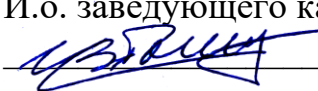


МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *Политехнический*
Кафедра «Электро- и нанотехнологии»

Утверждено на заседании кафедры
«Электро- и нанотехнологии»
«11» января 2023 г., протокол №4

И.о. заведующего кафедрой
 И.В. Гнидина

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине
«Теория и технология получения покрытий»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

по направлению подготовки
18.04.01 Химическая технология

с направленностью (профилем)

Технология органического синтеза


Формы обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 180401-01-23

Тула 2023 год

Разработчик методических указаний

Гнидина И.В., доцент, канд.техн.наук, доцент
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

Лабораторная работа № 1
**Изучение методов подготовки поверхности детали
перед нанесением покрытий**

1. Цель и задачи работы.

Целью работы является ознакомление студентов с методами подготовки поверхностей перед нанесением различных видов покрытий.

2. Теоретические сведения.

Хорошая обработка поверхности и тщательная ее очистка от загрязнений – залог успеха в получении качественных покрытий. Потому подготовка поверхности детали перед нанесением покрытия является важной подготовительной операцией во всем технологическом процессе.

Методы подготовки поверхности детали можно разделить на механические, химические и электрохимические.

Механические методы включают в себя: шлифование, полирование, пескоструйную очистку, ручную очистку щетками и пр.

К **химическим и электрохимическим методам** относятся: обезжиривание в щелочных растворах, травление в соответствующих растворителях, декапирование.

Шлифование применяется, как правило, для очистки поверхностей металлических деталей и заключается в снятии тонкой стружки металла острыми режущими гранями мелких зерен абразивных материалов. Шлифование осуществляется на шлифовальных станках, снабженных вращающимися дисками или кругами, или в специальных вращающихся барабанах или колоколах. Обработка кругами является наиболее распространенным видом шлифования.

Полирование, как и шлифование, в основном, применяется для подготовки поверхности металлических деталей. Процесс заключается в обработке металла с целью удаления мельчайших неровностей и придания ей зеркального блеска. Часто полирование применяется также и для окончательной отделки полученного покрытия. Полирование также осуществляется на станках, снабженных кругами и во вращающихся барабанах. Для полирования применяют круги с более мелкими зернами, чем для шлифования. Механизм процесса полирования поверхности существенно отличается от процесса шлифования. Характерное для шлифования срезание стружки металла в данном процессе отсутствует, а выравнивание поверхности металла может, в частности, происходить за счет раздавливания отдельных выступающих частиц металла и

заполнения ими углублений. За счет пластических деформаций металл как бы растекается по поверхности и заполняет мельчайшие трещины и царапины.

Пескоструйная обработка применяется для очистки поверхности металлических изделий от окалины, шлаковых и других включений, а также для удаления с поверхности грубых неровностей. Очистка производится струей сухого песка, вырывающегося с большой скоростью из специального аппарата через направляющее сопло под давлением сжатого воздуха. Песок, ударясь о поверхность, отделяет от нее все имеющиеся на ней загрязнения и делает ее шероховатость. На такую поверхность лучше наносятся защитные пленки путем распыления. Кроме обычного кварцевого песка может использоваться мелкая стальная дробь, что позволяет существенно увеличить производительность метода. Для пескоструйной обработки применяют специальные барабаны.

Ручную очистку щетками применяют обычно для удаления с поверхности деталей остатков жировых, окисных и других загрязнений (после обезжиривания и травления) непосредственно перед нанесением покрытия. При этом используются щетинные щетки из мягкого ворса.

При **химическом обезжиривании** применяют растворы щелочей, щелочных солей и ряд специальных органических растворителей. Обезжиривание в щелочных растворах сводится к омылению животных и растительных жиров и эмульгированию жиров различного происхождения. Минеральные масла и неомыляемые жиры, химически не разлагающиеся щелочами, как правило, могут образовывать с ними эмульсии и благодаря этому сравнительно легко отделяются от поверхности. Обезжиривание в органических растворителях сводится к обычному процессу растворения жиров. Для этой цели применяются керосин, бензин, толуол, трихлорэтан и др. Обезжиривание изделий производится различными способами: погружением в раствор, обработкой парами и распылением растворителя. Для обезжиривания в парах применяются, в основном, растворители с относительно низкой температурой кипения.

Электрохимическое обезжиривание производится в щелочных растворах на катоде и аноде. Чаще применяется катодное обезжиривание или комбинированная обработка — сначала на катоде, а потом на аноде. Эффективность электрохимического обезжиривания во много раз превышает эффективность химического обезжиривания. В качестве электролитов применяют едкий натр, углекислый натрий, углекислый калий, фосфорнокислый натрий и др. В эти растворы могут добавляться эмульгаторы — мыло или жидкое стекло. Существуют различные взгляды на механизм

электрохимического обезжиривания: его рассматривают как каталитическую реакцию, так и как чисто механический процесс разрыхления масляной пленки и удаления ее с поверхности. Электрохимическое обезжиривание осуществляется, как правило, при повышенной (60-80°C) температуре электролита, что позволяет интенсифицировать процесс. Плотность тока при обезжиривании должна быть такова, чтобы количество выделяющихся пузырьков газа было достаточно и для механического удаления продуктов обезжиривания и для перемешивания раствора электролита. Обычно при обезжиривании используются токи плотностью 3-10 А/дм². В некоторых особых случаях, например, при быстром электролитическом покрытии проволоки и ленты на конвейерных установках плотность тока увеличивают до 50 А/ дм². Расстояние между электродами в ванне обуславливается в первую очередь величиной и формой изделий, а также соображениями экономии электроэнергии и обычно составляет 5-15 см.

Процесс удаления окислов с поверхности деталей путем обработки в растворах кислот или кислых солей называется **травлением**. Травление может быть как **химическим**, так и **электрохимическим**. Травление обычно производят только после удаления с поверхности детали жировых загрязнений, т.е. после операции обезжиривания. Химический способ травления состоит в простом погружении изделий в раствор соответствующей кислоты, так, например, для удаления окислов с поверхностей металлов применяют серную, соляную, азотную кислоты или их смеси.

Электрохимическое травление производится как на аноде, так и на катоде. Анодное травление основано на электролитическом растворении металла и механическом отрывании окислов пузырьками выделяющегося кислорода. На катоде при этом выделяется водород. В качестве электролита используют кислоты или раствор соли соответствующего металла. Электродами служат: анодом —очищаемое изделие, катодом — свинец, медь, железо и пр. Применяемые обычно плотности тока 5-10 А/дм² и выше.

Катодное травление происходит за счет восстановления и механического отрывания окислов пузырьками выделяющегося в этом случае водорода. В качестве электролита служит раствор кислоты или соли, обладающей хорошей электропроводностью. Чаще всего при катодном травлении используются смеси серной и соляной кислот. В качестве анодов используются свинец, сплавы свинца с сурьмой или кремнистый чугун. Плотности тока при катодном травлении такие же, как и при анодном.

Травление изделий электрохимическим способом имеет большую производительность по сравнению с химическим, однако, эффект сильно

зависит от состояния окислов на поверхности изделия, так, например, толстые, плотные слои окислов трудно подвергаются электрохимической очистке.

Декапирование отличается от обычного процесса травления применением более слабых травильных растворов и малым временем обработки (до 1 мин, в отличие от травления, проводимого 10-15 мин). Эта операция применяется, прежде всего, для удаления легкого налета окиси, образующегося на поверхности уже очищенных изделий, например, при транспортировке. При декапировании достигается лишь подтравливание поверхности без образования шлама. По сути дела процесс декапирования является активацией поверхности, обеспечивающей лучшую адгезию покрытия с материалом детали.

Выбор метода и режимов подготовки поверхности перед нанесением покрытия зависит от:

- материала детали;
- характера и количества загрязнений;
- материала и назначения покрытия.

Режимы и технологические параметры метода очистки, как правило, подбираются по справочным данным с учетом названных выше факторов.

3. Объекты и средства исследования.

