

3 Методы нанесения покрытий

3.1 Назначение покрытий

Одним из наиболее эффективных технологических путей повышения надежности работы деталей машин и механизмов является нанесение на рабочую поверхность изделий различных покрытий.

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

Большой выбор материалов, используемых для создания покрытий, позволяет обеспечить заданные свойства поверхности (или комплекс свойств) для любых деталей современного машиностроения. Обычные конструкционные материалы не всегда способны удовлетворить требованиям, предъявляемым к деталям машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Конструкционные материалы повышенного качества, если и отвечают таким требованиям, могут оказаться слишком дорогими для их использования в массовом производстве.

Возникающее затруднение снимается при получении на рабочей поверхности покрытий толщиной от долей мм до нескольких мм, способных обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики деталей. Незначительный расход материала покрытия и высокие характеристики поверхности детали обеспечили повышенный интерес технологов к разработке методов нанесения покрытий целевого назначения и широкое внедрение покрытий в производственную практику.

Методы нанесения покрытий.

Существующие многочисленные способы нанесения покрытий можно классифицировать с различных позиций. По методам получения – механические, физические, химические, электрофизические; по виду технологического процесса – гальванические, вакуумные, наплавка. Покрытия различаются по используемым материалам – металлические, керамические, полимерные; по виду (состоянию) используемых материалов – нанесение покрытий в твердом (или твердом дисперсном) состоянии; нанесение покрытий из жидкой фазы (эмульсии, суспензии, лаки, шликер); нанесение покрытий из электролитических растворов; нанесение покрытий из расплавов; нанесение покрытий из газов или газовых смесей. Можно рассматривать покрытия и по их назначению – износостойкие, коррозионно-стойкие, жаростойкие, декоративные и т.д.

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.

Научные основы различных методов нанесения покрытий известны, но изучены не одинаково глубоко. Это связано со сложностью каждого физико-химического процесса, со специфическими особенностями методов и уровнем научных исследований для каждого из них.

3.2 Адгезия покрытия

3.2.1 Условия получения высокой адгезии

Одной из самых главных характеристик покрытия любого назначения является *адгезия*, т.е. прочность сцепления покрытия с основой. Современные методы позволяют получать покрытия с высокими характеристиками (жаропрочные, износостойкие, коррозионностойкие и т.д.), но если не обеспечить требуемый уровень сцепления покрытия с поверхностью детали т.е. адгезии, отвечающий условиям эксплуатации данной детали (без или под нагрузкой, нормальное или сдвиговое нагружение), то такое покрытие не найдет практического применения. Величина адгезии определяется из соотношения

$$\sigma_{\text{адг}} = F_{\text{отр}}/S_{\text{пов}} ,$$

где $F_{\text{отр}}$ – усилие, приложенное к покрытию и приводящее к отслаиванию покрытия от подложки, $S_{\text{пов}}$ – площадь контакта между покрытием и подложкой.

В основе взаимодействия покрытия с подложкой лежат два фактора, которые определяют механизм образования прочной связи: механическое взаимодействие, молекулярное взаимодействие.

Механическая адгезия определяется шероховатостью, зацеплением неровностей контактирующих поверхностей. В ряде случаев необходимая степень шероховатости задается специальной обработкой, например, получение “рваной” резьбы на поверхности вращения перед нанесением покрытия.

Молекулярная адгезия определяется характером и величиной межмолекулярного (межатомного) взаимодействия контактирующих на границе раздела покрытие-основа материалов: металл – металл, металл – оксид, металл – полимер, металл – керамика, и т.д. Во всех случаях непосредственно на границе раздела фаз покрытие-основа на механическую адгезию накладывается молекулярная адгезия.

Общим правилом получения высокой адгезии, т.е. сцепления покрытия с основным материалом, являются два условия – физический контакт (ФК) между покрытием и подложкой и химическое взаимодействие (ХВ) на границе двух контактирующих фаз. От того как обеспечены эти два условия зависит величина адгезии $\sigma_{\text{адг}}$.

На практике ФК можно обеспечить за счет упомянутой выше нарезки “рваной” резьбы, ударного взаимодействия покрытия с основой, при статическом нагружении на слой формируемого покрытия, за счет создания условия смачивания на границе покрытие-основа.

Высокую степень ХВ можно получить за счет активации атомов взаимодействующих материалов на границе фаз – при нагреве, при импульсном механическом нагружении поверхности основы в процессе формирования

покрытия или в процессе предварительной подготовки поверхности (дробеструйная обработка).

Характеристики состояния поверхности. Величина адгезии, а значит и работоспособность деталей с покрытиями, в значительной степени зависит от состояния их поверхностного слоя перед нанесением покрытия, поэтому следует учитывать влияние основных параметров поверхностного слоя деталей на качество наносимых покрытий и технологию подготовки поверхности под покрытие.

Химическая чистота поверхности детали. Данная характеристика является одним из основных условий высокого качества наносимого покрытия. Загрязненность поверхности затрудняет взаимодействие покрытия с материалом подложки, способствует возникновению несплошностей в покрытии и областей с высокими локальными напряжениями. Все это снижает прочность сцепления покрытия с подложкой и, как следствие, приводит к отслаиванию и растрескиванию покрытия, как в процессе его нанесения, так и при его эксплуатации.

Топография поверхности детали. Наличие на поверхности заготовки перед напылением грубых дефектов: раковин, царапин, трещин играет отрицательную роль. В то же время повышение шероховатости химически чистой поверхности детали во многих случаях (при напылении покрытия газотермическим методом, погружение в расплав, эмалирование и др.) способствует лучшему сцеплению покрытия с подложкой. Это объясняется увеличением площади фактической поверхности детали, появлению эффекта заклинивания образующегося покрытия.

Очевидно, что для каждой системы заготовка – покрытие существует некоторая оптимальная шероховатость, значение которой 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, способствуют усилению взаимодействия между материалами покрытия и подложки. Это обусловлено активацией поверхности, облегчающей образование зародышей покрытия, и повышением диффузионной подвижности элементов в сплавах при наличии в них дефектов решетки. При этом следует учитывать разную роль остаточных напряжений сжатия и растяжения. Если первые способствуют залечиванию микротрещин, то вторые наоборот – создают условия к росту и распространению трещин, понижая механические характеристики материала с покрытием.

3.2.2 Методы подготовки поверхности

Для создания оптимальных условий взаимодействия материала покрытия с материалом подложки и получения высокой адгезии используются различные методы предварительной обработки поверхности. Эти методы можно условно разделить на отдельные группы, которые представлены в таблице 1.

Критерии, определяющие выбор метода подготовки поверхности

Обработка поверхности перед нанесением покрытия представляет многоступенчатую технологию, состоящую из нескольких последовательных процессов. При их выборе необходимо учитывать следующие факторы.

Вид обрабатываемого основного материала. Для каждого металла – углеродистая или легированная сталь, чугун, сплавы цветных металлов, необходимо выбирать подходящий способ предварительной и отделочной обработки.

Состояние поверхности определяется способом получения, хранения и транспортировки детали. Технологические операции (механическая, термическая обработки) приводят к различному исходному состоянию поверхности. Степень загрязнения, легкость или трудность удаления грязи и технология нанесения покрытия на подготовленную поверхность определяют выбор способа предварительной обработки.

Таблица 7

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, хроматирование	Временная защита подготовленной поверхности
Нанесение промежуточных покрытий	Любые способы	Повышение адгезии при плохой совместимости материалов

Размер изделий и их количество в партии важны для рационального выбора метода и оборудования. Очень крупные изделия обычно поступают лишь в небольшом количестве и могут иногда обрабатываться частично даже вручную. Для изделий, которые обрабатываются на подставках, применяют автоматические или полуавтоматические агрегаты. Мелкие детали обрабатываются большими партиями в барабанах.

Издержки производства определяются факторами, рассмотренными выше и должны учитывать количество и стоимость расходуемых материалов,

амортизацию используемого оборудования, стоимость потребляемой энергии. Расчет целесообразно проводить на 1 м² площади поверхности

Таким образом, задача выбора технологии подготовки поверхности перед нанесением покрытия является комплексной и требует

3.3 Механические методы нанесения покрытий

3.3.1 Погружение в расплав

В основе данного метода лежит механическое погружение упрочняемого изделия в ванну с расплавленным металлом, выдержка его в ванне в течение заданного времени. После извлечения изделия из ванны на его поверхности образуется твердая металлическая пленка того же состава, что и металл ванны (рис. 14).

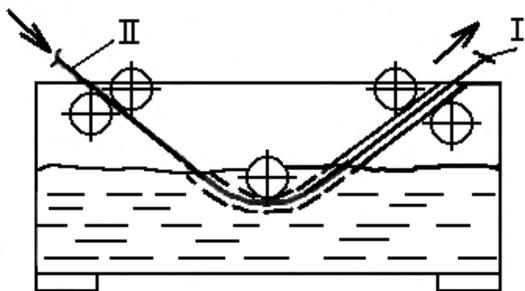


Рис.14. Схема метода нанесения покрытий погружением в расплав; 1 – материал с покрытием, 2 – исходный материал

На границе раздела покрытие – основной материал возникает сложная структура, определяемая видом диаграммы состояний металла покрытия и материала изделия. Поэтому перед нанесением покрытия методом погружения следует проанализировать диаграмму состояний и установить характер образующейся переходной зоны (рис.15). В зависимости от вида диаграммы состояний может быть образована зона сплошного ряда твердых растворов α (диаграмма с неограниченной растворимостью) (рис.15а); зона, включающая в себя области твердых растворов с ограниченной растворимостью α и β (рис.15б); зона с дополнительным пограничным слоем, содержащим интерметаллическую фазу γ (рис.15 в).

Главным механизмом, контролирующим образование переходной зоны, является диффузия. При погружении изделия в ванну с жидким металлом (после смачивания) в результате диффузии формируются твердые фазы переходной зоны, а после извлечения из расплава на поверхности образуется слой твердого покрытия, соответствующий составу ванны.

Характер переходной зоны (степень ее соответствия диаграмме состояний, какие образуются фазы, как велика скорость их роста при кратковременных процессах диффузии) зависит в первую очередь от значений коэффициентов диффузии в соответствующих фазах, от градиента концентраций а пределах однородных областей и от технологических параметров данного процесса нанесения покрытия.

