



МИНИСТЕРСТВО И НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФАКУЛЬТЕТ «ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ»
КАФЕДРА «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Конспект лекций

Ростов-на-Дону. 2022

СОДЕРЖАНИЕ

	<u>С.</u>
1. Введение. Основные понятия и определения, классификации покрытий	3
2. Технология нанесения покрытий	7
2.1. Подготовка поверхности основного металла	7
2.2. Общая структурная схема процессов нанесения неорганических покрытий	9
2.3. Наплавочные процессы	9
2.4. Плакирование	18
2.5. Напыление покрытий. Общая характеристика	19
– газотермическое напыление	20
– нанесение покрытий испарением и конденсацией в вакууме	25
2.6. Метод вакуумного ионно-плазменного напыления	27
2.7. Электрофизические методы нанесения покрытий	40
– электроэрозионный метод нанесения покрытий	40
– термомеханическое электроконтактное нанесение покрытий ...	41
– магнитно-импульсный метод	44
2.8. Электролитические покрытия	45
2.9. Химическое нанесение покрытий	48
2.10. Диффузионные покрытия	50
3. Дополнительная упрочняющая обработка покрытий	51
Рекомендуемая литература	57

1. Введение. Основные понятия и определения, классификации покрытий

Развитие машиностроения основывается на создании новых материалов и разработке прогрессивных технологий, в том числе включающих операцию нанесения покрытий. Покрытия позволяют не только получать новые свойства изделий за счет образующихся композиций, сочетающих высокую долговечность (усталостная прочность, износостойкость, специальные свойства) с достаточной надежностью (трещиностойкостью), но и повышать эксплуатационную стойкость деталей машин и инструментов, восстанавливать изношенные поверхности и, следовательно, снижать потребности в запасных частях. С помощью покрытий достигаются особые свойства рабочих поверхностей: твердость, износостойкость, жаропрочность, теплопроводность и др. Модифицирование поверхности, в том числе в виде нанесения покрытий, обеспечивает значительную экономию дефицитных и дорогостоящих легирующих элементов, используемых для объемного легирования в традиционных технологиях получения сплавов со специальными свойствами. Особо следует подчеркнуть роль покрытий с целью создания поверхностных композиций для увеличения конструктивной прочности в случае резко различающихся свойств основного металла и покрытия.

Можно утверждать, что к настоящему моменту исследования изделий с покрытиями выделились в самостоятельную экспериментальную область. Её спецификой является научно-исследовательский циклический процесс с обратной связью, осуществляемый по следующей схеме:

процесс нанесения покрытия → анализ структуры → изучение
свойств → совершенствование технологии → процесс нанесения
покрытия и т. д.

То есть структурный анализ покрытия должен дополняться и подтверждаться данными изучения механических, физических и других свойств. В свою очередь это позволит обновить и совершенствовать технологию. Тогда как нарушение этой цепочки приведет к образованию безысходного круга, исключающего развитие прогрессивной технологии.

Предлагаемый курс лекций касается только одного звена приведенной выше схематической цепочки и дает представление о том, каким разнообразием отличается эта стадия.

Прежде всего, следует отметить, что существует огромное количество изданий, в том числе и периодических (журнальных), посвященных покрытиям. Следствием этого является некоторая неопределенность в употреблении основных терминов, которая характерна для обширной литературы по покрытиям. Чтобы избежать связанных с этим противоречий и разночтений, приведём некоторые базовые термины и определения из области покрытий, на которые следует опираться при работе с настоящим курсом лекций.

Определения.

Покрытие представляет собой поверхностный слой детали, целенаправленно создаваемый воздействием окружающей среды на поверхность материала подложки (основы, детали), и характеризующейся конечной толщиной, а также химическим составом и структурно-фазовым состоянием, качественно отличающимся от аналогичных характеристик материала основы.

Основа (подложка) – поверхность основного материала, на которую наносится покрытие.

Основная часть покрытия – часть покрытия, расположенная над подслоем и выполняющая рабочую функцию покрытия.

Подслой – часть покрытия, непосредственно прилегающая к основе и выполняющая функции связи между основной частью покрытия и основой.

Градиентное покрытие – многослойное покрытие, в котором каждый промежуточный слой содержит несколько компонентов с градиентом концентрации, направленным от основы к поверхности покрытия.

Адгезионная прочность покрытия – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей отделению покрытия от основы.

Когезионная прочность покрытия – условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению связей между частицами покрытия и (или) самого материала частиц.

Производительность технологии нанесения покрытия по напыляемому/напыленному материалу – масса напыляемого/напыленного материала за единицу времени.

Коэффициент использования материала при нанесении покрытия – коэффициент, выражаемый отношением массы напыленного материала к массе напыляемого материала.

Существующее многообразие способов нанесения покрытий можно классифицировать с различных точек зрения.

По методам получения – механические, физические, химические, электрофизические.

По виду технологического процесса – гальванические, наплавка, напыление, плакирование.

По используемым материалам – металлические, керамические, полимерные, композиционные.

По назначению – износостойкие, коррозионно-стойкие, жаропрочные, термобарьерные, декоративные и т.д. В качестве примера классификации покрытий по функциональному назначению может быть использован следующий перечень из ГОСТ 28076—89.

1. *Защитное* – покрытие, защищающее поверхность от внешних воздействий.

2. *Износостойкое* – защитное покрытие, повышающее сопротивление поверхности различным видам изнашивания.

3. *Антифрикционное* – износостойкое покрытие, понижающее коэффициент трения в рабочей паре трения.

4. *Фрикционное* – износостойкое покрытие, повышающее коэффициент трения.

5. *Антиадгезионное* – износостойкое покрытие, снижающее склонность контактирующих поверхностей к адгезионному взаимодействию или схватыванию.

6. *Коррозионностойкое* – защитное покрытие, повышающее сопротивление поверхности коррозионному разрушению.

7. *Жаростойкое* – коррозионностойкое покрытие, повышающее сопротивление поверхности разрушению при высоких температурах.

8. *Терморегулирующее* – покрытие, обеспечивающее регулирование поглощения и излучения поверхностью тепловых потоков.

9. *Теплозащитное* – терморегулирующее покрытие, снижающее воздействие тепловых потоков на поверхность.

10. *Термостойкое* – покрытие, обладающее необходимой работоспособностью в условиях резких многократных изменений температуры.

11. *Уплотнительное* – покрытие, обеспечивающее необходимую стабильность зазоров в изделии или конструкции в процессе их эксплуатации.

12. *Корковое* – покрытие, сформированное на основе для приобретения ее формы и удаленное с основы для использования в самостоятельных целях.

13. *Эрозионностойкое* – покрытие, снижающее воздействие высокоскоростных потоков на поверхность.

Наиболее последовательно классификацию способов нанесения покрытий следует проводить с учетом механизмов и явлений, лежащих в основе процессов нанесения покрытий и формирования его структуры:

- механические методы;
- химические методы;
- электрохимические методы;
- наплавка;
- напыление;
- высокоэнергетические технологии;
- комбинированные методы.

В дальнейшем, в основной части настоящего курса лекций, при рассмотрении технологических основ многочисленных методов нанесения покрытий использован именно такой подход. Однако важность и сложность вопросов формирования структуры покрытий, особенностей их строения и взаимосвязи структуры и свойств покрытий требуют отдельного, более глубокого материаловедческого анализа (причем, детерминировано в рамках каждого технологического метода в отдельности), поэтому в настоящем пособии им уделено минимум внимания.

2. Технология нанесения покрытий

Технология получения покрытий включает: подготовку поверхности основы, формирование на поверхности основы слоя покрытия из исходных материалов заданного химического состава и морфологии и при необходимости последующую термическую или термомеханическую обработку нанесенного слоя с целью придания ему служебных свойств и создания прочной адгезионной связи между формирующимся слоем и основой. Прочность сцепления при нанесении покрытий обеспечивается за счет таких процессов, как схватывание, спекание, смачивание и т. д. Для протекания этих процессов кроме термодинамических условий необходима чистота и активирование поверхностей.

2.1. Подготовка поверхности основного металла

Величина адгезии, а значит и работоспособности деталей с покрытиями, в значительной степени зависит от состояния их поверхностного слоя перед нанесением покрытия, поэтому всегда следует учитывать влияние основных характеристик поверхностного слоя деталей на качество наносимых покрытий и технологию подготовки поверхности под покрытие. Общее правило здесь может быть сформулировано так: чем более высокотехнологичным является метод нанесения покрытия, тем выше должно быть качество подготовки поверхности подложки.

Прочность сцепления покрытия с основой σ_{cb} (величина адгезии) является одним из важнейших свойств покрытия. Она обозначает силу связи между основным металлом и покрытием, отнесенную к единице площади контакта. Для характеристики покрытий по прочности сцепления σ_{cb} сравнивается с прочностями основного материала σ_{b0} и покрытия σ_{b1} на разрыв. Прочность сцепления бывает: очень слабая – $0 < \sigma_{cb} < 0,1 \min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0})$; слабая – $0,1 \min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0}) < \sigma_{cb} < 0,5 \min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0})$; посредственная – $0,5 \min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0}) < \sigma_{cb} < \min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0})$; нормальная (хорошая) – $\min(\sigma_{b1}, \sigma_{b0}) < \sigma_{cb} < \max(\sigma_{b1}, \sigma_{b0})$; высокая – $\max(\sigma_{b1}, \sigma_{b0}) < \sigma_{cb}$.

К основным характеристикам состояния поверхности следует отнести:

- химическую чистоту поверхности: загрязненность поверхности, например, наличие оксидных пленок, приводит к возникновению несплошностей в покрытии, его отслаиванию, растрескиванию и скалыванию;

- топографию поверхности детали: поверхность не должна иметь раковин, царапин, трещин, сколов, однако, оптимальный параметр шероховатости зависит от условий работы детали, физико-химического состояния материала детали и покрытия, метода нанесения покрытия и других факторов;

- остаточные напряжения в поверхностном слое, связанные с предшествующей обработкой заготовки; при этом сжимающие напряжения играют положительную роль, т.к. способствуют «залечиванию» (схлопыванию) трещин и других дефектов; растягивающие напряжения создают условия для роста и распространения микротрещин, снижая механические характеристики материала с покрытием.

Очистка поверхности предусматривает удаление органических (жиров, смазки и т. п.) и неорганических (пленок оксидов, солей, гидратов) соединений и прочих загрязнений. Способы подготовки поверхностей подразделяются на химические, физические, механические и комбинированные (физико-химические, химико-механические, физико-механические). В обобщенном виде они представлены в табл. 1.

Таблица 1. Способы предварительной обработки поверхности перед нанесением покрытий

МЕТОД	СПОСОБ	ЦЕЛЬ
Механические методы	Шлифование, галтовка, полирование, струйно-абразивная обработка	Очистка от грубых загрязнений, окалины, оксидных пленок, активация поверхности, изменение шероховатости
Химические методы	Обезжиривание, травление, полирование, ультразвуковая очистка	Удаление жиров, уменьшение шероховатости
Физические методы	Ионная, электронная бомбардировка, вакуумный отжиг	Удаление загрязнений за счет распыления их с поверхности, активация поверхности
Нанесение временных защитных покрытий	Покрытие пленкой, лаком, сульфидирование, хромирование	Временная защита подготовленной поверхности
Нанесение промежуточных покрытий	Любые способы	Повышение адгезии при плохой совместимости материалов

Химические способы очистки поверхности предполагают обезжиривание и травление изделий в органических и неорганических растворах кислот, щелочей, а также в расплавах. К химическим следует отнести также способ очистки отжигом в восстановительной атмосфере. Физические способы очистки основаны на физических явлениях. К механическим способам относятся различные методы снятия поверхностного слоя изделия механическим путем. Комбинированные способы подготовки поверхности включают травление в растворах с наложением ультразвуковых колебаний, отжиг с электроискровым созданием шероховатости, отжиг с зачисткой щеткой, обработку в барабанах с раствором щелочи и т. д. Выбор способа подготовки поверхности для нанесения покрытия определяется видом и характером производства, размерами детали, видом обрабатываемого основного материала, состоянием его поверхности.

2.2. Общая структурная схема процессов нанесения неорганических покрытий

Нанесение покрытий как процесс поверхностной обработки материалов характеризуется многообразием методов и широтой их применения (рис. 1). Рассмотрим подробнее каждый из этих методов.

2.3. Наплавочные процессы

Наплавка осуществляется с образованием сварочной ванны, в которой расплавленный металл покрытия в зоне сплавления перемешивается с основным металлом, образуя глубокую переходную зону. В качестве источника энергии для плавления наносимого материала при наплавке покрытий используются электрическая дуга, газовое пламя и лазерный луч.

Газовая наплавка — один из способов сварки плавлением. Протекает в условиях частичного оплавления основного металла при использовании высокотемпературного пламени, получаемого при сжигании смеси горючего газа с кислородом. Наиболее приемлемо для газовой наплавки (сварки) ацетилено-кислородное пламя, обеспечивающее нагрев до высоких температур.

При наплавке в отличие от сварки требуется малая глубина проплавления основного металла, поэтому наплавку выполняют, используя горелку (рис. 2) с соплом большого диаметра. Нагрев основного металла ведется науглероживающим пламенем горелки. При использовании горючей смеси, обогащенной ацетиленом, на поверхности металла оседают частицы восстановленного углерода, образуя тонкий науглероженный слой толщиной

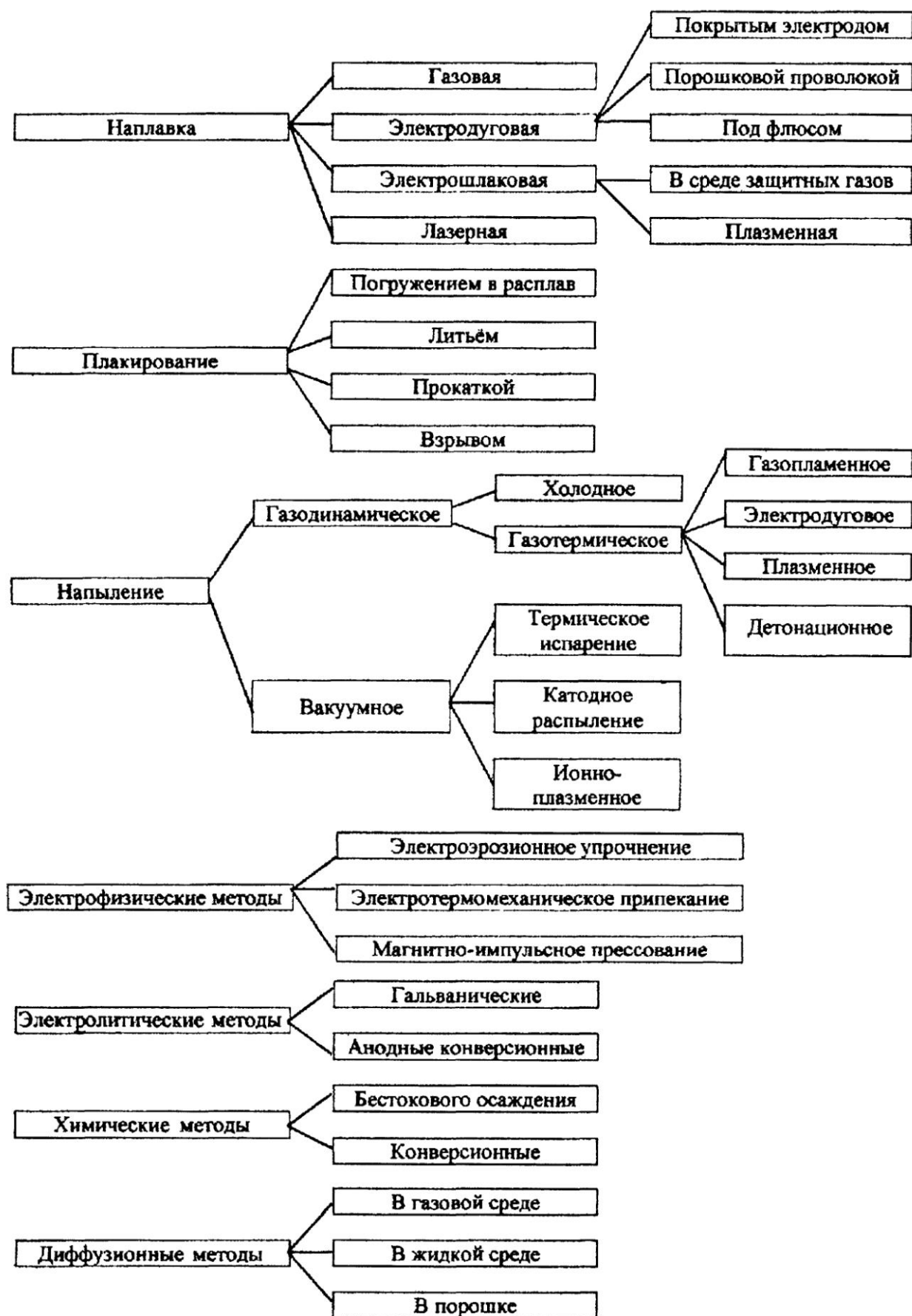


Рис. 1. Классификация процессов нанесения неорганических покрытий

~0,02 мм. Вследствие снижения точки плавления металла науглероженного слоя происходит расплавление только в тонком поверхностном слое. Возникновение на поверхности расплавленного слоя свидетельствует о готовности основного металла к газовой наплавке. Оплавление тонкого поверхностного слоя (так называемое «запотевание металла») в сочетании с применением присадочного материала создает особо благоприятное условие для газовой наплавки с незначительным проплавлением основного металла.

