

$$\Delta\epsilon_{1\text{хн}} = \epsilon_{0\text{н}} - \epsilon_{\text{н}} = \alpha_0 T_{0\text{н}} + \delta_{0\text{н}} - \alpha_1 T_{\text{н}} + y_{\text{н}} - \delta_{\text{н}}.$$

Это различие деформации вызывает в слое напряжения, величина которых зависит от размеров и свойств материалов слоя и основания.

Порошковый слой представляет собой конгломерат, состоящий из твердых (упругих) элементов (металлических, окисных или других частиц) и высокопластичных полужидких, газообразных веществ, которыми заполнены промежутки между твердыми элементами. Спекание нанесенного материала покрытия осуществляется при температуре, равной $0,6\text{—}0,85 T_{\text{пл}}$. Поэтому упругие частицы некоторых материалов переходят в пластическое состояние, еще не достигнув температуры спекания. Таким образом, порошковый слой представляет собой вязко-упругую среду. В теории вязкоупругости деформация твердого тела по своей природе есть состояние движения, и поэтому явление текучести необходимо рассматривать как некоторое движение непрерывной среды во времени.

Исходя из этого можно приближенно оценить линейные напряжения в слое $\sigma_{1\text{хн}}$ в момент нагрева $t_{\text{н}}$ при равномерной скорости нагрева $dT_{\text{н}}/dt_{\text{н}} = \text{const} = v_{\text{н}}$:

$$\sigma_{1\text{хн}} = \Delta\dot{\epsilon}_{1\text{хн}} H_{1\text{н}} t_{\text{н}} e^{-t_{\text{н}}/t_0},$$

где $\Delta\dot{\epsilon}_{1\text{хн}}$ — скорость разности деформации слоя и основания при нагреве, $1/\text{с}$;

$$\Delta\dot{\epsilon}_{1\text{хн}} = \alpha_0 v_{\text{н}} + \dot{\delta}_{0\text{н}} - \alpha_1 v_{\text{н}} + \dot{y}_{\text{н}} - \dot{\delta}_{\text{н}};$$

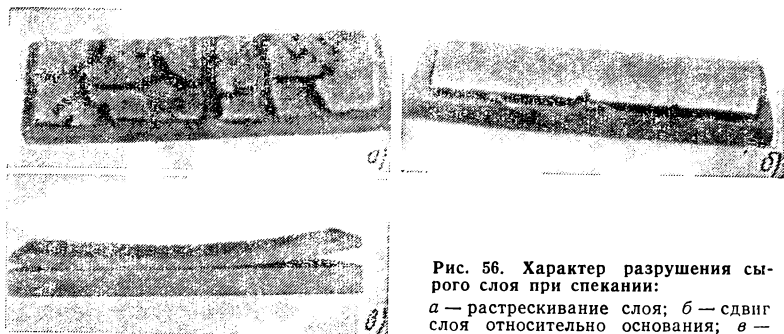


Рис. 56. Характер разрушения сырого слоя при спекании:

а — растрескивание слоя; *б* — сдвиг слоя относительно основания; *в* — отрыв и изгиб покрытия

δ_n — скорость деформации материала слоя, вызванная полиморфным и другими превращениями, $1/c$; $\delta_{он}$ — то же материала основания; y_n — скорость усадки материала порошкового брикета при нагреве, $1/c$; $H_{1н}$ — длительный модуль упругости, Па, $H=E/c$; c — коэффициент, равный 5—10; t_0 — время релаксации напряжений, с.

При положительном значении $\sigma_{1хн}$ слой растянут; при отрицательном значении — сжат. Характер проявления $\sigma_{1хн}$ зависит от его вида и величины, а также прочностных свойств слоя ($\sigma_{в1}$ — прочности на разрыв, $\sigma_{св}$ и т. д.). Если $\sigma_{1хн} > \sigma_{в1}$, то происходит разрушение слоя с образованием сетки трещин (рис. 56, *а*). При $|\sigma_{1хн}| > |\sigma_{в1}|$ слои вздуваются или сдвигаются относительно основания (рис. 56, *б*).

Основным путем снижения $\sigma_{1хн}$ является уменьшение $\Delta\epsilon_{1хн}$. Это может быть достигнуто за счет такого нагрева, при котором создается неравномерное температурное поле, обеспечивающее $\alpha_1 T_{1н} = \alpha_0 T_{он}$, и снижения $y_{1н}$. Последнее обеспечивается использованием шихты крупной зернистости, увеличением плотности сырого слоя, снижением влаги и т. д.

Деформации и напряжения при спекании (выдержке). При спекании порошкового брикета происходит усадка, величина которой зависит от химического и зернового состава шихты, режимов прессования и спекания и других факторов:

$$y_{сп} = f(R, L, p_p, p_{сп}, T_{сп}, t_{сп} \dots),$$

где R — размер порошинок (гранул); L — коэффициент, зависящий от химического состава исходного материала

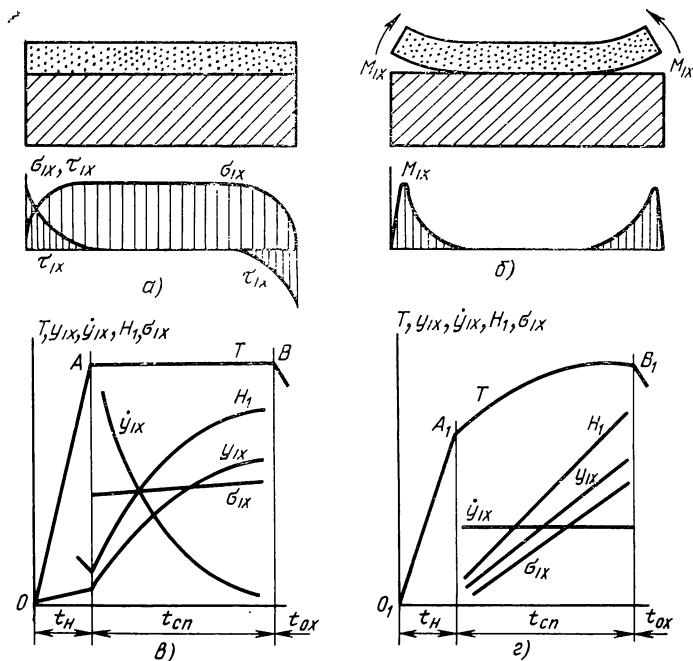


Рис. 57. Эпюры и характер изменения напряжений при спекании порошкового слоя:

а — эпюры нормальных σ_{1x} и касательных τ_{1x} напряжений; б — эпюры изгибающих моментов M_{1x} ; в, г — изменение y_{1x} , y_{1y} , y_{1z} , σ_{1x} , H_1 в зависимости от температурного режима спекания OAB (в) и $O_1A_1B_1$ (г)

шихты; $p_{\text{п}}$ — давление прессования брикета; $p_{\text{сп}}$ — давление горячего припрессования.

При спекании (выдержке) усадка порошкового слоя в направлении, перпендикулярном к основанию, $y_{1z} = y_{1v} \approx y_z$, а в направлениях, параллельных поверхности нанесения, вследствие связи слоя с основанием $y_{1x} = y_{1y} = 0$ (y_{1x} , y_{1y} , y_{1z} — усадка при спекании порошкового слоя соответственно по оси x , y , z ; y_{1v} — объемная усадка слоя; y_z — осевая усадка при спекании порошкового слоя). Такое торможение усадки вызывает в слое нормальное напряжение $\sigma_{1x\text{сп}}$, касательное напряжение в зоне соединения слоя с основанием $\tau_{1x\text{сп}}$, изгибающий момент $M_{1x\text{сп}}$ и напряжение (силу) отрыва слоя от основания $\sigma_{1z\text{сп}}$ (рис. 57, а, б).

Спекание при металлизации происходит при температуре, равной 0,55—0,95 $T_{пл}$ исходного материала шихты в течение 5—120 мин. В этих условиях основным механизмом усадки является вязкое течение — кратковременная ползучесть без мгновенной упруго-пластической деформации. Наибольшее напряжение в слое большой длины $\sigma_{1хсп}$ в приближенном виде можно выразить

$$\sigma_{1хсп} = e^{-t_{сп}/t_0} \int_0^{t_{сп}} y_{1х} H_1(T_{сп}, t_{сп}) dt,$$

где $\dot{y}_{1х}$ — скорость линейной усадки порошкового брикета из материала слоя при спекании в условиях спекания слоя, 1/с.

На рис. 57, в показан характер изменения $\dot{y}_{1х}$ и H_1 от времени спекания. При $T_{сп} = \text{const}$ скорость усадки в начальном периоде очень велика, это может привести к $\sigma_{в1} < \sigma_{1хсп}$, тогда произойдет разрушение слоя (рис. 56, а). Если же $T_{сп}$ в период выдержки изменяется, как это показано на рис. 57, г, то $y_{1х} \approx \text{const}$; это условие обеспечивает наименьшую вероятность разрушения слоя при достижении требуемой $y_{1з}$.

Последняя формула позволяет пока качественно оценивать возникающие в слое напряжения, так как отсутствуют данные по $\dot{y}_{1х}$, H_1 и t_0 порошковых материалов. Однако из формулы четко следует, что $\sigma_{1х}$ возрастает с увеличением $y_{1х}$ и H_1 .

Нормальное напряжение в слое, нанесенном на пластину конечной длины L , имеет максимальное значение в средней части, а с определенной длины от торца $l_{кр}/2$ начинает снижаться и становится равным нулю при $y = x = 0$; L , т. е. на торцах (см. рис. 57, а).

Изменение нормального напряжения в торцевой части слоя определяет $\tau_{1хсп}$ и $\sigma_{1зсп}$:

$$\tau_{1хсп} \sim h_1 \frac{d\sigma_{1х}}{dx};$$

$$\sigma_{1зсп} \sim h_1 \frac{d\sigma_{1х}}{dx}.$$

Создаваемый усадкой момент (см. рис. 57, б)

$$M_{1хсп} \approx a [(l_{кр}/2) - x] x \sigma_{1зсп},$$

где a — ширина слоя, м.

Определение σ_{1x} очень сложно, поэтому приведенные соотношения можно использовать для качественного анализа экспериментальных исследований.

Если при спекании:

$$1) \sigma_{b1} > \sigma_{1xсп}, \tau_{св} > \tau_{1xсп} \text{ и } \sigma_{св} > \sigma_{1zсп},$$

происходит качественное припекание слоя к основанию;

$$2) \sigma_{b1} < \sigma_{1xсп}, \tau_{св} > \tau_{1xсп} \text{ и } \sigma_{св} > \sigma_{1zсп};$$

происходит образование трещины в средней части образца (см. рис. 56, а);

$$3) \sigma_{b1} > \sigma_{1xсп}, \tau_{св} < \tau_{1xсп} \text{ и } \sigma_{св} > \sigma_{1zсп},$$

происходит сдвиг покрытия в среднюю часть пластины (см. рис. 56, б);

$$4) \sigma_{b1} > \sigma_{1x}, \tau_{св} > \tau_{1xсп} \text{ и } \sigma_{св} < \sigma_{1zсп},$$

происходит отслоение покрытия и его изгиб (см. рис. 56, в), где σ_{b1} — предел прочности слоя на разрыв, Па; $\tau_{св}$ — прочность связи слоя с основанием на срез, Па.

Исходя из пп. 1—4 и данных экспериментальных исследований можно определить причину дефекта и наметить меры предупреждения его возникновения. Снизить напряжения в слое при его спекании можно уменьшением скорости усадки. Это достигается увеличением размеров порошинок шихты, повышением (а в некоторых случаях понижением) давления напрессовки или изменением температурного режима спекания (см. рис. 57, г). Снижение $\tau_{1xсп}$, $\sigma_{1zсп}$ и $M_{1xсп}$ возможно также за счет уменьшения толщины слоя. Сдвиг и отрыв (см. рис. 56, б и в) можно предупредить повышением $\tau_{св}$ и $\sigma_{св}$, т. е. увеличением шероховатости покрываемой поверхности или нанесением подслоя.

Деформации и напряжения при охлаждении. При металлизировании очень важно определенис возникающих в покрытиях при охлаждении остаточных напряжений, влияющих как на свойства покрытий, так и на свойства всей конструкции (изделия). В процессе спекания конгломерат части пористого слоя превращается в вещество, свойства которого близки к свойствам материала порошинок.

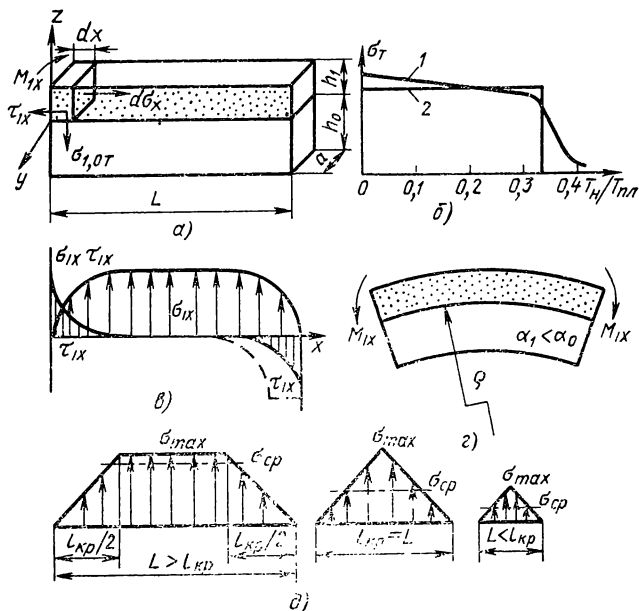


Рис. 58. Схемы действующих сил и эпюры напряжений в слое при охлаждении металлизированного образца:

a — элементарный объем слоя; *b* — аппроксимация реального тела (1) моделью (2); *в* — эпюры нормальных σ_{1x} и касательных τ_{1x} напряжений; *г* — изгиб образца под действием M_{1x} ; *д* — изменение $\sigma_{\max}$ и σ_{cp} в зависимости от длины покрытия

Отличие свойств спеченного материала от свойств компактного объясняется пористостью. Однако некоторые свойства (тепловой коэффициент линейного расширения, характер сопротивления механическим воздействиям и др.) не зависят или слабо зависят от пористости. Поэтому для определения напряжений в покрытиях, нанесенных металлизированием, можно использовать методики и расчеты, применяемые при исследовании напряжений в охлаждаемом многослойном компактном материале.

На рис. 58 представлена зависимость предела текучести реального металла σ_T от температуры. При повышении температуры σ_T сохраняет свое высокое значение до $0,33 T_{пл}$, а затем резко снижается. При металлизации охлаждение происходит с температур $0,5-0,9 T_{пл}$,

при которых материалы находятся в пластическом состоянии. Вследствие этого возникающие в начальном периоде напряжения релаксируются. Значительный рост напряжений в покрытиях происходит при охлаждении до температуры ниже $0,33 T_{пл}$ материала покрытия.

Для определения этих напряжений: 1) реальное тело аппроксимируем моделью со свойствами, соответствующими кривой 2 на рис. 58, б); 2) напряжениями, возникающими при температуре выше $0,33 T_{пл}$, пренебрегаем, т. е. приравниваем их к нулю, 3) используем теорию упругости, при этом температуру перехода материала слоя из пластического в упругое состояние принимаем $0,33 T_{пл}$.

Термоупругие напряжения, возникающие вследствие различия теплового расширения исходных материалов в бесконечной полосе (толщиной h_0), покрытой с двух сторон слоями толщиной h_1 при произвольном распределении температуры по оси z и $dT/dx=0$, можно определить [39]

$$\sigma_1 = -\epsilon_1 T_1 + \frac{1}{2} \frac{\int_{-(h_0+h_1)}^{h_0} \epsilon_1 T_1 dz + \int_{-h_0}^0 \epsilon_0 T_0 dz + \int_0^{h_1} \epsilon_1 T_1 dz}{h_0 + h_1 \epsilon_{10}} +$$

$$+ \frac{3}{2} z \frac{\int_{-(h_0+h_1)}^{-h_0} \epsilon_1 T_1 z dz + \int_{h_0}^0 \epsilon_0 T_0 z dz + \int_0^{h_1} \epsilon_1 T_1 z dz}{h_1^3 + (h_0^3/8) (\epsilon_{10} - 1)},$$

где

$$\epsilon_1 = \frac{\alpha_1 T_1}{1 - \mu_1}; \quad \epsilon_0 = \frac{\alpha_0 T_0}{1 - \mu_0}; \quad \epsilon_{10} = \frac{E_0 (1 - \mu_1)}{E_1 (1 - \mu_0)};$$

E_1, E_0 — модуль упругости материала слоя и основания; μ_1, μ_0 — коэффициент Пуассона для материала покрытия и основания; T_1 и T_0 — температура покрытия и основания, °С.

При низких и средних скоростях охлаждения можно принять $T_1 = T_0$, тогда

$$\sigma_1 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_0) \Delta T E_1}{(h_1/h_0) (E_1/E_0) (1 - \mu_0) + (1 - \mu_1)},$$

где ΔT — разность температур, °С; $\Delta T = 0,33 T_{пл} - T_K$; T_K — температура, при которой определяется напряжение.

При определении остаточных напряжений $T_K=0$ и $\Delta T=0,33 T_{пл}$.

Радиальные σ_{1r} , тангенциальные $\sigma_{1\theta}$ и осевые σ_{1z} напряжения в покрытиях, нанесенных на полый цилиндр, при нестационарном осесимметричном распределении температур $T=T(r, t)$ определяют по следующим формулам [4]:

$$\sigma_{1r} = A \left[1 - \frac{(h_1 + r_o)^2}{r^2} \right];$$

$$\sigma_{1\theta} = A \left[1 + \frac{(h_1 + r_o)^2}{r^2} \right];$$

$$\sigma_{1z} = E_1 \varepsilon_z - \alpha_1 E_1 T + 2A\mu,$$

где

$$A = \frac{E_1 E_o (\alpha_1 - \alpha_o) T}{(F - 1) E_o + (2\mu - 1) (E_o - F E_1)};$$

$$\varepsilon_z = \frac{E_o \alpha_o T - E_1 \alpha_1 T + 2A (\mu_1 + \mu_o)}{E_o - E_1 F};$$

$$F = \left[1 - \frac{(h_1 + h_o)^2}{h_o^2} \right].$$

При этом принято $\mu_1 = \mu_o$. Это может дать погрешность до 10% (в реальных случаях 2—3%, что вполне допустимо).