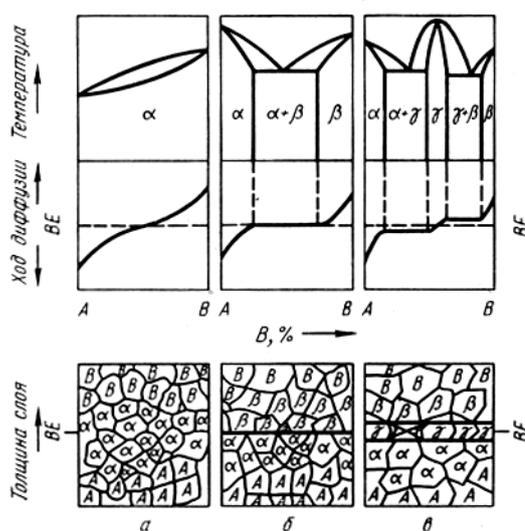


Рис.15. Ход диффузии и схематическое изображение структуры в бинарных системах различных типов А-В

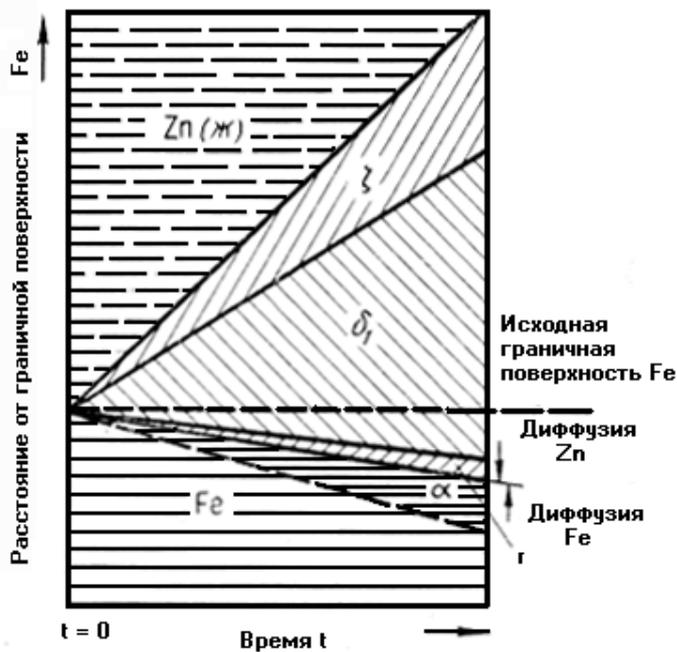


Рис.16. Изменение структуры покрытия цинка на железе по мере увеличения продолжительности погружения.

На рис.16 показана упрощенная схема формирования переходной зоны с течением времени при горячем цинковании железа. Получаемая переходная зона имеет сложную структуру, согласующуюся с диаграммой состояний системы Fe-Zn (α – твердый раствор Fe-Zn, интерметаллические соединения: Γ - Fe-Zn₃, Fe₃-Zn₁₀, Fe₅-Zn₂₁, δ - Fe-Zn₇, Fe-Zn₁₀, ξ - Fe-Zn₁₃).

Достоинством технологии получения покрытий методом погружения в расплав является высокая производительность, использование агрегатов непрерывного действия (обработка лент, полос, проволоки). К недостаткам

можно отнести узкий круг материалов покрытия, связанный с ограничением рабочих температур ванны с расплавленным металлом.

Наиболее распространенные материалы, используемые для получения покрытий методом погружения в расплав, представлены в таблице 8.

Горячее цинкование. Один из основных способов получения цинковых покрытий. Антикоррозионная защита стальных листов, труб, проволоки и т.д. Толщина покрытия от нескольких микрон до 100 мкм.

Алюминирование. Высокие коррозионностойкость и жаростойкость покрытий. Защита стальных листов, полос, проволоки. Используется для защиты труб, глушителей автомобилей, печей, теплообменников.

Таблица 8

Металлы и сплавы для покрытий

Материал покрытия	Материал основы
Цинк и его сплавы	Углеродистая сталь, литейный чугун, медь, латунь, бронза
Алюминий и его сплавы	Углеродистая и коррозионностойкая стали, медь
Олово	Сталь, литейный чугун, латунь, бронза, никель, алюминий
Свинец и его сплавы	Сталь, медь, алюминий, цинк

Горячее лужение. Назначение покрытий – защита от коррозии, получение промежуточных покрытий. Область применения: из «белой жести» изготавливают водосточные трубы, крыши зданий, емкости для бензина, консервные банки.

3.3.2 Плакирование

Плакированные материалы представляют собой двух- или многослойные материалы, полученные методом плакирования, т.е. различными методами механического соединения. Свойства плакированных материалов могут превосходить свойства отдельных исходных материалов и зависят от сочетания выбранных материалов основы и покрытия. Можно получить комбинацию свойств в одном изделии: прочность и пластичность, коррозионно- и износостойкость, сочетание физических свойств (электрические, магнитные, тепловые и т.д.).

Прочность сцепления контактирующих металлических слоев зависит от многих факторов. В первую очередь отметим условия получения физического контакта: развитая топография поверхности с учетом ее тонкой структуры, разрушение оксидных пленок и увеличение площади поверхности сцепления при обработке плакированных материалов давлением.

Важным технологическим параметром при плакировании является температура. При повышении температуры поверхностная энергия и пластичность большинства металлов увеличиваются, а процессы диффузии протекают более интенсивно, благодаря чему достигается более высокая прочность сцепления.

Благоприятные предпосылки для сваривания слоев возникают и тогда, когда в процессе обработки давлением обеспечивается возможно большее увеличение площади соединяемой поверхности и достигается напряженное состояние в плоскости соединения с возможно более высокими сжимающими напряжениями. Растягивающих нормальных напряжений в плоскости соединения следует избегать. Подходящими процессами обработки давлением являются прокатка, штамповка на прессе, прессование профилей, волочение. Следует избегать, например, применения поперечной прокатки в косых валках при получении плакированных труб, поскольку в плоскости соединения при этом формируется напряженное состояние с растягивающими напряжениями.

Напряженное состояние, действующее во время обработки давлением в плоскости соединения, зависит от: химического состава компонентов плакированного материала; температуры; степени деформации; скорости деформации); геометрии очага деформации (характера течения материала); структуры биметалла (пакета); доли отдельных компонентов плакированного материала в площади поперечного сечения; шероховатости поверхности и наличия поверхностных слоев.

Всегда следует учитывать сложный характер взаимосвязи между увеличением площади, температурой и напряженным состоянием в плоскости соединения и влияние этих факторов на процесс схватывания.

Промышленность выпускает плакированные материалы сразу в виде изделий или полуфабрикатов – листы, полосы, трубы, проволоку, сортовые профили (рис.17). Наиболее распространенные технологические способы получения плакированных материалов: прокатка двух листов, пакетная

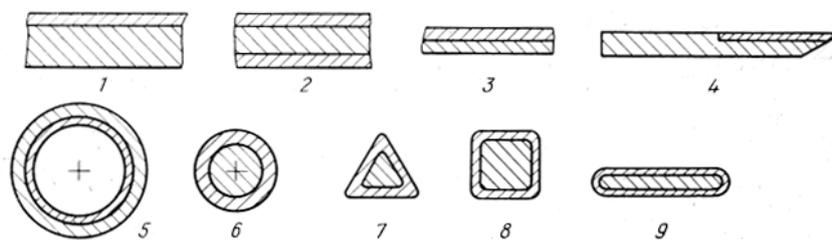


Рис.17. 1, 2 – плакированный лист; 3 – термобиметалл; 4 – ножевой биметалл; 5 – плакированная труба; 6-9 – плакированные прутковая сталь, проволока, сортовые

прокатка, взрывное прессование, прессование труб, комбинированное литье. Из них изготавливают аппараты и резервуары для химических производств, для нефтехимической промышленности, биметаллический режущий инструмент (самозатачивающийся).

Метод плакирования обеспечивает высокую производительность технологических процессов, высокую адгезию, отсутствует ограничение на толщину соединяемых материалов. Существенным недостатком плакирования является использование его для получения в основном изделий и полуфабрикатов простой формы (рис.17).

Высокая адгезия плакированных листов объясняется созданием хорошего физического контакта между соединяемыми поверхностями и высокой энергетической активацией атомов контактирующих поверхностей, особенно ярко этот механизм проявляется при взрывном прессовании.

Повышение качества плакированного материала можно обеспечить за счет дополнительной термической обработки. При этом следует учитывать возможность протекания нежелательных процессов диффузии в области границы с образованием хрупких фаз и появления пластической деформации вследствие различия коэффициентов термического расширения компонентов плакированного материала.

3.3.3 Эмалирование

Для защиты поверхности от коррозии при высоких температурах, от воздействия агрессивных сред, для повышения износостойкости широкое применение нашли эмалевые покрытия. В общем случае они включают в себя несколько типов покрытий: Эмалевые (стекловидные), стеклокерамические, стеклометаллические и керамические. Всех их объединяет вид технологического процесса нанесения покрытия – подготовка поверхности, приготовление эмали (шликера), нанесение шликера на поверхность, сушка и обжиг (при 700 –1000 °С) покрытия. Существует несколько способов нанесения эмали на металлическую поверхность: окунание, пульверизация, полив,

электростатический и электрофоретический методы при нанесении мокрым способом. Выбор соответствующего способа определяется как типом материала, конструкцией и требованиями к эмалированной поверхности, так и экономическими соображениями.

Таким образом, эмаль представляет собой стекловидную массу, образующуюся за счет расплава, состоящую из неорганических веществ. Основу эмали составляют окислы кремния. В особых случаях с помощью направленной кристаллизации можно получить эмалевый слой, имеющий кристаллическую структуру.

По назначению все эмали можно разделить на две группы: грунтовые и покровные. *Грунтовая эмаль* равномерно распределяется непосредственно на поверхности металла и обеспечивает сцепление между покровной эмалью и металлом. Для достижения хорошего сцепления, особенно для грунтовых эмалей, наносимых на листовую материал, необходима добавка окислов сцепления. *Покровная эмаль* определяет потребительские свойства изделия. Эти эмали можно классифицировать, например, на прозрачные, цветные и тусклые, кислотостойкие, высококислотостойкие и стойкие к щелочам. Соответственно назначению эмали могут иметь самые разные составы. Цветные эмали содержат краситель, который входит или в структуру стекла или тонко диспергирован в стекле. В качестве красителей используют окись кобальта (голубой цвет), окись хрома (зеленый), сульфид кадмия (желтый), окись железа (коричневые тона), сульфид кадмия + селенид кадмия (красный), смесь окисей хрома, кобальта, марганца, железа и меди (черный).

Эмаль не является самостоятельным материалом. Она применяется только в сочетании с металлом, т.е. их следует рассматривать как комбинированный материал, эмалированный металл. При этом каждая из составляющих выполняет свою роль. Металл обеспечивает изделию прочность, теплопроводность, электропроводность, магнитные характеристики. Эмалевое покрытие определяет такие свойства, как твердость, стойкость к истиранию, электроизоляции, коррозионно- и кислотостойкость, декоративный внешний вид.