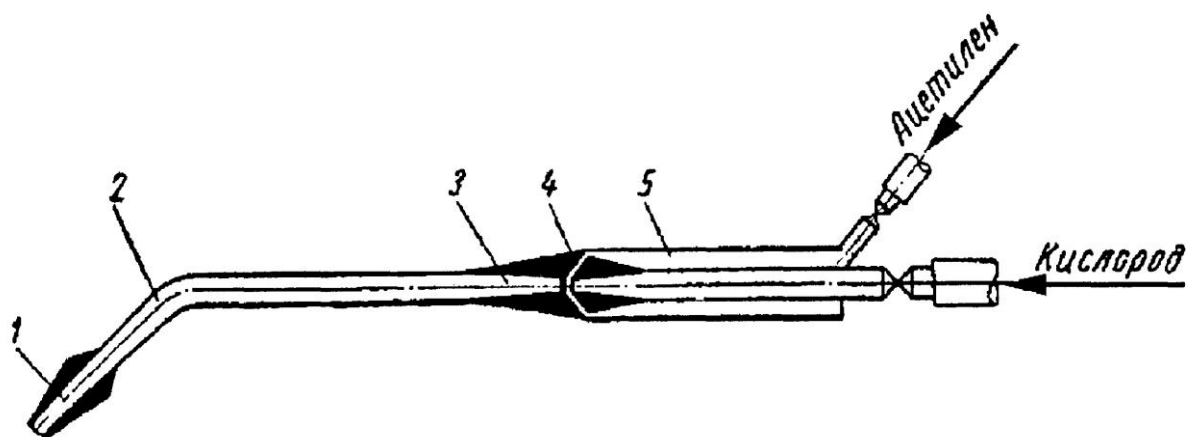


Рис. 2. Инжекторная горелка для газовой наплавки:

*1 — мундштук; 2 — трубка наконечника; 3 — смесительная камера; 4 — инжектор;
5 — ацетиленовый канал*

Вместе с тем науглероживание поверхности при наплавке этим способом вызывает повышение содержания углерода в наплавленном металле, что оказывает неблагоприятное влияние на его механические свойства и коррозионную стойкость. В связи с этим в настоящее время рассмотренный способ применяют только при наплавке высокохромистого сплава на основе железа, стеллита и других высокоуглеродистых наплавочных материалов. При нанесении покрытий из коррозионностойкой стали, для которой науглероживание противопоказано, применяют способы дуговой наплавки плавящимся и вольфрамовым электродами в среде инертного газа.

Преимуществами газовой наплавки являются: 1) незначительное проплавление основного металла; 2) возможность наплавки мелких деталей сложной формы; 3) уменьшение опасности возникновения трещин, поскольку процесс наплавки включает предварительный подогрев и последующее замедленное охлаждение изделия; 4) низкая стоимость сварочного оборудования.

Вместе с тем для газовой наплавки характерны и недостатки: 1) низкая производительность при наплавке массивных деталей, требующих

продолжительного предварительного подогрева; 2) высокая квалификация сварщика.

Газовую наплавку в настоящее время применяют в специальных областях (при изготовлении клапанов высокотемпературных систем высокого давления, клапанов двигателей внутреннего сгорания и т. п.).

Электродуговая наплавка. При использовании для наплавочных процессов такого концентрированного источника энергии, как электрическая дуга, для обеспечения высокого качества наплавляемых покрытий особое значение приобретает создание шлаковой и газошлаковой защиты сварочной ванны от атмосферного воздействия. Шлаковая защита образуется за счет расплавления флюсов, электродных покрытий и сердечников порошковой проволоки. Наиболее надежна шлаковая защита при сварке-наплавке под флюсом. Образование капель при плавлении электрода и их перенос происходят в объеме газового пузыря, заполненного парами металла и флюса. Взаимодействие с атмосферными газами практически исключается.

Менее надежна шлаковая защита при электродуговой наплавке покрытыми электродами и самозащитной порошковой проволокой. Капли электродного металла проходят через открытый дуговой промежуток и взаимодействуют с атмосферой. Наличие на каплях шлаковой пленки не всегда предохраняет их от этого взаимодействия. При наплавке наряду со шлаковой защитой должна создаваться и газовая защита. В электродные покрытия и сердечники порошковой проволоки в соответствии с этим вводят шлакообразующие и газообразующие компоненты.

Наплавка покрытыми электродами. При наплавке покрытым электродом происходит плавление стержня и обмазки (рис. 3). Расплавляющаяся обмазка 5 образует шлак и газы. Шлак обволакивает капли металла, образующиеся при плавлении электродной проволоки. В ванне шлак перемешивается и, всплывая на ее поверхность, образует шлаковый покров, предохраняющий металл от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Кроме того, при всплывании на поверхность ванны шлак, взаимодействуя с расплавленным металлом, очищает его. Образующиеся при расплавлении покрытия газы оттесняют воздух из реакционной зоны (зоны дуги) и таким образом способствуют созданию лучших условий для защиты.

Дуговая наплавка покрытыми электродами отличается низкой стоимостью оборудования, возможностью выполнения наплавки вручную. Ручная наплавка уступает автоматическим и полуавтоматическим способам по скорости выполнения процесса, однако она имеет ряд преимуществ, обеспечивающих ей весьма широкое распространение среди всех известных

способов наплавки черных и цветных металлов: 1) возможность наплавки изделий сложной формы; 2) возможность выбора наплавочного материала, наиболее пригодного для конкретного назначения, из широкого ассортимента покрытых наплавочных электродов; 3) транспортабельность оборудования, позволяющая выполнять наплавку в полевых условиях; 4) экономичность, универсальность и простота оборудования.

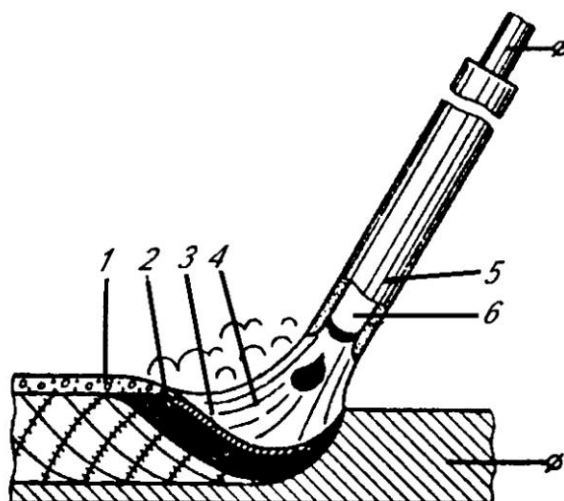


Рис. 3. Схема электродуговой наплавки покрытым электродом:

1 — шлаковая корка; 2 — сварочная ванна; 3 — жидкий шлак; 4 — дуга; 5 — электродная обмазка; 6 — наплавочный материал

Рациональная область применения ручной дуговой наплавки покрытыми электродами — упрочнение рабочих органов строительных и дорожных машин, деталей горно-металлургического оборудования: бульдозерных и грейдерных отвалов, зубьев ковшей экскаваторов, черпаков земснарядов, цепей буровых машин и др. при небольшой протяженности швов в различных пространственных положениях.

Наплавка порошковой самозащитной проволокой. Для устранения недостатков, присущих наплавке покрытыми электродами, получили развитие способы полуавтоматической и автоматической наплавки порошковой проволокой (рис. 4). Последняя представляет собой стальную оболочку, заполненную шихтой, которая включает порошки легирующих элементов, шлакообразующие и газообразующие компоненты, раскислители.

Наплавка под слоем флюса. Сущность процесса дуговой наплавки под слоем флюса заключается в применении непокрытой наплавочной проволоки и гранулированного флюса, насыпаемого впереди дуги слоем определенной толщины (рис. 5). Наплавку ведут дугой, горячей под слоем флюса в пространстве газового пузыря, образующегося в результате выделения паров и газов в зоне дуги. Сверху пузырь ограничен пленкой расплавленного шлака, снизу — сварочной ванной. Наплавка под слоем флюса проводится плавящимся электродом автоматически или реже полуавтоматически и отличается наиболее высокой производительностью от других дуговых способов.

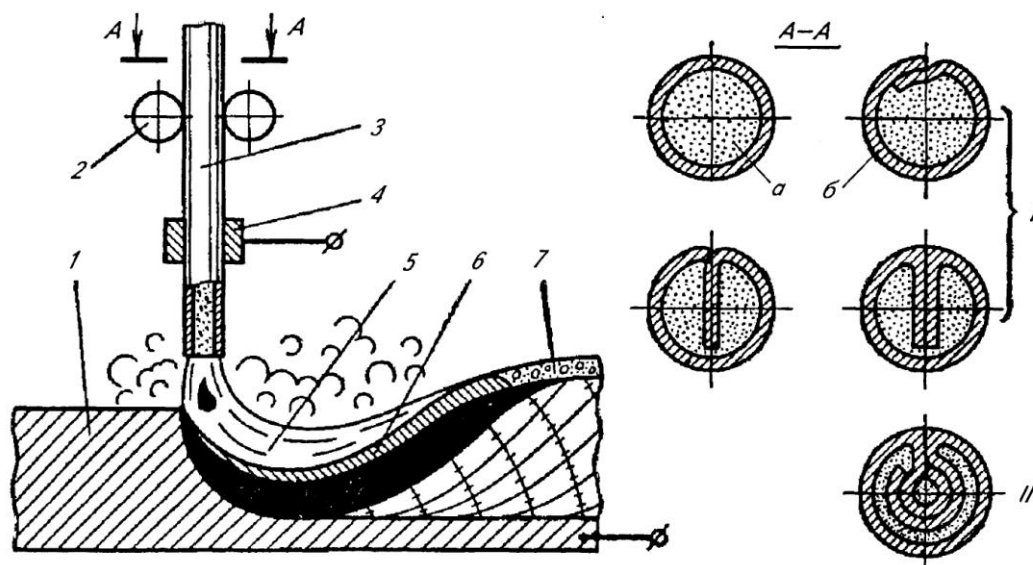


Рис. 4. Схема электродуговой наплавки самозащитной порошковой проволокой:
 а - порошковая шихта; б - металлическая оболочка; I - однослойная проволока;
 II - двухслойная проволока; 1 - обрабатываемая поверхность; 2 - подающий
 механизм; 3 - порошковая проволока; 4 - токоподвод; 5 - электрическая дуга;
 6 - расплавленный шлак; 7 - затвердевший шлак

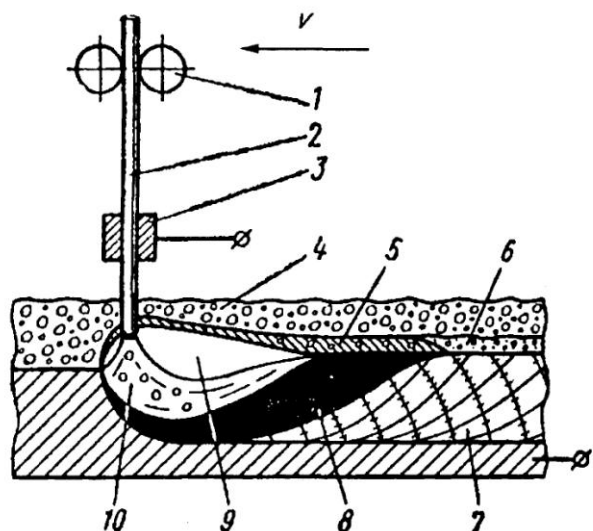


Рис. 5. Схема электродуговой наплавки
 под слоем флюса:

1 - подающий механизм; 2 - наплавочный
 электрод; 3 - токоподвод;
 4 - гранулированный флюс;
 5 - расплавленный флюс;
 6 — затвердевший флюс;
 7 - наплавленный слой; 8 — сварочная
 ванна; 9 - газовый пузырь; 10 — дуга

Электрошлаковая наплавка. Наплавка этим способом протекает в условиях непрерывной подачи электродной проволоки (или ленты) внутри слоя расплавленного шлака, а плавление их происходит за счет теплоты электросопротивления при пропускании тока через слой расплавленного флюса между основным металлом и наплавочным электродом.

К преимуществам способа электрошлаковой наплавки относится следующее: 1) экономичность наплавки возрастает при увеличении толщины наплавляемого слоя (применение много электродных головок обеспечивает наплавку слоя большой толщины без существенного увеличения

продолжительности наплавки); 2) меньше расход шлака, чем при дуговой наплавке под флюсом; 3) возможность наплавки высокоуглеродистых и других материалов, обладающих высокой чувствительностью к образованию трещин, что обеспечивается низкой скоростью охлаждения наплавленного металла; 4) относительная простота процесса наплавки.

Электрошлаковую сварку осуществляют обычно в вертикальном положении сварного шва. Для электрошлаковой наплавки применяется способ с нижним положением электрода с использованием ленточных электродов, как показано на **рис. 6**.

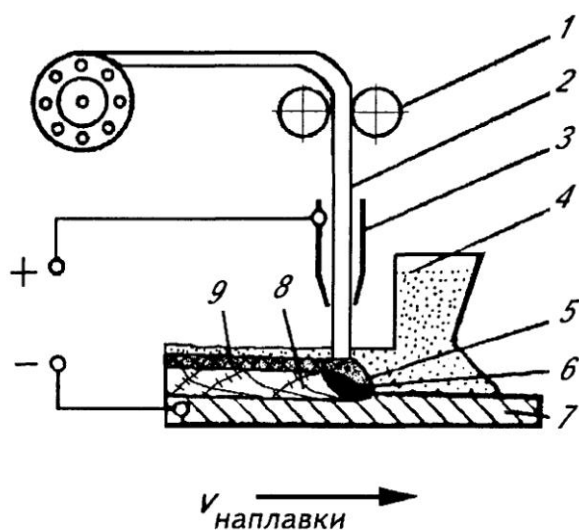


Рис. 6. Схема электрошлаковой наплавки: 1 – подающий механизм; 2 – наплавочный материал; 3 – токоподвод-мундштук; 4 – гранулированный шлак; 5 – шлаковая ванна; 6 – сварочная ванна; 7 – обрабатываемая поверхность; 8 – наплавленный металл; 9 – корочка шлака

Наплавка в среде защитных газов. При дуговой наплавке применяют два способа газовой защиты: струйную местную защиту и общую защиту в камерах.

При наплавке со струйной защитой обеспечивается защита только зоны расплавления. Возможен подсос воздуха в реакционную зону. Поэтому с точки зрения защиты ванны ее нельзя признать совершенной. Для улучшения защиты в ряде случаев особенно при нанесении покрытий из активных металлов применяют местные камеры (**рис. 7**).

Плазменная наплавка. Наплавка этим способом включает возникновение между основным металлом и электродом горелки (катодом) электрической дуги, обеспечивающей переход в плазменное состояние рабочего газа, подаваемого в зону дуги. При этом из сопла горелки истекает высокотемпературная плазменная струя, обеспечивающая плавление наплавочного материала (**рис. 8**). Для образования плазмы используют смесь гелия (75%) с аргоном (25%), а в качестве защитного газа применяют аргон. При наплавке в условиях поперечных колебаний плазменной горелки получают валик шириной до 64 мм. В качестве наплавочного материала используют коррозионностойкую сталь, никель и его сплавы, сплавы меди и др.

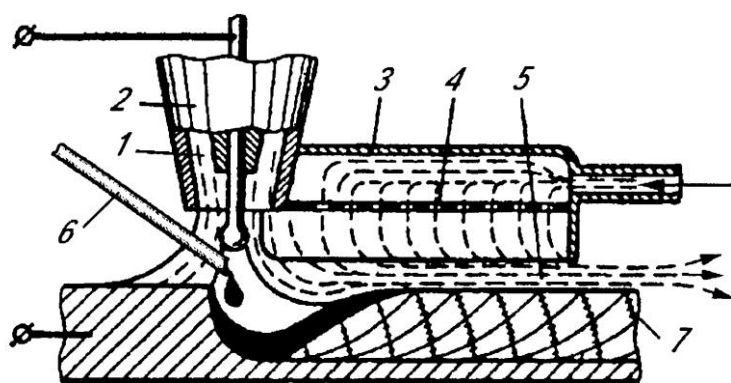
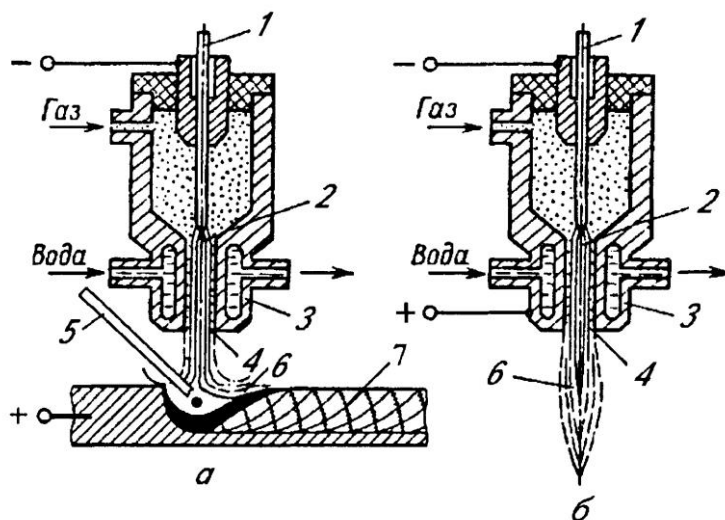


Рис. 7. Схема электродуговой наплавки в среде защитных газов:

1 – основной защитный газ;
2 – сопло; 3 – корпус местной камеры; 4 – сетка;
5 – дополнительный защитный газ; 6 – наплавляемый материал;
7 – наплавленное покрытие

Рис. 8. Дуговые плазменные горелки прямого (а) и косвенного (б) действия:

1 – вольфрамовый катод; 2 – дуга; 3 – сопло; 4 – канал сопла;
5 – наплавляемый материал; 6 – плазменная струя; 7 – наплавленный слой



Лазерная наплавка. Для лазерной наплавки, которая активно развивается в последние годы, применяются импульсные твердотельные лазеры и лазеры непрерывного действия с активным элементом, заполненным углекислым газом с добавками азота.

В современных твердотельных лазерных сварочно-наплавочных установках в качестве активного элемента используют оптическое стекло с примесью неодима или других редкоземельных элементов. Это позволяет повысить выходную мощность излучения. Твердотельные лазеры для сварки-наплавки работают в импульсном и импульсно-периодическом режиме излучения (рис. 9, а, б).

Газовые сварочные лазеры обладают более высокой выходной мощностью и работают в непрерывном и импульсном режимах. Плотность энергии в пятне нагрева очень высока и достигает 10^6 Вт/см² и более.

Формирование сварного соединения при лазерной наплавке основано на тепловом эффекте при воздействии лазерного излучения на непрозрачные среды.