Приведенные выше формулы служат для определения термических напряжений. Однако при охлаждении напряжения во многих покрытиях возникают также и вследствие структурных превращений, происходящих при температурах ниже $0,33 T_{пл}$ в материалах основания и слоя. Наиболее характерен пример мартенситного превращения в сталях. В этом случае формулы для определения напряжений в покрытиях должны содержать члены, отражающие влияние объемных изменений структурного превращения исходных материалов — $\Delta \delta E_1$, где $\Delta \delta = \delta_1 - \delta_o$; δ_1, δ_o — линейные деформации, вызванные структурными превращениями соответственно материала слоя и основания. Таким образом,

$$\sigma_1 = \frac{[(\alpha_1 - \alpha_o) \Delta T + \Delta \delta] E_1}{(h_1/h_o) (E_1/E_o) (1 - \mu_o) + (1 - \mu_1)}.$$

Аналогичным образом

$$A = \frac{[(\alpha_1 - \alpha_o) T + \Delta \delta] E_1}{(F - 1) + (2\mu - 1) (1 - F E_1/E_o)}.$$

Формулы выведены для пластины и цилиндра бесконечных длин и служат для определения максимального нормального напряжения $\sigma_1 = \sigma_{\max}$. Однако для металлизации (и некоторых других способов нанесения) необходимо также знать характер распределения нормальных и других напряжений не только в средней части, но и в зоне торца, где нормальное напряжение σ_{1x} уменьшается и достигает (на торцах) нулевого значения, а напряжения среза τ_{1x} , отрыва σ_{1z} и изгибающий момент M_{1x} достигают своих наибольших значений (рис. 58, *в*—*д*). Эти напряжения (τ_{1x} , σ_{1z}) в большинстве случаев являются определяющими, т. е. от их величин зависят целостность слоя и качество (несущая способность) покрываемой конструкции (изделия).

Условия работы покрытия аналогичны условиям работы волокна в матрице композиционного материала. В обоих случаях под нагрузкой работают композиции из двух взаимно связанных разнородных материалов [16, 29]. Исходя из этого автор при выводе формул для определения напряжений в торцевой части покрытия использовал методику и математический аппарат волокнистого упрочнения.

Нормальное напряжение

$$\sigma_{1x} = \sigma_{\max} \left[1 - \frac{\operatorname{ch} \beta [(l/2) - x]}{\operatorname{ch} (\beta l/2)} \right],$$

где x — расстояние от торца до рассматриваемой точки, мм;

$$\beta = \sqrt{\frac{G_0}{E_1} \frac{h_0}{(h_0 + h_1)}};$$

G_0 — модуль сдвига материала основания, Па; l — длина образца, м.

Характер распределения σ_{1x} в покрытии представлен на рис. 58, *в* штриховой линией. В действительности σ_{1x} достигает $\sigma_{\max}$ на участке $l_{\text{кр}}/2$. Вследствие этого характер σ_{1x} имеет вид, показанный на рис. 58, *в* сплошной линией. При этом чем больше отношение G_0/E_1 , тем быстрее растет напряжение в покрытии с удалением от торца, т. е. меньше $l_{\text{кр}}/2$.

Касательные напряжения в плоскости перехода покрытия в основание τ_{1x} определяют из рассмотрения

элементарного объема (см. рис. 58, а). Из условия равновесия имеем $d\sigma_{1x}h_1a = \tau_{1x}dx \cdot a$, откуда

$$\tau_{1x} = h_1 \frac{d\sigma_{1x}}{dx} = h_1 \sigma_{\max} \frac{d}{dx} \left[- \frac{\operatorname{ch} \beta [(l_{\text{кр}}/2) - x]}{\operatorname{ch} (\beta l_{\text{кр}}/2)} \right].$$

На рис. 58, а представлены эпюры τ_{1x} . Если $\tau_{1x} < \tau_T$, где τ_T — предел текучести на срез ($\sim \sigma_T/2$), то эпюра имеет вид кривой, проведенной сплошной линией; если $\tau_{1x} > \tau_T$, то эпюра имеет вид кривой, проведенной штриховой линией.

Напряжения отрыва σ_{1z} определяют также из условия равновесия элементарного объема (см. рис. 58, а):

$$\sigma_{1z} = 2h_1 \frac{d\sigma_{1x}}{dx},$$

т. е. характер распределения сил отрыва (эпюра) подобен характеру распределения сил среза.

Если взять сумму моментов сил, действующих на элементарный объем относительно его центра, то

$$M_{1x} = \frac{h_1}{2} \tau_{1x} = \frac{h_1^2}{2} \sigma_{\max} \frac{d}{dx} \left[\frac{\operatorname{ch} \beta [(l_{\text{кр}}/2) - x]}{\operatorname{ch} (\beta l_{\text{кр}}/2)} \right].$$

Анализ приведенных выше формул показывает, что напряжения в покрытиях определяются главным образом $\Delta\alpha$, ΔT и $\Delta\delta$. Величина их также зависит от соотношения физико-механических свойств и размеров покрытия и основания: h_1/h_0 , E_1/E_0 , G_0/E_1 и т. д.

Возникающие в наносимом слое при охлаждении временные напряжения при неблагоприятных технологических режимах могут превзойти допустимые и привести к разрушению (отслоению) покрытия. Влияние на работоспособность изделий остаточных напряжений зависит от их вида и величины, а также от характера действующих на изделие внешних сил. Во многих случаях желательно, а в некоторых даже обязательно, чтобы остаточные напряжения были минимальными.

Существуют различные способы снижения временных и остаточных напряжений. Основной метод снижения σ_{1x} , τ_{1x} и др. — согласование свойств покрытия и основания. При выборе материала покрытия, а в отдельных случаях и основания следует исходить из условия $|\alpha_1 - \alpha_0| \rightarrow \min$ или $(\alpha_1 - \alpha_0)\Delta T + \Delta\delta \rightarrow \min$. Примером может служить добавка меди в твердосплавную шихту типа ВК, которая повышает α_1 и уменьшает E_1 . Перспективна

замена стального основания сплавом железа с никелем такого состава, чтобы $\alpha_0 \approx \alpha_1$ ($\alpha_{\text{FeNi}} \approx \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3\text{Ni}}$).

Другой метод снижения напряжений в покрытиях — создание при спекании (выдержке) переменного температурного поля и такого регулируемого охлаждения, которое бы обеспечило одинаковое перемещение сопряженных поверхностей. Условие этого метода:

$$\frac{1}{h_0} \int_{-h_0}^0 \alpha_0 T_0 dz = \frac{1}{h_1} \int_0^{h_1} \alpha_1 T_1 dz$$

на любом отрезке времени охлаждения.

Такое условие создается направленным отводом теплоты с определенной скоростью от поверхности, материал которой имеет больший температурный коэффициент линейного расширения. Примером такого охлаждения может служить пропускание воздуха (CO_2) или воды через осевые отверстия стальных валов, осей и т. п. при нанесении на них твердосплавных покрытий металлизированием с поверхностным нагревом.

Снижение остаточных напряжений возможно также за счет формирования между покрытием и основанием промежуточного слоя с согласованными свойствами, т. е. за счет нанесения подслоя из высокопластичных материалов (Cu, Ni, ВПр и т. п.). Касательные напряжения τ_{1x} , напряжения отрыва σ_{1z} и изгибающий момент M_{1x} пропорциональны σ_{max} и толщине покрытия. Следовательно, снижение τ_{1x} , σ_{1z} и M_{1x} возможно как за счет уменьшения σ_{max} , так и за счет уменьшения толщины h_1 .

На рис. 58, д показано изменение σ_{max} в зависимости от длины покрытия. Из этой зависимости следует, что снижение всех видов напряжений в покрытии возможно за счет использования пластин длиной $L < l_{\text{кр}}$ при условии отсутствия жесткой связи между ними.

Отмеченные выше рекомендации по снижению напряжений в покрытиях следует предусматривать при разработке технологии нанесения. В технологию металлизирования могут быть включены также очень эффективные способы снижения возникших в покрытии остаточных напряжений: обработка давлением, ультразвуком или термообработка для получения соответствующей структуры (структуры с большим объемом или с меньшим E_1). Обработку давлением изделия с покрытием производят при комнатной температуре прессованием, ковкой,

обжатием на прессах, молотах или ротационных машинах в калибровочных приспособлениях — пресс-формах, штампах и т. п. Такая обработка улучшает (обычно увеличивает) многие свойства покрытия ($\sigma_{в1}$, $\sigma_{св}$, ρ и т. д.), а при высоких режимах (p , ϵ — степень деформации) и свойства материала основания ($\sigma_{то}$, Δl_o), повышает качество поверхности и снижает наиболее опасные напряжения растяжения.

При охлаждении плоских тонкостенных изделий с покрытием, материал которого имеет температурный коэффициент линейного расширения, отличный от соответствующего коэффициента основания, происходит их изгиб, имеющий кривизну ρ , пропорционально напряжению и толщине слоя:

$$\frac{1}{\rho} = 6 \frac{\sigma_{\max} h_1}{E_o h_o^2}.$$

Согласно [33]

$$\frac{1}{\rho} = 6 \frac{\sigma_{\max} h_1}{E_1 h_o (h_o + h_o^{5/4} h_1)}.$$

Эти и другие формулы используют также для экспериментального определения $\sigma_{\max}$, так как $\rho = l^2/8\delta$, где δ — прогиб изделия, м.

Снизить изгиб изделий при их охлаждении можно, уменьшив $\sigma_{\max}$ и толщину покрытия. Наряду с этим существует ряд технологических мероприятий: придание заготовке обратной кривизны, закрепление тонкостенной пластины в жестком приспособлении и др. Наиболее точные размеры заготовок с меньшими напряжениями в покрытиях получают при технологии, в которую введена операция подпрессовки или прокатки изделия в холодном состоянии.

В данном разделе перечислены основные виды дефектов, вызванные усадкой, неравномерным изменением объема при нагреве (охлаждении), неравномерным нагревом и т. д. Правильно выбранная технология металлизации дает стабильные высококачественные покрытия без значительных напряжений.

СВОЙСТВА МЕТАЛЛИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Металлированием можно наносить покрытия с самыми разнообразными свойствами по прочности ($\sigma_{\text{в1}} = 50 \div \div 1200$ МПа), твердости до *HRA* 93, пористости (0—60%), структуре и по другим характеристикам. Свойства металлизированных покрытий определяются исходными материалами — химическим и зерновым составами, видами и режимами нанесения и последующей обработкой.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Плотность покрытия зависит от плотности исходной шихты, давления при прессовании, вида и режимов спекания. Зависимость плотности покрытия от плотности шихты определяли пикнометрическим способом [25] на образцах, полученных по технологии Ш1 (рис. 59). Плотность покрытия пропорциональна плотности исходной шихты. Из рис. 60 видно, что наиболее приемлемое давление припрессования 200—700 МПа. При этом плотность составляет 70—90%. Плотность припрессованных покрытий также повышается с повышением плотности шихты, хотя для высоких давлений эта разница незначительна.

Температурная и временная зависимости плотности покрытий при их твердосплавном припекании показаны на рис. 61. Эти зависимости в общем подобны аналогичным зависимостям порошковых материалов [32]. Однако вследствие того, что усадка при припекании $y_{1v} \approx \frac{1}{3}y_v$, то и плотность покрытия меньше плотности спеченного брикета ($\rho_{\text{бр}}$) на $\frac{2}{3}y_{2v}$, т. е.

$$\rho_1 = \rho_{\text{бр}} - \frac{2}{3}y_v,$$

где $\rho_{\text{бр}}$ — плотность спеченного при аналогичных условиях порошкового брикета; y_v — объемная усадка порошкового брикета.

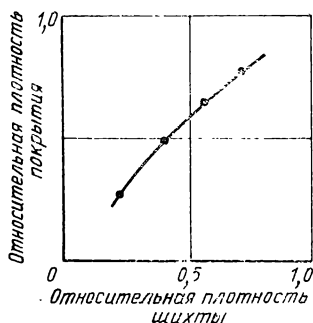


Рис. 59. Зависимость плотности покрытия от плотности шихты

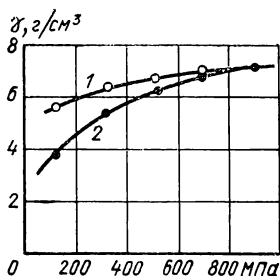


Рис. 60. Зависимость плотности железного покрытия от давления припрессования ($T_{сп}=900^{\circ}\text{C}$; $t_{сп}=90$ мин; среда — H_2):
1 — плотность насыпки 5,02; 2 — плотность насыпки 2,22

При жидкофазном спекании плотность покрытия зависит от количества и смачивающей способности жидкости. При хорошей смачиваемости плотность покрытия растет с увеличением количества жидкости и продолжительности спекания. При пропитке, когда количества жидкости достаточно для полного заполнения пор, плотность покрытия приближается к теоретической.

Горячее припрессование при металлизации аналогично горячему прессованию. Исходя из этого плотность покрытий может быть определена на основании зависимостей, существующих в порошковой металлургии; например,

$$\ln \frac{\theta_{\text{н}}}{\theta_1} = \frac{\rho_{\text{сп}}}{\eta} t_{\text{сп}},$$

где θ_1 — пористость горячеприпрессованного покрытия;
 $\theta_{\text{н}}$ — начальная пористость сырого слоя.

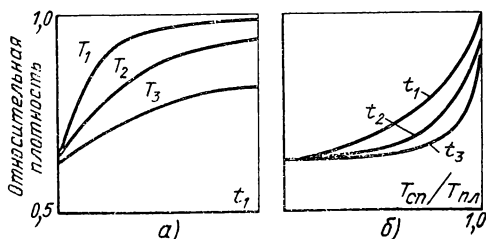


Рис. 61. Относительная плотность покрытия:

а — время спекания при $T_1 > T_2 > T_3$; б — температура спекания при $t_1 > t_2 > t_3$

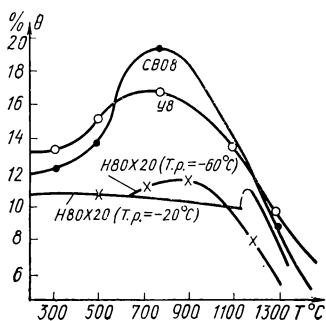


Рис. 62. Зависимость пористости покрытий, сырые слои которых нанесены термическим напылением, от температуры спекания; $T.p.$ — точка росы

Плотность покрытия при горячем напрессовании возрастает с повышением давления $p_{сп}$, текучести $B=1/\eta$ (где η — коэффициент вязкости) и времени спекания $t_{сп}$.

Ниже приведены данные плотности ($г/см^3$) спеченных брикета и покрытия из электролитического железного порошка, полученных горячим прессованием при $p_{сп}=160$ МПа и $T_{сп}=800^\circ C$ (давление предварительного прессования 300 МПа):

Время спекания, с	50	150	450
Спеченный брикет	7,59	7,71	7,76
Покрытие	7,52	7,70	7,73

Эти данные подтверждают аналогию механизма и кинетики спекания при горячем прессовании порошковых брикета и слоя.

Плотность, а соответственно и пористость покрытия зависят также от химических процессов, которые протекают при спекании внутри слоя. Если в слое содержится значительное количество окислов, то плотность при восстановлении окислов вначале уменьшается, так как объем, освобождаемый при удалении кислорода, превышает усадку; рост плотности начинается при высоких температурах или при значительной выдержке (рис. 62).

Прочность и твердость покрытий влияют на надежность и долговечность изделия. Прочность покрытия определяли разрывом плоских образцов ($50 \times 5 \times 2,5$), изготовленных из слоев, отделенных от основания (фрезерованием основания и шлифованием слоя). Твердость определяли на приборе Бринелля или Роквелла, а микротвердость — на приборе Виккерса или ПМТ-3.

В табл. 15 приведены данные по прочности на разрыв $\sigma_{в1}$ и твердости металлизированных покрытий, откуда видно, что прочность зависит от вида и режимов нанесения. Это влияние можно оценить по относительной прочности $a=\sigma_{в1}/\sigma_{в}$, где $\sigma_{в}$ — прочность компактной части покры-

Таблица 15. Свойства металлизированных покрытий

Покрытие	Порис- тость, %	Проч- ность $\sigma_{В1}$, МПа	Твердость	Примечание
ВА—М1—550—120—Н ₂	12—13	35—40	—	После Пд* $\sigma_{В1}=70$ МПа
ПЖ1С—Ш1—880—120— —Н ₂	42,0	5—8	—	—
ПЖ1С—Ш3—880—60— —Н ₂ —Пд*	3,0	186	HB72	—
ПЖ1С—Н1П—1080—20— —Н ₂	2,0	312	HB286	Пропитка
ПЖ1С+20ВК6—Н1— —1250—90—Н ₂	3,5	—	HB400	После проковки и закалки 54 HRC
СЧ+30СБр+30ПЖ— —Н1—1080—30—Н ₂	8,0	164	—	—
ППХ20Н80+12А1 ₂ О ₃ — —М6—1200—Н ₂	0,5	—	HB242	Прокатка
СНГН—Н2—1300—ВК	0,5	—	HRC50	—
ПП35ВК15—М7—1250— —30—Эк	1	—	HRC62	—
ВВ—М2 (эл.)**	0,2	520	HB300	—
ПК+12А1 ₂ О ₃ —Ш6—1250— —Вк	1,0	—	—	Прокатка
ПК+25МоSi ₂ —Ш6— —1350—Вк	1,5	—	—	»
ПР18+2ПМ—Н1—1100— —10—Н ₂	0,5	310	HRC52—60	»
ГВК6+6ПМ+3ПН—Н7— —1050—10	2,0	380	1500***	Гранулы
ГМНТ+20ПМФ7—Н5— 1080—60	8—10	—	2500***	Покрывы Ni
ОТ30К6—П6—1060—Н ₂	0,2	$\sigma_{из}=800$	HRA90	—
ОМНТ—П6—1100—Н ₂	0,3	$\sigma_{из}=700$	HRA91	—
ОМ+30Ср—П6—1000— —10—Н ₂	0,5	210	—	Прокатка
ОМ+70В—П6—1000— —10—Н ₂	0,5	—	—	»

* Пд — подпрессовка. ** эл. — электронно-лучевой нагрев. *** Микротвер-
дость, кгс/мм².