Сцепление эмали с металлом. Одним из требований, предъявляемых к эмалированному изделию, является прочность сцепления эмали с металлом. Принято считать, что хорошее сцепление эмали со стальным листом обеспечивается только тогда, когда металл содержит так называемые окислы сцепления (0,3—0,5 % CoO или до 1 % NiO, или и то и другое одновременно) или когда поверхность листа предварительно никелирована методом окунания. Основная задача этих окислов – формирование микрошероховатости поверхности металла и образование сцепляющего слоя на границе из окиси железа. Механизм сцепления эмали с чугуном более прост. Поверхность с шероховатостью, полученной после пескоструйной обработки, имеет достаточное количество углублений для закрепления эмали. Сцепление между грунтовой и покровной эмалями объясняется простым склеиванием и свариванием двух высоковязких расплавов и поэтому не требует дальнейшего теоретического объяснения.

Наряду с представлениями механического зацепления имеются также чисто химические теории. Они основаны на том, что между силикатным слоем, сцепляющим слоем, образованным из оксида железа, и железом существует действительная связь имеющая химическую природу. Подобный химический механизм описывает сцепление эмали с алюминием и образование адгезионной связи при эмалировании сплавов.

Дополнительным фактором получения высокой адгезии эмалей к основному материалу является следующее условие: коэффициент теплового расширения эмали должен быть несколько меньше, чем коэффициент теплового расширения у покрываемого металла. Если $\alpha_{Fe} < \alpha_э$, то затвердевание эмалевого слоя сопровождается растягивающими напряжениями, приводящими к образованию трещин. При $\alpha_{Fe} > \alpha_э$ в эмали, напротив, развиваются напряжения сжатия, которые могут вызвать ее отслаивание только при больших значениях напряжений или на изделиях с малым радиусом кривизны.

Таким образом, напряжения тем больше, чем больше разность коэффициентов теплового расширения и чем выше температура, при которой затвердевает эмаль. При постоянной толщине покрываемого листа и увеличении толщины эмалевого слоя напряжения уменьшаются. При постоянной толщине слоя эмали и увеличении толщины листа, наоборот, возрастают.

Эксплуатационные свойства эмалей и эмалированных изделий. Важнейшими механическими свойствами эмали являются прочность, твердость, прочность сцепления и прочность на удар.

По прочности и твердости эмали сравнимы с техническими стеклами. Временное сопротивление разрыву мало вследствие их хрупкости. При механическом эмалированных чугуновых изделий в процессе эксплуатации основной характеристикой становится прочность эмали на сжатие; в случае же эмалированных листов всегда имеет место комбинированное нагружение, включающее сжатие, растяжение и изгиб.

Твердость определяет прочность на истирание. По механической прочности на истирание эмали сравнимы со стеклами, если эмалевый слой плотный и непористый, а так же не имеет большого числа пузырей.

Прочность эмалевого слоя на удар является комплексным параметром, учитывающим прочность на сжатие, растяжение и изгиб, упругость, хрупкость и прочность сцепления. Кроме того, большую роль играет деформация металла, появляющаяся вследствие удара или соударения, так как эмаль испытывает тем более интенсивные механические нагрузки, чем сильнее деформирован лист.

Кроме того, прочность на удар зависит от толщины эмалевого слоя. Очень тонкие слои деформируются в определенных пределах без появления макродефектов, поэтому значение прочности на удар велико.

Большинство эмалированных изделий испытывает воздействие высоких температур и их изменений. При этом для практики значение имеют теплопроводность, термостойкость и стойкость к изменению температуры.

По сравнению с металлами теплопроводность эмалей низка. Кроме того, она зависит от пористости (наличия пузырей). У сильно пористой эмали

теплопроводность примерно на треть ниже по сравнению с той же величиной плотной эмали. Но следует отметить, что для нагрева эмалированных сосудов (например, при варке) требуется меньшее количество тепла, чем для неэмалированных. Это объясняется, во-первых, меньшим теплоотводом поверхностей, не соприкасающихся с источником тепла, и, во-вторых, лучшим поглощением излучаемой энергии и связанной с этим более высокой способностью эмали аккумулировать тепло.

Термическая стойкость обычных эмалей представляет меньший интерес, но играет важную роль в обеспечении высокотемпературной защиты от коррозии. Легированные стали, покрытые эмалью в целях коррозионной защиты, выдерживают температуры примерно 1000-1200⁰С, а иногда и выше.

Наряду с многообразным применением эмалированных изделий в быту они широко используются прежде всего в промышленности и технике, например при изготовлении силосных сооружений, резервуаров, трубопроводов, аппаратов, устойчивых к кислотам и щелочам, котлов, автоклавов, вывесок.

Для защиты от высокотемпературной коррозии металлов оправдали себя жаропрочные покрытия. В строительстве используют как эмалированные стальные листы, так и эмалированный алюминий в виде листов и фольги. Такого типа архитектурные эмалированные детали находят применение при оформлении фасадов и интерьеров.

3.4 Химическое осаждение покрытий

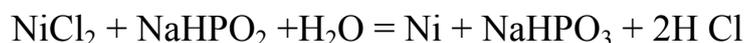
В основе данного способа лежит процесс создания на поверхности изделия тонкой пленки за счет проведения вблизи поверхности химической реакции с выделением одного или нескольких элементов (металлы и неметаллы) и осаждением их на поверхность. В отличие от металлизации (метод погружения в металлический расплав) и химико-термической обработки при осаждении главными механизмами являются осаждение продуктов реакции, их адсорбция, получение пленки, в то время как в других случаях процесс развивается дальше – идет абсорбция, диффузия, массоперенос. Такое различие определяется технологическими параметрами сравниваемых процессов: время $\tau < 1$ час (осаждение), $\tau = 3 - 10$ час (металлизация, ХТО), и температура процесса $T = 50-100$ °С и $T = 500-900$ °С соответственно.

Исходными материалами в технологии химического осаждения могут быть смеси газов, водные растворы солей металлов и др. Материал покрытия получается в результате реакций различного типа, например реакция обмена, реакция восстановления, реакция окисления. Невысокие скорости осаждения позволяют точно контролировать толщину покрытия.

Химическая металлизация может проводиться в растворах за счет реакций обмена, таких как хромирование



или за счет реакций восстановления – никелирование



Толщина покрытия 15-20мкм достигается за 1 час при температуре процесса 90 °С. После никелирования изделие подвергают термообработке в течение 1 часа при температуре 350-400 °С. Способ позволяет повысить стойкость пресс-форм для литья под давлением, штампов, лезвийных инструментов.

Улучшение режущих свойств и стойкости инструментов можно обеспечить за счет покрытия режущей части инструмента из быстрорежущих сталей износостойкими пленками никель-фосфора. Никель-фосфорное покрытие уменьшает силу трения при резании, резко снижает температуру резания, облегчает выход стружки, обеспечивает высокую износостойкость инструмента. Никель-борирование применяют для повышения износостойкости, твердости и коррозионной стойкости. Никель-кобальт-фосфатирование выполняют в целях повышения износостойкости и антифрикционных свойств стальных деталей сложной конфигурации (пресс-формы, крышка клапана, инструмент и др.), работающих в условиях трения при повышенных температурах.

Фосфатирование представляет процесс формирования слоя фосфата на металлической поверхности. Основное назначение такого покрытия защита от

коррозии. Фосфатная пленка черных металлов имеет толщину от 2 до 50 мкм, весьма прочно сцепляется с основой, жаростойка до 600°C. Данная технология нашла применение при упрочнении поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, пальцев верхних головок шатунов, зубчатых колес и др.

Оксидирование – процесс искусственного образования оксидной пленки на поверхности металла. Оксидная пленка черных металлов состоит из мельчайших кристаллов окиси железа Fe_3O_4 .

Композиты. Если в никельсодержащий раствор ввести мелкодисперсные вещества типа алмаза, карбидов или нитридов бора, вольфрама, кобальта или хрома, то при восстановлении никеля из суспензии образуется комплексный осадок, обладающий высокой износостойкостью. Износостойкость можно повысить за счет создания многослойных покрытий. Первый слой химическое никелевое покрытие, последующие - из никеля, содержащего окислы, карбиды, нитриды и т.д. Для улучшения приработки инструмента в наружных слоях осаждают более мягкие компоненты, например, электрокорунд, а во внутренних более твердые, например, карбид бора. Износостойкость многослойных покрытий выше, чем однослойных.

3.5 Гальванические покрытия

3.5.1 Электрохимического осаждения покрытий

Электрохимическое осаждение металлов относится к самым старым способам повышения качества поверхности изделия. Гальванические покрытия нашли широкое применение в промышленности благодаря широкому выбору материала покрытия (практически все металлы) и высокой технологичности процесса.

Принципиальная схема гальванического процесса представлена на рис.18. В водный раствор соли металла опускают пластину из того же металла (анод) и изделие, на которое надо нанести покрытие (катод). При пропускании постоянного электрического тока идет процесс электролиза: пластина растворяется, на поверхности изделия образуется покрытие.

Процесс электролиза в гальванической ванне контролируется следующими явлениями. В объеме электролита – растворение металла анода, выпадение металла в осадок, электролитическая диссоциация в электролите, перемещение продуктов реакции (конвекция, диффузия, перенос электрическим полем). На границе раздела фаз – адсорбция на поверхности, поверхностная диффузия, кристаллизация. В объеме изделия (катада) – объемная диффузия.

Характеристики процесса и получаемого покрытия при электролизе определяются следующими технологическими параметрами: материал основы, материал покрытия и его электрохимические характеристики, состав электролита, плотность электрического тока, время и температура процесса, форма катода и его положение относительно анода. Эти параметры определяют скорость роста покрытия, его толщину, однородность материала покрытия, вид поверхности – гладкая, матовая, пористость покрытия. По описанной выше технологии получают катодные покрытия из чистых металлов или сплавов. Другой разновидностью гальванических покрытий являются анодные покрытия. В данном случае в ванну заливается электролит специального состава (щелочные растворы окислителей), изделие играет роль анода. При пропускании электрического тока у поверхности изделия выделяется кислород, который образует на поверхности изделия прочную защитную пленку из оксидов. Процесс оксидирования нашел широкое применение для защиты поверхности изделий из Al, Zr и др.