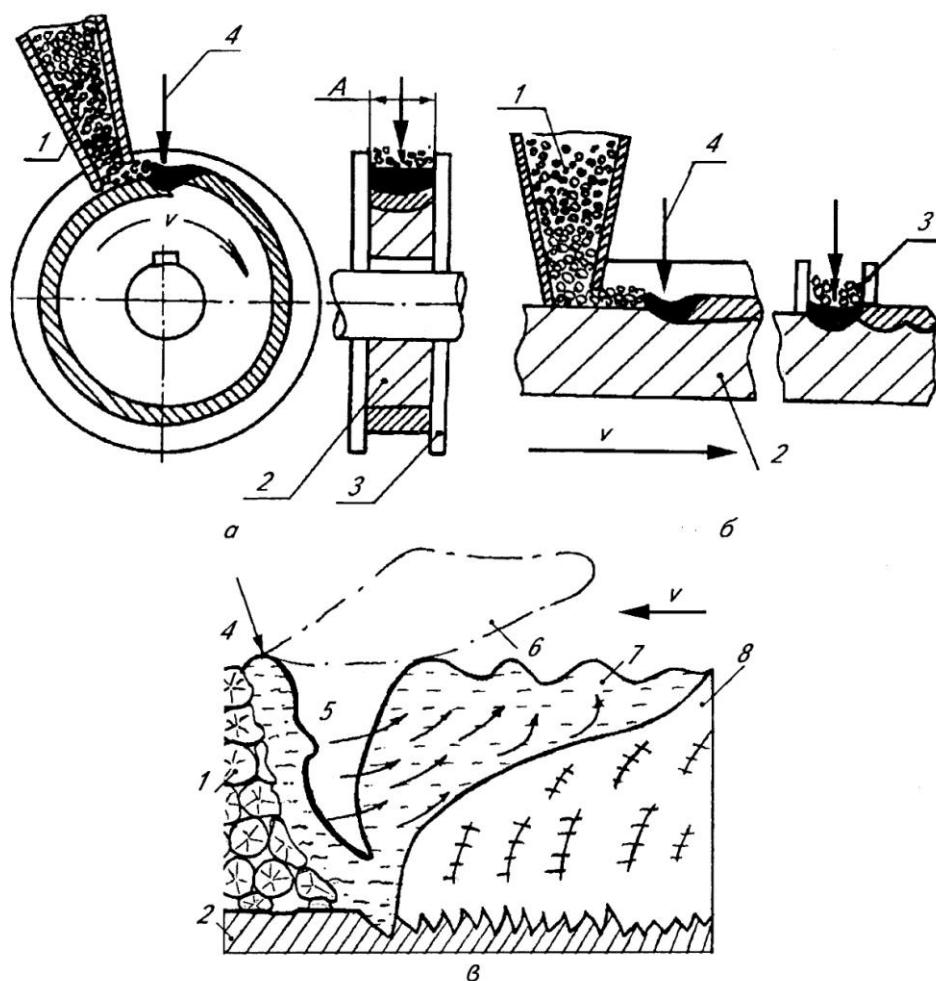


Рис. 9. Схема радиальной (а) и торцевой (б) лазерной наплавки. В нижней части рисунка (в) показано продольное сечение сварочной ванны при лазерной наплавке порошкового сплава: 1 – порошковый наплавочный материал; 2 – обрабатываемая поверхность; 3 – кристаллизатор; 4 – излучение оптического квантового генератора; 5 – парогазовый канал; 6 – плазменный факел; 7 – сварочная ванна; 8 – наплавленный слой

При лазерном излучении плотностью мощности выше критической осуществляется нагрев материала со скоростью, значительно превышающей скорость отвода теплоты за счет теплопроводности. При этом происходят процессы локального плавления материала, вследствие чего формируется сварочная ванна.

Схема формирования наплавленного слоя показана на рис. 9, в. Сварочная ванна имеет характерную форму, вытянутую в направлении сварки. В головной части ванны расположен канал или кратер 5, заполненный парами металла. Эта область наиболее яркого свечения. На передней стенке канала образуется слой расплавленного металла, который периодически перемещается сверху вниз. Перенос расплавленного металла из головной части в хвостовую

происходит преимущественно по боковым стенкам канала. В хвостовой части ванны расплавленный металл завихряющимися потоками поднимается вверх и частично выносится на поверхность сварочной ванны. Над поверхностью сварочной ванны наблюдается ярко светящееся облако – плазменный факел 6, размеры и яркость свечения которого периодически изменяются с частотами порядка сотен герц. При значительных скоростях лазерной сварки факел отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки, на 20–60°.

Основной недостаток лазерной наплавки – низкие значения КПД установок (1–3% для твердотельных и 10–30% для газовых) и небольшая их выходная мощность (15–2000 Вт). Область применения лазерной наплавки – изготовление режущего инструмента, упрочнение рабочих поверхностей клапанов двигателей внутреннего сгорания, местное упрочнение рабочих поверхностей штампов и других тяжело нагруженных деталей в труднодоступных местах. Возможности этого метода непрерывно возрастают и расширяются.

2.4. Плакирование

Процесс защиты поверхности основного металла или сплава другим металлом (сплавом), устойчивым к агрессивной среде и механическому воздействию, называют плакированием. Соединить два металла между собой можно литьевым, а также прокатным и недеформированным плакированием.

Горячее погружение (литьевое плакирование) – один из самых старых методов получения покрытий. Как правило, этим методом получают покрытия из легкоплавких металлов: цинка, олова, алюминия и др. с целью защиты от коррозии. Однако стали, оцинкованные горячим погружением, имеют повышенную износостойкость вследствие образования твердого промежуточного Fe-Zn слоя.

Плакирование прокаткой. Наибольшее применение находит способ совместной прокатки двух металлов, из которых один выполняет функцию защитного слоя. Для плакирования применяются металлы или сплавы, обладающие хорошей свариваемостью. К ним относятся углеродистые и кислотоупорные стали, дуралюмин, сплавы меди. В качестве плакирующего материала используются нержавеющие стали, алюминий, никель, титан, тантал и др.

Сварка взрывом. Весьма эффективным источником энергии для соединения основы с покрытием является сила взрыва (рис. 10). Причем с помощью взрыва можно соединять металлы, которые иначе соединить

невозможно. При сварке взрывом соединение осуществляется в результате вызванного взрывом соударения быстро движущихся соединяемых деталей.

На жестком основании 1 (рис. 10, а) устанавливают одну из свариваемых пластин 2. Вторую пластину 3 располагают под углом к плоскости пластины 2. На поверхности пластины 3 располагают заряд 4 и детонатор 5. В качестве заряда используют гексоген, обеспечивающий скорость детонации 6600 м/с и давление 12,7 ГН/м². Взрыв осуществляется с помощью детонатора 5, расположенного на краю пластины 3. Соединение материала покрытия с основой образуется под действием давления взрывной волны на пластину-покрытие 3, прижимающей ее с огромной силой к пластине основе 2. При соударении пластин между ними образуется кумулятивная (направленная) струя, которая разрушает на своем пути и уносит с соединяемых поверхностей оксидные пленки и другие поверхностные загрязнения. При сжатии контактных поверхностей происходит некоторое взаимное смещение их одной относительно другой. В результате указанных явлений образуется сварное соединение. Этот способ нанесения покрытий можно применять для изготовления заготовок при прокатке биметаллов, плакировании поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами.

Толщина плакирующего слоя составляет от 3 до 60% (чаще всего – 20%) толщины основного металла. Получаемые двухслойные материалы могут подвергаться всем видам обработки.

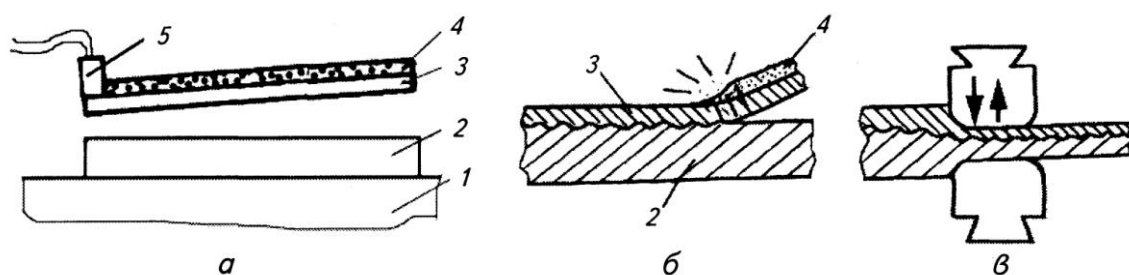


Рис. 10. Схема плакирования металла методом сварки взрывом:

а – подготовка свариваемых элементов; б – сварка взрывом; в – обработка давлением полученного биметалла; 1 – жесткое основание; 2 – обрабатываемая поверхность; 3 – материал покрытия; 4 – взрывчатое вещество; 5 – детонатор

2.5. Напыление покрытий. Общая характеристика

Значительное место в технологии восстановления и поверхностного упрочнения получили методы нанесения покрытий напылением. Существуют две разновидности этого процесса. В первом случае напыление осуществляют

газодинамическим методом частицами материала покрытия размером 10–150 мкм. Во втором – образование покрытия происходит при пониженном давлении за счет конденсации атомов или ионов на поверхности изделия (детали).

Двухфазный газопорошковый поток может иметь температуру ниже температуры рекристаллизации напыляемых частиц. В этом случае метод напыления является холодным газодинамическим напылением. Процессы напыления, в которых частицы потоками горячих газов разогреваются до температур плавления, называются газотермическими.

Газотермическое напыление. При нанесении покрытий методами газотермического напыления материал покрытия подвергают нагреву и плавлению каким-либо источником теплоты, а затем диспергируют и разгоняют газовым потоком. На поверхность изделия или основы напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые, ударяясь о нее, деформируются и закрепляются, накладываясь одна на другую и образуя слоистое покрытие.

Для получения газотермических покрытий сложного состава необходимые компоненты заранее вводят в напыляемые частицы. В зависимости от источника теплоты различают следующие методы газотермического нанесения покрытий: электродуговую металлизацию, газопламенное напыление, детонационное или детонационно-газовое напыление и плазменное напыление. В настоящее время развивается газотермическое нанесение покрытий при пониженном давлении в контролируемой атмосфере или в динамическом вакууме, поскольку разрежение создается интенсивной непрерывной откачкой атмосферы камеры. Этот процесс в первую очередь применяют для плазменного напыления и дуговой металлизации.

Применять газотермические покрытия выгодно при любых масштабах производства – от индивидуального и малосерийного до высокопроизводительного автоматизированного. Высокую эффективность и универсальность этих методов определяют следующие принципиальные их особенности:

1) возможность нанесения покрытий из различных материалов: чистых металлов и сплавов на их основе, интерметаллидных соединений, оксидов, органических веществ и ряда других материалов, в том числе в различных сочетаниях;

2) возможность регулирования в процессе напыления состава материала и структуры покрытия от обычной до мелкокристаллической и аморфной, что дополнительно сообщает им комплекс чрезвычайно ценных свойств;

3) получение покрытий на самых разных конструкциях и материалах: металлах, стеклах, керамике, пластмассах, тканях, бумаге и т. п.;

4) отсутствие деформации и понижения прочности изделия, на которое наносится покрытие, поскольку, напыление не вызывает его существенного нагрева;

5) высокая производительность газотермических методов напыления (для различных процессов колеблется от 1 до 20 кг/ч распыленного материала).

С помощью современной технологии нанесения газотермических покрытий можно решать ряд важных задач машиностроения, в первую очередь к ним следует отнести возможность получения материалов и покрытий с уникальными свойствами, которые необходимы для развития новой техники.

Металлизация напылением заключается в том, что на заранее подготовленную поверхность любой формы наносят металлическое покрытие путем распыления жидкого металла струей сжатого воздуха. Для этого используются специальные аппараты – металлзаторы.

В зависимости от источника тепла, используемого для расплавления металла, различают газовую, электрическую и плазменную металлизацию. Металл может подаваться в аппарат в виде проволоки, порошка или ленты. Наибольшее распространение получили металлзаторы проволоочного типа, меньшее – порошковые.

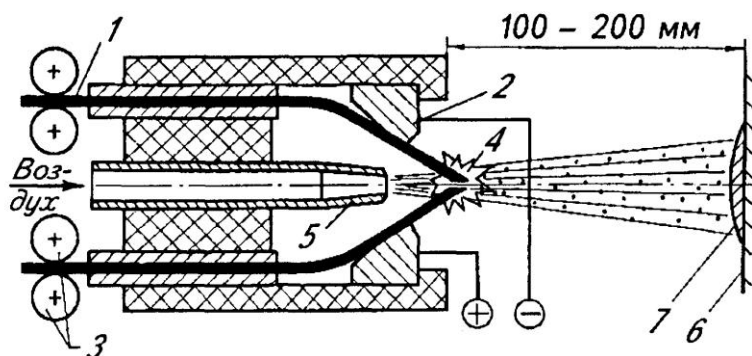


Рис. 11. Схема процесса электродуговой металлизации

На **рис. 11** дана схема напыления металла с помощью электродугового аппарата. Две проволоки 1, предназначенные для расплавления, непрерывно со скоростью 2,5–3,5 м/мин подаются в направляющие наконечники 2 при помощи роликов подающего механизма 3. Концы проволок, выходя из наконечников, пересекаются и расплавляются в электрической дуге 4. Струя сжатого до 400–700 кПа воздуха выходит из сопла 5, распыляет металл на мельчайшие частицы, которые, двигаясь в струе воздуха со скоростью 75–200 м/с, попадают на поверхность основного металла 6, образуя слой покрытия 7.

Размеры частиц колеблются в очень широких пределах (10–70 мкм) в зависимости от режима металлизации и свойств металла.

К достоинствам металлизации относится возможность наращивания на шейки валов машин, станины станков и другие детали слоя стали толщиной до 15 мм и более с требуемыми физико-механическими свойствами. Нанося слой металлов со специальными свойствами, можно повысить не только износостойкость деталей, но и другие эксплуатационные свойства, например, жаропрочность и коррозионную стойкость. Первоначальные свойства основного металла вследствие незначительности нагрева в процессе напыления не изменяются. Достоинством металлизации является также сравнительная простота и малая стоимость этого способа упрочнения.

К основным недостаткам металлизации относятся: хрупкость нанесенного слоя; не всегда достаточная прочность сцепления с основным металлом; снижение механической и особенно усталостной прочности деталей.

Газопламенное напыление. Обобщенная схема процесса газопламенного напыления показана на **рис. 12**. Горючий газ и кислород, реже воздух, 3 подают в смесительную камеру, из которой горючая смесь поступает в сопловое устройство и далее на выходе из него поджигается. Так образуется факел газового пламени 4.

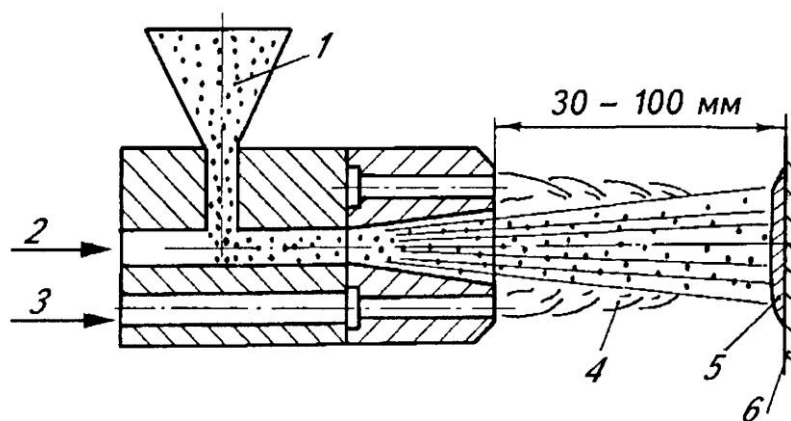


Рис. 12. Схема процесса газопламенного напыления:
1 – напыляемый порошок;
2 – транспортирующий газ (азот); 3 – смесь горючего газа и кислорода;
4 – факел; 5 – покрытие;
6 – обрабатываемая поверхность

Распыляемый материал в виде порошка или проволоки (стержней) подают по оси газопламенной струи. Такой способ подачи способствует более интенсивному нагреву и распылению материала.

Плазменное напыление. Создание надежной техники генерирования низкотемпературной плазмы позволило для нанесения покрытий использовать плазмотроны. В настоящее время это один из наиболее развитых процессов плазменной обработки, не только позволяющий упрочнять поверхность конструкционных материалов, но и дающий возможность создавать новые

композиционные материалы и покрытия, которые не могут быть получены другими методами.

Для нанесения покрытия плазменным напылением материал покрытия вводят в струю плазменного столба дуги, где он нагревается и ускоряется по направлению к основе.

Плазма – это частично или полностью ионизованный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, суммарный заряд которых равен нулю. Носителями зарядов в плазме являются электроны и положительные ионы. Наряду с ионами и электронами в плазме могут содержаться неионизированные атомы или молекулы. Между плазмой и газом трудно провести резкую границу. Плазма подчиняется большинству газовых законов и ведет себя во многих отношениях как газ. Однако она отличается от газа электропроводностью и взаимодействием с магнитными полями. В дуговых плазменных распылителях (рис. 13) источником нагрева газа является дуга, горящая между водоохлаждаемыми электродами. В верхней части плазмотрона располагают стержневой электрод 7 из вольфрама или другого тугоплавкого металла. В нижней части находится электрод в виде соплового устройства 6, который обычно изготавливают из меди. Иногда применяют вставки из тугоплавких и теплопроводных металлов. К электродам подводят напряжение от источника постоянного тока. При этом чаще всего выбирают прямую полярность («минус» на стержневом электроде). При обратной полярности значительно выше тепловые нагрузки на электрод.