тия; $a = \rho^n$, где $n = 1,3 \div 2$; n увеличивается с уменьшени-
ем ρ . Зависимости относительной прочности от режимов
нанесения подобны $\rho = f(T, p, t...)$ (см. рис. 60). Высокую
прочность покрытия приобретают при горячем припрес-
совании и спекании в присутствии жидкой фазы (при
пропитке).

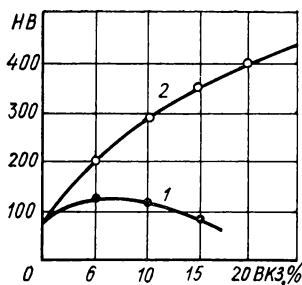


Рис. 63. Зависимость твердости покрытия ПЖ1С+10ПЖЗМ+ВКЗ от содержания ВКЗ:

1 — $T_{сп} = 1120^\circ\text{C}$; 2 — $T_{сп} = 1250^\circ\text{C}$

При нанесении однородных компонентов (Fe, Ni, Cu и т. д.) относительная твердость покрытия $HV_{отн} = HV_1/HV_0$ (где HV_1 — твердость слоя; HV_0 — твердость

исходного компонента) пропорциональна плотности. Следовательно, $HV_{отн}$ зависит от режимов спекания так же, как и плотность (см. рис. 60 и 61). Характер изменения твердости покрытия при взаимодействии его материала со средой и основанием определяется их химическим составом и степенью (полнотой) протекания процессов взаимодействия. Например, при припекании ПЖ1С+30ПЖМ в среде $\text{B}_4\text{C}+60\%$ буры ($T_{сп} = 1050^\circ\text{C}$) микротвердость покрытия составляла 12 800 МПа.

Твердость покрытия, полученного припеканием составной шихты, зависит от взаимодействия составляющих шихты в процессе спекания. Твердость покрытия из смеси железного порошка с углеродом зависит от степени химического взаимодействия железа с углеродом и возрастает с увеличением связанного углерода. Это подтверждается приведенными ниже данными по изменению химического состава и твердости покрытия из ПЖ1С+30ПЖМ+0,9С в зависимости от температуры припекания. Давление припрессования 540 МПа, $t = 60$ мин, среда $\text{H}_2 + 1,2 \text{ C}_2\text{H}_4$.

Температура спекания,					
°С	800	900	1000	1100	1200
Содержание углерода:					
свободного	0,88	0,70	0,27	0,08	0,04
связанного	0,0	0,19	0,60	0,80	0,83
Твердость HV	48	62	114	130	154

Если образец, спеченный при температуре 1200°C , проковать, то получим твердость покрытия более HRC50. Из рис. 63 видно, что увеличение содержания твердосплавной смеси приводит к повышению твердости покрытия при условии протекания между исходными компонентами химического взаимодействия.

Твердость композиционных покрытий определяется твердостью составляющих шихты. Так, при нанесении

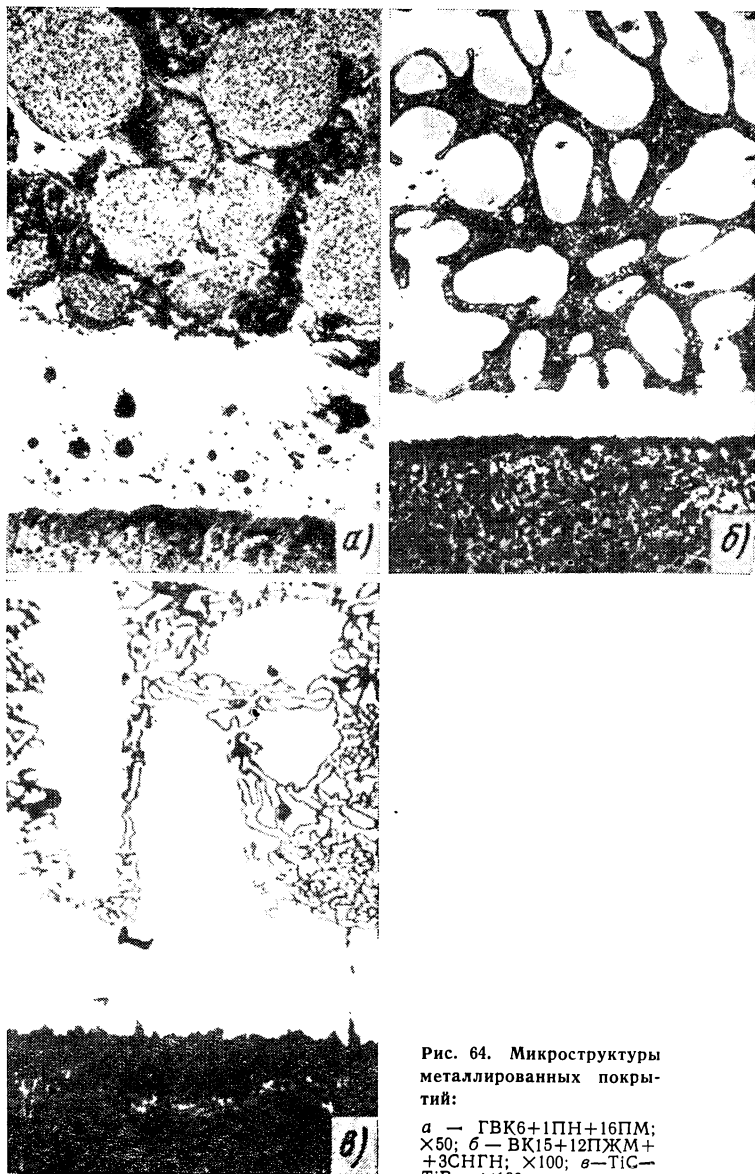


Рис. 64. Микроструктуры металлизированных покрытий:

a — ГВК6+1ПН+16ПМ; $\times 50$; *б* — ВК15+12ПЖМ+3СНГН; $\times 100$; *в* — TiC—TiB₂; $\times 100$

гранулических покрытий ГВК6+1ПН+16ПМ микротвердость гранул равна 14 000—15 000 МПа, а связки — 520 МПа (рис. 64, 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 температуру спекания выбирают из условия хорошей смачиваемости, а во втором — из условия достижения необходимой текучести исходного материала. На рис. 64, б показана микроструктура ВК15+12ПЖМ+3СНГН—Н1—1320—60—Н₂, твердость покрытия *HRC* 76—78. Твердость покрытий из пластин и оболочек определяется твердостью последних и достигает *HRC* 90 и более (рис. 64, в).

АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ИЗНОСОСТОЙКИЕ СВОЙСТВА

Основная причина выхода из строя многих деталей машин и механизмов — износ при трении. Следовательно, износостойкость покрытий — это одно из важных свойств, определяющих надежность 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 рассмотрим с учетом используемых материалов. Характеристики жидкостного трения определяли на машине МИ-1М, а сухого (абразивного) — на машине ХБ-4.

Свинец, олово и сплавы на их основе (ПОС) применяют 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 радиальных и осевых зазоров. Особенно хорошие ре-

зультаты получаются при использовании алюминиевых покрытий в обратной паре, т. е. когда на вал наносят покрытие из Al, а подшипник изготовлен из стали.

Бронзовые покрытия наносят по технологии НЗ, ШЗ, МЗ. В качестве исходного материала используют бронзовую (предварительно измельченную до 0,5—1,2 мм) стружку или стружку с добавками порошка Pb и Sn в количестве 3—6% (табл. 16).

Таблица 16. Свойства металлизированных бронзовых покрытий

Покрытие	Пористость, %	$\sigma_{в1}$, МПа	Твердость, НВ	$\sigma_{св}$, МПа	Предельная нагрузка, МПа, при скорости		Коэффициент трения f
					$v=1$ м/с	$v=4$ м/с	
СБрОСЦ+ЗПС1—ШЗ— —820—15—Н ₂ —Пд	1—2	96	48—57	62	1850	2100	0,022
СБрОСЦ—Н1П (ПОС)— —820—15—Н ₂	2—3	55	26—28	48	2000	2100	0,020

Покрытия на основе железа наносят всеми способами металлизирования как при производстве новых, так и при восстановлении изношенных деталей. На основе данных (табл. 17) можно сделать следующие заключения: твердость в большинстве случаев служит критерием износостойкости; высокая пористость (20—25%) резко снижает износостойкость покрытия как при жидкостном, так и при сухом трении; пористость в пределах 10—13% повышает износостойкость покрытия при жидкостном трении за счет снижения коэффициента трения — пористая поверхность лучше смачивается; при сухом (абразивном) трении пористость снижает износостойкость пропорционально ее величине; при одинаковой макротвердости многофазность — положительный фактор для жидкостного трения (т. е. повышает износостойкость) и отрицательный фактор для абразивного трения, если твердость абразива повышает твердость наиболее твердого компонента сплава.

К износостойким относятся покрытия на основе никеля — из сплава, содержащего В, Cr, Mn, Si (СНГН). Износостойкие покрытия на основе никеля наносят

Таблица 17. Свойства металлизированных покрытий на основе железа

Покрытие	Пористость, %	$\sigma_{\text{В1}}$, МПа	Твердость	Характеристики трения			Примечание
				жидкостного		су-хого	
				f	$\epsilon_{\text{ж}}$	$\epsilon_{\text{с}}$	
Сталь 45 закаленная	0	600	<i>HRC</i> 57	0,01	1	1	Эталон
ПЖ1С—Н1—1200—	23	28	<i>HB</i> 42—52	0,012	0,31	0,1	—
—30—Н ₂							
ПЖ1С+10ПМФ6—	4—6	54	<i>HB</i> 306	0,008	0,95	0,4	—
—Н1—960—60—Н ₂							
ПЖ1С—Н3—920—	4—6	—	<i>HB</i> 482	—	1,2	1,0	Спекание с цемен- тацией
—240—СО—Пд							—
ПЖ1С+15ВК8—Н1—	6—8	280	<i>HB</i> 404	0,008	1,9	0,88	—
—1250—90—Н ₂							
ПЖ1С+18ВК+0,6С—	0,5	—	<i>HRC</i> 63	—	3,2	2,7	Закалка
Н7—1250—60—Н ₂							
ПЖ1С+20МНТ—Н1П	0,5	—	—	—	3,1	1,8	—
(6 к)*—1260—30—							
—Н ₂							
ПР18—Ш6—1220—	1,5	—	<i>HRC</i> 60	—	—	2,6	—
—10—Н ₂							
ПЖ1С+30ПВ+ +30ПК—Н2(ЭЛ)—	0	720	<i>HRC</i> 65	—	—	3,1	Электрон- но-луче- вой нагрев
—1480—Вк							—
ПЖ1С+33ПА—Н2Э—	0,3	—	—	0,016	0,4	0,2	—
—720—2—Вк							
СНГН—Ф2—(ТВЧ)—	—	—	<i>HRC</i> 52	—	—	2,4	—
—Н ₂							
СНГН+20 МНТ—Н6—	—	—	<i>HRC</i> 58—	—	—	3,6	—
—1200—10—Вк			—62				
ППМС25—М1	—	—	<i>HB</i> 36	0,005	—	—	По данным Е. В. Антошина
ППМ75+ПОС—М1	—	—	<i>HB</i> 28	0,004	—	—	
ППАС50—М1	—	—	<i>HB</i> 35	0,004	—	—	
ППЖ+40ВК+2 ПМ—	2—3	—	—	0,01	3,7	2,6	
М1П (ВПр4)—1150—							
—10—Н ₂							—

* Шестикомпонентный сплав на основе меди.

** $\epsilon_{\text{ж}}$, $\epsilon_{\text{с}}$ — относительная износостойкость соответственно при жидкостном и сухом трении.

термическим напылением с последующим оплавлением на воздухе [4]. Исследования автора показали, что покрытия из СНГН приобретают высокие свойства лишь

при термообработке (спекании) их в условиях, при которых не происходит окисления Cr, Mn, Si.

К композиционным относятся следующие покрытия: порошковые с упрочненными частицами, псевдосплавные, стружко-порошковые, гранулические, проволоочные, многослойные, сотовые и т. п. Композиционные покрытия с упрочненными частицами состоят из основного материала и 3—15% высокодисперсных (0,1—5 мкм) частиц, которые упрочняют матричный материал (сплав) за счет ограничения движения дислокаций и снижают его адгезионные свойства. К этой группе относятся покрытия из Al—Al₂O₃, Cu—W, Ni—TiC и др. Их наносят по технологии H2, Ш2, H6, Ш8 и т. д.

Продолжительность жидкофазного (или высокотемпературного) состояния исходных материалов при термическом напылении составляет 0,01—0,002 с. За этот период при использовании разнородных электродов образуется многофазная структура, называемая псевдосплавом. При термообработке происходит частичное изменение структуры и значительное повышение механических свойств. Это обеспечивает покрытиям повышение их антифрикционных свойств при трении со смазкой. Медносвинцовые и алюминиевосвинцовые термообработанные псевдосплавы рекомендуются взамен оловянных и безоловянных бронз и баббитов в пределах допускаемых нагрузок и скоростей.

Перспективно нанесение псевдосплавов напылением порошковой проволоки, позволяющим наносить псевдосплавы на основе Fe и Ni со значительным включением карбидов (WC, TiC), боридов (CrB, TiB) и других компонентов, повышающих износостойкость. Псевдосплавы наносят по технологии M2, M1, M7 и т. д.

Один из самых дешевых материалов для износостойких покрытий — стружка. После дробления стружку размером 0,5—1,2 мм смешивают с порошком и наносят соответствующим способом на покрываемую поверхность. При металлизации наибольшее распространение получила чугунная стружка. В нее обычно добавляют 10—40% железного порошка и порошки легирующих компонентов (WO₃, FeMo, WC, CH₃GN и др.).

Хорошим исходным материалом для нанесения износостойких покрытий может быть мелкая стружка высоколегированных сплавов P18, 110Г13, хастеллоя и т. п. Сырой слой шихты на основе стружки наносят напрес-

совкой или плакированием. Спекание производят всеми описанными выше способами. В табл. 18 приведены данные о свойствах покрытий, нанесенных металлизированием с использованием стружки, обладающих высокими износостойкими свойствами.

Таблица 18. Свойства и относительная износостойкость металлизированных покрытий

Покрытие	Пористость, %	$\sigma_{в1}$, МПа	Твердость	Относительная стойкость		Примечание
				Жидкостное трение	Абразивный износ	
Сталь 45	0	600	HRC57	1*	1	Эталон
СЧ+50ПЖ1С—Н1— —1180—60—H ₂	10	94	HB362	0,9	0,45	—
СЧ+35ПЖ+5ВК6— —H2—1320—H ₂	2	280	HRC54	1,6	1,2	Нагрев ТВЧ
СЧ+25ПЖ+2ПМ— —Н1П (ПрМФ)— —980—H ₂	1	250	—	1,4	0,8	—
СР18+10ПЖ+1ПМ+ +1Мо—H8—1200— —30—H ₂	1,5	—	HB512	2,1	2,7	—
ГВК3+10БрОС—Ш3— —1080—15—H ₂	12— 14	—	—	8,5**	—	ГВК3 пористые 8%
ГТ30К6+15ВПр2— —H6—1200—5—H ₂	5—8	160	До 1800HV	9,6***	—	То же
ГТ30К6+15СНГН— —Ш7—1260—15—H ₂	1	—	—	—	18—20	Гранулы компактные
ГМНТ+12ПМ+ +12ПН—Ш3—1050— —20—H ₂	6—8	—	—	10,5***	—	Гранулы пористые
ГМНТ+25ПМНТ— —М6—1300—5—H ₂	0,5	—	—	—	20—22	Покрyтие наносили на молибден
ВК15+5ПЖ+2ПН+ +1ПМ—Н1—1320— —30—H ₂	0,5	—	HRC76— 78	—	18—24	—
ОВК15—П6—1050— —5—H ₂	0	—	HRA87	—	46—50	—
ОМНТ—П6—1050— —5—H ₂	0	—	HRA91	—	50—60	—

* Контртелo — бронза. ** Эксплуатационные испытания.

*** Контртелo — легированный модифицированный чугуи.

Гранулическое покрытие представляет собой композиционный слой, состоящий из шаровидных частиц диаметром 0,16—1,6 мм, связанных между собой через непосредственные контакты или через связь, создаваемую при нанесении специально вводимым металлом связи. Гранулические покрытия наносят по технологии Н1, Ф2, К6, Н7, Ш8 и т. д.

Гранулические покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами как при сухом, так и при трении со смазкой. Первое объясняется высокой твердостью гранул, второе — хорошей смачиваемостью композиций. Для покрытий, работающих в условиях абразивного износа, следует выбирать компактные гранулы и связку СНГН: для покрытий, работающих в условиях жидкостного трения, используют пористые гранулы, а для связи — бронзу.

Многослойные покрытия наносят последовательным напрессованием, напылением слоев с различными химическими составами. Термообработку их производят после нанесения одного слоя или всех слоев за один нагрев. Сотовые покрытия — разновидности пластинчато-порошковых — имеют относительно небольшие (3—5 мм) размеры пластин, соизмеримые с размерами зазоров между ними. Сотовые покрытия обладают высокими износостойкими свойствами при жидкостном трении.

К перспективным материалам для износостойких покрытий относятся карбиды, бориды, силициды и твердые окислы. Наибольшее применение в металлизации нашли покрытия из карбидов. Различают две группы методов их нанесения с использованием: а) порошков и б) пластин и оболочек. Свойства покрытий при использовании порошков формируются в процессе нанесения. Во втором случае эти свойства определяются свойствами оболочек или пластин. Для карбидных покрытий используют смеси стандартных твердосплавных шихт (ВК, ТК, ТН) с Fe, Ni, Cu, Mo. Первые три компонента или их сплавы вводят для снижения температуры образования жидкой фазы; молибден — для легирования карбидов (W, Mo) С и металла связи.

В табл. 19 приведены данные В. Юматова, Е. Росинского и автора по испытанию твердосплавных покрытий при сухом трении: образец — цилиндр ($d=5$ мм с покрытием на торце, нанесенном по технологии П6),

контртело — закаленная сталь 30ХГСНА ($HRC48$), продолжительность испытания 30 мин. Износ определяли взвешиванием, затем пересчитывали в линейный на единицу пути трения l_p .