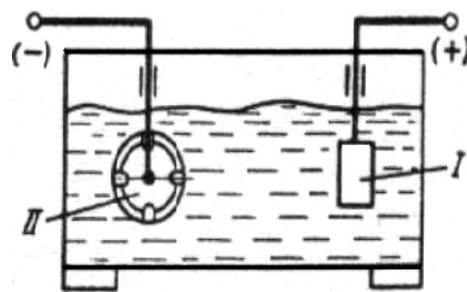


Рис.18. Схема метода нанесения электролитических покрытий; 1-материал покрытия (анод), 2-изделие (катод)

На алюминии оксидная пленка естественного происхождения или полученная химическим путем толщиной от 0,5 до 5 мкм прочно сцепляется с основным металлом, имеет значительную твердость и высокую износостойкость, пористость в среднем около 20% и жаростойкость до 1500 °С.

Электролитическое хромирование

Электролитическое хромирование как технологический метод повышения износостойкости стальных изделий занимает одно из первых мест.

Хромирование применяют для повышения износостойкости и восстановления деталей машин, контрольного, измерительного и режущего инструмента, а так же формообразующих элементов штампов и пресс-форм, дыропробивных пуансонов и матриц.

Хром отличается высокой твердостью, значительной прочностью сцепления со сталью и химической стойкостью. Свойства его в значительной степени зависят от режима осаждения на поверхность. Изменяя только плотность тока и температуру раствора электролита, можно изменять твердость покрытия в пределах НВ 450-1000. При этом износостойкость покрытия может изменяться почти в 10 раз.

Используя различные специальные приемы можно получить разные виды хромовых покрытий. Так регулируя технологические параметры температуру и плотность тока получают поверхность – гладкую, блестящую; гладкую, полублестящую; очень твердую; матовую и хрупкую. При химическом травлении получают пористое хромовое покрытие.

Для каждого вида хромового покрытия существуют наиболее выгодные условия его применения.

Гладкое хромовое покрытие целесообразно применять для деталей, работающих в условиях достаточного смазывания и при небольших скоростях скольжения.

Пористое хромовое покрытие менее износостойко, чем гладкое покрытие. В условиях же недостаточного смазывания преимущество имеет пористый хром, так как находящееся в порах смазочное масло предотвращает возникновение трения без СМ и образование очагов схватывания.

Коэффициент линейного расширения хрома в 1,5 раза меньше коэффициента линейного расширения стали. При больших толщинах хромового покрытия возрастает опасность отслаивания. Тем не менее применяют покрытия толщиной до 1,6 мм.

Детали с небольшой толщиной слоя (5-7,5 мкм) хромируют около 15 минут. Толщина покрытия инструмента составляет 0,05 мм; пресс-форм для пластмасс 0,01 мм, подшипников скольжения, валов насосов, поршневых пальцев 0,2 мм и более. Номинальная толщина слоя для крупных валов составляет 1,4 мм. Поршневые кольца автотракторных двигателей хромируют на толщину 0,10-0,15 мм.

Электролитическое никелирование

Процесс никелирования позволяет получать покрытия износостойкие, коррозионно-стойкие и декоративные. Широкое применение на практике электролитическое никелирование получило для повышения износостойкости и для восстановления шпинделей металлорежущих станков, поршневых пальцев, гильз цилиндров, поршней гидравлических машин, направляющих, втулок и др. При восстановлении толщина слоя может достигать 1,25 мм. Коэффициент линейного расширения никеля близок к коэффициенту линейного расширения стали, что обеспечивает высокое значение адгезии никелевых покрытий и способность их работать в условиях больших нагрузок при переменных температурах.

Для увеличения твердости и прочности сцепления покрытия с основным металлом деталь подвергают нагреву в течение 1 часа при температуре 300-400 °С.

При трении без СМ износостойкость никелевого покрытия в 2,5-3 раза выше, чем закаленной стали, и на 10-20% ниже, чем электролитического хрома. Мощность источников постоянного тока при никелировании в 3-4 раза меньше, чем при хромировании, а расход электроэнергии меньше в 20 раз.

Для повышения износостойкости покрытия применяют электролитическое осаждение сплавов никеля с другими металлами.

Электролитическое железнение

Железнение – процесс электролитического осаждения железа из водных растворов его закисных солей. Железо осаждают на катоде; анодом служат прутки или полосы малоуглеродистой стали.

Электролитически осажденное железо отличается высокой химической чистотой, благодаря чему его коррозионная стойкость выше, чем малоуглеродистой стали; по структуре состоит из вытянутых по направлению к покрываемой поверхности зерен.

Наиболее широкое применение железнение нашло как средство наращивания металла на изношенную поверхность стальных и чугунных деталей при восстановлении их размеров. Железнение является экономически весьма эффективным способом восстановления деталей: компоненты электролитов недефицитны, скорость наращивания слоя высокая, толщина слоя может достигать 8 мм. Если необходима более высокая твердость, например при восстановлении цементованных изделий, то прибегают к хромированию или цементации покрытия.

Для получения износостойких покрытий с повышенными механическими свойствами и улучшенной структурой железнение производят в электролитах, содержащих марганец или никель. Иногда применяют совместное осаждение на катоде железа и углерода. Содержание углерода в покрытии может быть доведено до 0,6%. Такие покрытия хорошо закаливаются и шлифуются. Покрытия получаются пористыми, с мелкими, равномерно распределенными порами.

Электролитическое осаждение сплавов

Осаждение сплавов дает возможность улучшить качество осаждаемых слоев покрытия. При обычных температурах и специфических условиях, определяемых условиями кристаллизации, можно управлять составом и структурой покрытия и получать свойства, которые нельзя получить другими способами. Возможно также образование метастабильных фаз, которые при заданном химическом составе отклоняются от соответствия с диаграммой равновесия для сплавов данной системы.

Особый интерес представляет возможность осаждать в виде компонентов сплавов такие металлы, как вольфрам, молибден и титан, поскольку в чистом виде они не могут быть осаждены из водных растворов. При этом следует учитывать, что внедрение таких металлов во многих случаях осуществляется не в металлической, а в оксидной или гидроксидной форме. Важными свойствами покрытий в виде сплавов являются магнитная проницаемость, остаточная намагниченность, сверхпроводимость, способность к пайке, износостойкость и, разумеется, коррозионная стойкость. В сочетании с последующей термической обработкой таким путем можно получить высокие показатели.

Наиболее часто применяемые сплавы для электролитических покрытий приведены в таблице 9.

Таблица 9

Примеры применения сплавов для гальванических покрытий

Сплав	Области применения
Sn → Zn	Защита от коррозии чугуна и стали, меди и латуни; припой
Zn → Ni	Защита от коррозии чугуна и стали
Cu → Sn	Декоративные покрытия для защиты от коррозии стали (украшения, бытовые товары); подшипники скольжения; отражательная способность покрытия

Для повышения износостойкости рабочей поверхности штампов и обеспечения ее постоянной смазки применяют покрытие электролитическим осаждением твердого пористого слоя сплава никеля с кобальтом, с последующими операциями расширения пор и пропитки политетрафторэтиленом. Покрытие увеличивает срок службы штампов и пресс-форм.

Пресс-формы и литейные формы для литья деталей из алюминиевых сплавов под давлением рационально упрочнять осаждением 9-12 мкм сплава никель–вольфрам. Многократное повышение термической стойкости формообразующих элементов пресс-форм при нанесении вольфрамоникелевого покрытия обусловлено аморфной структурой покрытия. Высокие твердость и пластичность вольфрамоникелевого покрытия пресс-форм при литье под давлением деталей из алюминиевых сплавов обеспечивают надежную защиту

формообразующих элементов от механического изнашивания и термических трещин.

3.5.2 Композиционные электролитические покрытия

Высокие эксплуатационные характеристики гальванических покрытий и широкое их применение в машиностроении были получены в результате разработки технологии получения композиционных электролитических покрытий (КЭП). Такие покрытия получают из суспензий, представляющих собой электролиты с добавкой определенного количества высокодисперсного порошка. В качестве катода используется упрочняемая деталь. При прохождении тока через электролит на детали осаждается металл (первая фаза или матрица) и частицы порошка (вторая фаза), которые скрепляются матричным материалом.

В отличие от электролитических покрытий в структуре КЭП находится вторая фаза, что существенно влияет на их физико-механические, в частности триботехнические, свойства. В качестве материала второй фазы применяются бориды, карбиды, нитриды, силициды, абразивные порошки и т.д. Матричным материалом в КЭП чаще всего служит никель, так как он обладает сродством к большинству частиц, применяемых в качестве второй фазы, и легко образует с ними покрытия. Кроме никеля находят применение железо, кобальт, хром, медь, благородные металлы.

Особый интерес представляет покрытия, содержащие высокотемпературные бориды. Так, детали, на поверхность которых нанесено покрытие хром-борид циркония, работает при температуре 2000—2500°C. Вольфрам с таким покрытием выдерживает температуру 3300—3600°C. Высокие защитные свойства покрытия Cr-ZrB₂ обусловлены химической стойкостью диборида циркония. Важным преимуществом КЭП по сравнению с гальваническими покрытиями является твердость и прочность, которые могут достигать широких пределов за счет объемного содержания второй фазы, ее размеров и расстояния между упрочняющими частицами. Существенное влияние на твердость и прочность оказывает материал матрицы.

Износостойкость КЭП в несколько (иногда и в десятки раз выше, чем чистых покрытий). Оптимальные размеры и концентрация твердых частиц в покрытии оказывает благоприятные условия на создание износостойких вторичных структур на поверхности трения. Пластичная деформируемая матрица равномерно перераспределяет нагрузку по всей площади трения детали, воспринимая эту нагрузку от твердых включений, которые надежно удерживаются в матрице. Сравнительные испытания композиционных боридных покрытий на трение и изнашивание позволяют рекомендовать их для деталей машин, работающих в тяжелых условиях контактного взаимодействия (трение без смазки, в вакууме и коррозионных средах, при высоких температурах).

Достоинства и недостатки технологий химических и электролитических покрытий

Достоинства.

1. Широкий выбор исходных материалов.
2. Высокое качество покрытия (высокие плотность, однородность, химическая чистота).
3. Низкая температура процесса (сохраняется структура и фазовый состав основного материала).

Недостатки.

1. Небольшая толщина покрытия.
2. Низкая скорость толщины покрытия.
3. Наличие токсических веществ в составе электролитов и растворов солей.

3.6 Электрофизические методы нанесения покрытий

3.6.1 Электроискровое легирование

Электроискровое упрочнение поверхности или электроискровое легирование (ЭИЛ) является эффективным методом поверхностного упрочнения деталей машин, изготовленных из обычных конструкционных материалов. Оно позволяет получать покрытия, прочно сцепленные с материалом основы и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками.