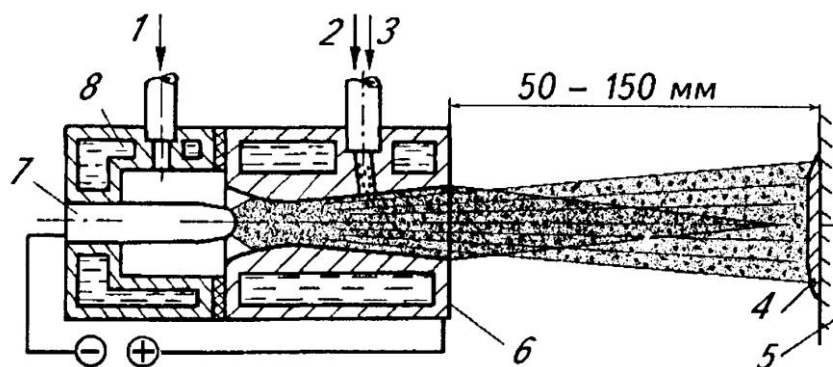


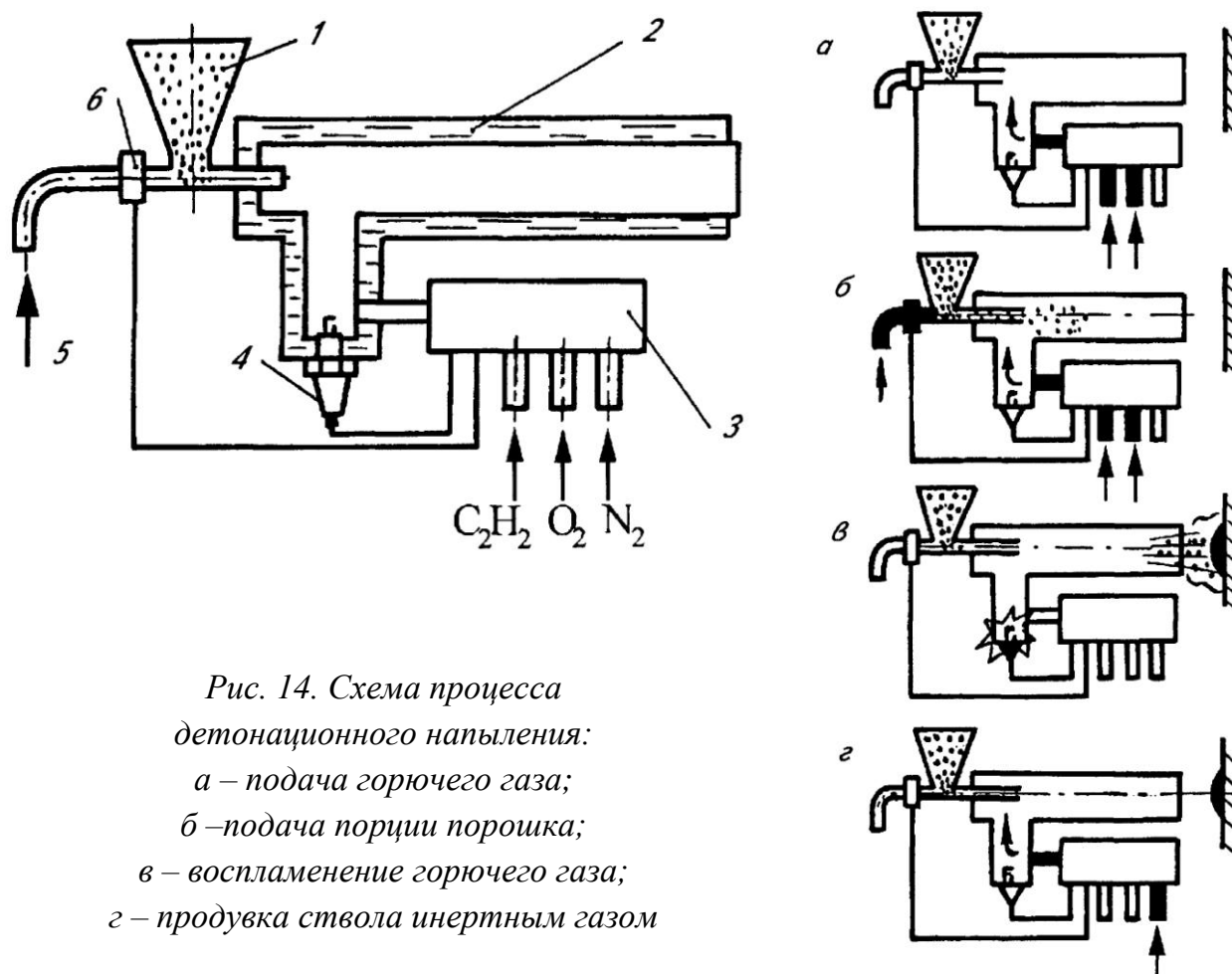
Рис. 13. Схема процесса плазменного порошкового напыления:

1 – плазмообразующий газ; 2 – напыляемый порошок; 3 – транспортирующий газ; 4 – покрытие; 5 – обрабатываемая поверхность; 6 – медный анод; 7 – вольфрамовый катод; 8 – система охлаждения

Порошок подают в радиальном направлении в различные участки плазменного распылителя: в плазменную струю ниже среза сопла (на срез сопла) или непосредственно в сопло. Наиболее эффективна подача в сопло

выше расположения анодного (или катодного) пятна. Такую подачу порошка называют доанодной или в столб дуги. При высокой энтальпии плазменной струи порошок успевает прогреться при подаче его на срез сопла. Известен ряд способов осевой подачи порошка.

Детонационные покрытия получают с помощью установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 14. Она состоит из открытого с одного конца ствола 2, механизма подачи напыляемого порошка 7, газовой камеры, в которой регулируется подача горючего и нейтрального газов и инициируется взрыв с помощью свечи зажигания 4. Процесс детонационного напыления – циклический. Из камеры 3 ствол 2 заполняется смесью газов, способных детонировать (рис. 14, а). Транспортирующим газом – азотом 5 в ствол подается заданная порция напыляемого порошка, после чего закрывается затвор 6 (рис. 14, б); одновременно вырабатывается инициирующий импульс, который подается на свечу зажигания 2 (рис. 14, в). Возникающие при воспламенении горючего газа тепловые волны порождают ударную, а затем и детонационную волну.



При истечении продукты детонации в виде сверхзвуковой струи увлекают напыляемые частицы, которые нагреваются и ускоряются. Формируется двухфазный поток, состоящий из продуктов детонации и напыляемых частиц. При этом могут иметь место процессы их плавления и испарения.

При напылении материалов однородного химического состава, например металлов или оксидов, покрытие может формироваться как из практически полностью расплавленных частиц, так и из смеси расплавленного и нерасплавленного материалов. При напылении некоторых композиционных материалов, например твердого сплава ВК, напыление осуществляется из смеси расплавленного кобальта и твердых частиц карбида вольфрама.

В течение одного цикла (0,2–0,5 с) на поверхность основы переносится 30–40 мг распыляемого вещества. Горючей смесью ствол вновь заполняется после предварительной продувки инертным газом, исключающим возможность самопроизвольного воспламенения при контакте с горячими продуктами детонации (рис. 14, г).

Преимущества детонационных покрытий по сравнению с плазменными и газоплазменными объясняются существенным отличием механизма формирования покрытия. Определяющую роль играет то, что в конце двухфазного потока сосредотачиваются наиболее крупные непроплавленные частицы, которые взаимодействуют с покрытием, сформированным из частиц, входящих в начало и середину потока. В результате имеют место эффекты абразивного воздействия и ударного прессования, увеличивающих плотность уже сформированного покрытия. Указанные эффекты могут проявляться и при взаимодействии двухфазного потока с покрытием, сформированным в результате предыдущего выстрела.

Еще одним существенным отличием детонационного напыления является значительно большая концентрация частиц в момент формирования покрытия по сравнению с плазменным. Это, в частности, усиливает проявление эффекта ударного прессования. Более высокие, чем при плазменном напылении, скорости частиц делают возможным выделение значительной энергии при ударе. В результате происходит повышение температуры частиц и температуры в зоне контакта, а это делает возможным напыление мелкодисперсного порошка (~1 мкм).

Нанесение покрытий испарением и конденсацией в вакууме впервые было применено для получения тонких пленок (от 1 до 10 нм) в оптической и радиотехнической промышленности. Конденсацией можно наносить покрытия сложного состава. Для этого смешивают потоки пара разных компонентов или

создают условия для синтеза вещества покрытия путем химического взаимодействия парового потока с окружающей атмосферой разреженного газа. Например, таким способом получают покрытия из оксидов, карбидов, нитридов и других соединений.

Схема процесса вакуумного конденсационного напыления покрытий представлена на **рис. 15**.

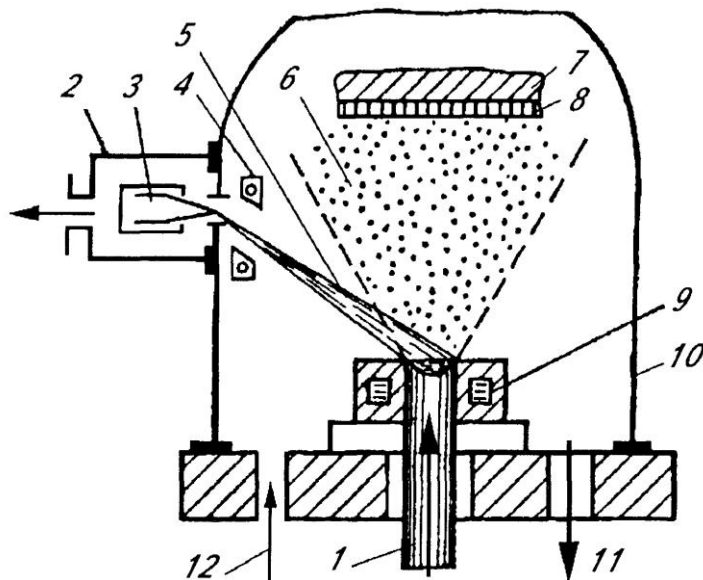


Рис. 15. Обобщенная схема процесса вакуумного конденсационного напыления покрытий:
 1 – распыляемый материал;
 2 – камера источника энергии;
 3 – источник энергии; 4 – система стабилизации и фокусировки энергетического потока;
 5 – поток энергии; 6 – поток напыляемых частиц;
 7 – обрабатываемое изделие;
 8 – покрытие; 9 – водохлаждаемый тигель; 10 – рабочая камера;
 11 – откачка; 12 – ввод активных газов

Покрытия при вакуумном конденсационном напылении формируются из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или ионизированном состояниях. Поток частиц получают распылением материала посредством воздействия на него различными энергетическими источниками. Для целей подвода энергии к распыляемому материалу используют резистивный метод, высокочастотный индукционный и электродуговой нагрев, а также воздействие лазерного и электронного лучей, электрический разряд и др. В зависимости от концентрации подводимой энергии различают распыление наносимого материала методами: термического испарения, взрывного испарения-распыления и ионного распыления твердого материала. Процесс вакуумного конденсационного напыления проводят в жестких герметичных камерах при давлении $13,3\text{--}133^{-3}$ Па. Благодаря этому обеспечивается необходимая длина свободного пробега напыляемых частиц и защита их и основного материала от взаимодействия с газами, составляющими воздушную атмосферу. Введение в камеру активных газов позволяет перейти к способу вакуумного реакционного напыления покрытий. Напыляемые частицы в потоке или на поверхности конденсации вступают в химическое взаимодействие с активными газами

(кислородом, азотом, угарным газом и др.) и образуют соответствующие соединения: оксиды, нитриды, карбиды и др.

В общем случае движущей силой переноса частиц в направлении к поверхности напыления является разность парциальных давлений паровой фазы. Наиболее высокие давления пара, достигающие 133 Па и более, наблюдаются вблизи поверхности распыления (испарения). Это и обуславливает перемещение частиц в направлении напыляемого изделия, где давление паров минимально.

Преимущества вакуумного конденсационного напыления следующие:

- 1) покрытия имеют высокие физико-механические свойства;
- 2) возможно получение покрытий из синтезированных соединений (карбидов, нитридов, оксидов и др.);
- 3) покрытия можно наносить в виде тонких и равномерных слоев;
- 4) можно наносить в качестве покрытий широкий класс неорганических материалов;
- 5) технологические процессы, связанные с вакуумным конденсационным напылением, не загрязняют окружающую среду и не нарушают экологию. В этом отношении они выгодно отличаются от химических и электролитических методов нанесения тонких покрытий.

К недостаткам методов вакуумного конденсационного напыления следует отнести:

- 1) невысокую производительность процесса (скорость конденсации около 1 мкм/мин);
- 2) повышенную сложность технологии и оборудования.

2.6. Метод вакуумного ионно-плазменного напыления

Ионно-лучевые технологии требуют применения вакуумной техники, высоких ускоряющих напряжений и в машиностроении стали широко использоваться не так давно. По мере совершенствования вакуумной техники, снижения её стоимости и повышения надежности, применение вакуумных ионно-плазменных технологий в промышленности набирает ход и становится всё более перспективным. Поэтому рассмотрим эту технологию, включающую в настоящее время уже целую группу методов, более подробно.

Очевидные преимущества этой группы методов включают легкость управления пучком заряженных частиц, возможность разгонять их до практически любой необходимой энергии и легко изменять вид используемых ионов, исключительную чистоту методов, воспроизводимость и контролируемость параметров обработки. Степень необходимого вакуума

определяется средней длиной свободного пути частиц и требованиями к чистоте получаемых поверхностных структур. *При давлении порядка 10^{-3} Па средняя длина свободного пути частиц исчисляется метрами.* В зависимости от энергии используемых частиц преобладающими оказываются процессы **осаждения покрытий** (энергия $10^{-18} - 10^{-16}$ Дж = 6,25 – 625,0 эВ), **распыления обрабатываемой поверхности** ($10^{-16} - 10^{-15}$ Дж = 625 – 6250 эВ), **имплантации** ($10^{-15} - 10^{-14}$ Дж = (6,25 – 62,5) · 10^3 эВ).

Кратко остановимся на основных методах ионно-лучевой обработки материалов.

1. Вакуумное испарение. Метод не обязательно связан с использованием ионов, но исторически явился первым методом формирования покрытий в вакууме, и уместно упомянуть о нем хотя бы в сравнительном плане. Суть метода сводится к осаждению паров материала. Создание высокоэффективных электронных пушек, обеспечивающих высокие скорости испарения, значительно расширило возможности метода. Помимо электронных пушек используются нагреватели из тугоплавких металлов. Введение в вакуумную камеру небольших добавок химически активных газов позволяет формировать покрытия оксидов, нитридов, карбидов и т. д. Энергия осаждаемых частиц соответствует характерным значениям энергии тепловых колебаний атомов, а скорость осаждения покрытий достигает десятков и сотен микрометров в час.

2. Молекулярная эпитаксия. В этом методе используются термически генерированные молекулярные пучки в ультравысоком вакууме. Рост покрытия осуществляется последовательным осаждением отдельных монослоев и приводит к формированию слоя, эпитаксиально связанного с лежащим ниже кристаллическим материалом. Толщина покрытий может достигать нескольких микрометров. Молекулярную эпитаксию широко применяют для выращивания пленок в микроэлектронике.

Однако высокая стоимость и сложность процесса; низкая производительность, трудности получения хорошей адгезии делают применение метода для получения износостойких покрытий не слишком перспективным.

3. Осаждение посредством ионного распыления. При взаимодействии высокоэнергетического иона с атомами твердого тела происходит передача энергии с соответствующим возбуждением атомов. Если возбуждение происходит в непосредственной близости от поверхности твердого тела, а энергия возбужденных атомов велика, наблюдается распыление поверхности. В общем случае поток осаждаемых на напыляемую деталь частиц представляет собой смесь атомов и ионов распыляемой поверхности и бомбардирующих

частиц. Эффективность процесса определяется коэффициентом или выходом распыления, равным количеству выбитых атомов в расчете на один налетающий ион. Выход распыления сложным образом зависит от энергии иона, угла его падения, материала мишени и топографии облучаемой поверхности. Ионное распыление используется для осаждения металлических и керамических пленок, сплавов практически на любые подложки. Энергия осаждаемых частиц может достигать 10^{-18} Дж = 6,25 эВ и выше, однако не всегда этой энергии достаточно для обеспечения хорошей адгезии покрытий. Скорость роста покрытий обычно составляет единицы и десятки микрометров в час.

4. Ионно-плазменное напыление. В некотором смысле ионно-плазменное напыление аналогично ионному распылению, но имеет неоспоримые преимущества с точки зрения качества получаемых покрытий. Осаждение ведется из плазмы на деталь, находящуюся под отрицательным потенциалом, значение которого достигает 10^3 В. Между изделием и заземленными частями установки создается тлеющий разряд в инертном газе, обычно аргоне, находящемся под давлением в единицы паскалей. Разряд обеспечивает очистку поверхности за счет распыления окисных и адсорбционных слоев. После очистки материал покрытия испаряется и вводится в область разряда с последующим осаждением на поверхность изделия. Метод позволяет получать пленки равномерной толщины и мелкодисперсной структуры с хорошей адгезией к подложке. Существенное ограничение метода, связанное с получением паров тугоплавких материалов и соединений сложного химического состава, в значительной степени связано с развитием магнетронного распыления. К недостаткам ионно-плазменного напыления можно отнести большое число параметров, активно влияющих на структуру и свойства получаемых покрытий. Это делает задачу оптимизации технологического процесса сложной, подчас неразрешимой.

5. Ионная имплантация. Суть метода весьма проста и заключается в поверхностной обработке изделия ионами с энергией, достаточной для внедрения в поверхностные слои материала. Пороговая энергия, выше которой начинается внедрение ионов, составляет примерно $3 \cdot 10^{-18}$ Дж ≈ 20 эВ. Глубина проникновения при энергии частиц $10^{-18} - 10^{-17}$ Дж = 6,25–62,5 эВ не превышает нескольких межатомных расстояний. Обычно рассматривают три энергетических диапазона ионной имплантации: низкоэнергетическая ($10^{-17} - 10^{-16}$ Дж = 62,5–625,0 эВ), имплантация ионов средних энергий ($10^{-15} - 10^{-14}$ Дж = (6,25–62,5) $\cdot 10^3$ эВ), высокоэнергетическая имплантация (10^{-13} Дж = 6,25 $\cdot 10^5$ эВ и выше). В качестве технологии, имеющей промышленное значение,

ионную имплантацию начали применять в микроэлектронике. Как метод получения износостойких материалов, ионная имплантация интенсивно развивается, начиная с 1980-х годов. Предпосылками этого развития стали создание высокопроизводительного оборудования для получения больших концентраций примесных атомов, накопление данных о влиянии ионного легирования на структуру и свойства обрабатываемых материалов. Наиболее перспективной в машиностроении сегодня представляется имплантация ионов средних энергий. Оборудование для высокоэнергетической имплантации остается сложным и дорогим. Низкоэнергетическая имплантация эффективна в сочетании с диффузионным отжигом для легирования глубоких слоев.

6. Имплантация атомами отдачи и ионное перемешивание. Эти методы являются разновидностями ионной имплантации и основаны на том, что эффект изменения свойств связан с внедрением не первичных высокоэнергетических ионов в легируемый материал, а атомов отдачи, например, из тонкой пленки, предварительно нанесенной на обрабатываемое изделие. В результате возможно для получения различных сплавов пользоваться одним и тем же источником и сортом ионов, например тяжелым инертным газом. Эффективное легирование и перемешивание достигаются при более низких дозах и энергиях, чем в методе прямой имплантации. Существенный недостаток имплантации атомами отдачи – распыление поверхностной пленки при бомбардировке преодолевается с развитием метода динамического перемешивания, когда поверхность одновременно подвергается воздействию пучка ионов высокой энергии и атомов или низкоэнергетических ионов легирующего вещества.

7. Совмещенные методы формирования покрытий. Эта группа методов подразумевает формирование поверхностных покрытий в условиях одновременной бомбардировки пучком высокоэнергетических ионов или серию последовательных операций осаждения и имплантации. Основная идея работ по совмещенным методам – соединить преимущества технологических процессов напыления и легирования.

Технология вакуумной ионно-плазменной обработки.