Таблица 19. Износ покрытий при сухом трении

Материал покрытия	Условия трения		Линейный износ $l_p \cdot 10^3$ м/м	Материал покрытия	Условия трения		Линейный износ, $l_p \cdot 10^3$ м/м
	нагрузка, кгс	скорость, м/мин			нагрузка, кгс	скорость, м/мин	
Сталь 45	15	70	152,5*	ВК8	15	120	0,114
	50	70	462,0*		50	120	1,93
	15	90	365,0*	ТЗ0К4	15	70	0,09
» Р18	15	70	5,7		50	70	1,66
	50	70	11,7		15	120	0,174
	15	90	6,1	МНТ-А2	50	120	2,07
ВК8	50	90	187,8		15	70	0,052
	15	70	0,13		50	70	1,87
	50	70	1,20		15	120	0,26
					50	120	2,23

* Продолжительность испытаний 5 мин.

На основании табл. 19 можно сделать следующие заключения: 1) износостойкость стали 45 при сухом трении несоизмеримо мала по сравнению с износостойкостью твердых сплавов; 2) сталь Р18 имеет относительно высокую износостойкость при нагрузках ниже 10 МПа; при повышении нагрузки износостойкость стали Р18 резко падает; 3) износостойкость твердосплавных материалов при относительно низких давлениях (10 МПа) повышается с увеличением содержания в них TiC. При высоких давлениях (20 МПа) износостойкость твердых сплавов повышается с увеличением в них содержания WC.

Абразивные, гидро- и ударноабразивные испытания покрытий из твердых сплавов на основе ВК, ТКиТН показали, что при тяжелых условиях работы износостойкость ϵ_n пропорциональна произведению твердости (HRA) на прочность при изгибе:

$$\epsilon_n = m + n (\sigma_{из} \cdot HRA),$$

где m, n — постоянные.

К высокотвердым относятся материалы, содержащие значительное количество алмаза, эльбора или другие сверхтвердые компоненты. Основные методы нанесения таких покрытий — Н6 и напрессовка с экзотермическим нагревом. В качестве связующего материала можно использовать сплавы на основе Ni и твердосплавные шихты типа ВК и ТК.

Для инженерной практики важен выбор пар материалов, обеспечивающих нормальную работу узла трения в заданных условиях. В зависимости от условий работы необходимо обеспечить требуемое значение сил трения и во всех случаях минимальный износ. Нанесение твердых покрытий позволяет заменить традиционную пару твердый металл+мягкий металл парой высокотвердый металл+твердый металл и использовать вместо баббитов, бронз и т. п. легированный чугун, сталь и пористые композиционные материалы с повышенной твердостью и хорошей смачиваемостью — композиционные материалы на основе гранул.

Износ металлизированных покрытий при трении можно снизить, если в поры слоя ввести твердые смазочные материалы: графит, пластмассу (тетрафтор, этилен), MoS_2 , CdS и т. д. Графит и некоторые другие материалы могут быть введены непосредственно в шихту, которая припекается при температуре ниже разложения вводимого компонента. Наиболее эффективно введение в слой твердых смазок по технологии ШЗ; материал твердой смазки в виде суспензии вводят пропиткой в поры слоя после его первого спекания. Обжиг производят после удаления (испарения) растворителя, вторичное спекание — при температуре ниже температуры разложения (деструкции) используемого компонента.

Фрикционные материалы по своей природе имеют обычно низкие прочностные свойства (σ_b), поэтому наиболее рационально их наносить тонким слоем на сталь (табл. 20). Эксплуатационные испытания показали, что покрытия на основе твердосплавных гранул обладают высокими фрикционными свойствами.

Материал контактов должен обладать высокой дугоустойчивостью, износостойкостью, механической прочностью, тепло- и электропроводностью. Эти требования в наибольшей степени могут быть удовлетворены композиционными материалами на основе Cu и Ag (табл. 21).

В псевдосплавах возможно аддитивно объединить

Таблица 20. Свойства фрикционных покрытий

Покрытия	$\Gamma \frac{Y}{\text{см}^2}$	НВ	$\sigma_{В1}$, МПа	Коэффициент f^*
ПЖ1+20ПМФ7+7Al ₂ O ₃ — —Н7—1100	7,3	210	60—80	0,30
ПН+30ПК+12Al ₂ O ₃ — —Ш6—1350—15—Н ₂	7,3	160	—	0,28
ГМНТ+29ВПр1—ШЗ— —1160—15—Н ₂	6,0	140; 2000**	160	0,33

* Материал контртела — ЧМНХ,

** Микротвердость.

Таблица 21. Состав покрытий для контактов

Марка псевдосплава	Состав, %				Способ изготовления
	Cu	Ag	W	другие компоненты	
СМ 502	50	50	—	—	Спекание и прокатка
СМ 703	70	30	—	—	»
СВ 502	—	50	50	—	Пропитка
СВ 703	—	30	70	—	»
МВ 502	50	—	50	—	»
МВ 703	30	—	70	—	»
ВНО	—	—	82	18 Ni	Высокотемпературное спекание
ВКЖ	—	—	50	20 Fe, 30 Co	То же
ВК15М20	20	—	—	80ВК15	Пропитка

индивидуальные свойства составляющих и получить материал с более высокой электроэрозионной стойкостью, жаростойкостью по сравнению со свойствами исходных материалов [19]. Однако перечисленные псевдосплавы относительно дорогостоящие, а в ряде случаев они не удовлетворяют требованиям по теплопроводимости. Вследствие этого наиболее рационально их использовать в виде покрытий толщиной 0,5—5 мм.

Основные способы нанесения электроконтактных покрытий: на медь — П6, а на сталь — Н1П и ШЗ (табл. 22). Для получения прочного соединения с низким электросопротивлением на поверхность основания

Таблица 22. Свойства электроконтактных покрытий

Покрытия	γ , г/см ²	Твердость HВ	Электро- сопротивле- ние ρ , Ом·м	$\sigma_{ВТ}$, МПа	Удлинение δ , %
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	350	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	17,8	315	0,158	—	—
ВК15+20ПМ—Н1П—1200—10—H ₂	13,3	100— 1200	0,292	—	—

наносят тонкий слой серебра. Пропитку согласно технологии Н1П предварительно напрессованной на сталь тугоплавкой составляющей (W, ВК15) осуществляют медью, серебром или их сплавами.

Термостойкие покрытия должны обеспечить защиту покрываемого металла от окисления при высоких температурах в течение требуемого времени, выдерживать тепловые удары и некоторую пластическую деформацию без ухудшения защитных свойств. При этом они не должны изменять в процессе работы своего защитного качества и свойства материала защищаемого изделия.

Материалы, используемые для нанесения термостойких покрытий, подразделяют на следующие группы: металлические (интерметаллические, металлоподобные), окислы и композиционные.

В данное время еще отсутствуют точные математические расчеты, описывающие закономерности окисления покрытий и их стойкость при высоких температурах, однако исходя из теории окисления и ряда исследовательских работ [4, 6, 18, 27] и работы автора, можно указать рациональные пути к подбору и оценке наиболее подходящих компонентов для нанесения теплоустойчивых покрытий.

Основные требования, предъявляемые к материалам для высокотемпературных покрытий:

1. Термическая стойкость, характеризующая тугоплавкостью, сопротивлением окислению, испаряемостью и температурой сублимации. Высокая термическая

стойкость — необходимое свойство исходного материала, так как она обеспечивает покрытие целостность при высоких температурах. Исходный материал должен иметь температуру плавления выше температуры эксплуатации материала основания. Вследствие этого в качестве исходного материала широко используют высокотемпературные окислы (Al_2O_3 , BeO и др.), силициды (MoSi_2 , WSi и др.), металлы (Pt , Au) и другие тугоплавкие материалы. При кратковременном использовании защитных свойств материал покрытия может находиться в жидко-твердом и даже вязко-текучем состоянии.

Высокое сопротивление окислению обеспечивается за счет высокой упругости диссоциации окислов относительно парциального давления кислорода рассматриваемой среды (Pb , Au) или за счет высокого сродства составляющих (MoSi_2 , Al_2O_3 и т. д.). Термостойкость материала покрытия должна сохраняться при комнатной и эксплуатационной температурах.

2. Термохимическая стойкость, характеризующаяся химическим взаимодействием при высоких температурах материала покрытия с основанием и определяемая их взаимной диффузией. Последняя зависит от их химического состава и, в частности, от соотношения диаметров их атомов (ионов). Ниже приведены величины ионных радиусов (по Паулингу):

Ион металла	Mo^{2+}	W^{2+}	Fe^{2+}	Cr^{3+}	Al^{3+}	Si^{4+}
Ионный радиус, Å	0,82	0,91	0,75	0,65	0,50	0,41

Диффузия ионов металла основания (Mo , W , Fe и т. д.) в материал покрытия, содержащий значительное количество Cr , Al , Si , тормозится большим размером их атомов.

Прочная связь составляющих многих окислов, силицидов и некоторых других материалов обеспечивает их термохимическую стойкость (инертность) по отношению почти ко всем металлам. Диффузия атомов металла основания в покрытие имеет место при нанесении на них металлических покрытий. Взаимная диффузия приводит к изменению химического состава исходных материалов и образованию нового слоя (фазы). Изменение химического состава покрытия приводит к снижению его защитных свойств (диффузия Fe в Ni—Cr—B).

Образование диффузионного слоя в отдельных случаях повышает прочность связи слоя с основанием, в других ослабляет и приводит к отслаиванию покрытия. Для предотвращения или уменьшения взаимной диффузии в практике металлопокрытия применяют технологию с нанесением подслоя из материала, исключаяющего или снижающего диффузию материала основы в покрытие и обратно — материала покрытия в основание ($\text{Mo—Al}_2\text{O}_3\text{—Pt}$).

3. Термофизическая стойкость, характеризующаяся сопротивлением материала покрытия диффузии при высоких температурах кислорода от поверхности слоя к основанию, т. е. через слой. Высоким сопротивлением диффузии кислорода при высоких температурах обладают некоторые окислы (Al_2O_3 , MgO_2 , BeO и др.). Однако высокие скорости диффузии кислорода в тугоплавких окислах ThO_2 , HfO и т. п. являются серьезным препятствием для разработки высокотемпературных защитных покрытий. В связи с этим более перспективны комплексные окислы Zr—Y—O , Zr—Th—O , Zr—Hf—Re—O и т. п.

Диффузия кислорода через покрытие повышается с его пористостью, поэтому высокотемпературные покрытия должны быть компактными. Равномерная микропористость до 1% незначительно снижает жаростойкость покрытия и поэтому может быть допустима. Экранирование металла основания от действия окружающей среды также зависит от целостности покрытия, т. е. отсутствия в нем трещин, раковин и т. п. В связи с этим термофизическая стойкость требует, чтобы материал покрытия обладал способностью к самозалечиванию дефектов.

Самозалечивание дефектов возможно за счет диффузии, затекания жидкой фазы и заполнения пустот образующимися окислами. Хорошими способностями к самозалечиванию обладают металлические покрытия, в которых при температуре эксплуатации происходит спекание. Удовлетворительной способностью к самозалечиванию дефектов обладают некоторые покрытия из композиционных, интерметаллических и металлоподобных соединений $\text{Ni—Cr—Al}_2\text{O}_3$ и др. Самозалечивание таких покрытий происходит за счет спекания и образования окислов с $V_{\text{ок}}/V_{\text{ме}} > 1$, заполняющих дефекты.

Примерами могут служить цинковые покрытия на

ниобии (титане). Это объясняется высокой упругостью паров цинка, которые проникают через дефекты поверхности в пленку Nb_2O_5 , уплотняют ее и переводят в нитриды цинка. Покрытия из окислов имеют низкую способность к самозалечиванию.

4. Термомеханическая стойкость — способность покрытия сопротивляться механическим нагрузкам, создаваемым нагревом и охлаждением. Она зависит не только от свойств материала самого покрытия, но также и от соотношения их с соответствующими свойствами материала основания. Таким образом, термомеханическая характеристика — это свойство системы покрытие — основание. Для оценки термомеханической стойкости металлизированных покрытий служит коэффициент термомеханической стойкости покрытия

$$k_T = \left(\frac{1}{h_1} \frac{\sigma_{св}}{\sigma_{В1}} \right)^{1/2} \exp \left[\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 + \varepsilon_0} - \frac{2|\alpha_1 - \alpha_0|}{\alpha_1 + \alpha_0} \right],$$

где ε_1 , ε_0 — относительные удлинения материалов покрытия и основания; h_1 — толщина покрытия, мм.

Коэффициент k_T увеличивается с повышением прочности связи слоя с основанием $\sigma_{св}$ и пластичности его материала, а снижается с уменьшением разности температурных коэффициентов линейного расширения исходных материалов $\Delta\alpha$ и толщины слоя. При быстром нагреве k_T увеличивается с повышением теплопроводности материала слоя. Покрытия с $k > 1$ обладают высокой, с $1 > k > 0,2$ — удовлетворительной и с $k < 0,2$ — неудовлетворительной термомеханической стойкостью.

Покрытия, нанесенные металлизированием с использованием металлов (сплавов), в более полной мере отвечают термомеханическим требованиям (высокая связь покрытия с основанием, относительно высокие пластические свойства и малая величина $\Delta\alpha$). Покрытия из боридов, силицидов и подобных материалов, нанесенные на металлы, обладают относительно низкой термомеханической стойкостью, так как они обычно имеют большую разницу температурных коэффициентов линейного расширения, низкие пластические свойства и малую прочность связи с основанием. Вследствие этого большой интерес представляют покрытия из смеси металла (связки) с тугоплавкими окислами, боридами и подобными материалами, композиции, армированные металлическими усами, многослойные, состоящие из тонких

(0,05—0,15 мм) слоев жаростойких металлических сплавов и тугоплавких окислов или силицидов (табл. 23).

Таблица 23. Технология нанесения и температура продолжительной эксплуатации покрытий

Материал		Технология нанесения	Условия эксплуатации		Примечание
основания	покрытия		Среда	T, °C	
Сталь	Ni—Al H80X20	ШЗ—1000—5—H ₂ МЗ—1200—20—H ₂	Воздух «	860 1000	Прокатка при комнатной температуре
»	H80X20+1ПА+ +25Al ₂ O ₃	Ш6—1200—10—Вк	H ₂ (CO)	1250	Прокатка при T _{сп}
Мо- либден	ПН+2ПА+50CrSi	Ш6—1200—Вк	Воздух	1120	То же

5. Технологичность нанесения — способность материала при соответствующей технологии образовывать покрытия с требуемыми свойствами. Эту характеристику рассматривают в связи с применяемым способом нанесения. При металлизации лучшей технологичностью обладают металлические покрытия, удовлетворительной — композиционные, окислы — плохой.

6. Экономичность, определяемая стоимостью нанесения и продолжительностью эксплуатации. Стоимость нанесения включает стоимость материала и затраты по нанесению покрытия.

Основное назначение теплоизоляционных покрытий — снижение теплопередачи от теплового потока материалу основания. Исходя из этого материал покрытия должен обладать низкой теплопроводностью и достаточной жаростойкостью. Теплоизоляционные покрытия следует наносить пористыми для снижения теплопроводности. Для предотвращения окисления поверхности основания теплоизоляционное покрытие должно быть газонепроницаемым. При наличии открытой пористости на поверхность основания необходимо нанести жаростойкий подслои.

Для работы в условиях, характеризующихся частыми тепловыми ударами, лучше подходят пористые по-

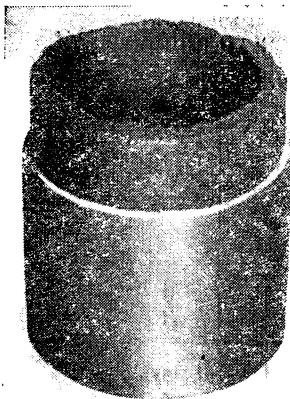


Рис. 65. Графитовая втулка с твердосплавным покрытием ГВК6+28ВК15

крытия (меньше E_1). Если помимо этого покрытие будет работать в высокоскоростном потоке газа при высокой температуре, то желательно увеличить его плотность (износостойкость). Для улучшения теплоизоляционных характеристик можно увеличить толщину покрытия. Однако увеличение толщины покрытия связано с повышением

внутренних напряжений и возможностью отслоения.

К жаропрочным относятся покрытия, повышающие прочность конструкции при высоких температурах. Эти покрытия наносят обычно на изделия, изготавливаемые из жаро-, кислотостойких и подобных материалов, но с низкими технологическими или отдельными прочностными свойствами — керамику, графит и т. д. (рис. 65). В качестве исходного материала используют жаропрочные сплавы и композиционные материалы, армированные волокном. Материал покрытия следует подбирать таким образом, чтобы его температурный коэффициент линейного расширения был равен или близок к соответствующему коэффициенту материала основания. Так, например, трубочка из Al_2O_3 с композиционным покрытием из нимоника, армированным вольфрамом, может работать под давлением при температуре более $1000^\circ C$.

Теплопроводные покрытия наносят для придания поверхности изделия повышенной теплопроводности, в большинстве случаев для повышения отвода теплоты из активной зоны нагрева. В качестве исходного материала для нанесения теплопроводных покрытий используют материалы с высокой теплопроводностью и достаточной жаростойкостью в условиях работы изделия (Ag, Cu, Ni). Так, например, покрытия из ВПр1 на гранулах повышают теплоотвод из зоны трения композиционного материала, изготовленного из таких гранул.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ С ПОКРЫТИЯМИ

Долговечность деталей машин определяется пределом прочности, пределом текучести (σ_T), пределом выносливости (σ_{-1}) и другими предельными состояниями материала детали. Изделие с покрытием как композитная конструкция (биметалл) имеет свои предельные состояния механической прочности (σ_{BK} , σ_{TK} , σ_{-1K} , E_K и др.), которые отличаются от предельных состояний материала основания и покрытия (рис. 66, а).