Объектом исследований при выполнении лабораторной работы являются детали, выполненные из различных материалов, в том числе композиционных. На поверхностях деталей имеются загрязнения различного характера. Метод нанесения покрытия на деталь задается преподавателем. В процессе выполнения работы необходимо оценить характер загрязнений и разработать технологию подготовки поверхности перед нанесением покрытия заданным методом.

4. Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с настоящими методическими указаниями.
2. Получить у преподавателя задание на работу.
3. По справочным данным подобрать метод и режимы подготовки поверхности заданной детали перед нанесением покрытия.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе оформляется в произвольной форме и должен содержать цель работы, эскиз детали, предназначенной для нанесения

покрытия, описание характера загрязнений, описание метода и режимов подготовки поверхности, выводы.

6. Контрольные вопросы.

1. Перечислите основные методы подготовки поверхности перед нанесением покрытий.
2. В чем принципиальное отличие шлифования и полирования?
3. Каково отличие химических и электрохимических методов подготовки поверхности?
4. Какие из описанных методов могут быть использованы для подготовки поверхности неметаллических изделий?

Изучение процесса нанесения покрытий на детали из металлических и композиционных материалов

1. Цель и задачи работы.

Цель работы заключается в изучении технологии нанесения покрытия различными методами (электролитическим, методами PVD, электроэрозионным, электростатическим и т.д.).

2. Теоретические сведения.

Покрытия – это одно или многослойная структура нанесенное на поверхность для защиты от внешних воздействий (температуры, давления, коррозии, эрозии и так далее).

Различают внешние и внутренние покрытия.

Внешние покрытия имеют границу между покрытием и поверхностью изделия. Соответственно размер изделия увеличивается на толщину покрытия, при этом возрастает масса изделия.

Во внутренних покрытиях отсутствует граница раздела и размеры и масса изделия остаются неизменными, при этом изменяются свойства изделия. Внутренние покрытия еще называют модифицирующими покрытиями.

Различают две основные задачи, разрешаемые при нанесении покрытия

Изменение исходных физико-химических свойств поверхности изделий, обеспечивающих заданные условия эксплуатации;

Восстановление свойств, размеров, массы поверхности изделия, нарушенных условиями эксплуатации.

2.1. Назначение и области применения покрытий

Основной причиной появления и развития технологии нанесения защитных покрытий явилось стремление повысить долговечность деталей и узлов различных механизмов и машин. Оптимизация системы покрытия предполагает соответствующий выбор состава покрытия, его структуры, пористости и адгезии с учетом, как температуры нанесения покрытия, так и рабочей температуры, совместимости материалов подложки и покрытия, доступности и стоимости материала покрытия, а также возможности его возобновления, ремонта и надлежащего ухода во время эксплуатации

Применение недостаточно прочного покрытия, толщина которого за время работы заметно уменьшается, может привести к снижению прочности всей детали вследствие уменьшения эффективной площади ее полного попе- речного

сечения. Взаимная диффузия компонентов из подложки в покрытие и наоборот может привести к обеднению или обогащению сплавов одним из элементов. Термическое воздействие может изменить микроструктуру подложки и вызвать появление в покрытии остаточных напряжений. С учетом всего перечисленного оптимальный выбор системы должен обеспечивать ее стабильность, т. е. сохранение таких свойств, как прочность (в ее различных аспектах), пластичность, ударная вязкость, сопротивление усталости и ползучести после любого воздействия. Наиболее сильное влияние на механические свойства оказывает эксплуатация в условиях быстрого термоциклирования, а наиболее важным параметром является температура и время ее воздействия на материал; взаимодействие с окружающей рабочей средой определяет характер и интенсивность химического воздействия.

Механические способы соединения покрытия с подложкой часто не обеспечивают нужное качество сцепления. Гораздо лучшие результаты обычно дают диффузионные методы соединения. Хорошим примером удачного диффузионного покрытия является алитирование черных и цветных металлов.

2.2. Классификация покрытий и методов их получения

В настоящее время существуют много разнообразных покрытия и методы их получения.

Во многих публикациях предлагаются различные схемы классификации неорганических покрытий по различным признакам.

Можно классифицировать покрытия по следующим основным принципам:

по назначению (антикоррозионные или защитные, жаростойкие, износостойкие, антифрикционные, светоотражающие, декоративные и другие);

по физическим или химическим свойствам (металлические, неметаллические, тугоплавкие, химостойкие, светоотражающие и т.д.);

по природе элементов (хромовое, хромоалюминиевое, хромокремниевое и другие);

по природе фаз, образующихся в поверхностном слое (алюминидные, силицидные, боридные, карбидные и другие)

Рассмотрим наиболее важные покрытия, классифицированные по назначению.

Защитные покрытия – основное назначение связано с их разнообразными защитными функциями. Большое распространение получили коррозионностойкие, жаростойкие и износостойкие покрытия. Широко применяются также теплозащитные, электроизоляционные и отражающие покрытия.

Конструкционные покрытия и пленки – выполняют роль конструктивных элементов в изделиях. Особенно широко также используются при производстве изделий в приборостроении, радиоэлектронной аппаратуре, интегральных схемах, в

турбореактивных двигателях - в виде срабатываемых уплотнений в турбине и компрессоре и др.

Технологические покрытия – предназначены для облегчения технологических процессов при производстве изделий. Например, нанесение припоя при пайке сложных конструкций; производстве полуфабрикатов в процессе высокотемпературного деформирования; сварке разнородных материалов и т.д.

Декоративные покрытия – исключительно широко применяются при производстве бытовых изделий, украшений, повышении эстетичности промышленных установок и приборов, протезировании в медицинской технике и др.

Восстановительные покрытия – дают огромный экономический эффект при восстановлении изношенных поверхностей изделий, например гребных валов в судостроении; шеек коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания; лопаток в турбинных двигателях; различного режущего и прессового инструмента.

Оптические покрытия – уменьшают отражательную способность по сравнению с массивными материалами, в основном, благодаря геометрии поверхности. Профилеметрирование показывает, что поверхность некоторых покрытий представляет собой совокупность шероховатостей, высота которых колеблется от 8 до 15 мкм. На отдельных макронеровностях формируются микронеровности, высота которых колеблется от 0,1 до 2 мкм. Таким образом, высота неровностей соизмерима с длиной волны падающего излучения. Отражение света от такой поверхности происходит в соответствии с законом Френкеля.

В литературных источниках встречаются различные принципы классификации методов нанесения покрытий. Хотя следует отметить, что единой системы классификации методов нанесения покрытий нет.

Хокинг и ряд других исследователей предложили три классификации методов нанесения покрытий:

по фазовому состоянию среды, из которой происходит осаждение материала покрытия;

по состоянию наносимого материала;

по состоянию процессов, которые определяют одну группу методов нанесения покрытий.

Более подробно классификации методов нанесения покрытий представлены на рис. 1.

Классификация методов нанесения покрытий по фазовому состоянию среды

Твердое состояние	Жидкое состояние	Полужидкое или пастообразное состояние	Газовая среда (атомное, ионное или электронное взаимодействие)	Раствор	Плазма
Механическое соединение Плакирование Спекание	Горячее окунание Напыление Наплавка	Золь-гель процесс Шликерный Напайка	Физическое осаждение из паровой фазы Химическое осаждение из паровой фазы	Химический Гальванический Электрогальванический	
Обработка поверхности					

Таблица 1.3

Классификация методов нанесения покрытий по состоянию процессов определяющих одну группу методов

Механические	Физические	Химические	Электрохимические	Напыление	Наплавка
Плакирование Соединение	Физическое осаждение из газовой фазы Вакуумные покрытия Термическое испарение Распыление Ионное осаждение	Химическое осаждение из газовой фазы Осаждение из электролита без наложения электрического поля	В водных растворах В расплавах солей	Детонационной пушкой Электрической дугой Металлизация Плазменное Газопламенное с использованием проволоки	Лазерная Ручной электросваркой Сваркой в инертном газе Кислородно-ацетиленовой сваркой В плазменной дуге Плазменной сваркой Сплавлением при напылении Дугой под слоем флюса Другой между вольфрамовыми электродами в инертной среде