Из перечисленных основных методов ионно-лучевой обработки материалов в настоящее время наиболее широко применяется и имеет перспективы дальнейшего развития технология вакуумное ионно-плазменное напыления, поэтому её стоит рассмотреть подробнее.

С материаловедческой точки зрения одно из наиболее интересных явлений при ионной имплантации – получение метастабильных фаз, не

реализуемых традиционными способами. То есть по технологии вакуумного ионно-плазменного напыления могут создаваться пленки и покрытия, содержащие **новые метастабильные химические соединения с неравновесным фазовым составом** или пересыщенные твердые растворы, имеющие необычные свойства. Характерным примером служит снятие ограничений, накладываемых правилом Юм-Розери на образование твердых растворов. Различие атомных радиусов в растворах, получаемых методом ионной имплантации, достигает 40%.

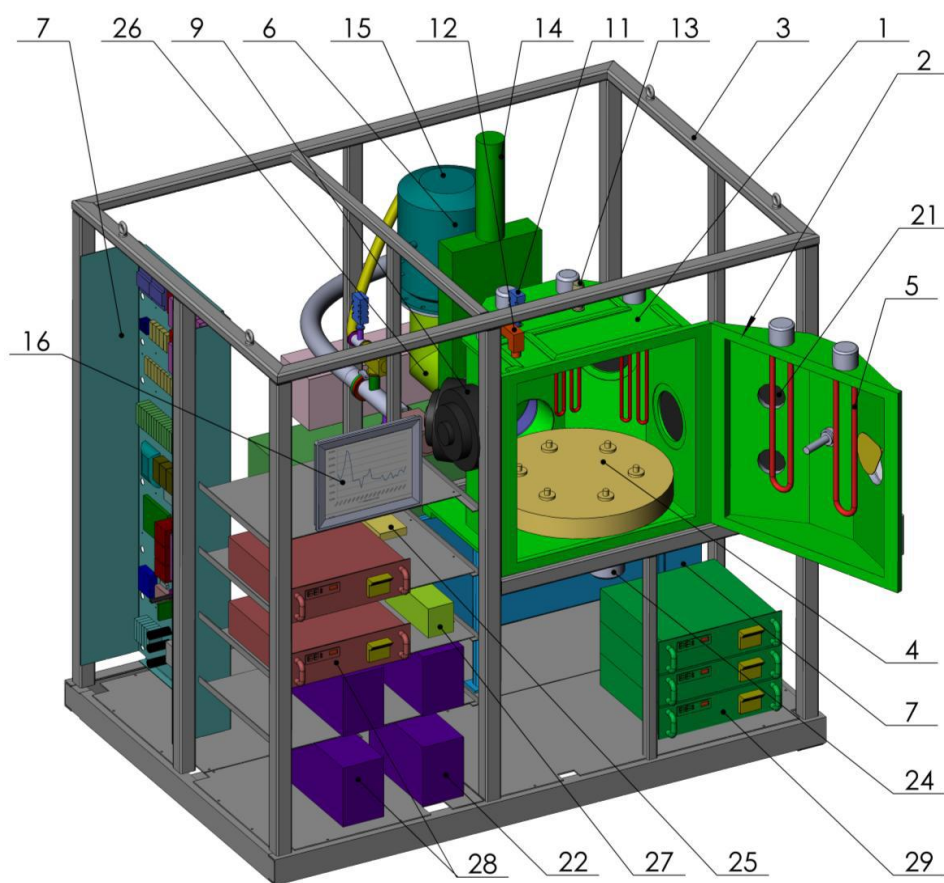
Энергия ионов много больше межатомных взаимодействий в твердом теле, и с точки зрения образования химических соединений ионная имплантация представляет собой термодинамически неравновесный процесс. Из-за тесного перемешивания внедренных атомов и атомов матрицы внутри материала (типичные расстояния между ними меньше 1 нм) диффузионные реакции могут проходить более чем в 10^4 раз быстрее реакций при обычном металлургическом сплавлении, то есть ионная имплантация позволяет получать фазы, стабильные только при низких температурах и существующие лишь благодаря ничтожно малой подвижности атомов их компонент.

Оборудование для ионно-плазменных технологий. Получение, формирование ионных пучков и обработка материалов происходят в специально разработанных ионно-лучевых установках. Разработка ионно-лучевых установок началась с решения исследовательских задач атомной и ядерной физики, реакторного материаловедения с последующим широким применением в электронной промышленности, освоением метода в оптической, медицинской промышленности, в машиностроении. В зависимости от назначения к установке могут предъявляться совершенно различные требования. В установках для исследовательских целей на первом плане стоит возможность получения различных ионных пучков, чистота экспериментальных условий – состав пучка, окружающей среды, точный контроль максимального числа экспериментальных параметров, в промышленных – надежность работы, простота обслуживания, высокая автоматизация и производительность рабочего процесса, низкая себестоимость. Существенно разные требования предъявляются к установкам для легирования материалов электронной промышленности и машиностроительных материалов. В первом случае возникают более жесткие требования к воспроизводимости результатов легирования, однородности пучка, допустимым температурам нагрева обрабатываемых образцов, во втором – необходимо достижение высоких концентраций легирующей примеси – единицы и десятки процентов, а следовательно, реализация высокоинтенсивных пучков ионов. Для примера

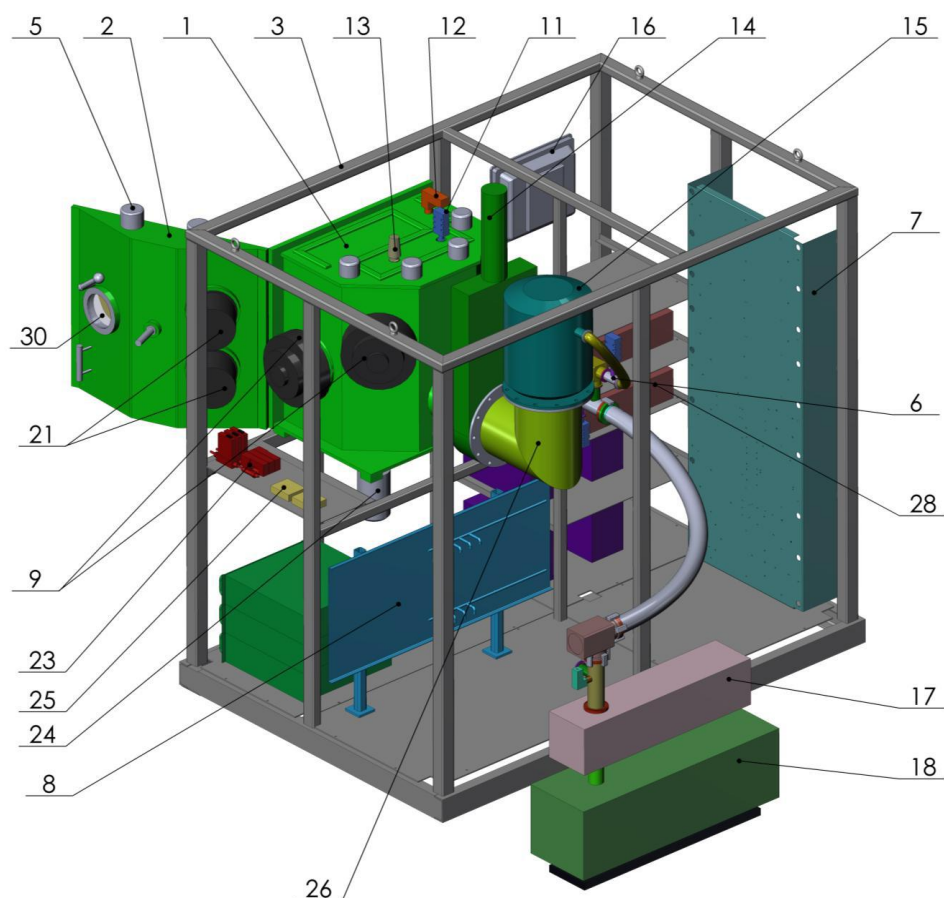
отметим, что при использовании источника с интенсивностью пучка 1 мА и легировании до дозы порядка 10^{17} ион/см² скорость обработки составляет 10 см²/с. Необходимость легирования деталей сложной формы ужесточает требования к конструкции приемной камеры; в ряде случаев необходимо использование трудно получаемых ионов, например ионов тугоплавких металлов. Вместе с тем требования к чистоте, стабильности и однородности ионного пучка при легировании машиностроительных материалов не столь высоки. Следствием широкого диапазона требований явилась тенденция к разработке все более узкоспециализированного оборудования для различных видов ионно-лучевой обработки.

К основным элементам установки ионного легирования относятся ионный источник, масс-сепаратор, системы ускорения, формирования и сканирования пучка, камера обработки, вакуумная система. В зависимости от класса задач, для решения которых разработана установка, ее компоновка и устройство отдельных элементов могут различаться. Типичная компоновка узлов вакуумной установки с катодным распылением для нанесения ионноплазменных покрытий показана на **рис. 16**, она состоит из:

- вакуумной камеры (поз. 1) из нержавеющей стали размером $\varnothing 600 \times 600$ мм с двойной сплошной рубашкой охлаждения;
- двери вакуумной камеры (поз. 2) из нержавеющей стали, с установленным пирометром и кварцевым иллюминатором с заслоночкой;
- каркаса силового (поз. 3), сваренного из стальных труб прямоугольного сечения;
- технологической оснастки (поз. 4) с двойным планетарным вращением;
- шести нагревателей (поз. 5);
- системы откачки (поз. 6), включающей в себя форвакуумный и байпасный клапаны;
- системы управления (поз. 7);
- гидropневмосистемы (поз. 8);
- четырех дуговых испарителей (поз. 9);
- трех датчиков низковакуумных (поз. 11);
- клапана напуска воздуха в камеру (поз. 12);
- датчика высоковакуумного (поз. 13);
- затвора высоковакуумного шиберного типа с пневмоприводом (поз. 14);
- турбомолекулярного насоса на магнитном подвесе (поз. 15);
- 17-дюймового панельного компьютера (поз. 16);



а.



б.

Рис. 16.
Структурная
схема (компоновка
узлов) вакуумной
установки BRV600
для нанесения
ионноплазменных
покрытий: а – вид
установки
спереди; б – вид
установки сзади.
Более подробная
информация
приведена в
тексте

- насоса Рутса (поз. 17);
- насоса пластинчато-роторного (поз. 18)
- двух низкоэнергетичных ионных источников (поз. 21) для ионной очистки и ассистирования с блоками питания (поз. 28);
- четырех блоков питания (поз. 22) дуговых испарителей;
- трех расходомеров (поз. 23);
- изолированного, водоохлаждаемого ввода вращения (поз.24);
- четырех блоков поджига (поз. 25) дуговых испарителей;
- одного колена 90° (поз. 26);
- контроллера турбомолекулярного насоса (поз. 27);
- блока подачи отрицательного потенциала смещения на технологическую оснастку (поз. 29).

Все узлы размещаются на единой платформе.

Разновидности ионноплазменного распыления включают катодное, магнетронное, высокочастотное и в несамостоятельном газовом разряде. Для получения износостойких, антифрикционных, антиэрозионных, триботехнических и других видов функциональных покрытий наиболее перспективны для промышленного использования первые два:

Катодное распыление. Принципиальная схема установки для нанесения покрытий методом катодного распыления приведена на **рис. 17**. Метод осуществляется следующим образом.

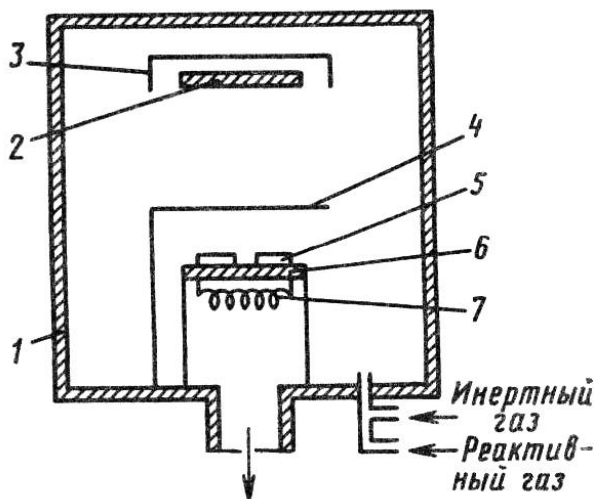


Рис. 17. Схема установки для нанесения покрытий катодным распылением:

- 1 – вакуумная рабочая камера;
- 2 – катод; 3 – заземленный экран;
- 4 – заслонка; 5 – подложка;
- 6 – заземленный анод; 7 – резистивный нагреватель подложек

Вакуумный объем, содержащий катод и анод, откачивается до давления 10^{-4} Па, после чего производится напуск инертного газа (обычно Ar при давлении 1–10 Па). Для зажигания тлеющего разряда между катодом и анодом подается высокое напряжение 1–10 кВ. Положительные ионы инертного газа, источником которых является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая его распыление. Следует

отметить, что при движении ионов к катоду в процессах переразрядки образуются быстрые нейтральные частицы, также участвующие в распылении катода. Распыленные атомы попадают на подложку и оседают в виде тонкой пленки. По существующим представлениям, распыленные атомы не принимают сколько-нибудь заметного участия в процессах, определяющих разряд.

Отличительным признаком диодной схемы распыления является то, что при распылении катод является источником и распыляемого материала, и электронов, поддерживающих разряд, а анод также принимает участие в возбуждении разряда, одновременно являясь подложкодержателем.

Катод изготавливают из материала, подлежащего распылению. Для локализации разряда используют заземленный электрод 2. Иногда для увеличения адгезии пленок к подложкам используют резистивный нагреватель подложек 7.

Так как распыление происходит при сравнительно большом давлении, ионы инертного газа, как и распыленные атомы, многократно сталкиваются между собой и с нейтральными частицами, в результате чего ионы, бомбардирующие катод, и частицы распыляемого материала теряют энергию. Это, в свою очередь, приводит к снижению скорости распыления и уменьшению адгезии пленок. В связи с этим расстояние между катодом и анодом (с укрепленными на нем подложками) по возможности должно быть минимальным. Для получения оптимальных условий распыления подбирают соответствующее соотношение между тремя величинами: расстоянием между катодом и анодом, приложенным напряжением и давлением газа.

Диодное распыление материалов может осуществляться и в газовой среде, взаимодействующей с распыленными частицами и материалом мишени. Тогда происходит так называемое реактивное распыление, в результате которого получают пленки окислов, нитридов, карбидов, сульфидов, хлоридов и др.

Для повышения чистоты осаждаемых пленок применяют геттерное распыление. Сущность его состоит в том, что в начале процесса подложка закрыта экраном и осаждение производится на этот экран и стенки камеры. При этом пленка осаждаемого материала играет роль газопоглотителя (геттера), сорбируя активные газы (O_2 , CO , N_2 , CH_4 , CO_2 , H_2O), уменьшая их парциальное давление до весьма низких значений. Затем отводится экран и производится осаждение на подложку в чистой атмосфере инертного газа. С использованием геттерного осаждения можно в обычных установках получить такие же пленки, как и в сверхвысоковакуумной установке.

Основные преимущества метода катодного распыления следующие:

- 1) безынерционность процесса;
- 2) низкие температуры процесса;
- 3) возможность получения пленок тугоплавких металлов и сплавов (в том числе многокомпонентного состава);
- 4) сохранение стехиометрического состава исходного материала при напылении;
- 5) возможность получения различных соединений при проведении процесса в реактивной среде;
- 6) возможность получения равномерных по толщине пленок на большой площади подложек, так как при катодном распылении материал осаждается на подложку не с точечного источника, а с плоской поверхности катода, размеры которого могут превышать расстояние от катода до подложки.

Метод имеет и недостатки:

- 1) низкая скорость осаждения (0,3-1 им/с);
- 2) загрязнение пленок рабочим газом вследствие проведения процесса при высоких давлениях (1-10 Па);
- 3) низкая степень ионизации осаждаемого вещества;
- 4) бомбардировка мишени высокоэнергетическими вторичными электронами приводит к образованию радиационных дефектов в пленках.

В качестве примера практической реализации вакуумной ионно-плазменной технологии нанесения покрытий с катодным распылением рассмотрим работу установки *PLATIT π ⁸⁰* (рис. 18, 19). Процесс нанесения покрытия на установке *PLATIT* основан на физическом осаждении из паровой фазы (процесс PVD – Physical Vapor Deposition). Процесс PVD происходит в вакууме (в большинстве практических случаев осаждаются покрытия нитрида титана TiN на стальных изделиях – подложках). Источники испарения, которые встроены в дверь (Cathodes на рис. 18), обеспечивают сильно ионизированный металлический пар (Metall vapor). Этот металлический пар возникает в результате дугового разряда (ARC) между катодом и приемником (корпусом рабочей камеры – Vacuum chamber). В реакции с азотом металлический пар соединяется с металлическими нитридами, нитриды осаждаются на подложках (Substrates). Результатом этого процесса нанесения покрытия являются гладкие твердые поверхности с очень высокой адгезией и твердостью.

Процесс начинается с вакуумной откачки до небольшого остаточного давления (~ 1,3 Па). Напряжение смещения (Bias voltage), варьируемое до 800 В

постоянного тока, создает электрическое поле между подложками (Substrates) и стенками вакуумной камеры (Vacuum chamber). Это поле ускоряет электроны и ионы оставшихся газов. Дуговой разряд испаряет ионизированные атомы металла с катодов – последние находятся под отрицательным потенциалом (15–40 В). Интенсивность этого испарения создает плазму (Plasma), происходит полная ионизация технологического газа и паров металла. Плазму можно различить по фиолетовому свечению внутри вакуумной камеры. Электроны, ускоренные отрицательным катодом и протекающие с большой энергией в положительно заряженную вакуумную камеру, вызывают ионизацию газов (плазменный разряд), то есть атомы газа в камере ионизированы так же, как и атомы испаряемого металла катодов.