Процесс ЭИЛ основан на преимущественном разрушении (эрозии) материала анода при искровом разряде и переносе его на поверхность катода (изделия) (рис.19). Основные закономерности и явления, определяющие процессы ЭИЛ, зависят от материала легирующего электрода и режимов обработки.

Механизм процесса ЭИЛ отличается значительной сложностью, представляя собой совокупность эрозионного, термического и термохимического процессов и контактного переноса материала.

Упрочнение поверхностного слоя детали происходит не только за счет осаждения материала анода, но и в результате взаимодействия этого материала с основой и образования твердых растворов, химических соединений, оксидов, нитридов. Эффект упрочнения при ЭИЛ увеличивается еще и потому, что происходит импульсное воздействие температур и давлений, приводящих к измельчению структуры и образованию новых фаз.

Для упрочняющих электродов (анода) применяют твердые сплавы, составляющими которых являются карбиды титана и вольфрама и кобальт, феррохром, хром-марганец, хром, алюминий, белый чугун, сталь Ст3 и графит.

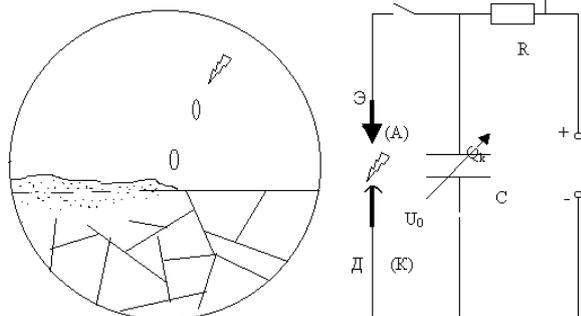


Рис. 19. Схема упрочнения поверхности методом электроискрового легирования

Легирование упрочненного металла тугоплавкими соединениями бора с титаном, хромом, вольфрамом приводит не только к частичной диссоциации этих соединений в процессе ЭИЛ и образованию легированных твердых растворов, но и упрочнению частицами боридов (10-15 мкм), которые образовались в результате хрупкого разрушения электрода (анода)

и как продукты эрозии осаждаются на катоде.

При ЭИЛ получается упрочненная поверхность толщиной до 0,1 мм. Верхний белый «нетравящийся» слой состоит из аустенита и мартенсита, нитридов железа и карбидов легирующих элементов. Белый слой образуется и в том случае, если электрод изготовлен из алюминия или меди. Подслой

представляет собой структуру типа мартенсита и троостита, а иногда и сорбита, и является диффузионным слоем, постепенно переходящим в материал основы.

Электроискровое упрочнение применяют для повышения износостойкости и твердости поверхности деталей машин, работающих в условиях повышенных температур; для увеличения размеров изношенных деталей машин при ремонте.

Технологию ЭИЛ используют для упрочнения поверхностей рабочих деталей дорожных, строительных и землеройных машин, работающих в абразивной среде; лопатки дробеструйных аппаратов; детали механизмов литейных цехов. Электроискровое упрочнение получило также применение для восстановления и упрочнения посадочных мест в неподвижных сопряжениях и скользящих посадках.

Электроискровому упрочнению подвергаются поверхности деталей машин типа кулачков, направляющих, фиксаторов поверхности шпоночных пазов, шлицев, деталей, изготовленных из конструкционных легированных и углеродистых сталей.

Электроискровое упрочнение не требует предварительного нагрева и последующей их термообработки; не вызывает коробления. Упрочненный слой имеет высокую износостойкость, а при достаточной глубине и соответствующем подборе электродов – высокую жаростойкость. Наклеп позволяет исключить неблагоприятное влияние электроискрового упрочнения на сопротивление усталости.

Недостатком ЭИЛ является сложность получения покрытий из неэлектродных материалов и необходимость применения компактных электродов. Этот недостаток может быть частично устранен при получении ЭИЛ для нанесения покрытий из порошков. Принципиальная возможность получения такого рода покрытий найдена.

3.6.2 Электродуговое упрочнение

В ряде случаев слой толщиной 0,1 мм, полученный методом ЭИЛ на деталях из конструкционной углеродистой стали или чугуна недостаточно прочен. Для упрочнения слоя предложен комбинированный искродуговой метод, названный термоискровым. Сущность метода состоит в том, что нанесенный электроискровым способом с помощью твердосплавного электрода слой подвергается кратковременному воздействию электрической дуги, получаемой на той же установке при отключенной электрической емкости. При второй операции под белым слоем образуется слой толщиной 1,5-2 мм и твердостью, снижающейся от HV 1000 до HV 500. Шероховатость поверхности после комбинированного упрочнения примерно такая же, как после обычной наплавки. Метод применяют для упрочнения работающих в абразивной среде деталей прессов при изготовлении кирпича, деталей шнеков цементных заводов, машин керамического производства и т.д.

3.7 Наплавка

3.7.1 Назначение и виды наплавки

Наплавкой называется технологический процесс нанесения слоя расплавленного металла на оплавленную поверхность детали или изделия. Нанесенный металл после охлаждения прочно связывается с основным металлом, образуя покрытие. Впервые наплавку, как упрочняющую технологию осуществили в США в 1922г. для наплавки коронок нефтяного бура способом газовой сварки с использованием присадочного материала в виде стальной трубки, заполненной хромовым сплавом. Примерно в это же время была осуществлена наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания с помощью изобретенного Хайзеном сплава – стеллита (кобальтохромовольфрамового) сплава.

Основная цель наплавки – получение рабочей поверхности деталей машин и инструментов с повышенными свойствами, такими как износостойкость, коррозионностойкость и др. В настоящее время в технологии наплавки существует два направления:

- восстановительная наплавка деталей, подвергающихся интенсивному износу;
- изготовительная наплавка для удлинения срока службы деталей.

Восстановление изношенных деталей наплавкой оказывается экономически выгодно ввиду того, что масса наплавленного материала составляет всего лишь 2 – 4% от массы восстанавливаемой детали и это позволяет возвращать в строй действующих большую массу деталей. А если в качестве наплавленного материала используются специальные составы, то получается восстановленная деталь с повышенными характеристиками поверхности.

В основе технологии наплавки лежат те же процессы, что и технологии сварки. При этом из разных способов сварки, имеющих промышленное применение, для наплавки используются методы, обеспечивающие следующие условия:

- неглубокое и равномерное проплавление основного металла;
- образование ровного валика с хорошим внешним видом;
- отсутствие склонности к возникновению дефектов;
- высокая технологичность процесса;
- высокая скорость процесса.

Таким требованиям отвечают термические виды сварки.

Принятая классификация видов и способов сварки применяется и для наплавки. Виды наплавки в зависимости от формы используемой энергии: газовая наплавка (рис.20а), дуговая наплавка (покрытым электродом, под флюсом, открытой дугой, в среде защитного газа) (рис.20б), вибродуговая, электрошлаковая, индукционная, плазменная, лазерная, электронно-лучевая. Способы наплавки в зависимости от ведения технологического процесса: ручная, полуавтоматическая, автоматическая.

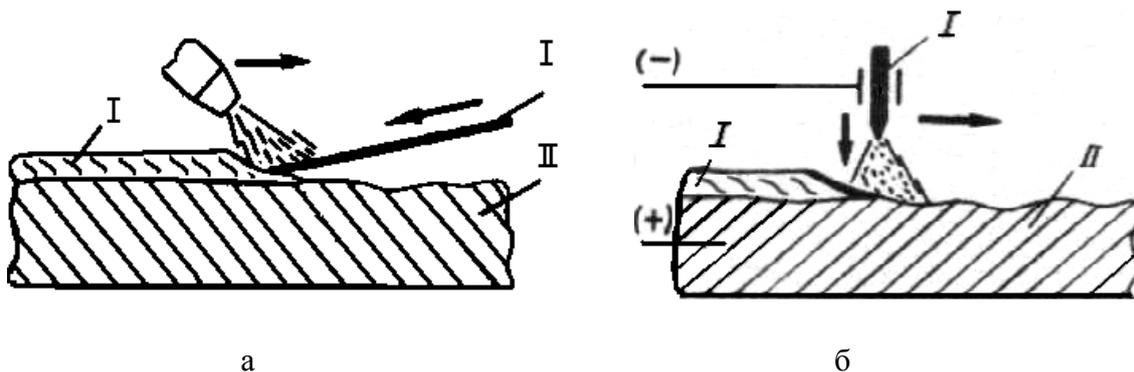


Рис 20. Схема электродуговой (а) и газопламенной (б) наплавки; I-расходный материал, II – изделие

Кроме указанных выше способов к технологии наплавки иногда относят следующие методы – контактная приварка (ленты), электроконтактная приварка (порошка), термическая наплавка (шликера, обмазки), центробежная металлизация.

Достоинства и недостатки технологии наплавки

По сравнению с другими способами обработки поверхности материалов технология наплавки обладает рядом преимуществ и недостатков. Рассмотрим достоинства технологии наплавки.

1. Возможность нанесения покрытия большой толщины за счет практически неограниченного числа наплавляемых слоев (от 0.25 до 5.0 мм и выше, электрошлаковая наплавка до 450 мм).
2. Высокая производительность (при использовании ленточных электродов до 15 – 25 кг/час).
3. Относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, возможность проводить ремонтные работы в полевых условиях.
4. Отсутствие ограничений на размеры ремонтируемых деталей.

Недостатки технологии наплавки связаны с высоким значением погонной энергии, используемой для получения в расплавленном состоянии как материала наплавляемого, так и материала детали. Ниже перечислены недостатки технологии наплавки.

1. Ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла.
2. Деформация изделия из-за высокого нагрева.
3. Ограниченный выбор сочетаний основного и наплавляемого металла из-за образования в ряде случаев (при плохой свариваемости) хрупкой прослойки интерметаллидов на границе покрытие - основа.
4. Трудность наплавки на поверхность мелких изделий сложной формы.
5. Невозможность наплавки на поверхность тонкостенных деталей.

3.7.2 Область применения наплавки

С учетом достоинств и невзирая на недостатки технология наплавки получила широкое применение в ремонтном производстве (восстановительная наплавка) и при изготовлении деталей с повышенным ресурсом работы (изготовительная наплавка).

Наплавка износостойких покрытий применяется для восстановления деталей сельскохозяйственных машин (валы, рычаги, тяги, крестовины, лемеха, лапы культиваторов), строительных машин (режущие кромки бульдозерных отвалов, зубья ковш экскаватора, детали ходовой части). Восстановительной наплавке подвергают разнообразные по форме и размерам детали железнодорожного подвижного состава, буровой инструмент, детали горнодобывающего оборудования.