Классификация методов по состоянию наносимого материала и способам изготовления

Группа 1 Атомное или ионное состояние	Группа 2 Макрочастицы	Группа 3 Массивный материал	Группа 4 Модификация структуры поверхности
<p>1</p> <p>Вакуумные методы:</p> <p>Вакуумное испарение</p> <p>Осаждение из ионного пучка</p> <p>Эпитаксиальное осаждение из молекулярного пучка</p> <p>Плазменные методы:</p> <p>Распыление (ионное, магнетронное)</p> <p>Ионное осаждение</p> <p>Полимеризация плазмы</p> <p>Активированное реакционное испарение</p> <p>Катодно-дуговое осаждение</p> <p>Химическое взаимодействие в парах Реагентов:</p> <p>Осаждение из паровой фазы</p> <p>Восстановление</p> <p>Разложение</p> <p>Плазменное осаждение</p> <p>Пиролиз при распылении</p> <p>Осаждение из электролита:</p> <p>Гальваностегия</p> <p>Химическое осаждение</p> <p>Осаждение из расплавленных солей</p> <p>Химическое замещение</p>	<p>2</p> <p>Ударные методы</p> <p>Сплавление:</p> <p>Окрашивание толстыми слоями</p> <p>Эмалирование</p> <p>Электрофорез</p> <p>Термические методы:</p> <p>Газопламенное распыление</p> <p>Плазменное распыление</p> <p>Детонационное распыление</p> <p>Золь-гель процесс</p>	<p>3</p> <p>Внешние покрытия:</p> <p>Наплавка</p> <p>Плакирование:</p> <p>Взрывной прокаткой</p> <p>Лазерное плавление</p> <p>Смачивание:</p> <p>Окрашивание кистью</p> <p>Горячее окунание</p> <p>Электростатические методы:</p> <p>Спин-покрытия</p> <p>Нанесение рисунка распылением</p>	<p>4</p> <p>Лазерная модификация поверхности</p> <p>Термообработка</p> <p>Ионная имплантация</p> <p>Поверхностное легирование:</p> <p>Диффузия из объема</p> <p>Распыление</p> <p>Выщелачивание</p> <p>Химическая конверсионная жидкопаровая диффузия (нагрев, плазма)</p> <p>Электролитическое анодирование</p> <p>Термообработка в расплавленных солях</p> <p>Механические методы:</p> <p>Дробеструйная обработка</p>

Рис. 1. Различные классификации методов нанесения покрытий

2.3. Изменение физико-химических свойств поверхностей при нанесении покрытий

Поверхностный слой (покрытие) играет определяющую роль в формировании эксплуатационных и других свойств изделий, создание его на поверхности твердого тела практически всегда изменяет физико-химические свойства в нужном направлении. Нанесение покрытий позволяет восстановить ранее утраченные свойства в процессе эксплуатации изделий. Однако чаще всего изменяют свойства исходных поверхностей изделий, полученные в процессе их производства. В этом случае свойства материала поверхностного слоя существенно отличаются от свойств исходной поверхности. В подавляющем большинстве меняется химический и фазовый состав вновь созданной поверхности, в результате получают изделия с требуемыми эксплуатационными характеристиками, например высокой коррозионной стойкостью, жаростойкостью, износостойкостью и многими другими показателями.

Изменение физико-химических свойств исходных поверхностей изделий может быть осуществлено созданием как внутренних, так и внешних покрытий. Возможны и комбинированные варианты (рис. 2).

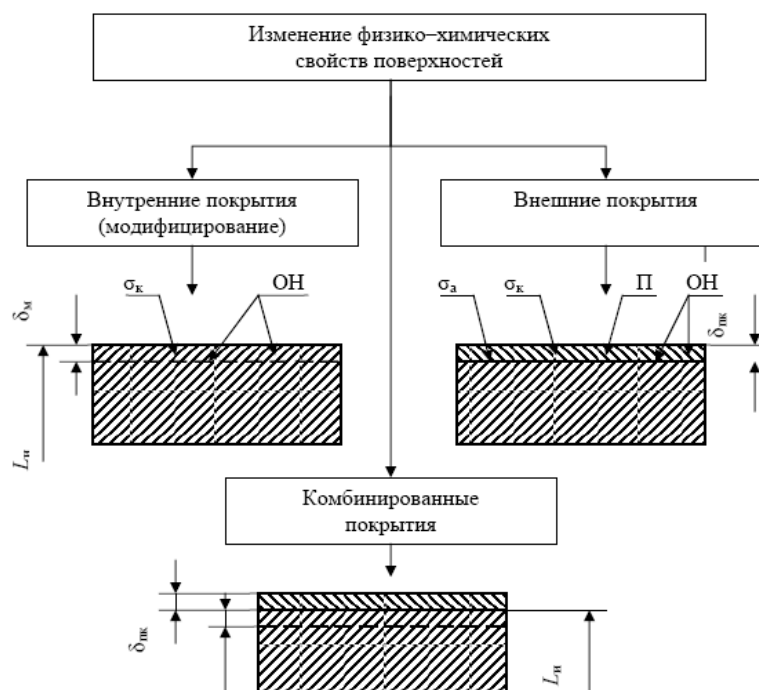


Рис. 2. Схематическое представление изменения физико-химических свойств поверхностей ($L_{и}$ – исходный размер изделия; $\delta_{м}$ – глубина внутреннего слоя; $\delta_{пк}$ – толщина покрытия; $\sigma_{а}$ – адгезионная прочность покрытия; $\sigma_{к}$ – когезионная прочность; Π – несплошности (поры и др.); $ОН$ – остаточные напряжения)

При нанесении внутренних покрытий сохраняются неизменными размеры изделий ($L_{и} = \text{const}$). Некоторые методы обеспечивают и постоянство массы изделия, в других методах - приращение массы ничтожно мало и им можно пренебречь. Как

правило, отсутствует четкая граница модифицированного поверхностного слоя ($\delta_m \neq \text{const}$).

При нанесении внешних покрытий размер изделия увеличивается ($L_i \neq \text{const}$) на толщину покрытия ($\delta_{\text{пк}}$). Возрастает и масса изделия.

На практике встречаются и комбинированные покрытия. Например, при нанесении теплозащитных покрытий, отличающихся повышенным количеством несплошностей во внешнем слое, жаростойкость обеспечивается за счет внутреннего беспористого покрытия.

2.4. Внутренние и внешние покрытия

Внутренние покрытия создаются различными способами воздействия на поверхность исходного материала (модифицирование исходных поверхностей). На практике широко используются следующие методы воздействия: механические, термические, термодиффузионные и высокоэнергетические с проникающими потоками частиц и излучений (рис. 3).

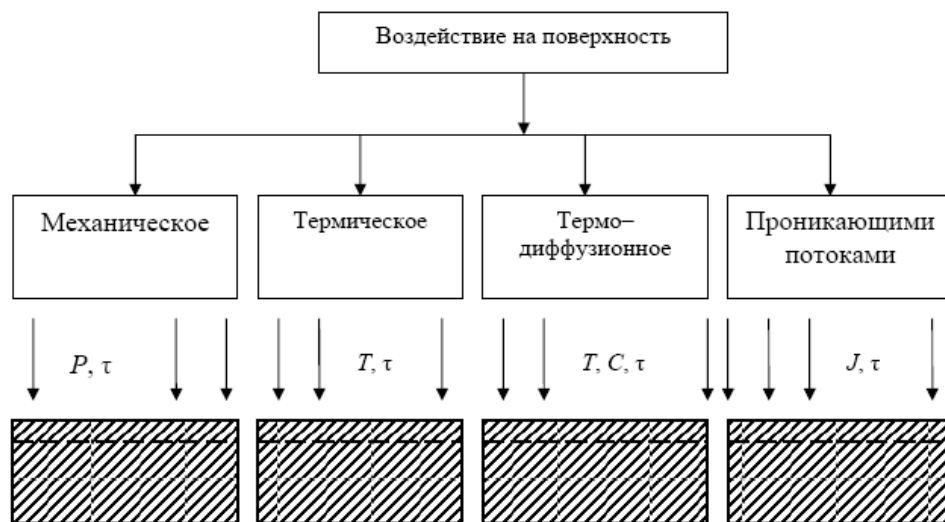


Рис. 3. Схема модифицирования поверхностей различными воздействиями
 (P – давление; T – температура; C – диффундирующий элемент;
 J – энергия потока; τ – время)

Встречаются и комбинированные методы воздействия, например термомеханические и др. В поверхностном слое происходят процессы, приводящие к структурному изменению исходного материала на глубину от нанометрового диапазона до десятых долей миллиметра и более. В зависимости от метода воздействия протекают следующие процессы:

- изменение зеренного строения материала;
- искажение кристаллической решетки, изменение ее параметров и типа;
- разрушение кристаллической решетки (аморфизация);

– изменение химического состава и синтезирование новых фаз.