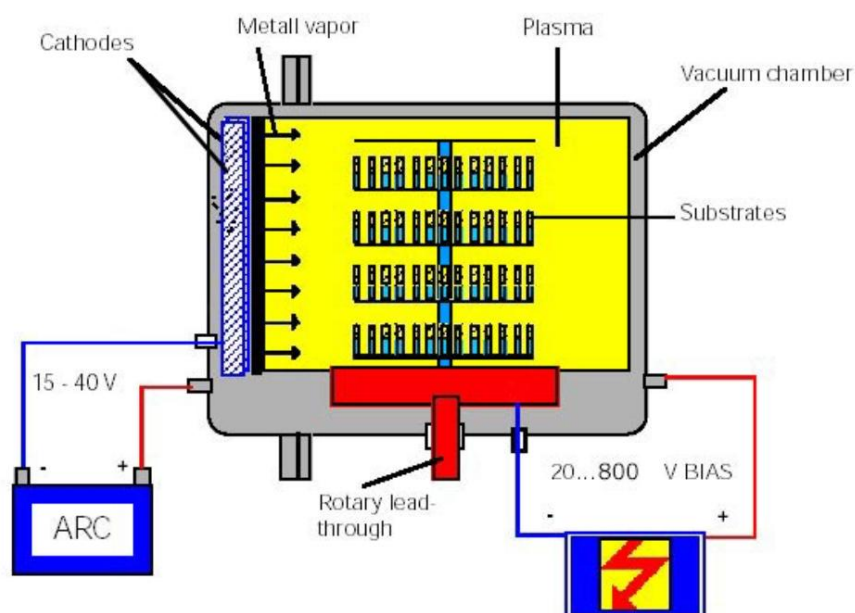


Рис. 18. Схема работы установки PLATIT π^{80}

Напряжение карусели (вращающаяся стойка с подложками – Rotary lead through) увеличивает разряд, поэтому плазма равномерно заполняет вакуумную камеру. Ионы металлов и газов ускоряются к подложкам (Substrates) под действием напряжения смещения (Bias voltage) и образуют на них плотное твердое покрытие.

Технологический цикл получения вакуумного ионно-плазменного покрытия включает несколько стадий, организованных последовательно без извлечения обрабатываемого изделия из вакуумной камеры. Пример рабочего цикла установки PLATIT π^{80} с параметрами давления (mbar), температуры ($^{\circ}\text{C}$), напряжения смещения (V), тока дуги (A) и времени обработки (min.) представлен на [рис. 19](#).

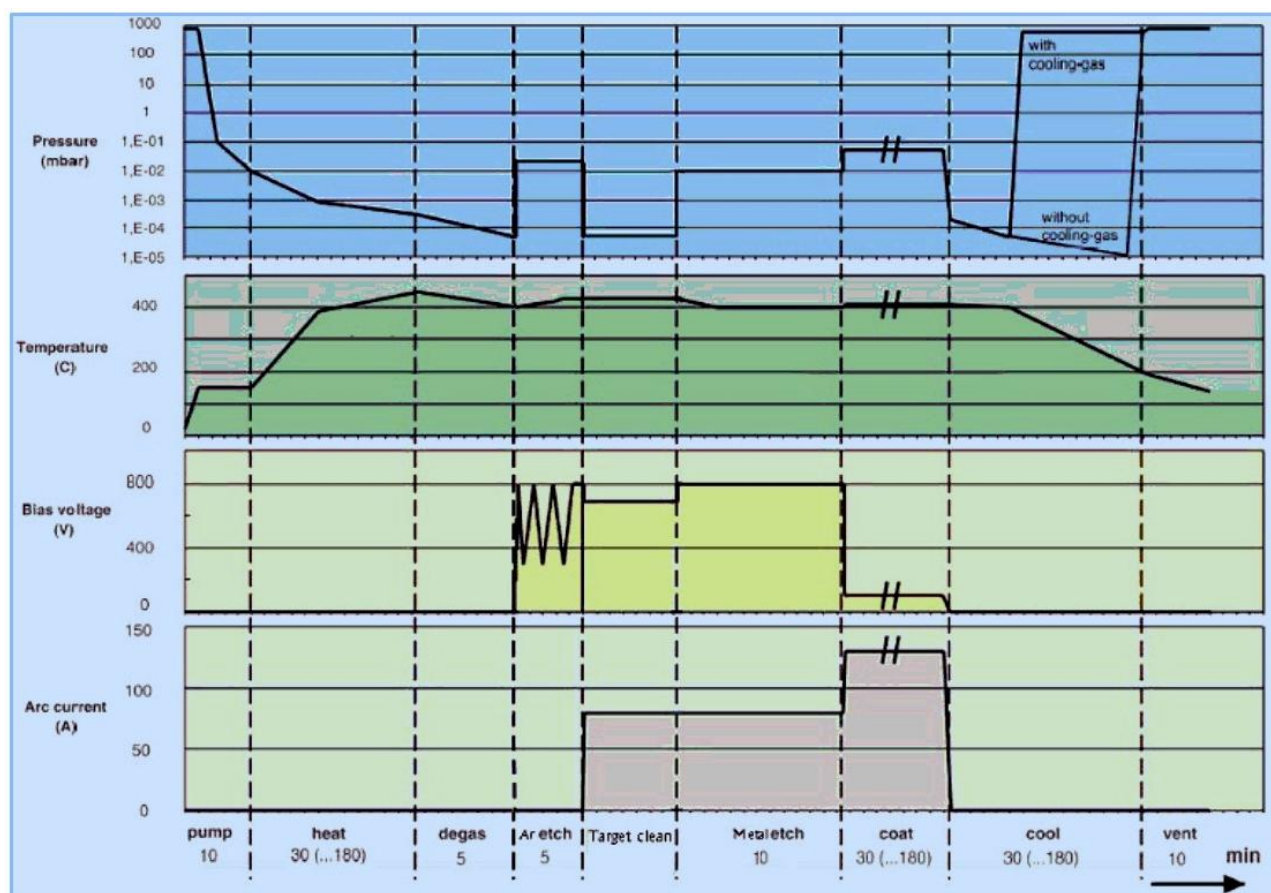


Рис. 19. Параметры (по оси ординат) и стадии технологического цикла нанесения вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN на установке PLATIT π^{80} .

Последовательность технологических стадий (по оси абсцисс): откачка (вакуумирование); нагрев; дегазация (откачка); ионное травление (ионами аргона); целевая очистка; переходная фаза; формирование покрытия; охлаждение; вентиляция (напуск)

Магнетронное распыление. Магнетронное распыление является разновидностью методов на основе тлеющего разряда. Магнетронные системы ионного распыления относятся к системам распыления диодного типа, в которых атомы распыляемого материала удаляются с поверхности мишени при ее бомбардировке ионами рабочего газа (обычно Ar), образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Для увеличения скорости распыления необходимо увеличить интенсивность ионной бомбардировки мишени, т. е. увеличить плотность ионного тока на поверхности мишени. С этой целью используют магнитное поле B , силовые линии которого параллельны распыляемой поверхности и перпендикулярны к силовым линиям электрического поля E .

В магнетронной распылительной системе (рис. 20) катод (мишень) 1 помещен в скрещенное электрическое (между катодом и анодом 4) и магнитное

поле, создаваемое магнитной системой 2. Наличие магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму аномального тлеющего разряда непосредственно у мишени. Дуги силовых линий b замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий b и интенсивно распыляемая, имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

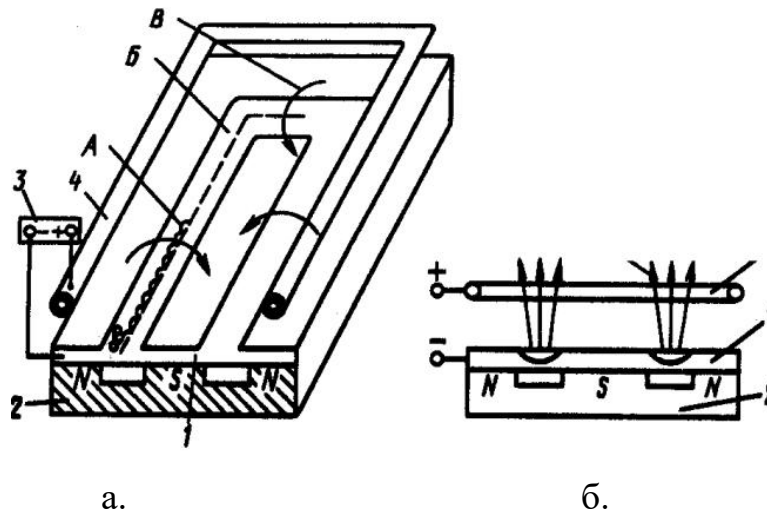


Рис. 20. Схемы магнетронной распылительной системы с плоской мишенью (а) и движения напыляемых частиц (б): 1 – катод-мишень; 2 – магнитная система; 3 – источник питания; 4 – анод; 5 – подложка; 6 – подложкодержатель; А – траектория движения электрона; Б – зона распыления; В – силовые линии магнитного поля; Г – поток распыленных частиц

При подаче постоянного тока между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается аномальный тлеющий разряд. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем и оказываются как бы в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой – поверхностью мишени, отталкивающей электроны. В результате электроны совершают сложное циклоидальное движение у поверхности катода. В процессе движения электроны претерпевают многочисленные столкновения с атомами аргона, обеспечивая высокую степень ионизации, что приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и соответственно значительному увеличению скорости распыления.

Основные параметры магнетронных систем ионного распыления:

- удельная скорость распыления $(4-40) \cdot 10^{-5}$ г/(см·с);
- эффективность процесса генерации (по меди) $3 \cdot 10^{-6}$ г/Дж;

- энергия генерируемых частиц $(1,6-3,2) \cdot 10^{-18}$ Дж = 10–20 эВ;
- энергия осаждаемых частиц $(0,32-16) \cdot 10^{-19}$ Дж = 2–10 эВ;
- скорость осаждения 10–60 нм/с; рабочее давление $(5-50) \cdot 10^{-2}$ Па.

Основные преимущества магнетронных систем распыления следующие:

- 1) высокие скорости распыления при низких рабочих напряжениях (500 В) и небольших давлениях рабочего газа;
- 2) низкие реакционные дефекты и отсутствие перегрева подложек;
- 3) малая степень загрязненности пленок посторонними газовыми включениями;
- 4) возможность получения равномерных по толщине пленок на большой площади подложек.

2.7. Электрофизические методы нанесения покрытий

Электрофизическое нанесение порошковых покрытий характеризуется высоким уровнем концентрации энергии, большими значениями коэффициента использования материала и коэффициента полезного действия. Сочетание концентрированного теплового и механического воздействий на обрабатываемые материалы обеспечивает высокое качество наносимых покрытий.

Электроэрозионный метод нанесения покрытий основан на явлении полярного переноса частиц металла с анода на катод во время разрыва электрической цепи. Электрический разряд происходит при высоком напряжении между катодом *K* и анодом *A* через небольшой зазор, оставленный между ними (рис 21, *a*). Поток электронов устремляется от катода через воздушный промежуток к аноду. Количество электронов на пути их движения

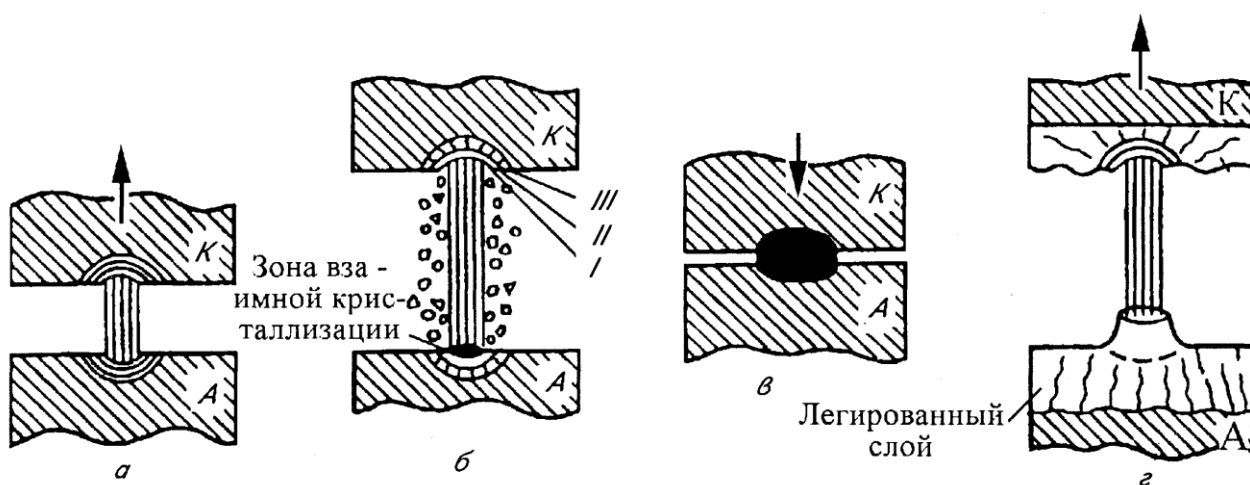


Рис. 21. Схема процесса электроэрозионного нанесения покрытий: *а* – пробой межэлектродного промежутка; *б* – образование эрозионных лунок на аноде *A* и катоде *K*; *в* – контакт электродов; *г* – формирование нароста на аноде и лунки на катод

увеличивается за счет «выбивания» электронов из молекул воздуха. Анод «бомбардируется» лавиной электронов, в результате чего происходит пробой воздушного промежутка и появляется искра, а сила тока значительно возрастает. Развитие разряда в искровом промежутке сопровождается появлением ударной волны. При разводе электродов после пробоя воздушного промежутка ток в цепи мгновенно прекращается. Периодически соединяя и разводя катод и анод, можно повторять описанный процесс.

Искровой разряд оказывает на металл импульсное тепловое и механическое воздействия. Поток электронов приводит к локальному разогреву электрода, а поперечное магнитное поле создает высокое давление в плазменном шнуре разряда; в нем реализуется средняя электронная температура $T_e = (5-7) \cdot 1000 \text{ К}$. В результате на поверхности электродов появляются эрозионные лунки, в которых выделяются три зоны (рис. 21, б): испарения *I*, плавления *II* и напряженного состояния *III*. Зона напряженного состояния возникает за счет волны термических и термомеханических напряжений в результате импульсного нагрева и реактивного действия плазменной струи. Механические напряжения в эрозионных лунках весьма значительны и приводят к хрупкому разрушению поверхностного слоя материала электродов. При осуществлении процесса с вибрирующими электродами хрупкое разрушение их поверхности происходит также и за счет усталости металла. Эрозия металла приводит к выбросу продуктов эрозии в межэлектродный зазор.

В микрованне на катоде происходит интенсивное перемешивание и химическое взаимодействие материалов катода с перенесенным материалом анода. Механический контакт электродов (рис. 21, в) также сопровождается интенсивным химическим взаимодействием, которому сопутствуют схватывание электродов и перенос материала с катода на анод.

После искрового процесса на катоде образуется углубление, а на аноде — нарост (рис. 21, г). Электроэрозионное упрочнение поверхности деталей обусловлено термическим воздействием искрового или дугового электрического разряда на деталь, т. е. скоростной закалкой, поверхностным легированием материала детали элементами, входящими в состав анода (упрочняющего материала), а также азотом воздуха. Упрочненный слой отличается высокой твердостью, обусловленной присутствием в нем нитридов и карбонитридов.

Термомеханическое электроконтактное нанесение покрытий. Получение покрытий методом электроконтактной термомеханической

приварки (припекания) может осуществляться при использовании в качестве присадочного металла проволоки, ленты или порошка.

При приваривании проволочной присадки поверхность детали, как показано на **рис. 22**, высаживается электромеханическим способом. Высадка металла производится пластиной 2 из твердого сплава с получением на поверхности канавки треугольного профиля. Сила тока при высадке составляет до 600 А, усилие прижатия инструмента до 1000 Н, скорость подачи проволоки 1,5 мм на оборот. В образовавшуюся высаженную спиральную канавку приваривается дополнительный металл в виде стальной проволоки.

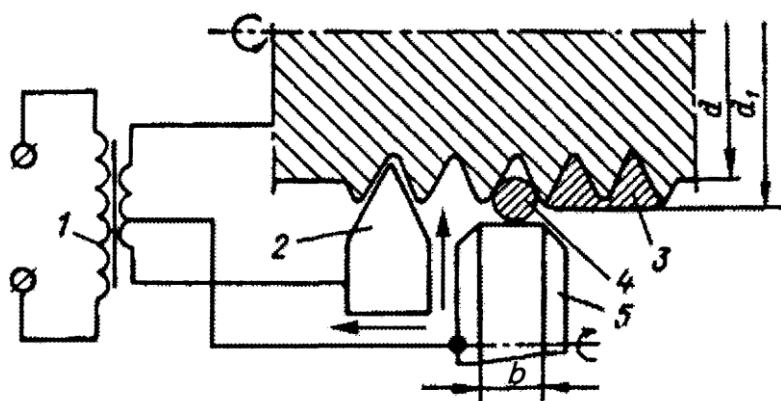


Рис. 22. Схема электроконтактной приварки покрытия:
1 – трансформатор;
2 – высаживающая пластина; 3 – покрытие;
4 – наносимый материал (проволока); 5 – роликовый электрод

Для приваривания присадочного металла между высаженной поверхностью детали и роликовым электродом 5 помещают стальную проволоку 4 и пропускают электрический ток большой силы (1400–2000 А) и низкого напряжения (4–6 В). В месте контакта происходит интенсивный разогрев металла. Под действием усилия инструмента (500–600 Н) развивается пластическая деформация проволоки с заполнением высаженного профиля. Скорость вращения детали при этом должна быть 0,4–1,0 м/мин. При большем диаметре проволоки применяется меньшая скорость. При высоком удельном давлении и температуре около 1000–1200 °С происходит сварка, приводящая к увеличению первоначального размера детали d до d_1 .

Таким образом, в основе этого способа получения покрытия лежит соединение металлов, основанное на сварке под давлением. При этом способе отсутствуют пороки, связанные с переходом металла из твердой фазы в жидкую и обратно, такие как пережог, усадочные напряжения и раковины, газовые поры, рыхлость и кристаллические трещины.

При термомеханическом электроконтактном нанесении порошковых покрытий основной технологической схемой является прокатка порошкового слоя роликовым электродом (**рис. 23**). Для упрочнения торцевых поверхностей применяют электроды конической формы.