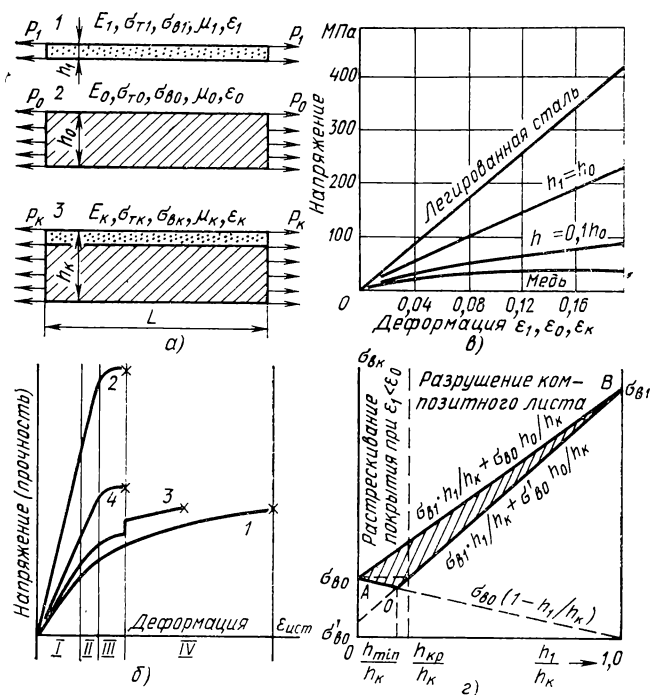


Рис. 66. Модель композитной системы основание — покрытие и кривые деформирования:

а — исходные компоненты и модель композитной системы; 1 — покрытие; 2 — основание; 3 — композитный лист; б — кривые деформирования; 1 — материал основания; 2 — материал покрытия; 3 — композитный лист с $h_1 < h_{\min}$; 4 — то же с $h_1 > h_{\min}$; в — экспериментальные кривые деформирования композитного листа, г — зависимость прочности композитного листа σ_{BK} от соотношения h_1/h_K ; АВ — для системы, в которой $\epsilon_1 \approx \epsilon_0$ и $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$; АОВ — для системы, в которой $\epsilon_1 \ll \epsilon_0$ и $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$

На рис. 66, б представлены кривые деформирования исходных материалов (1, 2) и композитного листа (3, 4), на рисунке можно выделить четыре участка, характерных для деформирования системы основание — покрытие. На участке материалы основания и покрытия деформируются упруго. Модули композитного листа могут быть выражены на основании теории упругости через модули исходных компонентов.

На рис. 66, в приведены экспериментальные кривые деформирования композитного листа: основание — медь, покрытие — легированная сталь с $\sigma_T = 420$ МПа. С точностью до 2—3% можно записать

$$E_k = (E_1 h_1 + E_0 h_0) / h_k;$$

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

где $h_k = h_1 + h_0$; $\sigma_{\text{тк}}^I$ — предел текучести композитного листа на участке I; $\sigma_{\text{т0}}^I$ — напряжение, соответствующее пересечению кривой 2 (рис. 66, б) деформации материала основания с линией, разделяющей участки I и II.

Эти закономерности можно использовать для других пар материалов.

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

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

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? Это зависит от предельных деформаций исходных компонентов, толщины покрытия, прочности связи покрытия с основанием и чувствительности материала основания к концентраторам напряжения.

Разрушающее (предельное) напряжение композитного листа зависит от предельных деформаций обоих исходных материалов. Если предельные деформации равны или отличаются незначительно, то предел прочности листа

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

Если же предельная деформация покрытия намного меньше предельной деформации основания и $\sigma_{B1}h_1 \gg \gg \sigma_{B0}h_0$, то

$$\sigma_{BK} = [\sigma_{B1}h_1 + \sigma'_{B0}(h_K - h_1)]/h_K,$$

где σ'_{B0} — напряжение в основании при достижении предельной деформации покрытия.

Когда σ_K становится больше σ_{BK} , 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 подобных материалов. Аналогичная картина наблюдается также, когда толщина основания, изготовленного из малопрочных металлов (Zn, Al, Cu и т. д.), соизмерима с толщиной покрытия.

Последняя формула справедлива лишь при $\sigma_{BK} \geq \sigma_{B0}$ ($1 - h_1/h_K$) и применима только при $h_1 > h_{\min}$:

$$h_{\min} = \frac{\sigma_{B0} - \sigma'_{B0}}{\sigma_{B1} + (\sigma_{B0} - \sigma'_{B0})} h_K = \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_{B1} - \sigma_{\omega}} h_K,$$

где $\sigma_{\omega} = \sigma_{B0} - \sigma'_{B0}$ есть полное приращение номинального напряжения, которое может быть получено при пластическом деформировании основания. При $h_1 < h_{\min}$ прочность композитной конструкции $\sigma_{BK} = \sigma_{B0}(1 - h_1/h_K)$.

На рис. 66, а представлена расчетная зависимость прочности композитного листа от соотношения h_1/h_K . Если $\varepsilon_0 \approx \varepsilon_1$ и $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$, то упрочнение композитного листа по отношению к материалу основания пропорционально h_1 ; при $\varepsilon_0 \gg \varepsilon_1$ и $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$ прочность конструкции σ_{BK} с увеличением h_1 вначале снижается, но по достижении $h_1 = h_{\min}$ начинает повышаться: первоначальное значение $\sigma_{BK} = \sigma_{B0}$ достигает при $h_{кр}$:

$$h_{кр} = \frac{\sigma_{B0} - \sigma'_{B0}}{\sigma_{B1} - \sigma'_{B0}} h_K \approx \frac{\sigma_{\omega}}{\sigma_{B1}} h_K.$$

Таким образом, упрочнять композитный лист можно покрытием с $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$ и $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_0$ или $\sigma_{B1} > \sigma_{B0}$, $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$, но с $h_1 > h_{кр}$. 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. $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_K < \varepsilon_0$. В этом случае

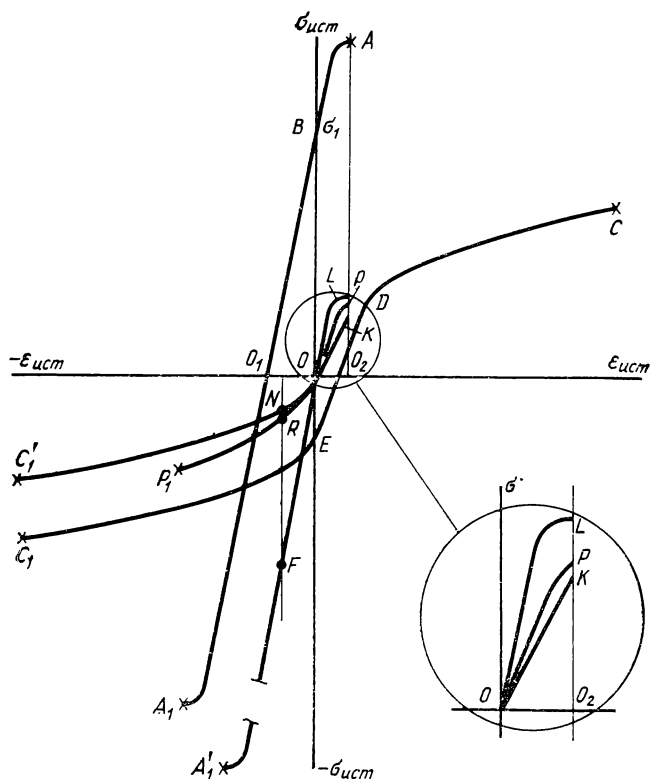


Рис. 67. Кривые деформирования: AA_1 — материала основания; CC_1 — материала покрытия; PP_1 — композитного листа

покрытие разрывается на отдельные секции, которые удерживаются на основании за счет связи $\sigma_{св}$. Если эта связь недостаточная, происходит отслоение покрытия без разрушения основания.

На характер деформации и разрушения композитного листа влияют остаточные напряжения. Для анализа этого влияния необходимо построить кривую деформации композитного листа (рис. 67). Вначале в координатах $\sigma_{ист} - \epsilon_{ист}$ строим (экспериментальные) кривые деформации материалов покрытия и основания. Затем на оси напряжений откладываем ординату (точку B), равную величине остаточных напряжений в покрытии $\sigma_{1ост}$, и совмещаем с ней кривую деформации покрытия

ABO_1A_1 , т. е. сдвигаем по оси абсцисс на величину, равную σ_1/E_1 . Аналогично откладываем $\sigma_{0.ост}$ и совмещаем (сдвигаем) с ней кривую деформации материала основания $CDEC_1$. Правую ветвь кривой деформации композитного листа строим графически следующим образом: в точке O совмещаем (сдвигаем по оси ординат) те части кривых основания и покрытия (AB и EDC), расположенные справа от оси ординат (построение см. в кругу справа), т. е. AB переходит в OL , а ED в OK .

Точка кривой деформации композитного листа P определяется на основании правила рычага:

$$\sigma_K h_1 (KL - LP) = LP \cdot \sigma_L h_0,$$

откуда

$$LP = \frac{\sigma_K h_1 \cdot KL}{\sigma_0 h_0 + \sigma_K h_1} = \frac{(\sigma_{B1} - \sigma_1) h_1 \cdot KL}{G_0 h_0 + (\sigma_{B1} - \sigma_1) h_1}.$$

Таким же образом находим соответствующее число точек и по ним строим кривую PO .

Аналогично строим левую часть кривой деформации листа. В точке O совмещаем (сдвигаем по оси ординат) $BA_1 \rightarrow OA'_1$ и $EC_1 \rightarrow OC'_1$. Точку R находим из соотношения $NR \cdot \sigma_N h_0 = (FN - NR) \sigma_F h_1$, $NR = FN \cdot \sigma_F h_1 / (\sigma_N h_0 + \sigma_F h_1)$. Определив соответствующее число точек, строим по ним левую часть кривой. Сложив обе части, получаем кривую деформации листа POP_1 .

На рис. 67 построена кривая деформации композитного листа, в котором покрытие имеет остаточные напряжения растяжения $\sigma_{1.ост}$, а основание — напряжения сжатия $\sigma_{0.ост}$. Если к этому листу приложить усилие растяжения, то он будет деформироваться по линии OP , при этом покрытие по BA , а основание по EDC . Если $\sigma_{1.ост}$ высокое, то основная нагрузка от внешних сил воспринимается уже нагруженным покрытием. Вследствие этого покрытие разрушается при очень малых деформациях, причем во многих случаях до того, как материал основания достигает предела текучести.

Если же к композиционной конструкции приложено сжимающее усилие, то напряжение в покрытии изменяется по линии BO_1A_1 , а в основании — по EC_1 . В этом случае основную нагрузку (особенно в начальном периоде деформирования) воспринимает основание, что более благоприятное условие для принятой системы.

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. Если знак внешней нагрузки противоположен знаку остаточных напряжений в покрытии, то композитный лист имеет большую деформационную способность и разрушается при нагрузках, значительно больших, чем без остаточных напряжений.

Покрытия, нанесенные на основание, изменяют сопротивляемость композитного изделия (листа, цилиндра и т. п.) на изгиб и кручение. Напряжения от приложенного изгибающего или крутящего момента распределяются по сечению изделий неравномерно: в центре изделия напряжения равны нулю, а максимальные значения они достигают в поверхностных слоях. Вследствие этого покрытие с прочностью, большей, чем у основания, повышает прочность при изгибе, прочность при кручении и контактную прочность изделия. Однако это положение имеет место при условии, когда деформация поверхностного слоя изделия меньше или равна упругой деформации материала покрытия.

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

ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ, КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Качество металлизирования зависит от правильности принятой технологии и точности ее выполнения, т. е. от квалификации рабочих, точности показания приборов, исправности оборудования и т. д. В табл. 24 и на рис. 68 приведены дефекты металлизирования и причины их возникновения. Практика металлизирования показывает высокую стабильность получаемых результатов (при правильно выбранных режимах металлопокрытия). Это обусловлено относительно малой толщиной покрытия и жесткостью компактного материала. Низкая дефектность металлизирования объясняется также большим

допустимым диапазоном отклонения от номинальных режимов технологии нанесения слоя и его спекания:

$$T_{\text{сп}} = T_{\text{сп}}^{\text{ном}} \pm 15 \div 30^{\circ} \text{C}, \quad p_{\text{п}} = p_{\text{п}}^{\text{ном}} \pm 0,15 p_{\text{п}}^{\text{ном}}.$$

Для контроля покрытий можно использовать существующие методы контроля качества металлов — рентгеновский, магнитный и т. д. На практике широко используют метод внешнего контроля, в который входит внешний осмотр, проверка размеров, остукивание, иногда определение твердости и т. д. Внешняя бездефектность покрытий предопределяет внутреннюю бездефектность. Наиболее опасным дефектом, который неопределим внешним контролем, является образование раковин в переходной зоне. Они образуются при значительном превышении режимов спекания ($T_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}$). Однако они легко определяются ультразвуковым или рентгеновским способом контроля.

Другой трудноопределяемый дефект металлопокрытия — низкая прочность связи покрытия с основанием. В производственных условиях для контроля качества наиболее рационально применение ультразвука.

Наиболее вероятными участками возможного образования дефекта (при значительных $\Delta\alpha$ и y_{1v}) для плоских образцов считаются углы, а в цилиндрических деталях — торцы. Для предотвращения дефектов можно рекомендовать ряд технологических приемов

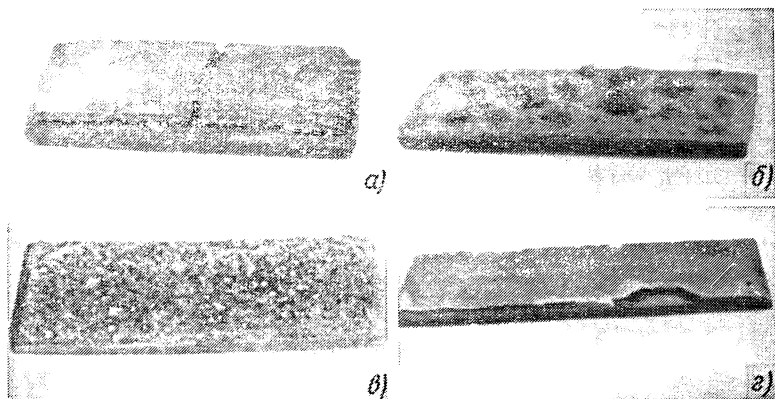


Рис. 68. Дефекты металлизации:
а — трещины; б — вздутия; в — ноздреватость; г — выплавление

Таблица 24. Виды и причины дефектов металлизирования

Дефекты металлизирования	Причины			Примечание
	при подготовке	при нанесении слоя	при спекании	
Неравномерность свойств: пористости, химического состава и т. д.	Некачественное перемешивание шихты. Неправильно выбран зерновой состав	Неправильно выбраны вид и режимы нанесения сырого слоя, малое содержание пластификатора	Неравномерный нагрев; выгорание отдельных элементов; флютуация жидкой фазы; диффузия металла подслоя или основания, не соответствующие среде	Устраняются изменением технологии
Отклонение свойств покрытия от требуемых	То же	Неправильный выбор режимов нанесения или неисправности аппаратуры	Неправильный выбор режимов спекания или отклонения от принятых	Устраняется изменением технологии
Низкая прочность связи покрытия с основанием	Недостаточная чистота поверхности, малая шероховатость	Упругое последствие или недостаточное пластификатора	Занижены режимы спекания; образование диффузионного слоя с низкими механическими свойствами	То же
Отрыв покрытия от основания (в отдельных местах)	То же	Неравномерная плотность слоя и упругое последствие	Внутренние напряжения, вызванные значительным различием температурных коэффициентов линейного расширения, или большая усадка слоя	Во многих случаях исправляется подпрессовкой и повторным спеканием
Трещины в покрытии	»	Неравномерная плотность слоя	То же	—

Раковины в зоне перехода слоя в оседание	Неправильный выбор материала под- слоя и шихты	То же	Контактное расплавление вследствие завышения температуры спекания или выдержки	Не исправляется
Вздутия покрытия	Неправильный выбор химического и зернистого состава шихты	Большая толщина, высокое давление прессования	Образование корки. Коробление—различие температурных коэффициентов линейного расширения	Вздутия малых размеров можно исправлять подпрессованием
Разрыхление слоя, неоднородность поверхности покрытия	Неправильный выбор химического состава шихты	Низкое давление прессования, экстразии и др.	При быстром нагреве — бурное выделение газов; бурное взаимодействие компонентов	Исправляется изменением химического состава исходного материала
Термическое и механическое воздействие на металл основания	—	Высокое давление прессования	Завышение режимов спекания—температуры, времени и давления	Исправляется последующей термообработкой
Пористость основания	—	—	Завышенные температуры или времени спекания	Исправляется изменением режимов спекания

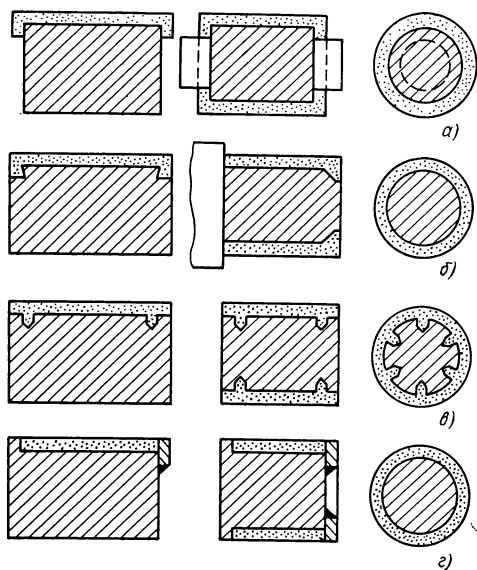


Рис. 69. Технологические приемы предотвращения дефектов и повышения прочности связи покрытия с основанием:

а — нанесение слоя с превышением размеров покрываемой поверхности; б — выточка клиновидного скоса; в — за-
сверливание; г — выточка бурта или приварка технологических пластин

(рис. 69), которые не только предупреждают образование дефектов, но и увеличивают прочность связи покрытия с основанием.

Точность размеров и шероховатость поверхности покрытия при металлизации зависят от формы исходного материала слоя, вида и режимов его спекания и последующей обработки. С увеличением размеров порошинок шероховатость поверхности повышается. Наибольшую шероховатость имеют высокопористые покрытия, сырой слой которых нанесен шликерным способом или осаждением, а спекание произведено нагревом.

Покрытия, сырой слой которых нанесен напрессовкой, плакированием или формовочным способом и термообработан с поверхностным или общим нагревом, имеют 1—2-й классы шероховатости поверхности (ГОСТ 2789—73) и точность 5—6-го классов. Применение спекания с подпрессовкой повышает класс шероховатости поверхности покрытия до 2—3, а точность до 4—5. Термомеханическое спекание обеспечивает при тщательной наладке механизма обжатия 3-й класс шероховатости поверхности и 4—5-й классы точности. Наибольших классов шероховатости (3—4) и точности (3—4) достигают при применении калибровки.

ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ УЧАСТКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Размеры и оснащение участков металлизации зависят от вида и характера производства, от серийности и объема планируемой продукции. Ниже приведено краткое описание отделения и цеха металлизации. Отделение металлизации (рис. 70, а) состоит из трех участков:

участок *I* подготовки поверхности и нанесения металлизационного слоя. Здесь установлены камера 2 дробеструйной очистки поверхности, пост 1 ручной газовой металлизации и стационарный 3 металлизационный аппарат (ЭМ12 и т. п.). На этом участке наносят подслои, а в отдельных случаях и сырой слой;

участок *II* приготовления шихты и нанесения порошкового слоя, на котором установлено оборудование для приготовления шликера 4 и пластифицированной порошковой массы 5, стенд 6 для изготовления оболочек и нанесения слоев и два пресса 7, 8 на 100 или 400 тс. Для приготовления шихты (шликера, пластифицированной массы или вообще смеси) используют шнековые или горизонтальные (используемые в литейном производстве) смесители;

участок *III* термообработки и горячего припрессования, состоящий из печи 9 с защитно-восстановительной атмосферой (водород, конвертированный газ и т. д.) и пресса горячего припрессования с использованием для нагрева ТВЧ.

Отделение металлизации может быть рекомендовано для нанесения покрытий на ремонтируемые или заготовки новых деталей.

На рис. 70, б показана схема цеха металлизации для нанесения покрытий на заготовки при серийном и крупносерийном производстве новых деталей. Технологический процесс в данном цехе характеризуется высокой механизацией и автоматизацией. Предполагаемый

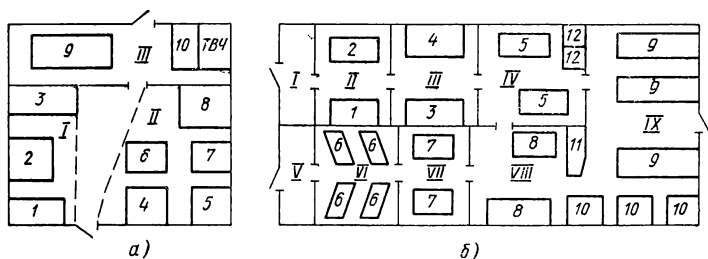


Рис. 70. Схемы отделения и цеха металлорования

цех состоит из линии изготовления оболочек, линии подготовки поверхности заготовок и участка горячего припрессования.

Линия изготовления оболочек состоит из: *I* — склада исходных материалов; *II* — участка изготовления шихты, где установлена аппаратура приготовления шликера *I*; и пластифицированной порошковой массы *2*; *III* — участка изготовления оболочек шликерным способом *3* и прессованием *4*; *IV* — участка термообработки оболочек, где расположены печи *5* с контролируемой атмосферой и калибровочные прессы *12*.

Линия подготовки поверхности заготовок включает: *V* — склад заготовок, *VI* — участок подготовки поверхности, где установлены металлорежущие автоматы *6* для придания заготовке в местах нанесения покрытий требуемых размеров и соответствующей чистоты; *VII* — участок металлизации с автоматами *7* для нанесения металлизационного подслоя; *VIII* — участок сборки, в котором размещены автоматы *8* для нанесения оболочек на заготовки в холодном состоянии (эти автоматы упрощают конструкцию прессов горячего припрессования и увеличивают их производительность).

На участке горячего припрессования *IX* установлены прессы горячего *9*, ударного *10* и виброударного *12* припрессования; *11* — стол контроля качества. Для особо ответственных деталей могут понадобиться печи с поверхностным нагревом электронным лучом — по типу установок для зонной или лучевой плавки металлов. Представленный цех может обеспечить нанесение покрытий на заготовки осей, валов, направляющих и т. п.

Наиболее целесообразно создание заводов по изготовлению новых и восстановлению изношенных деталей,

которые бы специализировались на нескольких прогрессивных методах нанесения покрытий.

Оборудование представленных отделения и цеха — в основном стандартное и выпускается промышленностью. Ниже приведены схемы двух установок горячего припрессования конструкции В. А. Мартынова, Н. В. Авдеева, Р. Г. Березина и В. П. Петренко.

Вибрационный пресс горячего припрессования в защитной атмосфере (Ar , H_2 и др.) состоит из стола 1, четырех стоек 12, на которых установлены три неподвижные 2 и одна подвижная 10 траверсы (рис. 71). Исходную заготовку 7 устанавливают в камеру, представляющую собой водоохлаждаемый корпус 4 с уплотнениями 19, выполненными из неэлектропроводного материала, с предохранительным клапаном 18, загрузочной дверкой 5 и смотровым окном 6.

Давление от гидравлического цилиндра 11 через шиток 13, подвижную траверсу 10, пружины 14, верхнюю опорную плиту 15, изолятор 16 и пуансон 17 передается на заготовку 7 и через последнюю — на нижний пуансон. Вибрация создается вибраторами 9, установленными на верхней и нижней опорных плитах 15 с частотой колебания 2,8—14 кГц.

Нагрев изделия — контактный; токоподвод через

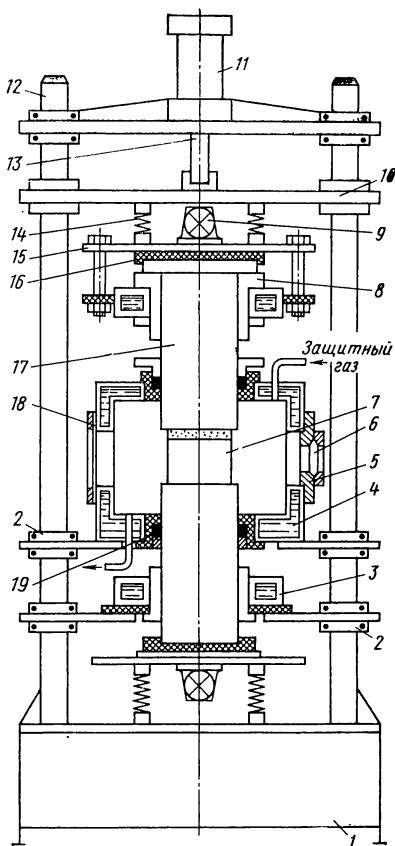


Рис. 71. Вибрационный пресс горячего припрессования

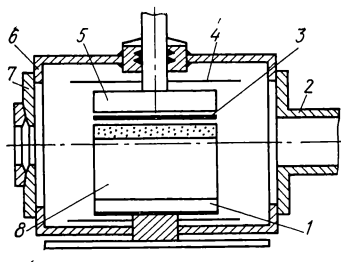


рис. 72. Вакуумная камера горячего припрессования

медные, водоохлаждаемые электроды 3, графитовые муфты 8 и пуансоны. Электрическое питание пресс получает от сети переменного тока 50 Гц и напряжением 380/220 В через два понижающих трансформатора ОСУ-8/0,5. Для плавной регулировки напряжения служит автотрансформатор.

Прессом управляют со специального пульта, в котором смонтированы все органы управления и контрольно-измерительная аппаратура.

Техническая характеристика прессы

Максимальное усилие, кгс	5000
Максимальная температура, °С	2500
Мощность источника питания, кВт	100
Размеры изделия (диаметр или высота), мм	200
Габаритные размеры, мм	1200×800×700
Масса, кг	700
Частота вибрации, кГц	14—28

Вакуумная камера для горячего припрессования с нагревом ТВЧ представляет собой водоохлаждаемый корпус 6 с внутренней футеровкой, экранами 4, дверкой 7 с окном и вакуумным шибером 2 (рис. 72). Изделие 8 устанавливают на нижнюю опору 1, нагревают индуктором 3, который затем убирают в боковой карман, и прессуют пуансоном 5.

Размеры и конфигурацию камеры выбирают по форме и размерам изделия. Источником питания служит типовой ультразвуковой генератор. Конструкция камеры позволяет монтировать приспособления для передачи на изделие виброударных и ультразвуковых колебаний.

Более простую конструкцию имеет камера, нагрев в которой осуществляется спиралями, размещенными в пуансоне. Последний в этом случае изготовляют из жаропрочного материала и нагрев производят до температуры не выше 950°С.

ПРИМЕНЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Металлирование применяется для нанесения износостойких (антифрикционных), фрикционных, жаростойких и других покрытий на металлы, керамику и графит.

Выбор наиболее рационального вида и режимов металлирования определяется технико-экономическими расчетами (определение оптимальной технологии) и эксплуатационными испытаниями изделий. Под оптимальной технологией металлирования понимается совокупность режимов нанесения сырого слоя и его спекания ($p_{\text{сп}}$, $T_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}$, $p_{\text{сп}}$ и т. д.), которые обеспечивают получение композитной детали с требуемой надежностью при минимальных затратах средств и рабочей силы.

Основной параметр металлирования — температура спекания. Нижняя ее граница определяется условиями достижения необходимых свойств покрытия, а верхняя ограничивается термическим влиянием на материал основания. Если температура, выбранная по первому условию, превышает температуру, определяемую вторым условием, то необходимо изменить химический состав исходной шихты или вид операции спекания. Повышение производительности метода и качества наносимых покрытий без значительных термических влияний на материал основания достигается при термомеханическом спекании.

При выборе материала, вида и режимов металлирования следует исходить из формы и размеров покрываемой поверхности, материала основания, эксплуатационных условий и типа производства изделий.

Различают элементарные, усложненные, составные и сложные формы покрываемой поверхности (рис. 73). К элементарным относят плоские (*а*), цилиндрические (*б*), конические (*в*) и шаровидные (*г*) поверхности. Элементарные поверхности также подразделяют на наружные (*1*) и внутренние (*2*). К усложненным относят поверхности, имеющие незначительное отклонение от элементарной 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

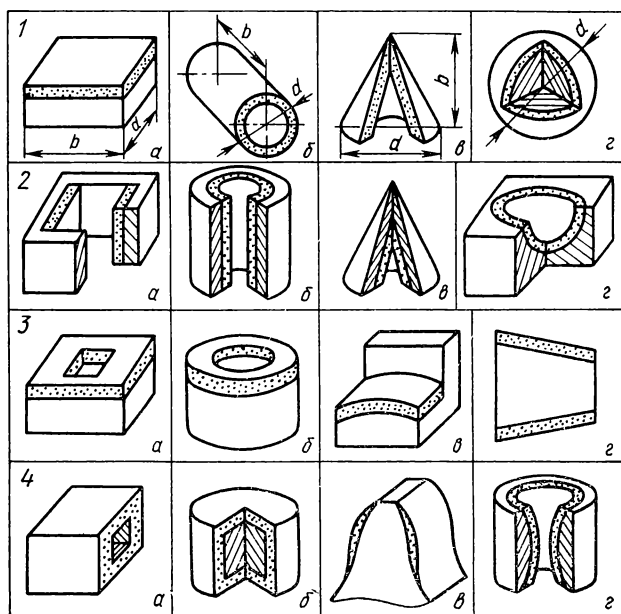


Рис. 73. Классификация форм покрываемой поверхности

те, которые не описываются какой-либо закономерностью (4, г).

По размерам покрываемые поверхности подразделяют на малые ($d, b < 0,02$), средние ($0,02 < d, b < 0,3$), большие ($0,3 < d, b < 1$) и очень большие ($d, b > 1$ м).

Основные параметры внешнего воздействия, влияющие на работоспособность покрытия: величина и характер действующих сил, температура и химический состав окружающей среды. Нагрузку, действующую непосредственно на покрытие (при трении), подразделяют на малую ($p < 2$), среднюю ($2 < p < 20$) и высокую ($p > 20$ МПа). По характеру действия различают постоянно действующие, переменные (циклические) и ударные нагрузки. По термическим условиям внешнюю среду подразделяют 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 через среду можно оказывать механическое воздействие на покрытие — пульпой, водой и т. д.

Выбор технологии металлизации зависит также от характера и типа производства: производство новых деталей и ремонтное производство, массовое, крупносерийное, серийное, мелкосерийное и единичное.

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

Ниже приведены рекомендации по выбору вида и режимов металлизации для деталей, объединенных в отдельные группы или подгруппы по одному или нескольким характерным признакам.

В группу 1 входят детали, рабочая поверхность которых имеет малые размеры (≤ 20 мм), — пуансоны, толкатели, электроконтакты, электроды контактных машин, измерительный и специальный инструмент, клапаны малых размеров и другие детали машин и механизмов. По конфигурации рабочих поверхностей эти детали обычно относятся к элементарным или элементарно-составным. Условия работы: абразивный, эрозионный и тому подобный износ, температура комнатная, повышенная или высокая (электроконтакты).

Эти условия требуют от материала покрытий высоких свойств — твердости, электропроводности, жаропрочности и т. д. Исходя из этого покрытия следует наносить по технологии П6 или П8. Оболочку (пластину) толщиной 0,3—3 мм выбирают из материала с максимальной или достаточной стойкостью в условиях работы изделия. При сухом трении, абразивном износе без ударов и гидроабразивном износе лучше использовать высоколегированные чугуны, спеченные твердые сплавы (Т30К6, МНТ и т. п.), бориды и другие сверхтвердые материалы.

При ударно-абразивном износе лучше работают высоколегированные стали, спеченные твердые сплавы с высоким содержанием кобальта (ВК25 — ВК35), композиционные армированные молибденовые сплавы типа

Т30К4 и т. д. При нанесении покрытия на электроконтакты необходимо использовать пластины 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 пластины наносят интенсифицирующие слои из Ag, Cu, бронзу, СНСГ и т. д.

В группу 2 входят детали средних и больших размеров. Нанесение покрытий на детали возможно на типовом оборудовании (прессы, печи и т. д.), однако при этом следует учитывать различие температурных коэффициентов линейного расширения исходных материалов при нагреве и охлаждении и усадку при спекании. В эту группу входят разнообразные детали машин и механизмов. Вследствие этого группу подразделяют на подгруппы, каждая из которых объединяет детали со свойственными им конфигурацией и условиями работы.

Подгруппа I объединяет детали, рабочая поверхность которых плоская и работает на трение (направляющие вкладыши, скользуны, пресс-формы, лемеха, ножи и т. д.). Исходный материал и технологию нанесения принимают исходя из вида трения. При жидкостном трении используют многокомпонентную шихту на основе порошка железа или стружки легированных сплавов. К ним добавляют порошки ферросплавов FeW, FeMo, FeNi 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 применяют твердосплавные пористые гранулы из ТК, ТН (Т30К4, МНТ-2А) с добавками порошков бронзы и элементов твердой смазки (MoS₂) или оболочки из мелких (3—8 мм) твердосплавных пластин с бронзовой связкой.

Нанесение сырого слоя и его спекание возможно всеми вышеописанными способами. Однако если $\alpha_1 \approx \alpha_0$ и шихта содержит легкоплавкий компонент, хорошо смачивающий основной материал, то лучше применять технологию П1 или П1 (в последнем случае оболочка сырая). Если $\alpha_1 \gg \alpha_0$, то используют технологию ШЗ. Уплотнение в холодном состоянии производят прессова-

нием, прокаткой или ударной нагрузкой. Высокопроизводительными являются также технологии Н1П и Ш1П, особенно если исходным материалом служат гранулы. Припекание сотовых оболочек выполняют по технологии П5 и П8.

Пример практического применения: направляющие кулачки кривошипного механизма. На рабочую поверхность наносят покрытия $СЧ+5 FeW+25 ПЖ+5 BrO_6-ШЗ-1180-20-H_2$.

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 ($ПР18+5ПЖ+25TiC$; $СНГН+30ПЖ+20ВК8$ и т. д.), гранул из высоколегированных сталей (чугунов) и твердосплавных смесей ($Т30К4+МНТ-A_2$), оболочек из твердых и сверхтвердых материалов и, во-вторых, применением таких 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, Н, Ф, Ш. При этом горячее припрессование применяют в виде прокатки или накатки.

Примеры практического применения: 1) направляющие баки ковочных машин (рис. 74), поверхность которых работает в условиях сухого трения при температуре $300-400^{\circ}C$, материал основания — сталь 45. На рабочую поверхность наносят покрытие ПЖ, $30ВК10-H_6-1250-H_2$ (прокатка через валки в нагретом состоянии); 2) стол пресс-автомата, плоская поверхность работает на абразивный износ, наносят покрытие $ОМНТ-П6-1150-H_2$.

К подгруппе 2 относятся детали, рабочая поверхность которых представляет собой плоское кольцо, — клапаны, седла, пятники и т. д. Условия их работы в большинстве случаев — сухое трение и гидро- или просто абразивный износ. Наиболее приемлемая технология нанесения покрытий на детали такого типа — П4 или П6. При нанесении покрытий по технологии П4

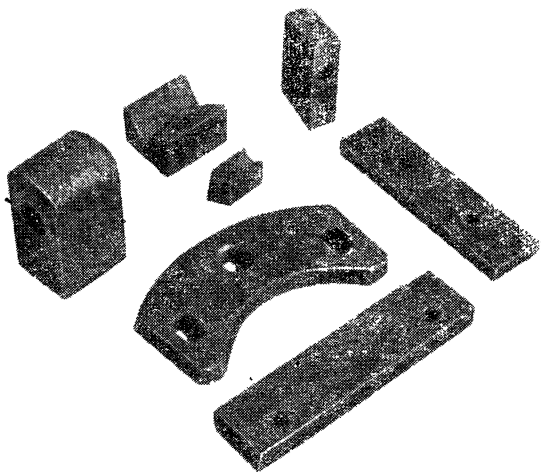


Рис. 74. Направляющие бакенов ковочных машин, восстановленные металлизированием

оболочку изготовляют из компактного материала или спеканием из порошков. При Пб возможно использование сырых и спеченных оболочек. Лучше применять поверхностный нагрев (ТВЧ или блоками) в сочетании с холодильниками для обеспечения переменного поля температур.

Пример практического применения: седло и клапан задвижки химической аппаратуры. Условия работы — гидроабразивный износ — перекачка щелочной пульпы с WO_3 , давлением 20 ат, $T=150\div 200^\circ\text{C}$. На рабочую поверхность наносят слой ОВК20—Пб—1200—5— H_2 .

В подгруппу 3 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 — с общим нагревом или под давлением. Основное в разработке 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, окислы Al_2O_3 , Cr_2O_3 , карбиды TiC, силициды $MoSi_2$ и другие материалы.