Практическое значение внешних покрытий очень велико. Нанесение внешних покрытий позволяет не только решать задачи по изменению физико-химических свойств исходных поверхностей, но также восстанавливать их после эксплуатации.

Механизм и кинетика формирования приведены на рис. 4. Внешние покрытия часто выполняют роль конструкционного элемента, например покрытия – пленки при производстве интегральных схем. К настоящему времени разработано большое количество методов нанесения покрытий различного назначения из многих неорганических материалов.

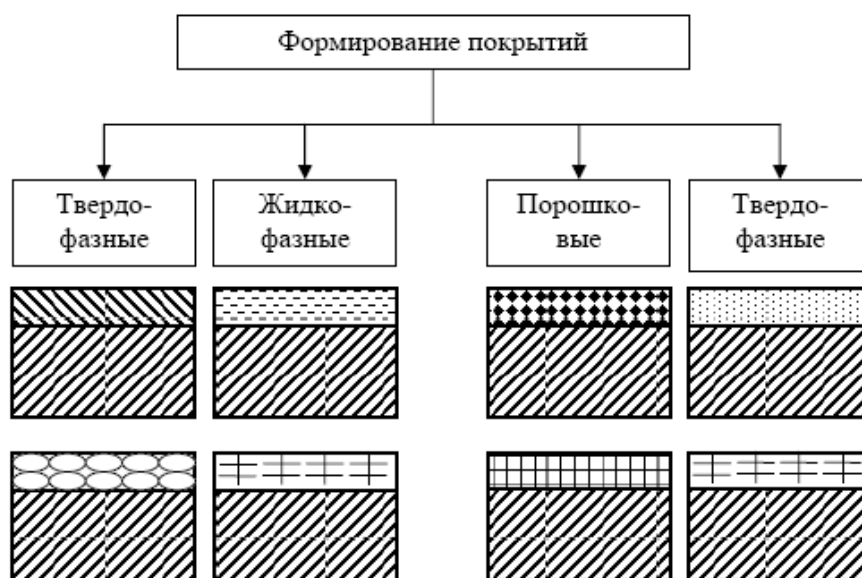


Рис. 4. Схемы формирования покрытий на твердой поверхности

Для анализа физико-химических процессов, связанных с нанесением покрытий, их целесообразно систематизировать по условиям формирования. представляется возможным выделить следующие группы покрытий, формирующихся на твердой поверхности: твердофазные, жидкофазные, порошковые и атомарные.

3. Объекты и средства исследования.

Объектом исследований при выполнении лабораторной работы является конкретный процесс нанесения покрытия на детали, выполненные из различных материалов, в том числе композиционных. В процессе выполнения работы обучающиеся должны изучить теоретические сведения о конкретном процессе нанесения покрытия, его технологические особенности, методику проектирования операции нанесения покрытия. Для заданного преподавателем

объекта исследования разработать технологию, нанести покрытие, оценить результаты.

4. Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с настоящими методическими указаниями.
2. Получить у преподавателя задание на работу.
3. Разработать технологию нанесения покрытия. Произвести обработку.

Оценить результаты.

4. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе оформляется в произвольной форме и должен содержать цель работы, эскиз детали, предназначенной для нанесения покрытия, описание процесса проектирования технологии, оценку результатов нанесения покрытия, выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Какие методы нанесения покрытий относятся к физическим?
2. К какой группе методов можно отнести вакуумное напыление?
3. Какие методы нанесения покрытий на композиционные материалы являются наиболее распространенными?
4. Чем отличаются методы PVD и CVD?

Лабораторная работа №3
Исследование свойств и контроль качества покрытий,
полученных различными методами

1. Цель работы

Целью работы является изучение различных методов контроля качества и исследования свойств покрытий, полученных различными методами.

2. Теоретические сведения

2.1. Контроль внешнего вида покрытий.

Контроль внешнего вида покрытий производят визуальным осмотром при нормальном дневном или искусственном освещении. Освещенность должна быть не менее 300 лк. Необходимость применения для осмотра оптических приборов с указанием кратности увеличения должна быть оговорена в технической документации на изделия. В результате оценки по внешнему виду покрытия изделие относят к одной из следующих групп: годные, дефектные, брак. Дефектными считаются изделия, требующие снятия недоброкачественного покрытия и его повторного нанесения, а также изделия, требующие доработки без снятия покрытия (например, обработка недополированных участков). К браку относятся: перетравленные изделия; изделия, имеющие механические повреждения; изделия, имеющие очаги коррозии, поры литья и т.п.; изделия, не допускающие переделки со снятием недоброкачественного покрытия.

2.2. Измерение толщины покрытий.

Во многих случаях решающим признаком качества покрытия, которое должно отвечать определенным техническим и экономическим требованиям, является его толщина. В связи с этим определение толщины покрытия является основой его оценки. За последние годы техника измерения толщины покрытий значительно усовершенствовалась. Проблемы измерения, вытекающие из наличия множества комбинаций покрытий и основ, не могут быть решены одним способом и соответственно одним прибором; в различных случаях необходимо выбирать для измерения наиболее подходящую в данном случае методику и приборы. Выбор будет зависеть от многих (факторов, рода и формы покрытия и основного металла, желаемой точности и длительности измерения). Решающим может сказаться допустимость и недопустимость разрушения покрытия или всей детали.

При контроле толщины покрытия следует учитывать, что даже на плоских изделиях толщина слоя металла неодинакова в различных точках; еще большие колебания в толщине на профилированных изделиях. Отсюда вытекает

необходимость определения не только средней толщины покрытия, но и минимальной толщины на определенных участках изделия.

Неразрушающие (физические) методы измерения

К физическим методам контроля толщины слоя электролитических покрытий, не связанным с разрушением изделия и покрытия, относятся методы прямого измерения, измерения масс, магнитный, радиоактивный, а также различные оптические методы (поляризационный, интерференционный, метод определения по цвету окраски покрытия, метод светового сечения, теневого сечения и др.).

Метод прямого измерения заключается в измерении размеров изделия до и после нанесения покрытия. Измерение производится с помощью микрометра или оптиметра. Микрометр позволяет измерять только значительные толщины покрытий, так как погрешность измерений достигает ± 10 мкм.

Метод измерения масс заключается во взвешивании детали до и после покрытия. Этот метод применим только для мелких изделий, которые могут быть взвешены и измерены с достаточной степенью точности.

Расчет толщины покрытия может быть произведен по следующей формуле:

$$h_{\text{ср}} = \frac{P}{Sd10^4}$$

где $h_{\text{ср}}$ — толщина покрытия, мм; S — площадь покрытия, дм²; d — плотность материала покрытия, кг/м³; P — масса покрытия, г.

Отрывной магнитный метод основан на измерении силы отрыва магнита от поверхности испытуемой детали. Метод следует применять для контроля толщины покрытий непосредственно в производственных условиях при серийном и массовом выпуске изделий, в случае, когда идут однотипные детали из ферромагнитного материала с более или менее постоянными магнитными свойствами. Данный метод рекомендуется применять для измерения толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе или же в случае резкого различия их магнитных свойств.

Измеренная сила притяжения магнита является функцией толщины покрытия. При ферромагнитных покрытиях (никель или железо) на немагнитном основном металле сила притяжения магнита увеличивается с ростом толщины покрытия; при немагнитных или никелевых покрытиях по стали сила притяжения уменьшается с возрастанием толщины покрытия.