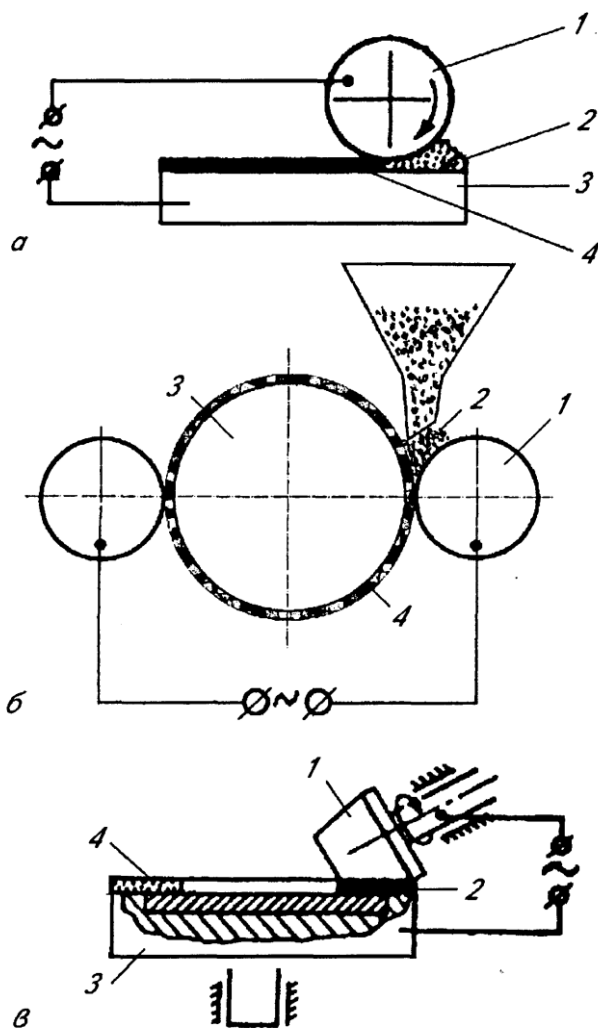


Рис. 23. Термомеханическое припекание порошковых покрытий на плоских (а), цилиндрических (б) и торцевых (в) поверхностях:
 1 – электрод роликовый;
 2 – наносимый порошок;
 3 – обрабатываемая поверхность;
 4 – покрытие

Плотность тока при обработке самофлюсующихся покрытий составляет 300 А/мм^2 , давление на электроды не превышает $35\text{--}40 \text{ МПа}$. Эти параметры обеспечивают максимальное тепловыделение лишь на участках наибольшего электросопротивления обрабатываемого порошкового слоя, т. е. в местах контакта частиц между собой и с основой. В результате формирование структуры покрытия происходит за счет спекания в присутствии жидкой фазы в местах контакта частиц. Отдельные частицы свариваются между собой и с основой. Механическая активация процесса способствует завариванию пор. Уплотнение покрытия осуществляется путем взаимного проскальзывания и поворота частиц по оплавленным поверхностям контакта. Таким образом, в структуре покрытия сохраняется исходная дисперсность фаз порошкового сплава. Процесс нанесения покрытия без полного расплавления наносимого сплава получил наименование электроконтактного припекания покрытий.

Электроконтактное припекание покрытий широко применяется для обработки предварительно сформированных покрытий. Порошок с помощью плазмы или газопламенного устройства напыляют на поверхность заготовки, после чего последняя подвергается воздействию давления с одновременным

пропусканием электрического тока. Указанный способ позволяет эффективно упрочнять крупногабаритные детали, для которых иная технология оплавления после напыления практически невозможна. Электроконтактное припекание предварительно напыленных покрытий позволяет получать слои с высокими физико-механическими свойствами, которые существенно превосходят оплавленные покрытия.

Магнитно-импульсный метод. Заключается в использовании импульсных электродинамических сил, которые могут быть приложены к слою предварительно нанесенного порошкового покрытия (магнитно-импульсная обработка) или воздействовать на порошок через электропроводящий элемент (магнитно-импульсное прессование).

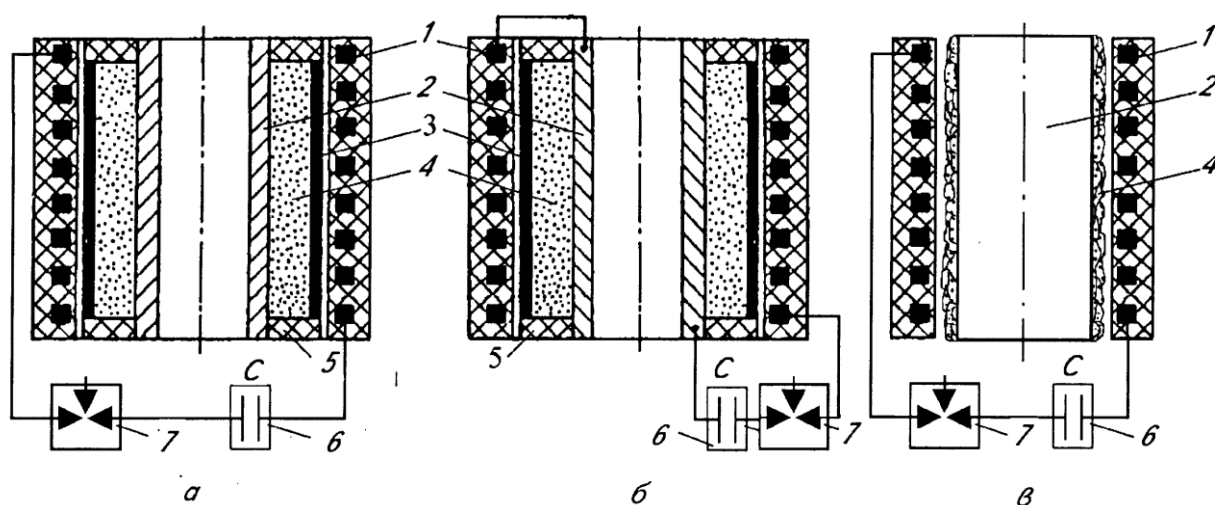


Рис. 24. Схема магнитно-импульсного прессования:

а — магнитно-импульсное прессование порошка; б - горячее магнитно-импульсное прессование порошка; в — магнитно-импульсная обработка покрытий;

1 — индуктор; 2 - обрабатываемая деталь; 3 — токопроводящая оболочка; 4— порошковый слой; 5— крышка; 6— конденсаторная батарея; 7 — разрядник

При магнитно-импульсном прессовании на обрабатываемую поверхность детали 2 (рис. 24, а) надевается токопроводящая оболочка 3 с наносимым порошком 4. Оболочка изготавливается из медного листа толщиной 0,2–0,3 мм. Крышка 5 удерживает порошок внутри оболочки. Оболочка с наносимым порошком и деталью помещается внутрь спирального цилиндрического многovitкового индуктора 7. При разряде предварительно заряженного накопителя энергии 6 возникают импульсные электродинамические силы, деформирующие оболочку. Преодолевая механическое сопротивление, оболочка сжимает порошок до требуемой плотности. Заключительной операцией технологического процесса является термическая обработка, обеспечивающая спекание порошка с одновременным расплавлением медной оболочки и пропитки расплавленной медью порошкового слоя.

Термическая активация поверхности обрабатываемой детали дает возможность значительно снизить давление прессования и исключить операцию последующего припекания. При этом существенно возрастают основные физико-механические свойства покрытий.

При горячем магнитно-импульсном прессовании часть энергии емкостного накопителя используется для нагрева порошка. Нагрев зоны контакта порошка и обрабатываемой поверхности обеспечивается за счет пропускания по металлической детали импульсного разрядного тока индуктора. Для реализации такой схемы обрабатываемая деталь последовательно включается в цепь разрядника (рис. 24, б).

Получение покрытий из металлических порошков магнитно-импульсным методом возможно также путем магнитно-импульсной обработки предварительно нанесенного порошкового слоя (рис. 24, в).

Магнитно-импульсный метод нанесения покрытий применяется для изготовления и восстановления биметаллических пар скольжения (нанесение железграфита с последующим расплавлением медной оболочки и пропиткой слоя), упрочнения металлокерамическими твердыми сплавами технологической оснастки и инструмента, повышения износостойкости сельскохозяйственных машин и строительно-дорожной техники.

2.8. Электролитические покрытия

Покрытия, наносимые электролитическим (гальваническим) методом чаще всего получают в водных растворах солей с применением внешнего источника электротока или с помощью химических реагентов.

Гальванический метод. Данный метод широко применяют в машиностроении, так как он обеспечивает получение достаточно прочных покрытий при небольших расходах и потерях металла. Процесс получения покрытия состоит в выделении или осаждении металла или сплава из водных растворов их солей при пропускании электрического тока через электролит. Покрываемое изделие в электролизере служит катодом, тогда как анод — это пластины осаждаемого металла (растворимые аноды), графита или металла, нерастворимого в электролите (нерастворимые аноды). При электролизе в ваннах с растворимыми анодами металл анода растворяется, а из раствора на катоде выделяется такое же количество металла, поэтому концентрация раствора соли в электролите практически не изменяется. При использовании нерастворимых анодов постоянство концентрации электролита поддерживается периодическим введением требуемого количества соответствующей соли. Гальванический метод нанесения покрытий позволяет совместным осаждением

вводить в его состав твердые частицы. Этим способом можно получать покрытия с особыми свойствами.

Гальванические покрытия широко применяются в качестве защитно-декоративных, для обеспечения коррозионностойкости и износостойкости, а также для восстановления размеров изношенных деталей в ремонтном производстве (табл. 2).

Таблица 2. Основные виды гальванических покрытий и области их применения

Вид покрытия	Толщина покрытия, мкм	Область применения	Вид покрытия	Толщина покрытия, мкм	Область применения
Цинкование	7–30	Защита от коррозии изделий, работающих во влажной атмосфере (главным образом деталей из стали и чугуна), стальных листов	Лужение	3–25	ры, азотнокислой и щелочной сред, большинства газов и органических кислот; горячая концентрированная серная кислота и галогеновые кислоты растворяют хром. Хромовое покрытие хорошо выдерживает равномерно распределенную динамическую нагрузку, но разрушается при сосредоточенном ударе
Кадмирование	7–45	Защита от коррозии конструкций, работающих в контакте с морской водой; пружин; резьбовых и крепежных деталей, работающих в легких условиях			Лужению подвергаются детали из железа, стали, чугуна, меди, латуни. Широко применяется в пищевой промышленности для покрытия контактов приборов. Защита деталей специальной аппаратуры
Меднение	5–35	Медное покрытие не может служить защитой от коррозии для железа, поэтому применяется как подслой никелевого и хромового покрытий			
Свинцевание	75–400	Защита от коррозии металлических конструкций, работающих в условиях контакта с серной кислотой, растворами солей серной кислоты и сернистыми газами. Свинцеванию подвергаются изделия из стали, чугуна, меди, медных сплавов, алюминия и его сплавов	Латунирование	3–5	Латунные покрытия хорошо сцепляются с различными покрытиями, применяются как подслой при серебрении, никелировании, лужении и других покрытиях
Никелирование	12–36	Защита от коррозии; получение декоративной поверхности; подслой при хромировании. Никелем покрываются также детали приборов, аппаратов, автомобилей	Осталивание (покрытие железом)	200–2000	Восстановление размеров деталей при ремонте. Обеспечение натяга при посадках. Подслой при нанесении баббита на чугунные вкладыши подшипников. Для обеспечения прирабатываемости хромированных поршневых колец
Хромирование	15–45	Хромовое покрытие стойко против действия влажной атмосферы			

Составы электролитов и режимы нанесения покрытий широкой номенклатуры металлов и сплавов, в том числе и приведенных в табл. 2, можно найти в ГОСТ 9.305-84 «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий.» (официальное издание: М.: ИПК Издательство стандартов, 2003). Электролиты, как правило, представляют собой соли на основе наносимого металла с добавками катализаторов/ингибиторов. Режим нанесения включает температуру и время обработки, а также электрические параметры в виде плотности тока (в расчете на площадь поверхности обрабатываемого изделия).

Технология гальванической обработки включает (в порядке их выполнения): механическую обработку и очистку деталей, промывку и обезжиривание, собственно гальваническую обработку, вторичную промывку, нейтрализацию и сушку. В ряде случаев (например, при хромировании) для создания маслоудерживающего рельефа полученное покрытие подвергают анодному травлению. Места, не подлежащие обработке, защищают пластмассами или лаком. Для покрытия небольших участков крупных деталей целесообразно применять местную гальваническую обработку (рис. 25).

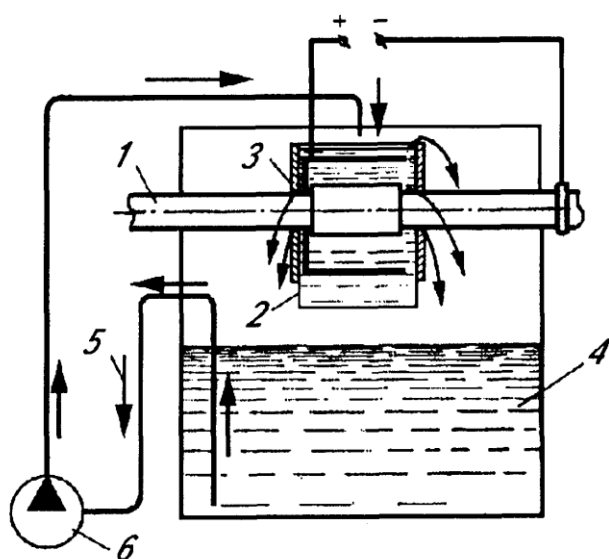


Рис. 25. Схема местной гальванической обработки: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – электролизная ванна; 3 – уплотнение; 4 – резервуар; 5 – поток электролита; 6 – насос

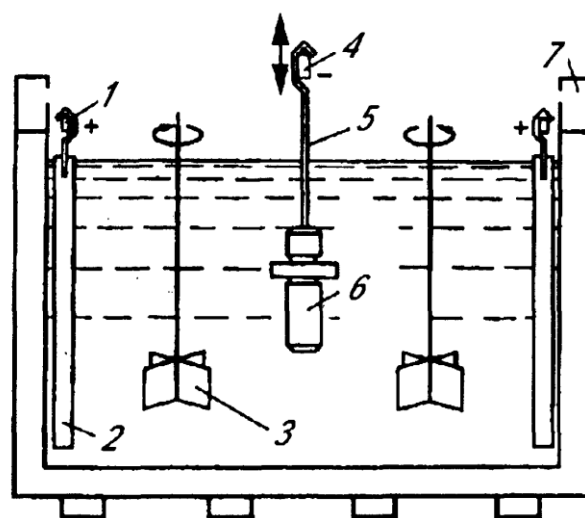


Рис. 26. Ванна для гальванического нанесения дисперсных покрытий: 1 – анодная шина; 2 – анод; 3 – активатор; 4 – катодная шина; 5 – подвеска; 6 – обрабатываемое изделие; 7 – отсос

Особое место среди гальванических покрытий занимают так называемые дисперсные покрытия, которые получаются при введении в металлические

слои, получаемые электролитическим или химическим осаждением, определенных твердых частиц размером 1—5 мкм при их доле 5—10 мас.%, или 20—30 об.%. В качестве дисперсных наполнителей могут быть твердые сплавы, антифрикционные и другие компоненты, благодаря которым покрытия приобретают особые свойства. Частицы попадают в металлическую матрицу при осаждении металлов из растворов их солей, в которых частицы с концентрацией 50—300 г/л поддерживаются во взвешенном состоянии с помощью перемешивания, принудительной циркуляции раствора или вдувания воздуха. Схема ванны для осаждения покрытий дана на **рис. 26**. Такая ванна ничем не отличается от используемой для осаждения чистых металлов. Рабочие параметры процесса такие же, как и при получении металлических покрытий. Покрытия с высокотвердым наполнителем можно обрабатывать на нужный размер шлифованием алмазными или эльборовыми кругами.

Анодные конверсионные покрытия. Эти покрытия получают в водных растворах электролита с применением источника тока, подключенного таким образом, что обрабатываемое изделие служит анодом. Материал основы преобразовывается (конвертируется) и участвует в образовании покрытия путем химического взаимодействия своих металлических ионов с электролитом. Такой анодной обработке поддаются магниевые, алюминиевые и титановые сплавы.

2.9. Химическое нанесение покрытий

Химические бестоковые покрытия. Процесс химического нанесения покрытий включает следующие операции: подготовка деталей к покрытию; нанесение покрытия на рабочие поверхности; термическая обработка; механическая обработка для придания деталям необходимых размеров и чистоты поверхности. В промышленности применяются разные химические способы нанесения никелевых, хромовых, кобальтовых, никель-кобальтовых и других упрочняющих покрытий. Готовят детали к химическому покрытию так же, как и к гальваническому. Примерный состав ванн и режимы нанесения покрытий химическим способом приведены в **табл. 3**.

После термической обработки покрытий при температуре 350—450°C прочность их сцепления с основным металлом детали, твердость и износостойкость возрастают в 1,5 раза и более. Прочность сцепления покрытия с основным металлом высокая, например, со сталью 10 – выше 300 МПа.

Скорость осаждения упрочняющего металла зависит в основном от температуры ванны: с повышением температуры никелевой ванны от 50 до 90 °C скорость осаждения никеля возрастает примерно в 7 раз.

Таблица 3. Состав ванн и режимы нанесения химических покрытий

Показатель	Покрытие			
	нике- левое	хромо- вое	кобаль- товое	никель- кобаль- товое
Состав ванны*, г/л:				
хлористый никель	21–30	—	—	30
хлористый кобальт	—	—	30	30
гипофосфит натрия	10–30	8,5	20	20
соль Рошеля	—	—	—	200
оксиацетат натрия	15–50	—	—	—
хлористый алюминий	—	—	50	50
фтористый хром	—	—	50	50
хлористый хром	—	17	—	—
уксусная кис- лота (ледя- ная), мг/л	—	11	—	—
Скорость осаж- дения, мкм/ч	15–25	2,5–3	15	15
Оптимальная температура, °С	90–93	71–78	90–99	90–99
Количество ще- лочей для ней- трализации, г/л	4–6	10–11	9–10	8–10
* Для всех компонентов состав в г/л кроме уксусной кислоты (мг/л).				

Покрытия образуются как следствие химического взаимодействия, и поэтому они формируются по всей поверхности с одинаковой скоростью, в отличие от гальванических покрытий, которые формируются прежде всего на выступающих местах — кромках, ребрах, гранях. Для реализации химического способа нанесения покрытий не требуется сложное и дорогое оборудование. Наиболее эффективно его применение для деталей сложной формы.

Химические конверсионные покрытия. Формируются в процессе химического взаимодействия материала обрабатываемого изделия с активной составляющей рабочего раствора. Металл изделия участвует в образовании слоя покрытия, при этом он видоизменяется (конвертируется). К

конверсионным покрытиям относят хромовые покрытия на магниевых сплавах, пассивирующие покрытия на алюминиевых сплавах, воронёные слои, фосфатные покрытия на низколегированных сталях и пассивирующие слои (оксиды) на легированных хромоникелевых сталях и кобальтовых сплавах.

2.10. Диффузионные покрытия

Эти покрытия образуются в результате химико-термического взаимодействия поверхности детали с диффузионно-активным компонентом газовой фазы, порошка или жидкого расплава. Формирование покрытий происходит при сравнительно высоких температурах, воздействию которых неизбежно подвергается и материал подложки. Нарушение состояния материала вследствие влияния высоких температур ведения процессов чаще всего может устраняться последующей термообработкой. К диффузионным способам нанесения покрытий причисляют такие, при которых в поверхность подложки внедряются углерод или/и азот, а также металлоиды (бор, кремний) или металлы (алюминий, хром, цинк).