Для ремонта металлургического оборудования (прокатные валки, конусы засыпных аппаратов доменных печей) наплавкой получают износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия, работающие при повышенных температурах.

Коррозионно-стойкие покрытия, работающие под нагрузкой и обеспечивающие механическую прочность, методом наплавки получают при изготовлении сосудов высокого давления, предназначенных для атомной энергетики и химической промышленности.

Таким образом, в отличие от других методов упрочнения, наплавка применяется, главным образом, для деталей, работающих в условиях повышенного износа и сопровождающихся ударными нагрузками, либо в условиях агрессивной среды при повышенных температурах.

Материалы для наплавки

В зависимости от технологии наплавки исходный (наплавляемый) материал выбирается в виде проволоки, стержня, электродов с обмазкой, порошка, порошковой проволоки. Для получения требуемых свойств покрытия выбирают материал определенного химического состава. Этот выбор определяется в первую очередь материалом восстанавливаемой детали, а также условиями ее эксплуатации.

Самым простым выбором являются электроды из углеродистой стали, которые применяются для восстановления изношенных деталей. Более качественную поверхность можно получить, используя электроды из легированных сталей (с легирующими элементами Cr, Ni, Mn, Mo и др.).

Для наплавки деталей, подвергающихся интенсивному изнашиванию, созданы специальные материалы – твердые сплавы. Рассмотрим некоторые из них. Эти сплавы можно разделить на три группы.

К первой группе относится *релит*, являющийся композицией литых карбидов вольфрама и используемый для наплавки быстроизнашивающихся стальных деталей в условиях интенсивного абразивного износа ударными нагрузками.

Ко второй группе относят *стеллиты* и *сормаиты*. Стеллиты – сплавы, содержащие главным образом кобальт и вольфрам либо никель и хром.

Стеллиты обладают высокой стойкостью против коррозии. Хорошая свариваемость позволяет использовать их для наплавки на инструменты. Сормаиты – сплавы на железохромовой основе с марганцем и никелем. Они менее твердые и красностойкие, чем стеллиты, но значительно дешевле, поэтому нашли широкое применение в восстановлении деталей сельскохозяйственных машин.

К третьей группе относится *сталинит*. Это сплав на железной основе, содержащий хром, марганец, кремний и до 7 – 10% углерода. Его применяют для наплавки деталей, подвергающихся грубому износу.

Природа упрочнения поверхности для каждого из применяемых материалов имеет свои особенности. При наплавке углеродистой стали упрочнение происходит за счет термических условий формирования поверхностного слоя – при высокой скорости охлаждения получают закалочные структуры с повышенной твердостью. Свойства поверхности после наплавки легированных сталей зависят от типа легирующих элементов, определяющих фазовый состав, границы фазовых переходов, механические свойства.

Твердые сплавы типа релит и стеллит обладают свойствами, определяемыми химическим составом (карбиды вольфрама в первом случае и сплавы на основе Co-W или Ni-Cr во втором случае). Сормаит и сталинит, содержащие высокий процент углерода, образуют твердый износостойкий слой с содержанием чугуна, в случае сталинита это легированный белый заэвтектический чугун. Одним из способов повышения прочности стали является измельчение зерна. При этом повышается предел текучести стали и одновременно снижается порог хладноломкости. Небольшие добавки бора вызывают значительное измельчение зерен, улучшают прокаливаемость стали, повышают ее жаропрочность, твердость, износостойкость. При этом легирование стали бором в небольших количествах позволяет значительно снизить степень их легированности такими элементами, как хром, никель, марганец и молибден при одновременном сохранении необходимого уровня механических и других свойств.

Проведенные исследования показали, что высокую износостойкость можно получить в эвтектических структурах, упрочняющей фазой которых являются бориды железа, титана, никеля, хрома, и других металлов. Поэтому бориды можно с успехом применять при создании композиционных структур для узлов трения, работающих в сложных условиях эксплуатации.

На структуру наплавленного металла, а значит и на его физико-механические свойства оказывает влияние не только количество легирующих элементов, но и технологические параметры наплавки. При изменении режима наплавки меняются процесс расплавления материала, геометрические характеристики наплавленного слоя, химическая макронеоднородность наплавленного металла. На износостойкость и ударную стойкость упрочненных деталей оказывают влияние в основном образующиеся в процессе наплавки бориды, их форма, размеры и расположение в матричном материале.

Матричный материал наплавленного покрытия, в котором расположены твердые частицы, не меньше влияет на его свойства, чем твердая фаза. Матрицы на основе железа изменяют свой состав в широких пределах – от аустенита и продуктов его превращения до их смеси в различных количественных и качественных соотношениях. Матричный материал характеризует степень закреплённости твердых включений, способность воспринимать знакопеременную нагрузку, а также сопротивляться изнашиванию ответной пары трения. Износостойкость матричного материала зависит от условий работы пары трения, характера воздействий контактных нагрузок и рабочей среды.

В Японии разработан способ поверхностного упрочнения деталей металлом, армированным волокнами-усами, монокристаллами, согласно которому на заготовку, отлитую из металла, наплавляют металл, армированный упрочняющими волокнами, и наплавленный слой после отверждения подвергают механической обработке. Армирующие волокна (усы-монокристаллы) изготавливают из Fe, W, SiO, C, B, а матрицы - из Fe, Al и их сплавов.

3.8 Напыленные покрытия

3.8.1 Газотермические покрытия

Среди других методов нанесения покрытий технологии напыления обладают заметным преимуществом. Во-первых, универсальностью выбора материала покрытий: покрытия металлические, полимерные, керамические, композиционные, покрытия из материалов с низкой и высокой температурой плавления, аморфные покрытия. Согласно приведенной выше классификации все технологии напыления можно разделить на две группы: газотермическое напыление и вакуумно-конденсационное напыление. При этом внутри каждой группы существует целый ряд методов напыления различающихся источником подводимой энергии, физикой протекающих процессов. Особенностью методов газотермического напыления (ГТН) является то, что получаемое покрытие формируется из направленного потока дисперсных частиц со средним размером 10-200 мкм (рис.21). Структура материала покрытия формируется при ударе, деформации и затвердевании нагретых частиц на поверхности основы (подложки) или предыдущих остывших частиц. При этом образуется слоистый материал, состоящий из деформированных частиц (сплэтов), соединенных

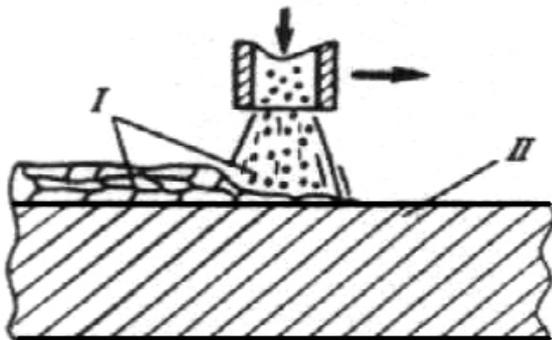


Рис.21. Схема нанесения газотермических покрытий; I – материал покрытия, II – изделие

контактными участками.

В зависимости от источника теплоты и движущих сил переноса различают следующие методы напыления: плазменное, газопламенное, детонационное, дуговая металлизация и высокочастотная металлизация. В первых трех методах источник нагрева совмещен с источником распыления и ускорения частиц. При дуговой и высокочастотной металлизации источники нагрева и ускорения разделены.

ускорения разделены.

Для создания потока частиц используют либо порошки, либо проволоку (стержни). При использовании проволоки поток частиц образуется посредством расплавления проволоки и ее распыления скоростным потоком автономного газа или самим источником теплоты (плазменной, газопламенной струей).

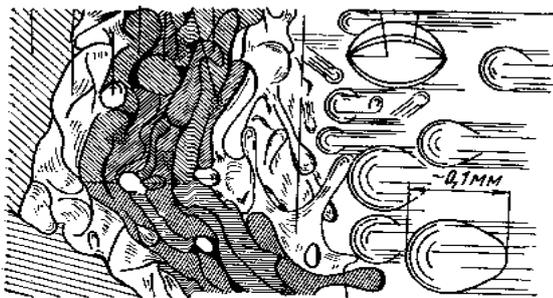


Рис. 22. Процесс нанесения покрытия

газа или самим источником теплоты (плазменной, газопламенной струей).

Процесс газотермического напыления покрытий представляет собой сложную совокупность физико-химических механических явлений. Его можно разделить на два основных этапа: формирование двухфазного потока (газовой струи с дисперсными частицами) и формирование самого

покрытия (рис.22).

К первому этапу относится процесс взаимодействия высокотемпературного газового потока и частиц, включающий в себя теплообмен и нагрев частиц, их ускорение при передаче количества движения от струи газового потока. На практике желательно получить перегрев напыляемых частиц в момент их подлета к поверхности (на 50 – 100°С выше температуры плавления материала частиц), с целью повышения прочности сцепления за счет увеличения пятна химического взаимодействия на границе частица подложка.

На втором этапе формируется покрытие при соударении расплавленных частиц с поверхностью основы, в результате чего частицы плотно ложатся друг на друга и, растекаясь, заполняют неровности шероховатой поверхности. Благодаря их высокой температуре в зоне контакта возникают участки схватывания (приваривания), и частицы прочно соединяются между собой и с основой с образованием сложной структуры покрытия (рис. 23). Граница раздела между покрытием и основой – 1 определяет прочность соединения

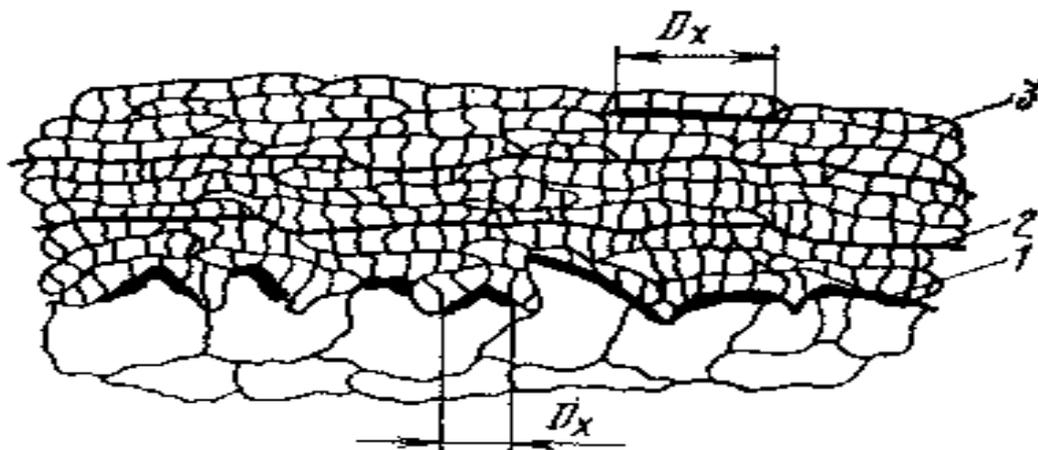


Рис.23. Схема структуры покрытия

(адгезия покрытия). Свойства самого покрытия обуславливаются прочностью сцепления между частицами по границе – 3 (когезия покрытия). Граница раздела между слоями (межслойная граница) – 2, полученная за один проход распылителя, возникает из-за различной выдержки во времени между нанесением частиц в слое и между слоями, в результате чего поверхность слоя покрытия загрязняется, окисляется. Пятно химического взаимодействия не заполняет всю площадь контактной поверхности между частицами и основой. Его диаметр – D_x зависит от интенсивности межатомного взаимодействия на границе частица – подложка.