На результаты измерений заметное влияние оказывают структура покрытия, степень шероховатости покрытия, термическая обработка и т. д. Поэтому магнитный метод может быть рекомендован для контроля продукции лишь при наличии чистой механической обработки покрываемых изделий. Толщина покрытия на испытуемых деталях определяется по эмпирическим градуировочным кривым, построенным для данного прибора по специальным эталонам с известной толщиной слоя покрытия.

Толщиномеры, основанные на магнитном отрывном методе, просты по конструкции, большинство из них портативны. Пределы измерения этими приборами 0—50 мкм. Наибольшая погрешность измерения достигает $\pm 10\%$, продолжительность измерения — 5—6 с.

Индукционный магнитный метод основан на измерении магнитного потока, проходящего в сердечнике электромагнита. Величина магнитного потока так же, как и сила притяжения магнита, является функцией толщины покрытий. При контроле толщины немагнитного покрытия на крупных стальных деталях с различными магнитными свойствами целесообразно применение приборов, основанных на изменении магнитного потока в цепи.

Сущность электромагнитного метода (вихревых токов) сводится к следующему. Если изделие из металла поместить в переменное электромагнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности, то в поверхностном слое изделия появляются вихревые токи, поле которых, взаимодействуя с полем катушки, приводит к изменению ее полного сопротивления. Величина этого изменения зависит от размеров, конфигурации, качества поверхности изделия и электрофизических свойств материалов покрытия и изделий, а также от конструктивного исполнения прибора. Измеряя полное сопротивление катушки датчика с помощью специальных измерительных и усилительных схем, можно контролировать параметры изделия, в частности толщину покрытия.

Радиоактивный метод основан на обратном рассеянии (отражении) β -излучения. Мерой интенсивности отраженного (рассеянного) излучения служит ток, возникающий в ионизационной камере. С увеличением толщины основного металла изделия интенсивность отраженного β -излучения (ионизационный ток) растет сначала линейно, затем рост начинает замедляться и наступает насыщение. Значение толщины насыщения определяется физической природой отражателя и энергией излучения. При увеличении атомного номера отражателя интенсивность отраженного излучения также увеличивается.

Для использования отраженного β -излучения требуется наличие трех условий:

- 1) толщина детали должна быть больше толщины насыщения;
- 2) толщина покрытия должна быть меньше толщины насыщения;
- 3) атомный номер металла покрытия должен отличаться от атомного номера металла основы не менее, чем на 2.

Достоинствами этого метода являются: возможность контроля покрытия без контакта с поверхностью детали, длительный срок службы датчиков, возможность автоматизации процесса контроля.

Оптические методы рекомендуется применять в основном для измерения толщин тонкослойных покрытий, обладающих хорошими оптическими свойствами и

нанесенных на хорошо подготовленные поверхности подложки. При этом определение толщины пленок во многом зависит от точности установления показателя преломления света прозрачными средами. Методы основаны на измерениях уступа, образованного краем покрытия с основным металлом, способом светового сечения или растровым способом с помощью оптических микроскопов. Методы применимы для измерения толщин покрытий от 1 до 40 мкм с коэффициентом отражения не менее 0,3.

Методы измерения толщины с разрушением изделия

Методы контроля толщины покрытия с разрушением изделия делятся на химические, вызывающие разрушения только покрытия, и физические, при применении которых нарушается целостность не только покрытия, но и самого изделия. Применяемые в настоящее время химические методы могут быть рекомендованы лишь в том случае, если по производственным условиям допускается разрушение нанесенных на изделия покрытий, что неизбежно связано с потерей некоторой части готовых изделий.

Химические методы применяются для выборочного контроля толщины наиболее часто применяемых металлопокрытий. Погрешность измерения химическими методами по сравнению с другими значительна и может достигать $\pm 30\%$, большая погрешность получается при контроле тонкослойных покрытий. Всем химическим методам присуща весьма низкая производительность. При использовании химических методов возможность автоматизации процесса контроля толщины покрытий в условиях серийного и массового изготовления деталей практически исключается.

К группе физических разрушающих методов относятся: металлографический, метод хорды и спектральный метод. При применении этих методов разрушению подвергается как покрытие, так и материал основы. Указанные методы являются лабораторными и могут быть рекомендованы только для выборочного контроля в специальных условиях.

2.3. Определение пористости покрытий.

Коррозионная стойкость покрытия, а, следовательно, и возможность применения его в той или иной области зависят от наличия пор в покрытии. Поэтому при оценке защитных свойств покрытий определение их пористости имеет большое значение.

Обычно пора́ми называют макро- или микроканалы, образующиеся в покрытиях. По размерам поры делятся на микропоры (радиус менее 1,5 нм), макропоры (радиус свыше 0,1 мкм) и поры, промежуточные по размеру. Поры могут быть сквозными, т. е. доходящими до основного металла или подслоя, или замкнутыми; они могут иметь разнообразную форму (точечная, канальчатая

пористость) и значительно отличаться по своим размерам. Обычно размеры пор невелики, а поэтому они не могут быть различимы невооруженным глазом. Существует несколько методов определения пористости защитных и защитно-декоративных покрытий, а также износостойких хромовых покрытий.

Коррозионные методы являются наиболее простыми и распространенными и заключаются в том, что для выявления пор производится обработка испытуемого образца специальным раствором, который, не действуя на металл покрытия, реагирует через поры с металлом основы, образуя хорошо видимые продукты реакции. Полученные таким образом точки коррозии подсчитывают, наблюдая их невооруженным глазом или при увеличении (через лупу или в поле зрения микроскопа). Продуктами реакции могут являться точки коррозии на поверхности при испытаниях в атмосферных условиях или в камерах влажности или соленого тумана, пузырьки выделяющегося газа при погружении испытуемого образца в раствор и т. п.

Наиболее распространенным можно считать метод обнаружения пор при помощи реактивов, дающих с основным металлом окрашенные соединения. Универсальным реагентом в этом отношении является раствор красной кровяной соли $K_3Fe(Cn)_6$ (железосинеродистый калий), который, реагируя с ионами железа, образует турнбулеву синь, с ионами меди — железосинеродистую медь, а с ионами никеля — железосинеродистый никель. Индикатор — железосинеродистый калий — применим для определения пористости медных, никелевых, хромовых, оловянных, свинцовых, серебряных и золотых покрытий.

Способы проведения испытаний могут быть различными. В некоторых случаях испытуемый образец погружают на некоторое время в электролит, затем его вынимают и подсчитывают число появившихся окрашенных точек. Иногда испытуемую поверхность не погружают в электролит, а смачивают посредством тампона.

Наиболее распространен метод наложения. На изделия с покрытием накладывают фильтровальную бумагу, смоченную специальным раствором, или пасту определенного состава. Метод наложения фильтровальной бумаги применим для определения пористости металлических покрытий на стали, меди и ее сплавах, на деталях простой формы, если профиль детали допускает наложение фильтровальной бумаги. На обезжиренную поверхность детали накладывают фильтровальную бумагу, пропитанную раствором специального состава. Бумагу накладывают таким образом, чтобы между поверхностью детали и бумагой не оставалось пузырьков воздуха. После снятия бумаги с отпечатками пор в виде точек или пятен промывают струей дистиллированной воды и просушивают на чистом стекле.

При испытании медных покрытий бумагу снимают через 20 мин, при испытании однослойных никелевых покрытий, осажденных на сталь,— через 5 мин и при испытании всех остальных типов покрытий, кроме оловянных,— через 10 мин.

2.4. Измерение блеска покрытий.

Блеск покрытия целесообразно отнести к физико-химическим свойствам, которые могут быть положены в основу характеристики и сравнения блестящих и матовых покрытий. Самым простым способом оценки блеска является визуальное наблюдение. Однако оно носит субъективный характер и дает лишь качественное впечатление. Поэтому визуальное наблюдение может быть применено лишь во время поисковых опытов в качестве предварительной оценки.