Пример практического применения — лодочка из Ni для восстановления вольфрама из WO_3 (рис. 75), рабочая температура $1250^\circ C$, среда H_2 , H_2O , CO. Покрытие наносят для создания барьерного слоя, предотвращающего взаимодействие W с Ni. На исходную заготовку ($280 \times 280 \times 3$) с обеих сторон термическим напылением наносят NiCr

толщиной 0,1 мм. Затем пульверизацией на подслой наносят шликер, фритта которого состоит из $Ni + 25 Al_2O_3$ с интенсифицирующим покровным слоем из $Ni - Cl$. После удаления влаги заготовки нагревают до температуры $1200 - 1250^\circ C$ и прогоняют через валки. Хорошие результаты показывают эксперименты, в которых вместо Al_2O_3 использовали $MoSi_2$ и $Al + 80 CrSi$.

В подгруппу 4 входят детали цилиндрической формы — валы, оси, пальцы, втулки, цилиндры, шкивы, пресс-формы, стволы и т. д. Детали этой подгруппы подразделяют на две части. К одной части относят детали с внутренней рабочей поверхностью, к другой — с наружной. Условия работы цилиндрических деталей очень разнообразны, поэтому для покрытий используют широкий класс материалов и различные операции нанесения сырого слоя и его спекания.

Наиболее широкоприменяемые способы нанесения слоя на поверхности цилиндрической формы — формовочный и плакирование. При использовании порошков мелкой градации применяют экструзионный, для крупной градации — шликерно-формовочный способ. При плакировании используют целые изготовленные по месту оболочки (см. рис. 12, а, б), пластины с радиусом основания, гибкие оболочки (см. рис. 12, в, г) и проволоку. Широкое применение находят также шликерный

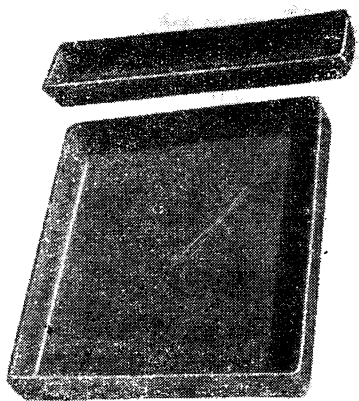


Рис. 75. Никелевые лодочки покрытием $PN + 20 Al_2O_3$

способ, напыление и осаждение. Напрессовку применяют для нанесения сырого слоя на удлиненные цилиндрические детали малого диаметра — аналогично технологии нанесения покрытий на сварочные электроды.

Особый способ нанесения сырого слоя — центробежный. Во внутреннюю полость втулки (цилиндра) вводят шихту, которая при вращении заготовки равномерно распространяется по поверхности и закрепляется вследствие затвердевания парафина или удаления влаги. Центробежный способ можно использовать и при нанесении сырого слоя также и на наружную поверхность цилиндрической заготовки. В этом случае слой вначале наносят на внутреннюю поверхность графитовой (керамической) формы, которую после проточки надевают на цилиндрическое основание.

Для спекания сырого слоя, нанесенного на цилиндрическое основание, используют различные способы. Из термических способов широкое применение находит спекание с общим нагревом (1), с поверхностным нагревом (ТВЧ, Э. ЭЛ) и с двухступенчатым нагревом (3). Обжатие в последнем случае происходит путем прогонки через фильеру (при нанесении на наружную поверхность) и прошивки (внутренней поверхности) в холодном состоянии.

Из термомеханических наибольшее применение нашли 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 с использованием ротационных машин.

Примеры практического применения: 1) палец верхней головки шатуна, работающий в условиях жидкостного трения; наносят покрытия ППЗ6ВК6+2БрФ7—М8—1200—15—Н₂ (рис. 76); 2) втулка цилиндра гидронасоса, работающая в условиях гидроабразивного износа; наносят покрытие ОМНТ—П5—1000—15—Н₂; твердосплавную оболочку (втулка толщиной 2 мм) с бронзовым слоем 0,1 мм вставляют в нагретую до температуры 1160°C стальную втулку; 3) шейка коленчатого вала; графитовую форму устанавливают на шейку ва-

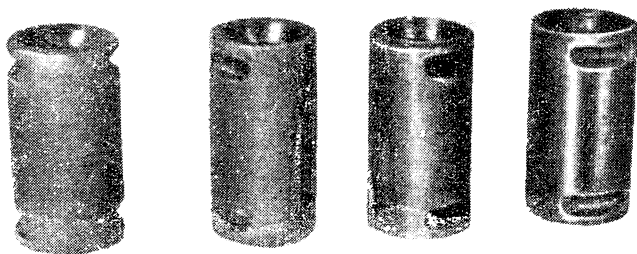


Рис. 76. Пальцы верхней головки шатуна с покрытием ПП36ВК6+2БрФ7—
—М8—1200—15—Н₂

ла; пластифицированная шихта ГМНТ—А2+30 БрОСЦ заполняет зазор между заготовкой и формой. Режим спекания: 1100°С в течение 20 мин в среде водорода.

В группу 3 входят детали сложной конфигурации: лопатки турбин, кулачки, шестеренки, отдельные детали пресс-форм, сопла и т. д. Сырой слой наносят шликерным и формовочным способами, напылением или осаждением. Термическое спекание производят с общим или поверхностным (изотермическим) нагревом, термомеханическое спекание — в гидро- или газостатах. В отдельных случаях возможно спекание под давлением (за счет разности расширения при нагреве материалов основы и формы), горячее припрессование или виброударная обработка нагретой заготовки. Если рабочая поверхность детали сложной конфигурации элементарна (плоская, цилиндрическая и т. д.), то ее относят к соответствующей подгруппе.

В группу 4 входят детали и узлы крупных размеров — направляющие станины, конусы, валы, цилиндры, корпуса, резервуары и т. д. Тонкие слои наносят напылением, осаждением или шликерным способом, толстые сырые слои — плакированием, прессованием, формовочным и другими способами. Термическое спекание производят с общим нагревом (в специальных печах) или с поверхностным нагревом (ТВЧ, экзотермический), термомеханическое спекание — под давлением (под

грузом) горячим припрессованием (накаткой) или с применением виброударной нагрузки.

Наиболее приемлемый способ нанесения покрытий на детали крупных размеров — плакирование с использованием пластин или гибкой пленки, спекание — местным нагревом за счет пропуска электрического тока, трения (ультразвука) или использования блоков. Сжатие осуществляется за счет статического давления или виброударной нагрузки.

На основании исследований по металлизации деталей с поверхностями больших площадей приведены следующие рекомендации:

1. Направляющая станины станка. Пленку, содержащую пористые гранулы ГМНТ—А2 и 25% ВПр2, припрессовывают широким роликом к направляющей и нагревают под давлением керамического блока до температуры 1160°C. Снизу покрываемой поверхности устанавливают холодильники (медные охлаждающие башмаки). По второму варианту нагрев производят ТВЧ, давление создают твердосплавным (ВК15) роликом. Пленку изготовляют на основе тонкого (0,1 мм) листа железа, который служит своеобразным барьером между припоем и роликом.

2. Конус доменной печи. Слой наносят припеканием шестиугольных пластинок (шириной 18—30 мм, толщиной 4—7 мм) из МНТ—А2, ЖНТ или ДНТ со слоем (0,1 мм) ВПр4 или СНГН. Нагрев — за счет пропуска электрического тока, давление от электрода по типу контактной (точечной) сварки.

3. Вал большого диаметра. Вал устанавливают вертикально в графитную форму. В зазор между валом и формой вводят шликер (гранулы и порошок бронзы). Нагрев производят со стороны графитовой формы; по осевому отверстию вала пропускают воду или CO_2 .

РАЦИОНАЛЬНОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Надежность деталей машин и механизмов в настоящее время повышают, используя главным образом сплавы, композиции и другие материалы с повышенными свойствами. Этот путь требует применения большого коли-

чества дефицитных и дорогостоящих материалов (Ni, Mo, W и т. п.) и поэтому отличается высокой себестоимостью. Вследствие дефицитности отмеченных компонентов этот способ не может быть применен для широкого класса деталей массового производства.

Кроме того, надежность многих деталей не решается в полной мере даже использованием дорогостоящих и композиционных материалов, так как от материала, идущего на изготовление ряда деталей, требуются не только высокие и разнообразные, но во многих случаях трудносочетаемые свойства: твердость — пластичность, жаропрочность — электропроводность и т. д. Однородный по всему объему детали исходный материал (сплав, композиция и т. д.) часто не в состоянии долговечно сопротивляться разнохарактерному внешнему воздействию (нагрузка, окисление, температура, трение и т. п.).

Наибольшая долговечность деталей машин и механизмов при минимальной затрате дефицитных и дорогостоящих материалов может быть достигнута за счет рационального конструирования деталей. Основные положения рационального конструирования: профиль каждого сечения детали выбирают из условия наибольшей сопротивляемости действующим нагрузкам; площадь сечения детали рассчитывают по соответствующему предельному состоянию (критерию); материал каждой части детали выбирают с учетом максимального (достаточного) сопротивления действующим в рассматриваемом месте внутренним напряжениям и внешнему воздействию (окислению, трению и т. д.).

Разные части детали в большинстве случаев подвергаются различным воздействиям, вследствие этого и материал каждой части соответственно должен отличаться химическим составом, структурой и другими характеристиками. Для выполнения этого рациональный способ конструирования предусматривает разделение детали на составные части, каждую из которых необходимо изготавливать из материала с наибольшим сопротивлением действующим в этой части внутренним напряжениям и внешнему воздействию.

Составные части рационально сконструированной детали представляют собой заготовки простейшей конфигурации, поэтому при разработке технологии их изготовления предусматривают широкое использование профильного материала (листов, уголков, труб и т. д.)

и полную автоматизацию. Завершающие операции изготовления рационально сконструированных деталей состоят в объединении составных частей неразъемным соединением и окончательной механической обработке (шлифовании). Соединять составные части можно пайкой, диффузионной сваркой, сваркой трением, сваркой спеканием и др.

Для увеличения долговечности деталей рациональное конструирование при изготовлении составных частей деталей должно предусматривать наиболее перспективные способы металлопокрытий — осаждение, металлизирование и т. д.

Рациональное конструирование используют в инструментальном производстве для изготовления резцов, фрез с напаянными пластинками, сверл с приварными хвостовиками и т. д. Техничко-экономические показатели составного инструмента высоки. Отдельные примеры рационального конструирования имеются и в машиностроении — клапаны с приваренными износостойкими кольцами, напавленные зубья экскаватора и т. п. Возможности рационального конструирования в машиностроении велики, так что большинство деталей машин и механизмов можно проектировать и изготавливать по рациональной технологии. Само проектирование не вызывает трудности. Сложность в изготовлении, однако, современные методы сварки, металлопокрытий, производства биметалла и т. п. позволяют преодолеть многие трудности технологии изготовления рационально спроектированных деталей.

Примером рационального конструирования может служить коленчатый вал (рис. 77). Шейки вала работают преимущественно на кручение и изгиб; поверхностный слой сопряжен с подшипником и работает в условиях жидкостного трения. Поэтому шейки изготавливают из малодефицитной низколегированной стали 13Н2А, 15ХН. Диаметр шейки рассчитывают исходя из допустимого давления трущихся пар; площадь поперечного сечения шейки, получаемая из этого расчета, обычно значительно больше площади, которая получилась бы при расчете на прочность. Поэтому шейку рационально изготавливать пустотелой — втулкообразной (рис. 77, а), а поверхность трения покрывать пористым композиционным твердосплавным материалом (рис. 77, б). Щечки вала работают на изгиб и растяжение. Материалом

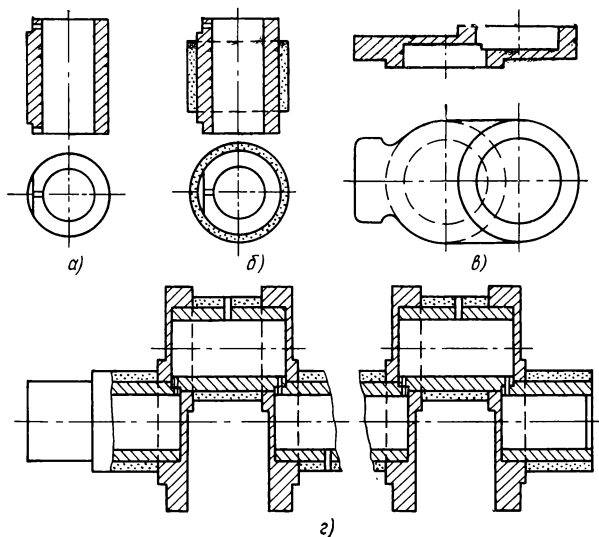


Рис. 77. Составные части и композитная конструкция коленчатого вала:
 а — заготовка под шейку; б — шейка с покрытием; в — щека;
 г — коленчатый вал

для них служит низколегированная сталь типа 30ХН, 20ХГСА, 40Х и т. п., их профиль приближается к двутавровому сечению (рис. 77, в). Составные части соединяют пайкой, сваркой, спеканием или диффузионной сваркой в среде водорода.

Коленчатый вал рациональной конструкции в 1,5—2 раза легче обычного, износостойкость увеличивается в 5—8 раз и более.

Рациональное конструирование применимо к прокатному валу, задвижкам, бакенам ковочных машин и многим другим деталям. Практика показала, что рациональное конструирование снижает объем заготовительных работ и механической обработки, уменьшает металлоемкость и значительно повышает долговечность деталей. Так, например, долговечность рационально сконструированных задвижек на автоматической линии химического производства увеличилась в 45—50 раз, бакенов ковочных машин в 10—12 раз и т. д.

Рациональное конструирование позволяет создавать

новые более совершенные конструкции и разрешать ряд важных проблем машиностроения.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Применение металлизации в ремонтном производстве дает возможность восстанавливать первоначальную работоспособность изношенной детали или увеличивать ее в несколько (десятки) раз. Выбирая исходный материал, вид и режимы нанесения покрытий на ремонтные детали, необходимо исходить из того, чтобы при термообработке не снижались или снижались в допустимых пределах свойства материала основания. В связи с этим при ремонте применяют спекание с пропиткой, спекание с поверхностным нагревом и с подпрессовкой между двумя нагревами. Наибольшее применение находит термомеханическое спекание.

Приведем примеры практического применения.

1. Валик балансира ($d=50$, $L=350$ мм, сталь 45). Условия работы — полужидкостное трение. Наносимое покрытие $\text{ПП30СЧ}+6\text{FeW}+2\text{Cu}-\text{М8}-1200-10-\text{Н}_2$. Стойкость увеличилась в 1,6 раза (рис. 78).

2. Распределительный шкив протяжного стана ($d=180$ мм, $L=25$ мм, материал — сталь 35). Условия работы — сухое трение о молибденовую проволоку. Наносимое покрытие $\text{ГМНТ}-\text{А2}+8\text{ПЖ}+1\text{ПН}+8\text{ПМ}-\text{Н1}-1188-30-\text{Н}_2$. Последующая нормализация. Стойкость увеличилась в 5,2 раза.

3. Тяговый барабан ($d=70$ мм, $L=1400$ мм, материал — сталь Х9). Условия работы — сухое трение о вольфрамовую проволоку. Наносимое покрытие $\text{ОВК6}-\text{П2}-1150-10-\text{Н}_2$. Стойкость увеличилась в 26—30 раз.

Металлизацией восстанавливают клапаны, седла, сопла, детали штампов и прессформ, контакты, на-

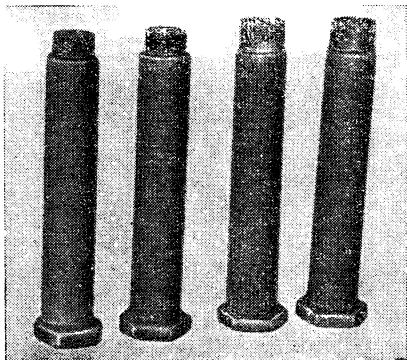


Рис. 78. Валики балансира, восстановленные металлизацией

правляющие, валы и многие детали машин и механизмов.

Ниже описан очень простой и экономичный способ восстановления изношенных подшипников, втулок, однослойных вкладышей, лабиринтов, сальников и т. п. до чертежных или требуемых размеров с обеспечением их первоначальных качеств. Сущность этого способа состоит в следующем: изношенную втулкообразную деталь (рис. 79, б) обжимают для уменьшения внутреннего диаметра до размера, который менее требуемого на величину припуска для последующей механической обработки (рис. 79, в). Одновременно с этим уменьшается наружный диаметр детали. Для увеличения этого диаметра до размера, превышающего требуемый на величину припуска, для последующей механической обработки (рис. 79, д) используют металлизацию (рис. 79, з).

Первую операцию данного метода — обжатие — для уменьшения внутреннего диаметра детали можно осуществить несколькими способами. Наиболее простой и производительный — прогонка вышеуказанных деталей через коническую матрицу (рис. 79, е). Сырой слой наносят напылением, формовочным или шликерным способом с использованием проволоки или стружки с порошком. Спекание выполняют с общим нагревом. Более производительный способ восстановления втулкообразных деталей — способ, при котором операция обжатия совмещена с давлением при термомеханическом спекании. Согласно такой технологии восстановление изношенной детали состоит из нанесения сырого слоя, нагрева и обжатия.

Примером восстановления втулкообразных деталей может быть ремонт с помощью металлизации бронзой втулки верхней головки шатуна двигателя 2Д100 тепловоза ТЭ-3. Аналогичен процесс восстановления таких деталей, как бронзовые гайки прессы, лабиринты турбовоздухоуловков, втулки и подшипники станочного оборудования и многие другие детали.