Метод ГТН позволяет получать покрытия с заданной твердостью, износостойкостью, жаропрочностью, антифрикционностью, коррозионной стойкостью. Применять газотермические покрытия выгодно при любых масштабах производства – от индивидуального и малосерийного до высокопроизводительного автоматизированного.

Высокая эффективность и универсальность этого метода определяется следующими особенностями: возможностью нанесения покрытий из различных материалов – чистых металлов, сплавов, оксидов, боридов, карбидов и их сочетанием в различных пропорциях; возможностью получения покрытий на самых различных конструкциях и материалах – на металлах, стеклах, керамике, пластмассах и т.д.; малой деформацией напыляемого изделия; низким расходом материала покрытия, толщина которого составляет 0,1 –1,0 мм; высокой производительностью (от 1 кг/ч до нескольких десятков и даже сотен кг/ч в зависимости от способа напыления. Большим достоинством метода ГТН является возможность изменять в процессе напыления состав материала и его структуру от обычной до мелкозернистой и аморфной, что позволяет регулировать в широких пределах свойства получаемого покрытия.

Метод плазменного напыления

Первые газотермические покрытия были получены методом газопламенного распыления, затем была предложена технология электродуговой металлизации. Возможности ГТН существенно расширились с применением и источников низкотемпературной плазмы. Плазменное напыление резко повысило качество покрытий, поскольку появилась возможность в широких пределах управлять энергетикой процесса (рабочая температура плазменной струи от 5000 до 15000°K) и создавать покрытия практически из любых материалов, в том числе и из композиционных материалов, которые не могут быть получены другими методами.

Потребность в материалах с очень высокими эксплуатационными характеристиками появилась и непрерывно растет в связи с развитием новых отраслей техники, для которых характерно быстрое увеличение рабочих нагрузок, температур, агрессивности рабочих сред. Метод плазменного напыления позволяет получать покрытия отвечающие указанным требованиям. Так, для изготовления легких конструкционных деталей, работающих при высоких температурах, были предложены композиционные материалы с металлической матрицей (Al, Mg, Ti и другие легкие металлы и сплавы) армированные волокнами короткими, непрерывными или в виде нитевидных кристаллов (B, C, SiC, Al₂O₃, W). Повысить качество получаемых композиционных материалов возможно в сочетании технологии напыления с последующим горячим прессованием, прокаткой или пропиткой жидкими металлами или полимерами.

Плазменные покрытия обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой. К недостаткам метода можно отнести – сравнительно низкую производительность процесса напыления, шум при работе, интенсивное ультрафиолетовое излучение.

Метод детонационного напыления

Особые условия формирования покрытий имеют место при детонационно-газовом напылении покрытий. В этом методе используют специфический способ нагрева и распыления и ускорения напыляемых частиц.

Источник представляет собой высокоскоростной поток газовой смеси, образующейся в результате направленного взрыва, обусловленного детонацией. Детонация представляет собой процесс химического превращения взрывчатого вещества при распространении по нему детонационной волны с максимальной возможной скоростью, превышающей скорость звука в данной среде.

Детонационная волна образуется в камере водоохлаждаемого ствола установки (детонационной пушки), в которую одновременно с рабочей газовой смесью подается порошок напыляемого материала. Скорость продуктов детонации определяет скорость напыляемых частиц. Обычно это высокие скорости, достигающие 800 – 1200 м/с. При такой скорости частицы в момент столкновения с поверхностью подложки могут разогреваться до 4000°С и выше. Высокая скорость движения частиц и их разогрев при детонационном напылении обеспечивает получение покрытий высокой плотности и прочности сцепления с основой. При этом температура основного материала остается низкой, исключая его деформацию или иное физическое изменение, что позволяет использовать этот способ напыления для прецизионных деталей и для получения покрытий с высокой адгезией.

К недостаткам метода можно отнести низкую производительность метода – за один "выстрел" получается покрытие толщиной ≈ 6 мкм (производительность установки 4 – 5 "выстрела" в секунду, рабочая толщина покрытия 0,25 – 0,3 мм). Из-за большого шума (до 140дБ) оборудование для детонационного напыления приходится устанавливать в камере со звукоизолирующими стенами.

Газодинамическое напыление

Сущность традиционных газотермических методов нанесения покрытий заключается в необходимости нагрева дисперсного материала до температуры плавления или выше. Ускорения и переноса его до напыляемой поверхности высокотемпературными струями. В результате происходят сложные физико-химические процессы, включающие в себя реакции окисления, выгорания мелкодисперсных порошков, разложенные ряда материалов. Таким образом, наряду с позитивными процессами в этом случае реализуется и негативные, связанные с использованием высокотемпературных потоков газа или плазмы. К настоящему времени предложены и реализуются подходы, позволяющие уменьшить влияние негативных факторов на физико-технические характеристики покрытий и связанные в основном с оптимизацией процессов газотермического напыления.

Метод «холодного» газодинамического напыления (ХГН) позволяет решить эту важную проблему принципиально иным путем, используя в качестве основной не тепловую, а кинетическую энергию напыляемых частиц, ускоряемых холодным газом, и тем самым нивелировать негативные высокотемпературные эффекты.

Сущностью технологии ХГН является то, что покрытия формируются из нерасплавленных высокоскоростных частиц размером 50-0,01 мкм, ускоряемых в сверхзвуковых аэродинамических установках до скорости 1000м/с и более,

при температуре рабочего газа существенно ниже температуры плавления материала частиц.

Следовательно, отличительна особенность технологии ХГН (в сравнении с плазменной, газоплазменной, детонационной) состоит в том, что основным энергетическим источником формирования покрытий является кинетическая энергия напыляемых частиц, сообщаемая им сверхзвуковым потоком рабочего газа, что обеспечивает получение покрытий с минимальными температурными напряжениями без сквозных пор и микротрещин и обуславливает высокие электропроводящие, антикоррозийные и прочностные (адгезионно-когезионные) свойства.

Процесс адгезионного взаимодействия частицы с подложкой при газодинамическом напылении можно рассматривать в рамках подхода, широко используемого при анализе газотермического напыления. Однако следует учитывать, что при газодинамическом напылении более значительно, чем в газотермических методах, влияние кинетической энергии частиц, приводящее к некоторым существенным отличиям взаимодействия холодных и расплавленных частиц, характерных для газотермических методов напыления. Так температура в контакте “частица—подложка“ в случае холодных частиц будет зависеть от тепловыделения в зоне интенсивной пластической деформации, что несущественно при взаимодействии с подложкой расплавленных частиц. На адгезионное взаимодействие существенное влияние оказывает также упругая разгрузка, происходящая после прекращения пластической деформации. Для расплавленных частиц такой проблемы практически не существует.

Отличительной особенностью метода ХГН является возможность получения покрытий при температуре струи 0-500°C, меньшей температуры плавления материала частиц. В связи с этим отсутствуют эффекты высокотемпературного окисления, испарения, плавления, кристаллизации, газовыделения и т.д., характерные для газотермических методов. К преимуществам метода относятся:

- возможность использования порошков с размером менее 30-50мкм, в том числе ультрадисперсных, что приводит к улучшению качества покрытия: увеличивается его плотность, уменьшается объем микропустот. Структура становится более однородной. Появляется возможность уменьшить толщину покрытия;

- отсутствие существенного нагрева частиц и связанных с ним процессов высокотемпературного окисления, фазовых переходов, что позволяет получать покрытия со свойствами, близких к свойствам материала исходных частиц, а также композиционные покрытия из механической смеси порошков, значительно различающихся по физико-термическим свойствам;

- отсутствие существенного термического воздействия на обрабатываемое изделие, что позволяет наносить покрытия на подложке из нетермостойких материалов;

- простота технической реализации и улучшение безопасности работ в связи с отсутствием высокотемпературных струй.

Метод ХГН может найти широкое применение для получения антикоррозионных, упрочняющих, электропроводящих и других покрытий отдельных деталей и конструкций особенно из материалов и на материалы, допускающие ограниченное термическое воздействие, а также может быть использован для получения компактных порошковых материалов.

3.8.2 Вакуумно- конденсационные покрытия

Вакуумное конденсационное напыление (осаждение) (ВКН). Покрытие формируется из потока частиц, находящихся в атомарном, молекулярном или их ионизированном состоянии. Обобщенная схема процесса показана на рис.24.

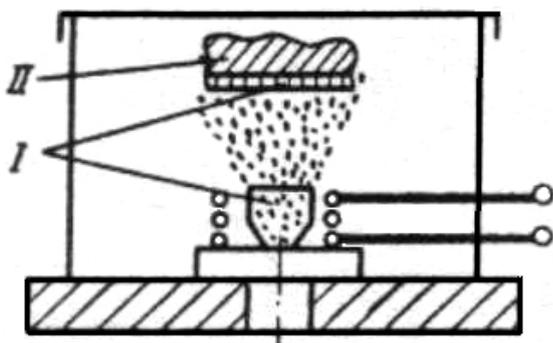


Рис.24. Схема метода вакуумного конденсационного напыления покрытий; 1 – материал покрытия, 2 – изделие

Для получения потока (пара) частиц используют различные источники энергетического воздействия на материал. Различают формирование потока частиц посредством термического испарения материала, ионным распылением или взрывным испарением - распылением. Соответственно этому вакуумное конденсационное напыление разделяют на методы. При ионизации потока напыляемых частиц реализуется способ ионно-плазменного напыления, а при введении в поток реактивного газа - вакуумное конденсационное напыление.

Процесс ВКН состоит из трех стадий: переход конденсированной фазы в газообразную, формирование потока и перенос частиц на поверхность изделия, конденсация паров на поверхности напыления и образование покрытия. Для получения покрытий с высоким качеством требуется строго соблюдать оптимальные режимы протекания процессов на каждой из трех стадий.