Блеск металлической поверхности обусловлен тем, что падающий на поверхность металла свет не рассеивается равномерно по всем направлениям, как в случае матовых поверхностей, а отражается под углом, равным углу падения. Чем меньше света рассеивает поверхность и чем больше его отражается, тем более блестящей будет поверхность. Иначе говоря, блеск поверхности определяется соотношением между интенсивностью зеркально-отраженного и диффузно рассеянного света. Поэтому блеск поверхности может быть охарактеризован следующим уравнением:

$$Б = \frac{I_0}{I_0 + I_p} = \frac{I_0}{I_c}$$

где I_0 — интенсивность зеркально-отраженного света; I_p — интенсивность диффузно рассеянного света; $Б$ — блеск поверхности; $I_c = I_0 + I_p$ — суммарная интенсивность светового луча.

В случае идеально зеркальной поверхности это отношение $I_0/I_p = 1$, так как $I_p = 0$. Чем больше блеск поверхности, тем ближе к единице отношение I_0/I_p .

Измерение интенсивности зеркально-отраженного света для характеристики степени блеска металлической поверхности применяется чаще других методов. Зеркально-отраженный свет при измерении улавливается либо оптическим прибором — фотометром (фотометрический метод), либо фотоэлектрическим прибором — фотоэлементом (фотоэлектрический метод).

На несколько ином принципе основано измерение степени блеска поверхности блескомером, действие которого связано с тем, что четкость отображенного в блестящей поверхности образца предмета (черные цифры на белой бумаге) тем меньше, чем больше расстояние между ними. Указанный способ определения блеска поверхности применяется только для плоских поверхностей и для поверхностей с очень малой кривизной.

Для определения в цеховых условиях блеска защитно-декоративных покрытий рекомендуется методика определения блеска по резкости отражения. Испытуемый

образец готовится по принятой на предприятии технологии. Для определения блеска пользуются вспомогательным приспособлением, состоящим из согнутого под прямым углом оргстекла, на вертикальной поверхности которого приклеивается сетка или рисунок. Образец размещают на горизонтальной поверхности приспособления, вплотную к вертикальной поверхности с рисунком. Оценивают степень блеска сидя за столом, на котором находится приспособление с испытуемым образцом на расстоянии примерно 30 см от испытателя. Свет должен падать на приспособление слева и сзади.

Блеск оценивается качественно следующим образом:

- а) зеркальный – резкость изображения рисунка на покрытии соответствует изображению на зеркале;
- б) блестящий – резкое изображение рисунка, но верхняя часть изображения несколько размыта;
- в) полублестящий – изображение рисунка заметно, но не резкое;
- г) матовый – изображение рисунка сильно размыто и заметно лишь на ближней к рисунку части образца;
- д) глубокоматовый – изображение рисунка отсутствует.

2.5. Измерение прочности сцепления покрытий с основой.

Покрытие, связанное с основным металлом, подвержено влиянию температуры, механическим нагрузкам, нагрузкам от собственных напряжений и другим внешним и внутренним силам. Наиболее напряженным, критическим местом является граничная поверхность между покрытием и основным металлом. В связи с этим прочность сцепления покрытия и основного металла является одним из важных факторов, характеризующих возможность применения металлических покрытий.

Состояние поверхности основного металла перед покрытием во многом определяет подученную прочность сцепления. Следы загрязнения, пленки жиров и окислов в значительной степени влияют на нее. Поэтому очистка поверхности изделий перед покрытием имеет решающее значение. Сцепление будет тем лучше, чем более шероховатой и развитой будет поверхность основного металла, что можно объяснить увеличением площади соприкосновения между основным металлом и покрытием. Следовательно, такие методы подготовки под покрытия, как пескоструйная обработка, шлифование, травление, должны благоприятно влиять на качество сцепления. Следует отметить, что на прочность сцепления покрытия влияют не только предварительная подготовка поверхности основы, но также режимы процесса получения покрытия.

Различают качественные и количественные методы измерения прочности сцепления. В практике чаще всего применяются качественные методы испытаний: они допускают непосредственное испытание без большой подготовки образца, однако

дают только более или менее относительные результаты и в значительной степени зависят от аккуратности и наблюдательности испытателя. Количественные испытания, как правило, требуют придания образцу специальной формы или, по крайней мере, какой-то предварительной обработки детали для снятия напряжений. В своем большинстве они ограничиваются областью металлических покрытий и требуют относительно большой их толщины. Достоинством количественных методов является возможность получения абсолютных данных.

Качественные методы определения прочности сцепления

Методы основаны на различии физико-механических свойств металлов покрытий и основного металла детали. Большинство качественных методов основано на сильной деформации образца, при которой происходит разрушение покрытия или основного металла. Метод контроля выбирают в зависимости от металла покрытия, вида и назначения детали.

Метод полирования заключается в обработке покрытия кругами из бязи, фетра и других материалов или пастами — крокусной, хромовой и другими — не менее 15 с. Скорость полирования — 20—30 м/с. После полирования на контролируемой поверхности не должно наблюдаться вздутия или отслаивания покрытия.

Методом крацевания поверхность покрытия крацуют не менее 15 с стальными и латунными щетками (для мягких покрытий) с диаметром проволоки 0,1—0,3 мм, частота вращения 1500—1800 об/мин. После крацевания на контролируемой поверхности не должно наблюдаться вздутия и отслаивания покрытия.

Метод навивки применим для определения прочности сцепления покрытий на проволоке. Проволоку диаметром до 1 мм навивают на стержень утроенного диаметра; диаметром более 1 мм — на проволоку того же диаметра таким образом, чтобы образовалось 10—15 плотно прилегающих друг к другу витков. Пружины диаметром проволоки до 1 мм контролируют выпрямлением; диаметром более 1 мм — растягиванием пружин на двойную их длину. После контроля на поверхности покрытия не должно наблюдаться отслаивания покрытия.

Метод нанесения сетки царапин заключается в прочерчивании на поверхности контролируемого покрытия стальным острием 4 - 6 параллельных линий, глубиной до основного металла, на расстоянии 2 - 3 мм друг от друга и 4 - 6 параллельных линий, перпендикулярных к ним. Линии следует проводить в одном направлении. На контролируемой поверхности покрытия не должно наблюдаться отслаивания.

При методе изгиба детали с покрытием подвергают изгибу под углом 90° в обе стороны до излома. В месте излома покрытие не должно отслаиваться.

Метод вдавливания применяется при проверке пригодности листового материала к глубокой деформации (штамповка). Результаты испытаний считают хорошими, если трещины появляются при одинаковой глубине вдавливания на

покрытом и непокрытом образцах, причем при образовании трещин на покрытом образце покрытие не должно отслаиваться от основы.

Метод распиловки основан на спиливании кромки покрытия. При распиловке образца не должно наблюдаться отслаивания покрытия в месте распиловки. Направление штрихов напильника не должно содействовать отрыву покрытия от основного металла.

Метод удара применяется для оценки сцепления с помощью бойка, падающего с определенной высоты. Прочность сцепления тем выше, чем больше ударов бойка выдерживает испытуемый участок поверхности до отслаивания.

Метод трения основан на выделении от трещин в процессе испытания значительного количества тепла. Это тепло вызывает расширение как основного материала, так и его покрытия. Если коэффициенты линейного расширения обоих металлов в значительной степени отличаются друг от друга, в местах с плохим сцеплением может произойти вспучивание покрытия, образование пузырей, и покрытие может отслаиваться. Этот метод испытания не зависит от геометрической формы образца, однако он подвержен влиянию скорости трения и влиянию давления, в результате которых создается нагрузка трения.

Метод нагрева основан на тех же физических законах, что и предыдущий. Детали с покрытием нагревают в течение 0,5—1,0 ч и охлаждают на воздухе.

2.6. Измерение твердости покрытий.

Исследование твердости покрытий имеет существенные трудности, одна из которых — влияние твердости самой подложки, особенно при сравнительно небольших толщинах покрытия. В настоящее время наиболее точным и удобным методом измерения твердости покрытий является метод статического вдавливания алмазной пирамидки под малыми нагрузками (от 2 до 200 г) или так называемый метод измерения микротвердости.

Измерение микротвердости производится с помощью специального прибора — микротвердомера ПМТ-3. Применяемый при испытании на микротвердость алмазный наконечник представляет собой правильную четырехгранную пирамиду с углом между противоположными гранями при вершине $\alpha = 136^\circ \pm 20'$.