3. Дополнительная упрочняющая обработка покрытий

Подготовка поверхности деталей под напыление, как было отмечено выше, способствует усилению физико-химического взаимодействия напыляемого материала с основой за счет активации напыляемой поверхности в результате удаления оксидной пленки и создания наклепа. Несмотря на это, для многих покрытий основной вклад в адгезионную прочность привносится механическим зацеплением. Слабая связь между частицами покрытия связана с особенностями его формирования: быстрым нагревом и охлаждением, кратковременной выдержкой импульсного давления. Для повышения прочности связи покрытия с материалом детали (адгезионная прочность) и прочности связей между отдельными частицами в самом покрытии (когезионная прочность) предпринимается дополнительная обработка. Дополнительной обработке подвергаются детали перед нанесением покрытий для очистки и активирования поверхности, а также сами покрытия в процессе нанесения и детали с уже нанесенными покрытиями.

Дополнительная упрочняющая обработка покрытий необходима с учетом сложных условий нагружения деталей, действия растягивающих, ударных, усталостных напряжений. Особенно важен этот этап обработки при нанесении покрытий методом напыления, поскольку, например в газотермических покрытиях взаимодействие между частицами и между частицами и основой происходит по механизму анкерного эффекта на площади всего лишь 8—9% общей площади контакта частиц.

Средствами для достижения необходимой структуры и свойств напыленных покрытий, уменьшения пористости и повышения их адгезионной прочности являются различные виды термической и термомеханической обработки. Наиболее широко применяемыми методами дополнительной обработки являются:

- спекание (термическая обработка без расплавления частиц покрытия или при наличии жидкой фазы по границам нерасплавившихся частиц);
- оплавление покрытия (эта обработка необходима для покрытий, напыленных газодинамическими методами);
- пластическое деформирование, в том числе упрочняюще-чистовая ультразвуковая обработка;
- термическая обработка с пропиткой нанесенного пористого покрытия металлическими расплавами и др.

Спекание. Проводится при нагреве порошкового покрытия при температурах $(0,65-0,75) \cdot T_{пл}$. В процессе спекания металлического покрытия

вследствие повышения диффузионной активности атомов происходит рекристаллизация, релаксация внутренних напряжений, увеличение площади контактных поверхностей частиц между собой и с основой. В результате спекания металлическое покрытие из состояния конгломерата частиц переходит в состояние конгломерата кристаллов. Повышается его пластичность, уменьшается пористость, возрастает адгезионная и когезионная прочность.

Спекание в присутствии жидкой фазы или твердо-жидкое спекание. Применяют обычно для упрочнения композиционных покрытий. В этом случае либо расплавляют один из компонентов покрытия, либо обеспечивают контактное плавление при взаимодействии компонентов покрытия. Образующаяся при расплавлении жидкая фаза проникает в несплошности покрытия, способствуя его упрочнению.

Продолжительность спекания в зависимости от толщины нанесенного слоя колеблется от 2 до 5 ч.

Термообработка с пропиткой. Для упрочнения газотермических покрытий применяют также пропитку неорганическими материалами, совмещая данную операцию с объемной термообработкой. Для этого на напыленный слой разными способами наносят пропиточный материал. По мере расплавления материал за счет капиллярных сил проникает в несплошности покрытия. При правильно выбранном составе пропитки и режиме процесса происходит заполнение большинства открытых пор. Такую технологию применяют, используя медь и другие припои для упрочнения покрытий из карбида вольфрама.

Пластическая деформация. Улучшить характеристики покрытия и активировать процессы спекания позволяет пластическое деформирование. Наибольшее распространение получила схема электроконтактного нагрева или термомеханического спекания при прокатке покрытий медным токопроводным роликом. Деформация покрытия при термомеханическом спекании или припекании связана с тем, что отдельные частицы сдвигаются и поворачиваются одна относительно другой по оплавленным границам. Возможна деформация и хрупкое разрушение отдельных частиц с последующим завариванием возникших трещин. Структура порошкового покрытия при горячей деформации формируется в результате горячего наклёпа, динамического возврата и динамической рекристаллизации, развивающихся в зависимости от температурно-силовых параметров. При этом максимальная износостойкость может быть достигнута при условиях, обеспечивающих наибольшую дисперсность и микроискажения кристаллической структуры. К недостаткам электроконтактного нагрева следует отнести затруднена при

обработке поверхностей сложной геометрической формы и невозможность обработки неэлектропроводных материалов.

Оплавление. Самым распространенным способом упрочнения покрытий является их оплавление. Наиболее легко процесс оплавления реализуется при обработке самофлюсующихся Ni-Cr-B-Si-C сплавов. Соединение B_2O_3 имеет низкую (998 К) температуру плавления и отличается совместностью с SiO_2 способностью связывать оксиды металлов в стекловидные боросиликатные шлаки. Имея низкую температуру плавления шлаки легко всплывают на поверхность покрытия. Помимо устранения оксидов и снижения пористости оплавление покрытия обеспечивает взаимную диффузию элементов на поверхностях контакта. Это повышает адгезию и, соответственно, конструктивную прочность деталей с покрытиями. Наряду с этим при оплавлении могут изменяться физико-механические свойства материала основы вследствие изменения состава и структуры напыленного сплава.

Оплавление покрытий проводят с применением как объемного нагрева (например в печах, соляных ваннах), так и локального градиентного нагрева источниками энергии высокой концентрации (электронным лучом, лучом лазера, электронным пучком, электрической дугой, электроконтактным методом, газопламенным и плазменным потоком, микроплазменным источником).

Оплавление покрытий в печах осуществляют в восстановительной, нейтральной атмосфере или в вакууме.

Для нагрева в соляных ваннах наиболее часто используют расплав хлористого бария с температурой 1323–1373 К. Использование жидких теплоносителей позволяет достаточно точно поддерживать тепловой режим и не требует создания защитной атмосферы. Объемный разогрев в печах и соляных ваннах является достаточно технологичным методом, но значительный прогрев всей массы детали может привести к ухудшению структуры материала основы. Данный метод имеет ограничения также по габаритам обрабатываемых изделий и, кроме того, он не позволяет выполнять оплавление тугоплавких композиционных материалов на сталях.

Довольно распространенным и эффективным методом является высокочастотный индукционный нагрев. В зависимости от геометрии и размеров индуктора и обрабатываемой детали нагрев осуществляется либо по всей напыленной поверхности, либо локально на определенных участках. Недостатком индукционного нагрева является необходимость в каждом отдельном случае изготавливать индуктор в соответствии с конфигурацией изделия. Кроме того, при индукционном нагреве невозможно обрабатывать покрытия из тугоплавких соединений на немагнитных материалах.

Большие технологические возможности имеет лазерная технология упрочнения покрытий. За счет изменения параметров луча может регулироваться глубина проплавленного слоя. Она может быть равна глубине напыленного порошкового слоя, может превосходить ее и расплавлять часть основы. Высокая скорость нагрева при лазерной обработке позволяет сохранять наследственную мелкозернистость напыленного сплава, что обеспечивает хорошую износостойкость.

Оплавление покрытий пучком электронов, имеющих длину пробега в облучаемом материале, равную или несколько большую толщины необходимого слоя расплавления, позволяет повысить допускаемую плотность мощности в пучке, скорость и производительность процесса оплавления, а также исключить закипание расплава и вынос его из зоны нагрева. Покрытие, получаемое в этом случае, обладает высокой однородностью и хорошей адгезионной прочностью. Оплавление пучком электронов проводят как в специальных вакуумных камерах, так и в атмосферном воздухе. Большим недостатком лучевых методов обработки является сложность и высокая стоимость оборудования. Кроме того, работа с электронно-лучевыми установками требует специальных мер по защите обслуживающего персонала.

Оплавление покрытий сварочной дугой в инертной среде технологически возможно, однако при этом происходит перемешивание компонентов покрытия с основой, что снижает физико-механические характеристики получаемого покрытия. Избежать перемешивания компонентов напыленного порошкового сплава и основы можно при использовании микроплазменного нагрева. Процесс микроплазменного оплавления характеризуется незначительной зоной термического влияния (до 300 мкм). При этом микроплазменная струя нагревает только покрытие. Существенным недостатком процесса является его низкая производительность.

По технологичности самым распространенным в производственных условиях способом оплавления является обработка ацетилен-кислородными горелками. Нагрев ведется нейтральным пламенем. Данный способ привлекает доступностью оборудования и простотой технологии. Однако ему присущи и существенные недостатки: низкая производительность процесса вследствие небольшой плотности теплового потока и связанная с этим же фактором необходимость прогрева всей массы детали. Кроме того, на экономические показатели данного способа обработки влияет и высокая стоимость ацетилена.

Успешно конкурирует с газопламенным способом нагрев с применением плазменной струи, которой можно обрабатывать любые материалы, включая тугоплавкие соединения.

Общая характеристика различных методов термической обработки покрытий с целью их упрочнения приведена в табл. 4.

Таблица 4. Характеристика методов упрочнения напыленных покрытий

Способ термической обработки	Характеристика нагрева. Область применения	Достоинства метода	Недостатки метода
1. В печи (в том числе с пропиткой)	Объемный нагрев всей массы детали. Обработка изделий сложной геометрической формы	Возможность одно-временной обработки партии деталей, в том числе со сложной геометрией, тонкостенных, разностенных. Отсутствие краевого эффекта	Возможное ухудшение структуры материалов основы и покрытия. Необходимость защитной среды. Ограничения по габаритам и массе деталей. Невозможность оплавления тугоплавких композиций.
2. В соляных ваннах	Ускоренный объемный нагрев всей массы детали, возможность градиентного нагрева. Высокая производительность	Возможность одно-временной обработки партии деталей, в том числе со сложной геометрией. Точность регулировки температурных параметров. Защита от атмосферного воздействия	Возможное ухудшение структуры материалов основы и покрытия. Ограничения по габаритам и массе деталей. Невозможность оплавления тугоплавких композиций.
3. Индукционный	Ускоренный локальный поверхностный нагрев. Высокопроизводительная обработка деталей простой геометрической формы	Высокая скорость нагрева. Сохранение мелкодисперсности порошкового сплава покрытия	Ограничение типоразмеров деталей. Невозможность обработки тугоплавких покрытий на немагнитных сплавах
4. Электроконтактное припекание	То же	То же	Трудности обработки деталей со сложной геометрией. Невозможность обработки неэлектропроводных материалов
5. Электродуговой	Локальный нагрев концентрированным источником энергии. Обработка крупногабаритных изделий	Высокая скорость локального нагрева.	Перемешивание металла покрытия с основой. Изменение структуры основы в зоне термического влияния
6. Газопламенный	Ускоренный нагрев поверхности. Единичное производство	Простота оборудования и организации технологического процесса	Высокая стоимость ацетилена. Низкая производительность процесса. Выгорание элементов покрытия, изменение структуры основы
7. Плазмоструйный	Локальный нагрев концентрированным источником энергии. Получение различных, в том числе тугоплавких, покрытий	Высокая скорость локального нагрева. Возможность обработки любых материалов. Регулирование температурно-временных параметров в широких пределах	Большое число факторов и случайных возмущений, влияющих на температурно-временные параметры процесса
8. Микроплазменным источником	Локальный нагрев концентрированным источником энергии. Тонкие прецизионные покрытия	Незначительная зона термического влияния. Формирование мелкодисперсной структуры покрытия	Низкая производительность процесса
9. Лазерный	Локальный нагрев концентрированным источником энергии. Обработка небольших, в том числе труднодоступных, поверхностей	Высокая скорость локального нагрева. Возможность обработки любых материалов. Регулирование температурно-временных параметров в весьма широких пределах.	Сложность оборудования и его высокая стоимость. Потери энергии на отражение. Необходимость специальной защиты персонала
10. Электронным лучом	Локальный нагрев концентрированным источником энергии	Обработка деталей со сложной геометрией. Экологическая чистота	То же

Наиболее эффективны методы обработки, сочетающие различные виды энергии, подводимой в зону обработки. Рациональное взаимодействие источников энергии высокой концентрации позволяет получить поверхностный слой обрабатываемой детали с повышенными эксплуатационными характеристиками. Дополнительная энергия может подводиться в зону наносимого покрытия на различных стадиях технологического процесса. Так, например, высокоскоростная обработка ультразвуковым инструментом напыленного плазмой неостывшего порошкового покрытия обеспечивает получение слоя с плотностью, близкой к 100% от компактного материала, что особенно важно для износостойких покрытий. А применение ультразвукового воздействия в комбинации с плазменным потоком для обработки предварительно напыленного покрытия оказывает положительное влияние как на структуру контактной зоны покрытия с деталью, так и на структуру покрытия. В контактной зоне активизируются диффузионные процессы. Материал покрытия проникает на глубину до 50 мкм в поверхность детали по межзеренным границам, что обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия и детали. В самом покрытии значительно измельчаются все структурные составляющие. Это обеспечит повышение трещиностойкости покрытия при сохранении уровня износостойкости.

Рекомендуемая литература

1. Защитные покрытия: учеб. пособие / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардонина, Н.Г. Россияна, А.С. Юровских. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2014. – 200 с.
2. Зенин Б.С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий: учеб. пособие / Б.С. Зенин, А.И. Слосман. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 120 с.
3. Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю.Н. Туманов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 968 с.
4. Солнцев С.С. Защитные покрытия металлов при нагреве: справ. пособие / С.С. Солнцев. – М.: Либроком, 2009. – 248 с.
5. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2008. – 360 с.
6. Тюрин Ю.Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич. – Киев: Наукова думка, 2008. – 216 с.
7. Кондратов Л.П. Технология материалов и покрытий / Л.П. Кондратов, Н.Н. Божко. – М.: МГУП, 2008. – 226 с.
8. Гамбург Ю.Д. Гальванопокрытия: справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
9. Тушинский Л.И. и др. Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 384 с.
10. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Маригаки; пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

Перечень российских (ГОСТ) и европейских (ISO) стандартов по покрытиям

11. ГОСТ 9.301-86 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2010 (официальное издание)
12. ГОСТ 9.306-85 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Обозначения. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997 (официальное издание)
13. ГОСТ 9.303-84 (ИСО 4521-85, ИСО 4523-85) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору. М.: Стандартиформ, 2008 (официальное издание)

14. ГОСТ 9.305-84 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 (официальное издание)
15. ГОСТ 9.302-88 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. М.: Издательство стандартов, 1990 (официальное издание)
16. ГОСТ 28076-89 Газотермическое напыление. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1989 (официальное издание)
17. ГОСТ 25.220.40 Металлические покрытия
18. ISO 1456:2009 Покрытия металлические. Электролитические покрытия из никель-хрома, медь-никеля и медь-никель-хрома
19. ISO 2063:2005 Термическое напыление. Металлические и другие неорганические покрытия. Цинк, алюминий и их сплавы
20. ISO/DIS 2063-1 Thermal spraying -- Metallic and other inorganic coatings -- Zinc, aluminium and their alloys -- Part 1: Planning of the corrosion protection system -- Component design considerations and quality requirements
21. ISO/DIS 2063-2 Thermal spraying -- Metallic and other inorganic coatings -- Zinc, aluminium and their alloys -- Part 2: Conditions for execution of corrosion protection works by thermal spray processes
22. ISO 2064:1996 Покрытия металлические и другие неорганические покрытия. Определения и понятия, относящиеся к измерению толщины
23. ISO 2080:2008 Металлические и другие неорганические покрытия. Поверхностная обработка. Словарь
24. ISO 2093:1986 Покрытия электролитические оловянные. Технические требования и методы испытания
25. ISO 2179:1986 Покрытия электролитические из оловянно-никелевого сплава. Технические условия и методы испытаний
26. ISO 2819:1980 Покрытия металлические на металлических подложках. Электроосажденные и химически осажденные покрытия. Обзор методов испытаний на прочность сцепления
27. ISO 3882:2003 Металлические и другие неорганические покрытия. Обзор методов измерения толщины
28. ISO 4516:2002 Покрытия металлические и другие неорганические покрытия. Определение микротвердости по Виккерсу и Кнупу
29. ISO 4526:2004 Покрытия металлические. Электролитические никелевые покрытия для технических целей
30. ISO 4527:2003 Покрытия металлические. Автокаталитические никелефосфорные покрытия. Технические условия и методы испытаний

31. ISO 4536:1985 Покрyтия металличеcкие и другие неорганические покрyтия на металличеcких подложках. Испытание на коррозию при обрызгивании солевым раствором
32. ISO 4539:1980 Покрyтия электроосажденные хромовыe. Электролитические коррозионные испытания (испытания ЕК)
33. ISO 4543:1981 Металлические и другие неорганические покрyтия. Общие правила испытаний на коррозию в условиях хранения
34. ISO 6158:2011 Покрyтия металличеcкие и другие неорганические покрyтия. Электролитические хромовыe покрyтия для технических целей
35. ISO 7587:1986 Покрyтия электролитические из сплавов олово-свинец. Технические требования и методы испытаний
36. ISO 8401:1986 Покрyтия металличеcкие. Методы измерения пластичности
37. ISO 10289:1999 Методы коррозионных испытаний металлических и других неорганических покрyтий на металличеcких подложках. Оценка испытательных образцов и готовых изделий, подвергаемых коррозионным испытаниям
38. ISO 10308:2006 Покрyтия металличеcкие. Обзор испытаний на пористость
39. ISO 15726:2009 Металлические и другие неорганические покрyтия. Гальванические цинковые сплавы с никелем, кобальтом или железом
40. ISO 16348:2003 Покрyтия металличеcкие и другие неорганические покрyтия. Определения и условные обозначения, касающиеся внешнего вида
41. ISO 22779:2006 Металлические покрyтия. Алюминиевые покрyтия, наносимые методом физического осаждения из паровой фазы. Технические требования и методы испытания
42. ISO 26945:2011 Металлические и другие неорганические покрyтия. Электроосажденные покрyтия из оловокобальтового сплава
43. ISO 27830:2008 Покрyтия металличеcкие и другие неорганические покрyтия. Руководящие указания по определению металлических и неорганических покрyтий
44. ISO 27831-1:2008 Металлические и другие неорганические покрyтия. Чистка и подготовка металлических поверхностей. Часть 1. Железосодержащие металлы и сплавы
45. ISO 27831-2:2008 Металлические и другие неорганические покрyтия. Чистка и подготовка металлических поверхностей. Часть 2. Металлы и сплавы, не содержащие железо