Вакуумное конденсационное напыление нашло широкое применения в различных областях техники. К преимуществам ВКН относятся высокие физико-механические свойства покрытий, возможность получения покрытий из синтезированных соединений (карбидов, оксидов, нитридов и др.), получение тонких и равномерных покрытий. В отличие от химических и электролитических методов получения тонких покрытий технология ВКН является экологически чистой. Возможности методов вакуумного конденсационного напыления позволяют получать покрытия толщиной от десятков нанометров до сотен микрометров из различных материалов с высоким качеством. Среди недостатков методов вакуумного напыления следует отметить низкую производительность процесса (скорость напыления около 1 мкм/мин), повышенную сложность технологии и оборудования (связанные с вакуумной системой), невысокие показатели энергетических коэффициентов распыления и напыления.

Метод термического испарения или термовакуумного напыления (ТВН).

Для нагрева и его последующего испарения применяются разнообразные источники тепловой энергии: резистивные нагреватели, электронный или световой (лазерный) лучи, индукционный нагрев, дуговой нагрев. Адгезия и когезия ТВН покрытий в первую очередь зависят от температуры поверхности напыляемого изделия. Невысокая температура изделий способствуют формированию покрытий с низкой адгезией.

Характеристики потока частиц (атомов) при ТВН: средняя кинетическая энергия частицы 0,2 – 0,5 эВ; степень ионизации потока 0,01 – 1,5%; Для повышения качества покрытия рекомендуется подогреть поверхность или увеличивать скорость напыляемых частиц. Для повышения энергии частиц используют различные методы воздействия на поток частиц. Например, пропуская поток через плазму дугового разряда, можно довести степень ионизации до 100%, что позволяет регулировать энергию потока с помощью высоковольтного выпрямителя, ускоряющий отрицательный потенциал которого подается на изделие. Практически полностью ионизированный поток частиц позволяет получать покрытия с высокой адгезионной и когезионной прочностью без дополнительного подогрева изделия.

Метод взрывного распыления.

Процесс взрывного распыления имеет место при локальном воздействии на поверхность материала энергетического импульса, в результате чего на микроучастках поверхности создаются условия для высокоскоростного испарения твердого материала. Протекает распылительно – испарительный процесс с образованием потока напыляемых частиц. Основная часть продуктов распыления состоит из паровой фазы. Однако практически всегда процесс распыления – испарения сопровождается образованием мельчайших частиц конденсированной фазы. Размер частиц, образующих капельную фазу составляет от долей до десятков микрон. Попадание капельной фракции в покрытие снижает качество последнего, приводя к неоднородности микро- и макроструктуры.

Условие взрывного распыления- испарения можно получить с помощью различных импульсных источников тепловой энергии, перемещающихся по поверхности распыляемого материала. Для этого используют электронный или лазерный лучи, электрические разряды. Широкое применение нашел процесс распыления материала при подаче на него отрицательного потенциала источника питания. В практике такой разряд называют дугой обратной полярности или катодной формой дуги. Дуговой разряд существует в парах распыляемого материала катода. Высокая плотность тока в катодных пятнах обеспечивает режим взрывного испарения. Такой способ вакуумного получения покрытий называется методом КИБ (конденсация в сочетании с ионной бомбардировкой) или ионно-плазменным вакуумным напылением, так как формирование покрытий в этом случае происходит преимущественно из ионизированного потока частиц.

Характеристика потока частиц: энергия частиц 5 – 100 эВ, степень ионизации потока 20 – 90%, количество конденсированной фазы до 10%.

Отличительные особенности метода взрывного распыления – универсальность по напыляемым материалам, высокая производительность 3 мкм/мин и выше, высокая адгезия и равномерная толщина покрытия. К недостаткам метода следует отнести наличие капельной фракции, что вынуждает производить сепарацию напыляемого потока.

Метод напыления покрытий ионным распылением.

Распыляемый материал подвергается бомбардировке ускоренным потоком положительно заряженных частиц (ионы аргона и других инертных газов). При этом распыляемый материал выполняет роль катода. Распыление катода происходит в результате прямой передачи импульса положительного иона атомам поверхности при условии, если энергия иона превышает некоторое пороговое значение (энергию связи атомов с решеткой). Отсюда другое название метода – напыление покрытий катодным распылением.

Средняя энергия распыленных атомов во много раз выше энергии испаряемых атомов и достигает величины 200 эВ и более. Достоинством метода является получение покрытий из сплавов практически без изменения их состава в процессе распыления, высокий коэффициент использования материала, приближающийся к единице. К недостаткам метода можно отнести низкий энергетический КПД процесса, слабую степень ионизации напыляемого потока.

Вакуумное конденсационное реакционное напыление.

Если в камеру установки рис.24 во время процесса напыления напустить химически активный газ, то в камере произойдет реакция между паровым потоком распыляемого металла и атомами специально введенного газа. Твердые продукты реакции осаждаются на поверхности напыления.

Такой метод целесообразно использовать для получения покрытий из некоторых карбидов, оксидов, нитридов и других соединений, которые при нагреве и распылении обычными методами ВКН претерпевают частичное или полное разложение.

Реакционное напыление можно проводить на базе любого из рассмотренных выше методов ВКНП. Более высокое давление газов в камере при реакционном напылении по сравнению с прямым испарением или распылением материала увеличивает частоту столкновения и диффузионного рассеяния конденсируемых атомов. В результате покрытие равномерно осаждается на всей поверхности изделия, даже если оно имеет сложную форму.

Газофазное осаждение покрытий

Газофазное осаждение (ГФО). Нанесение покрытий осуществляется из газовой фазы в замкнутом объеме (камере) посредством диссоциации соединений при их нагреве и осаждении одного или нескольких элементов

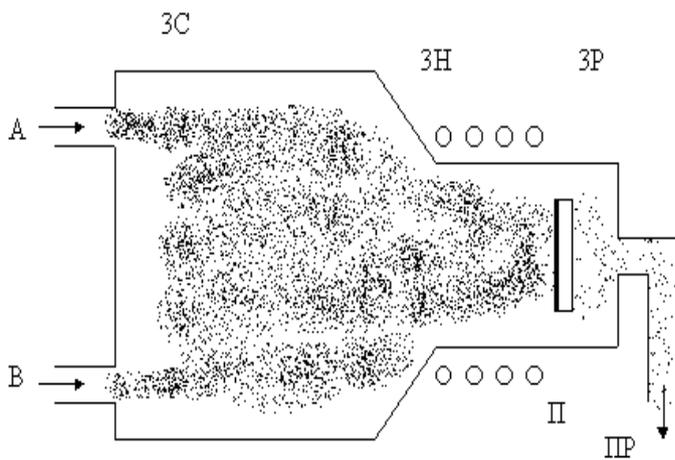
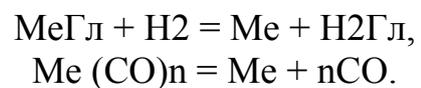


Рис.25.Схема газифазного осаждения покрытия

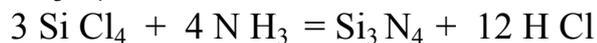
соединения на поверхность изделия. Для разложения в реакционной камере используют многие термически нестойкие соединения: карбонильные, галлоидные, металлоорганические, гидридные и др.

Суммарные реакции, применительно к галогенидам и карбонилам, могут быть записаны в следующем виде:



Для протекания гетерогенной реакции на поверхности изделий осуществляют нагрев, достигающий нескольких сотен градусов. Обобщенная схема процесса показана на рис.25. В рабочую камеру подается исходный материал в виде газов. После прохождения зоны смешивания 3С смесь газов попадает в зону нагрева 3Н. Вблизи поверхности упрочняемого изделия в зоне реакции 3Н происходит химическое взаимодействие газов с выпадением осадка, который на поверхности изделия образует покрытие. Газообразные продукты реакции ПР выводятся из камеры.

Примером такого процесса может служить реакция нанесения упрочняющего покрытия Si_3N_4



Процессы газифазного осаждения покрытий проводят как при нормальном давлении в камере, так и при разрежении. При низком давлении обеспечивается высокая степень чистоты, равномерность слоя и, как следствие, получение покрытий высокого качества.

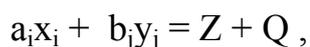
3.9 Формирование покрытий методом СВС

Задача увеличения надежности и долговечности элементов машин и механизмов в большинстве случаев непосредственным образом связана с износостойкостью трущихся сопряженных поверхностей. Одним из перспективных путей повышения износостойкости относится метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Метод СВС является одним из перспективных методов получения тугоплавких соединений. В основе метода СВС лежит экзотермическая реакция взаимодействия двух и более химических элементов, протекающая либо в режиме послынного направленного горения, либо в режиме послынного направленного горения, либо в режиме теплового взрыва.

Синтез протекает в режиме послынного горения тогда, когда в заданном участке образца инициируется реакция и далее образование нового продукта идет в узкой зоне, перемещающейся по объему вещества за счет теплопередачи. Другой вид реакции возникает при нагреве образца целиком до заданной температуры, после чего реакция протекает практически одновременно во всем объеме – это СВС в режиме теплового взрыва.

Обобщенная реакция получения заданного соединения имеет вид:



где x – элементы горючие (Ti, Zr, Hf, V, Mo, W и др.),

y – элементы окислители (B, C, N, Si, Al и др.),

Z – конечный продукт (бориды, карбиды и др.),

Q – тепловая энергия экзотермической реакции.

Чтобы с помощью метода СВС получить конечный продукт, удовлетворяющий предъявляемым требованиям, необходимо обеспечить «тонкое» управление составом и структурой исходного продукта и оптимальные условия синтеза. Работы в области СВС сначала развивались по пути от науки к производству. Результаты научных исследований, которые приобрели практическое значение, в ряде случаев завершались созданием производств того или иного масштаба. Иными словами, сначала ставилась чисто научная задача, которая затем перерастала в задачу производственную.

Большое впечатление в этом отношении производят успехи китайских специалистов, которые нацелены на решение производственных проблем и умеют проходить путь от исследований к производству кратчайшим образом. Крупные успехи достигнуты китайскими учёными в производстве труб с износостойкими внутренними керамическими покрытиями из Al_2O_3 , полученными методом СВС.

СВС-трубы используются для транспортировки абразивных материалов. Применять их можно в различных областях промышленности. Они используются при добыче полезных ископаемых, на электростанциях, в металлургии и строительстве. 30 заводов Китая освоили производство стальных

композитных труб с керамическим СВС-покрытием. Стойкость таких СВС-труб оказалась намного выше стальных.