Поверхность испытуемого образца должна быть плоской, гладкой, свободной от загрязнений. При подготовке поверхности испытуемого образца необходимо принять меры предосторожности против возможного изменения твердости испытуемого образца вследствие нагрева или наклепа поверхности в результате механической обработки. Образец должен быть установлен на столике прибора так, чтобы в процессе испытания он не смещался и не прогибался. Поверхность участка образца, подлежащего испытанию, должна быть установлена перпендикулярно к направлению перемещения пирамиды при вдавливании.

Микротвердость покрытия (МПа) определяется путем деления нагрузки P на условную площадь боковой поверхности F полученного отпечатка по следующей формуле:

$$H = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 18540 \frac{2P}{d^2}$$

где P —нагрузка на пирамиду, г; α .—угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ; d — длина диагонали отпечатка после снятия нагрузки, мкм.

2.7. Измерение внутренних напряжений.

В процессе получения покрытия вследствие различных структурных искажений в покрытии могут возникнуть внутренние напряжения, причем величина и характер этих напряжений зависят от природы материала покрытия и условий проведения процесса. Возникновение внутренних напряжений в покрытии выражается в сжатости или растянутости его по сравнению с нормальным состоянием. В случае растянутого состояния покрытие стремится сжаться, т. е. в нем возникают напряжения сжатия, и наоборот, если покрытие сжато, в нем возникают напряжения растяжения. Наличие в покрытиях внутренних напряжений может привести к резкому снижению антикоррозионных свойств вследствие растрескивания металла и увеличения пор, а также к отслаиванию покрытия от подслоя и понижению усталостной прочности деталей. В связи с этим контроль внутренних напряжений покрытий в производственных условиях необходим, как и контроль толщины и пористости.

Существует множество разнообразных способов для изучения внутренних напряжений, основанных на измерении деформации образца в результате сжатия или растяжения материала покрытия. Описанные в литературе методы можно разделить на следующие основные группы: методы деформации гибкого катода; метод деформации стеклянного шарика; метод датчиков; рентгенографический метод.

Для измерения внутренних напряжений в покрытиях, полученных методом гальванического осаждения, на практике наиболее часто применяются методы деформации гибкого катода. Они подразделяются на методы, при которых изгиб катода определяется в процессе осаждения металла, и методы, в которых величина прогиба (обычно стрела прогиба) определяется после электролиза.

В наиболее простом виде определение внутренних напряжений покрытия катода в процессе электролиза производится следующим образом. В качестве катода берется тонкая (толщиной 0,1—0,2 мм) стальная пластинка длиной в несколько сантиметров. Верхний конец катода жестко закреплен, а сторона, противоположная аноду, изолирована специальным лаком, стойким в данном электролите. Металл при этом осаждается только на одной стороне катода. Электролиз ведут в электролизере

прямоугольного сечения. Положение нижнего края катода фиксируется с помощью зрительной трубки по шкале, установленной перед электролизером на нуле. Катодная пластинка может иметь изгиб в обе стороны: при сжатии покрытия изгиб направлен в сторону анода, при расширении — в обратную сторону.

В некоторых случаях изгиб катода можно определить также при помощи оптических приспособлений. Например, поместив ячейку в оптический проектор, можно определить отклонение катода при электролизе по смещению его проекции на экране. Применение оптических приспособлений в несколько раз увеличивает чувствительность прибора.

Применяются методы, основанные на измерении деформации гибкого катода и отличающиеся тем, что изгиб катода определяется после электролиза и характеризуется стрелой прогиба.

2.8. Некоторые методы испытаний покрытий.

Испытания на износостойкость производят путем измерения убыли материала в результате истирания. Для испытаний на истирание применяют специальные приборы, представляющие собой пары трения. Одной из составляющих такой пары трения является испытуемый образец, а другой может служить, например, наждачное полотно (или сукно для мягких покрытий), нанесенное на специальный барабан.

Определение антифрикционных свойств (прирабатываемости, способности выдерживать удельные давления, низкий коэффициент трения и т.д.) покрытий производится, как правило, на машинах трения типа АЕ-5.

Определение степени шероховатости производится на профилографах – профилометрах методом ошупывания или с помощью микроскопа в отраженном свете.

Определение удельного электрического сопротивления производят путем измерения сопротивления покрытия при помощи электроизмерительного моста. В случае измерения электросопротивления покрытия без основы особое внимание следует уделять подбору металла подложки, который должен обеспечивать легкое отделение исследуемого покрытия без образования пор и трещин. В случае измерения сопротивления покрытия, не отделяемого от подложки, необходимо, чтобы последняя обладала значительно большим, чем покрытие, сопротивлением.

Коррозионная стойкость покрытий оценивается путем выдержки образцов с покрытием в той коррозионной среде, в которой предполагается эксплуатация готовых изделий. Существуют количественные и качественные методы оценки коррозионной стойкости. К качественным методам относятся, например, наблюдение внешнего вида и микроисследования. Количественно коррозионная стойкость оценивается временем появления первого очага коррозии и числом коррозионных центров на единице поверхности.

2.9. Исследование шероховатости поверхности покрытий

Прямой метод оценки шероховатости поверхности заключается в применении щуповых (профилометры и профилографы) и оптических (двойной и интерференционной микроскопы) приборов.

Профилометры бывают стационарного и переносного типов. Они позволяют измерять шероховатость в пределах $0,02 - 5$ мкм. Действие профилометра основано на ощупывании поверхности алмазной иглой, движущейся по ней по заданной траектории. Колебания иглы вызывают в электрической системе прибора соответствующую электродвижущую силу (ЭДС). Наиболее распространены индукционные профилометры (201, 253 завода “Калибр”, приборы Филлипс, Тейлор-Гобсон, Браш). На шкале профилометра оценка шероховатости дается по параметрам R_a или N_{sk} (среднее квадратичное отклонение высоты микронеровностей от средней линии профиля).

Профилографы применяют для записи микропрофиля поверхности ($RZ = 0,025 - 80$ мкм) в виде профилограмм. При последующей обработке снятой профилограммы могут быть получены значения R_a и RZ для данной поверхности. В оптико-механических профилографах профилограмма записывается световым лучом на фотопленке или пером самопишущего устройства на бумажной ленте. Вертикальное увеличение при снятии профилограмм значительно больше, чем горизонтальное. Радиус закругления иглы ($10 - 12$ мкм) не позволяет ей проникнуть в узкие и глубокие впадины и отразить их на профилограмме.

В щуповых приборах для измерения параметров шероховатости поверхности применяются индукционные, индуктивные, электронные и пьезоэлектрические преобразователи механических колебаний иглы в электрические сигналы (рис. 1).

Принцип работы оптико-механических профилографов состоит в том, что, откликаясь на вертикальное перемещение иглы 1 (рис. 1, а), соединенное со щупом подвижное зеркало 2 изменяет направление падающего на него света, идущего через систему призм и линз из источника 3. Отраженный от зеркала свет попадает на экран 4, где движение светящейся точки записывается в виде профилограммы с помощью фотопленки, перемещающейся с постоянной скоростью.

В индукционных приборах (рис. 1, б) катушка 1, скрепленная неподвижно с иглой 2, перемещается в магнитном поле. При этом в обмотке ее возбуждается э.д.с., пропорциональная скорости колебаний щупа. Сигналы с катушки идут на усилитель, интегрируются и поступают на шкалу профилометра.

Вследствие того, что применение индукционного сигнала требует быстрого перемещения иглы по микрорельефу, запись профиля затруднена и индукционные приборы используют обычно только в качестве профилометров. Точность этих профилометров, как правило, невелика.