Относительно легким может быть восстановление деталей плоской формы до чертежных размеров и работоспособности рабочей поверхности в пределах, рекомендуемых для новой детали. Это направляющие, скользуны, пластины и т. п. Покрытие наносят на поверхность с обратной стороны рабочей поверхности, а рабо-

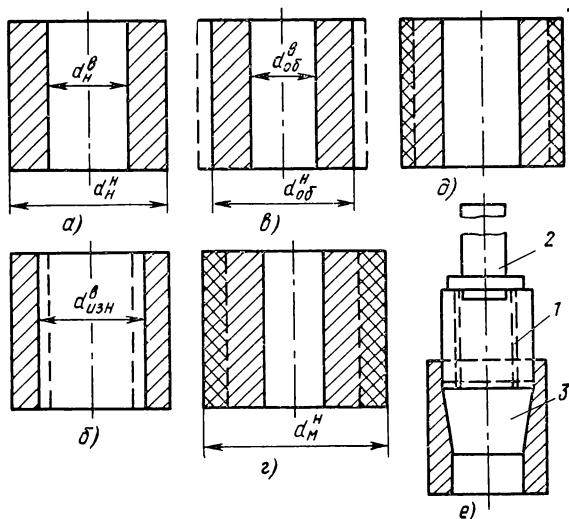


Рис. 79. Размеры втулки:

a — новой; *б* — изношенной; *в* — обжатой; *г* — после металлизации; *д* — после механической обработки; *е* — схема устройства для обжатия изношенной втулки; 1 — деталь; 2 — пуансон; 3 — матрица; d_H^B , d_H^H — внутренний и наружный диаметры новой втулки; $d_{\text{изн}}^B$ — внутренний диаметр изношенной втулки; $d_{\text{об}}^B$, $d_{\text{об}}^H$ — внутренний и наружный диаметры обжатой втулки; d_M^H — наружный диаметр металлизированной втулки

чую поверхность обрабатывают механически (шлифованием). Покрытие восстановленных таким образом деталей работает на сжатие, поэтому возможно применение покрытия из недефицитного материала (стали).

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ

Экономическая целесообразность применения металлизации определяется абсолютной суммой экономического эффекта и размером экономии по себестоимости (в денежном выражении), сокращением расхода металлов, высвобождением оборудования и рабочих. В сфере эксплуатации экономическая эффективность определяется увеличением срока службы узлов машин и агрегатов, сокращением эксплуатационных расходов и др.

Себестоимость изготовления детали с покрытием $C_{\text{п}}$ может быть определена непосредственно по техниче-

ским нормам или в сравнении с себестоимостью изготовления стандартной детали C_0 , т. е. без покрытия:

$$C_{\pi} = C_0 + Q_{\text{ип}} \Pi_{\text{ип}} + b_{\text{ип}} t_{\text{ип}} (1 + H_i) - \\ - (G_0 - G_{\text{оп}}) \Pi_0 - G_{\text{оп}} (\Pi_0 - \Pi_{\text{оп}}),$$

где $Q_{\text{ип}}$, $\Pi_{\text{ип}}$ — масса и стоимость материалов, необходимых для нанесения покрытий на одну деталь; $b_{\text{ип}}$, $t_{\text{ип}}$ — тарифные ставки исполнителей и продолжительность работ (i), связанных с нанесением покрытий; H_i — коэффициент, учитывающий накладные расходы, связанные с использованием дополнительного оборудования, приспособлений, площадей и т. д.; G_0 , $G_{\text{оп}}$ — масса заготовки соответственно для изготовления детали без покрытия и детали с покрытием; Π_0 , $\Pi_{\text{оп}}$ — цена 1 кг материала основания детали, изготовленной по технологии без нанесения покрытия и с покрытием.

Количество материала, необходимого для нанесения покрытий (Q_1 , кг), зависит от площади покрываемой поверхности (S , м^2) и толщины слоя (h_1):

$$Q_1 = Sh_1 \gamma_1 = Sh_1 (1 - \theta) \gamma_{\text{м}},$$

где γ_1 и $\gamma_{\text{м}}$ — плотность покрытия и компактной части покрытия, г/см^3 ; θ — относительная пористость.

Для деталей, работающих на износ, толщину покрытия принимают

$$h_1 = t_{\text{н}} + l_{\text{р}} + k_{\text{п}}.$$

Величину допустимого износа $t_{\text{н}}$ (м) принимают по справочнику (ремонтника) или из технических условий эксплуатации соответствующего узла. В большинстве случаев $t_{\text{н}} = 0,3 \div 3$ мм; перекрытие основного металла $l_{\text{р}} = 0,05 \div 0,2$ мм; припуск на механическую обработку принимают в зависимости от разновидности спекания: при спекании с поверхностным и общим нагревом $k_{\text{п}} = 0,5 \div 1,2$, при ТМС $k_{\text{п}} = 0,3 \div 0,5$, а при использовании калибровки $k_{\text{п}} = 0 \div 0,3$ мм.

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

$$h_1 = v t_{\text{у}},$$

где v — скорость окисления (растворения), мм/ч; $t_{\text{у}}$ — устанавливаемый срок службы изделия, ч.

Стоимость исходного материала зависит от его химического состава (табл. 25). Наиболее дешевые материалы — порошки железа и стружка. Порошки цветных

Таблица 25. Стоимость исходных материалов, применяемых для металлизации [21, 22]

Наименование продукции	ГОСТ, ОСТ или технические условия	Марка	Единица измерения	Оптовая цена, руб.
Порошки:				
железный	ГОСТ 9849—74	ПЖ1—	т	150—320
медный	ГОСТ 4960—75	ПЖ5	»	1230
никелевый	ГОСТ 9722—71	ПНК	»	4460
		ПНЭ	»	5000
вольфрамовый	ТУ 48-19-101—74	ПВ1	кг	12,7
молибденовый	ТУ 48-19-69—73	МП4	»	21,0
титановый	ЧМТУ 1-875—70	ПТК	»	47,3
»	ЧМТУ 1-866—70	ПТ	»	14,5
»	ТУ 48-10-22—73	ПТЭК-1	»	2,6
Порошки сплавов:				
оловянно-свинцовые	ГОСТ 1499—70	ПОС-40	т	5630
латунный	ТУ 48-08-418—71	ПЛ-35	»	1010
Сплав—связка	ТУ 48-19-123—74	ЛГС-1	»	930
ПХ18Н9Т-1	—	—	кг	18,50
ПХ20Н80-1	—	—	»	26,50
Карбиды:				
вольфрама	ТУ 48-19-103—73	—	кг	11,90
титана	ТУ 48-19-78—73	—	»	6,90
Смеси:				
вольфрамокарбидные	ТУ 48-19-60—73 и	ВК2	кг	12,50
	ТУ 48-19-104—73	ВК15	»	16,4
		Т30К4	»	9,5
ПС-14-80	ТУ 48-19-122—74	—	т	370
ПС-15-30	То же	—	»	830
Проволока:				
стальная	d=2 мм	1 класс	т	402
биметаллическая	d=2 мм	—	»	938
Fe—Cu				
65С2ВА	d=2 мм	—	»	1780
Пластины:				
ВК2	—	—	кг	13—80
ВК15	—	—	»	18—20
Т30К4	—	—	»	10—70

металлов и их сплавов — дорогостоящие материалы. Вследствие этого их следует использовать в местах с наиболее тяжелыми эксплуатационными условиями.

Металлирование дает возможность наиболее полно использовать материалы. На рис. 80, а и б представлены шейка и балансирный валик, покрытия на которых

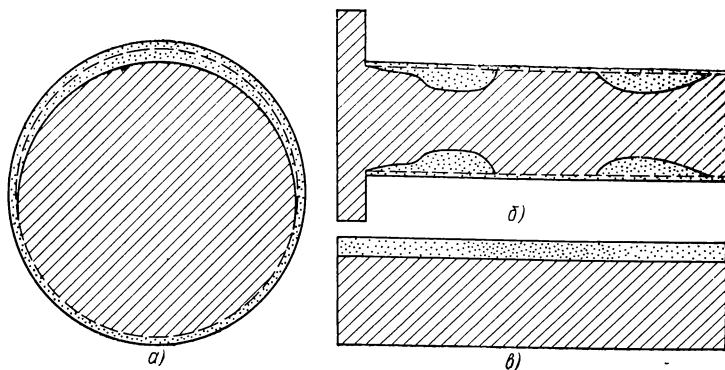


Рис. 80. Покрытия:

a, б — нанесенные в соответствии с формой и величиной износа; *в* — с переменными свойствами

нанесены лишь на места их износа. Кроме этого, металлизирование позволяет наносить покрытия с переменными свойствами: на одной поверхности в местах наибольшего внешнего воздействия (трения) наносят слои из более износостойкого (более дорогостоящего) материала, а в других местах — из менее дефицитного и недорогого материала. Все это, а также высокая точность и чистота поверхности наносимых металлизированием покрытий, малый припуск на последующую обработку обеспечивают высокую рентабельность металлизирования.

Из анализа формулы C_{π} видно, что для многих деталей $C_{\pi} > C_o$, так как

$$Q_{in}C_{in} + b_{int}t_{in}(1 + H_i) > (G_o - G_{оп})C_o + G_{оп}(C_o - C_{оп}).$$

Применение металлизирования позволяет уменьшить металлоемкость детали или заменить материал основания менее дорогостоящим. В этом случае $C_{\pi} \leq C_o$.

Годовая экономия применения металлизирования при изготовлении или восстановлении деталей составляет

$$\Delta = \left(\frac{C_o}{D} - \frac{C_{\pi}}{D_{\pi}} \right) D_o n = (k_n C_o - C_{\pi}) n,$$

где D , D_{π} — объем работы, выполненной машиной (агрегатом) в период гарантийного по надежности времени работы при использовании детали без покрытия и с покрытием; D_o — объем работы машины, для которой определяется эффективность, обычно $D_o = D$; n — число

деталей, изготавливаемых (восстанавливаемых) с применением металлизации; k_n — коэффициент относительной работоспособности, $k_n = D_{\text{п}}/D$.

Таблица 26. Эффективность применения металлизации
(на одну восстановленную или изготовленную деталь)

Наименование детали	Стоимость, руб.		k_n	Экономия на одну восстановленную деталь		Примечание
	C_o	$C_{\text{п}}$		$k_n C_o - C_{\text{п}}$, руб.	$(k_n - 1)G_o$, кг	
Направляющие бакенов	1,22	1,12	11	12,30	У8—4,0	Восстановление
Седло и клапан задвижки	52,6	62,9	50	2400	Сталь Л35—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	Ni—2,4	Изготовление новой

В табл. 26 приведены примеры экономии денежных средств и металла при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей с применением металлизации. Если учесть сокращение простоя оборудования при смене деталей, сокращение числа ремонтников и т. д., то уточненные цифры будут еще выше, чем в табл. 26.

Широкое внедрение металлизации обеспечит значительную экономию денежных средств и большого количества металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлирование как способ нанесения покрытий в ближайшее время станет одним из широкоприменяемых в машиностроении и ремонтном производстве. Металлированием можно наносить на поверхности различной конфигурации покрытия с широким диапазоном свойств по прочности, твердости, пористости, толщине и другим характеристикам. Металлирование — высокопроизводительный и рентабельный способ, обеспечивающий нанесение покрытий с различными функциями — защитными, температуроустойчивыми, барьерными и т. д.

Для практики нанесения покрытий большой интерес представляет термомеханическое спекание — технология с низким нагревом и высокими давлениями. Перспективно жидкофазное спекание с поверхностным нагревом и спекание с использованием высокотемпературного синтеза и др.

Металлирование — это новое направление в практике нанесения покрытий. В теории металлизации еще слабо изучены механизмы и закономерности нанесения сырого слоя, жидкофазного спекания и т. п. Важным вопросом внедрения является разработка и выпуск оборудования.

Отмечая высокую рентабельность металлизации, следует отметить, что для внедрения этого способа требуются значительные первоначальные площади. Однако если в какой-то отрасли будет организовано централизованное изготовление специальной шихты, пластин или оболочек, то для нанесения покрытий непосредственно на заводе потребуется всего одна — три установки — пресс и печь или установка ТВЧ, или просто одна установка горячего припрессования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеев Н. В.** Основные понятия металлизации. В сб. материалов по итогам научно-исследовательских работ ТашПИ за 1972—1973 гг. Вып. 102. Ташкент, «Наука», 1974, с. 99—102.
2. **Авдеев Н. В., Березин Р. Г., Мартынов В. А.** Методы определения прочности сцепления покрытия с основанием при металлизации. — «Заводская лаборатория». Т. 40, 1974, № 2, с. 226.
3. **Авдеев Н. В., Мурзаев В. В.** Применение порошковой проволоки для нанесения покрытий распылением. В сб. материалов по итогам научно-исследовательских работ ТашПИ за 1973—1974 гг. Вып. 144, Ташкент, «Наука», 1975, с. 29—100.
4. **Аппен А. А.** Температуроустойчивые неорганические покрытия. М.-Л., «Химия», 1976. 296 с.
5. **Бальшин М. Ю.** Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. М., Металлургиздат, 1972. 312 с.
6. **Высокотемпературные неорганические покрытия.** Пер. с англ. Под ред. Дж. Гуменика. М., «Металлургия», 1968. 340 с.
7. **Грацианов Ю. А., Путинцев Б. Н., Силаев А. Ф.** Металлические порошки из расплавов. М., «Металлургия», 1970. 245 с.
8. **Добровольский А. Г.** Шликерное литье. М., «Металлургия», 1977. 240 с.
9. **Дорожкин Н. Н., Кашицын Л. П.** Физико-механические характеристики износостойких покрытий. Киев, «Порошковая металлургия», 1974, № 3, с. 60—65.
10. **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, с. 101—121.
11. **Журавлев Г. И.** Химия и технология термостойких неорганических покрытий. М.-Л., «Химия», 1975. 197 с.
12. **Иванов В. Е., Сомов А. И., Тихоновский М. А.** Дислокационный механизм влияния твердых поверхностных пленок на деформацию и разрушение металлов. В кн. «Защитные высокотемпературные покрытия». М.-Л., «Наука», 1972, с. 291—301.
13. **Износостойкость и структура твердых наплавов.** М., «Машиностроение», 1971, с. 93. Авт.: М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович и др.
14. **Карпенко Г. В., Похмурский В. И., Далисов В. Б.** Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий. М., «Наукова думка», 1971. 167 с.
15. **Каракозов Э. С.** Соединения металлов в твердой фазе. М., «Металлургия», 1976. 263 с.
16. **Келли А.** Высокопрочные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1976. 260 с.
17. **Крылов Ю. И., Бронников В. А., Крысина В. Г.** О возможности

создания термитных смесей на основе композиции. Киев, «Порошковая металлургия», 1975, № 12, с. 57—60.

18. **Лайнер В. И.** Защитные покрытия металлов. М., «Металлургия», 1974. 376 с.
19. **Металлокерамические** материалы для электрических контактов и электродов. Киев, АН УССР, 1972. 11 с.
20. **Надежность** и долговечность машин. Киев, «Техника», 1974. 400 с. Авт.: Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов.
21. **Новиков И. И.** Теория термической обработки металлов. М., «Металлургия», 1974. 400 с.
22. **Оптовые** цены на цветные металлы, сплавы и порошки. Прейскурант № 02—01 М. Прейскурантиздат, 1976.
23. **Оптовые** цены на чугун и ферросплавы. Прейскурант № 01—01. М., Прейскурантиздат, 1976.
24. **Радюченко Ю. С.** Ротационное бжятие. М., «Машиностроение», 1972. 175 с.
25. **Раковский В. С., Саклинский В. В.** Справочник. Порошковая металлургия в машиностроении. М., «Машиностроение», 1973. 126 с.
26. **Ройх И. Л., Новиков Н. Н.** Нанесение металлических покрытий на порошки методом напыления в вакууме. Киев. «Порошковая металлургия», 1975, № 8. 1—9 с.
27. **Самсонов Г. В., Эпик А. П.** Тугоплавкие покрытия. М., «Металлургия», 1975. 400 с.
28. **Скороход В. В.** Теория твердофазного спекания металлокерамических изделий. В кн. «Современные проблемы порошковой металлургии». Киев, «Наукова думка», 1970, с. 81—91.
29. **Современные** композиционные материалы. Пер. с англ. Под ред. Л. Броутмана и Р. Крока. М., «Мир», 1970. 672 с.
30. **Справочник** по пайке. Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. М., «Машиностроение», 1975. 407 с.
31. **Ткачев В. Н., Фиштейн Б. М., Казинцев Н. В.** Индукционная наплавка твердых сплавов. М., «Машиностроение», 1970. 184 с.
32. **Федорченко И. М., Андриевский Р. А.** Основы порошковой металлургии. Киев, АН УССР, 1961. 420 с.
33. **Хасуй А.** Техника напыления. Пер. с япон. М., «Машиностроение», 1975. 287 с.
34. **Черниенко В. В., Машков А. К., Негда Г. П.** Экспериментальное исследование пропитки. Киев, «Порошковая металлургия», 1975, № 12, с. 49—56.
35. **Эйчис А. П.** Покрытия и техническая эстетика. Киев, «Техника», 1971. 246 с.
36. **Юзвенко Ю. А., Фрумин Е. И., Пашенко М. А.** Сферический рэлит. Способ получения и свойства. Киев, «Порошковая металлургия», 1975, № 7, с. 1—5.
37. **Campbell J. E.** Vapor deposition of high — temperature coating. High — temperature — a tool for future. Proseeds of the Simposium. 1956, p. 117.
38. **Matting A. und Hans Nieter Steffens.** Metallspritzschichten aus Stahl und Nichteisenmetallen und Prüfung ihrer Haftfestigkeit. Stahl und Eisen 85 (1965), N 20, Oktober.
39. **Smith Nukl. Sci and Eng.** N 2, v. 3, p. 152, 1957.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. МЕТАЛЛИРОВАНИЕ	9
Сущность металлизации	9
Выбор и подготовка исходных материалов	14
Нанесение сырого слоя	29
Спекание	42
Технология спекания	52
Маркировка покрытий	79
Глава II. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ	82
Образование сырого слоя и сцепление его с основанием	82
Спекание порошкового слоя, нанесенного на компактное основание	89
Физико-химические процессы припекания слоя	99
Припекание порошкового слоя и оболочек к основанию	107
Деформации и напряжения при металлизации	113
Глава III. СВОЙСТВА МЕТАЛЛИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ	126
Физико-механические свойства	126
Антифрикционные и износостойкие свойства	132
Прочностные характеристики изделий с покрытиями	147
Дефекты металлизации, контроль качества	152
Глава IV. ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ МЕТАЛЛИРОВАНИЯ	157
Производственные участки и оборудование	157
Применение и рекомендации	161
Рациональное конструирование и технология изготовления композиционных деталей	170
Восстановление изношенных деталей	174
Технико-экономические обоснования металлизации	176
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	181
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	182

Цена 50 коп.



МАШИНОСТРОЕНИЕ