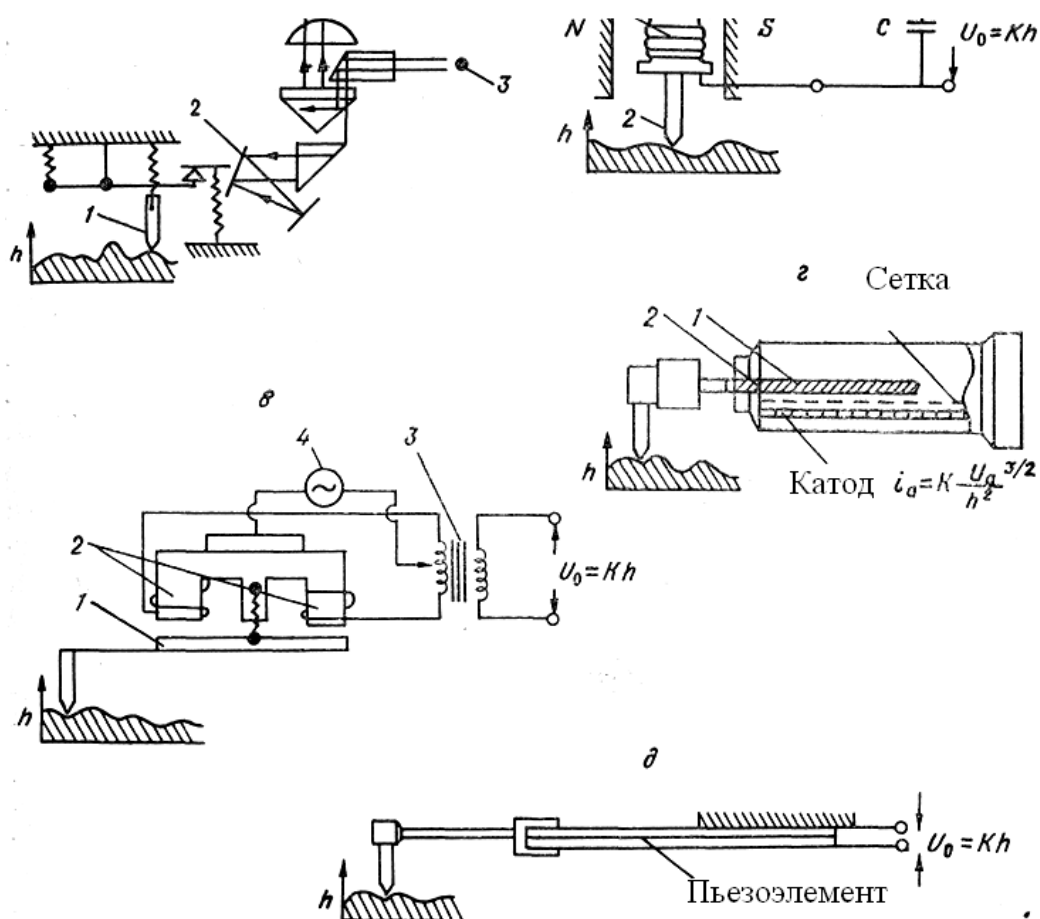


Рис. 1. Принципиальные схемы щуповых профилографов:
 а - оптико-механических, б - индукционных, в - индуктивных,
 г - электронных, д - пьезоэлектрических

В приборах индуктивного типа (рис. 1, в) преобразование колебаний щупа в электрический сигнал происходит в результате колебаний якоря 7, влияющего на индуктивность катушек 2, образующих балансный мост с двумя половинами первичной обмотки трансформатора 3. Мост питается генератором звуковой частоты 4. Напряжение, вызванное колебаниями якоря, снимается со вторичной обмотки трансформатора.

В электронных профилографах (см. рис. 1, г) колебания щупа передаются подвижному аноду 1 электронной лампы-триода через диафрагму 2, вызывая соответствующее изменение выходного напряжения.

Пьезоэлектрический метод преобразования колебаний иглы основан на пьезоэлектрическом эффекте, которым обладает ряд химических соединений (сегнетова соль, титанат бария и др.). Механические колебания пластинки (см. рис. 1, д) пьезоэлемента вызывают колебания напряжения на его обкладках, пропорциональные высоте неровностей.

Двойной микроскоп ПСС-2 и МИС-11 предназначен для измерения шероховатости поверхностей $RZ = 0,8 - 80$ мкм. В этом приборе микронеровности освещают световым лучом, направленным под некоторым углом к контролируемой поверхности. Микронеровности измеряют с помощью окулярного микрометра или фотографируют сменными объективами, достигая увеличения в 517 раз. На приборе определяют шероховатость поверхности по показателю RZ . Недостаток метода – необходимость измерений и подсчетом результатов измерений.

Микроинтерферометры (ММИ-4) используют для измерения шероховатости поверхностей $RZ = 0,025 - 0,6$ мкм. Интерференционные полосы искривляются соответственно профилю микронеровностей на рассматриваемом участке поверхности. Высоту этих искривлений измеряют окулярным микрометром при увеличении в 490 раз. Фотографирование производят при увеличении в 290 раз. Микроинтерферометры применяют в лабораторных исследованиях и производственном контроле прецизионных деталей.

3. Объекты и средства исследования.

Объектом исследований при выполнении лабораторной работы является покрытия, нанесенное на заданную деталь в процессе выполнения лабораторной работы №2. В ходе выполнения работы в зависимости от назначения покрытия обучающийся должен определить свойства покрытия, которые необходимо контролировать после нанесения, разработать методику контроля и исследовать свойства по выбранной методике.

4. Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с настоящими методическими указаниями.
2. Получить у преподавателя задание на работу.
3. Определить перечень свойств, контролируемых после нанесения покрытия
4. Разработать методику оценки свойств покрытия.
5. Произвести исследование свойств покрытия по разработанной методике. Оценить результаты.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

5. Указания по оформлению отчета по лабораторной работе.

Отчет по лабораторной работе оформляется в произвольной форме и должен содержать цель работы, эскиз детали, краткое описание назначения

покрытия, методику исследования свойств покрытия, результаты исследования свойств покрытия, оценку результатов исследования, выводы.

6. Контрольные вопросы

1. Какие вы знаете методы контроля толщины покрытий?
2. Как оценивается внешний вид покрытий?
3. Почему для покрытий применяется метод оценки микротвердости?
4. На чем основан интерферометрический метод измерения шероховатости поверхности?
5. Для измерения каких величин шероховатости используются профилографы-профилометры?

Литература для выполнения лабораторных работ

1. Защитные покрытия : учебное пособие / М. Л. Лобанов, Н. И. Кардонина, Н. Г. Россина, А. С. Юровских ; под редакцией Ю. Г. Эйсмонт. Защитные покрытия, 2022-08-31. Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. 200 с. ISBN 978-5-7996-1101-9.
2. Кулик, В. И. Функциональные стойкие покрытия [Электронный ресурс]: учебное пособие / Кулик В. И., Нилов А. С. Санкт-Петербург : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2017. 151 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/121849>. ISBN 978-5-906920-38-6.
3. Защитно-декоративные покрытия материалов: учебное пособие / А.Р. Мухтарова, Р.Р. Сафин, П.А. Кайнов, А. Е. Воронин. Защитно-декоративные покрытия материалов, 2025-01-18. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2018. 80 с. ISBN 978-5-7882-2399-5.
4. Иванов, Н. Б. Нанотехнологии материалов и покрытий : учебное пособие / Н. Б. Иванов, Н. А. Покалюхин ; под редакцией Д. С. Аношкиной. Нанотехнологии материалов и покрытий, Весь срок охраны авторского права. Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. 236 с. ISBN 978-5-7882-2538-8.
5. Бобров, Г.В. Нанесение неорганических покрытий. Теория, технология и оборудование: учебник для вузов / Г.В. Бобров, А.А. Ильин. М. : Интернет инжиниринг, 2004. 624с. : ил. ISBN 5-89594-095-1 /в пер./ : 539.00.
6. Любимов, Виктор Васильевич. Формирование микро- и наноструктурированных функциональных поверхностей режущего инструмента : учебное пособие / В.В. Любимов, В.М. Волгин, И.В. Гнидина ; ТулГУ. Тула, 2016. 111 с. : ил. ISBN 978-5-7679-3560-4.
7. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева; Ю. М. Тарновского; редколл. Н. А. Алфутов [и др.]. М. : Машиностроение, 1990. 512 с. : ил. ISBN 5-217-01113-0 ((в пер.)) : 2,60.