



ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРЬТІЙ

Блок 6 модуль 17

Автор: доц. Глушкова Д.Б.

Lect4_1M_TKMIM_GDB_31.03.15

ПЛАН

1. Общие и специальные контрольные операции определения качественных показателей.
2. Основные показатели качества покрытий.
3. Прочность покрытий на границе раздела.
4. Прочность материала покрытия.
5. Остаточные напряжения.

ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Контроль качества покрытий - важнейшие операции в технологическом процессе. Различают три стадии контроля:

1) предварительный контроль - контроль исходного состояния материала покрытия; поверхности изделий и материала покрытия; рабочих газов; состояния оборудования и др.;



2) промежуточный контроль - контрольные операции непосредственно процесса нанесения покрытия (отслеживается постоянство параметров режима; первая и вторая стадии контроля позволяют получать заданные эксплуатационные свойства нанесенных покрытий);

3) окончательный контроль - контроль нанесенных покрытий. Следует отметить, что при соблюдении постоянного контроля на первой и второй стадии можно исключить или свести к минимуму операцию окончательного контроля.

ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Предварительные и промежуточные контрольные операции существенно зависят от технологического процесса.

В связи с этим их целесообразно рассматривать применительно к различным методам и конкретным технологиям нанесения покрытий. Окончательный контроль покрытий целесообразно разделить на две группы: общие и специальные операции



К общим контрольным операциям применительно к любым покрытиям относят определение качественных показателей: адгезионной и когезионной прочности, количества несплошностей, остаточных напряжений и структурного состояния материала покрытия.

Контролируется также толщина покрытия и допустимый уровень разнотолщинности по поверхности покрытия.

ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Специальные контрольные операции выбирают в зависимости от условий эксплуатации изделий с нанесенными покрытиями. Это могут быть методики контроля износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости, теплозащиты и многие другие.

На первом этапе окончательного контроля обязательно проводят внешний осмотр поверхности покрытия визуально или при небольшом (5 - 10 раз) увеличении. При этом обнаруживаются многие дефекты покрытия: вспучивания; местные отслаивания; включение инородных частиц; наросты на острых кромках, трещины и другие.



В процессах серийного производства исследуемую поверхность сравнивают с эталонами.

ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Оговариваются допустимые дефекты в зависимости от эксплуатационных требований. Большинство методов контроля оценивают по качественным и количественным показателям.

Различают неразрушающие и разрушающие методы контроля. К неразрушающим методам относят: контроль внешнего вида, измерение толщины и шероховатости, сквозной пористости, некоторые методы оценки прочности сцепления.



Разрушающие методы контроля применяют при испытании образцов: на отрыв покрытия; общую и открытую пористость; износостойкость применительно к реальным условиям и др.

ОБЩИЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Неразрушающий контроль позволяет диагностировать состояние покрытия непосредственно на изделии по всей поверхности, поэтому его используют в практике машиностроения при производстве ответственных изделий авиационного и космического назначения, атомных реакторов и др.

Наибольшее распространение получили следующие методы:

- визуальнооптические;
- капиллярные;
- магнитные;
- радиационные;
- вихревых потоков;
- тепловые;
- электрические и др.



Перспективными следует считать энергетические, голографические и радиоволновые методы контроля. Наиболее полно методики контроля неорганических покрытий отражены в монографии Л. И. Тушинского.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Обычно качество нанесенных покрытий оценивается следующими основными показателями:

- прочностью сцепления покрытия с основным материалом изделия (адгезионная прочность oa);
- прочностью материала самого покрытия (когезионная прочность ok);
- количеством несплошностей в покрытии (пористость P);
- уровнем остаточных нагрузжений (OH).



Прочность сцепления покрытия или, как часто называют, адгезионная прочность, относится к наиболее важным показателям качества покрытий. Практически всегда стремятся получить максимально высокие значения адгезионной прочности ($oa \wedge max$), что обеспечивает надежность покрытий в процессе эксплуатации изделий.

При невысокой адгезионной прочности часто наблюдается отслаивание покрытий. При нанесении внутренних покрытий понятие адгезионной прочности утрачивает смысл.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Прочность материала самого покрытия

Его отождествляют с когезионной прочностью. Обычно в практике нанесения покрытий стремятся получить максимальные ее значения (ок \wedge max), однако иногда этого не требуется, например, когда покрытия выполняют роль срабатываемого уплотнения в различных конструкциях турбинных установок.



Наиболее высокие значения ок характерны для внутренних покрытий, близких по величине к ок материала изделия.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Пористость покрытий

Она во многом определяется количеством различного рода несплошностей (часто их обобщают под названием пористость). Обычно при нанесении покрытий стремятся к минимальным значениям пористости (P^{min}), что ведет к возрастанию адгезионной и когезионной прочности покрытий. Наличие несплошностей резко снижает коррозионную стойкость и жаростойкость покрытий, и многие другие эксплуатационные параметры.



пористое титановое покрытие

В этом отношении выгодно отличаются внутренние покрытия с практически нулевой пористостью.

Встречаются покрытия, в которых пористость играет положительную роль, например теплозащитные и ряд других покрытий.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Остаточное напряжение

Наличие в покрытиях остаточных напряжений высокого уровня крайне нежелательно, так как это приводит к снижению адгезионной прочности, отслаиванию покрытия в процессе эксплуатации, существенно уменьшается надежность работы покрытия.



Особенно опасны остаточные напряжения, возникающие на границе раздела покрытие - основной материал. В этом отношении предпочтительнее внутренние покрытия, в которых отсутствует четкая граница раздела.

Анализ основных показателей качества внешних и внутренних покрытий, несомненно, показывает преимущества последних.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

Внутренние покрытия отличаются большей надежностью при эксплуатации изделий, обусловленной высокими значениями когезионных связей в поверхностном слое и минимальным количеством несплошностей при допустимом уровне остаточных напряжений.

Кроме того, внутренние покрытия не меняют размеры изделий, практически и их массу, не требуют дорогостоящей последующей обработки. Однако их возможности ограничены. Внешние покрытия позволяют получать поверхность с более разнообразными физико-химическими свойствами.



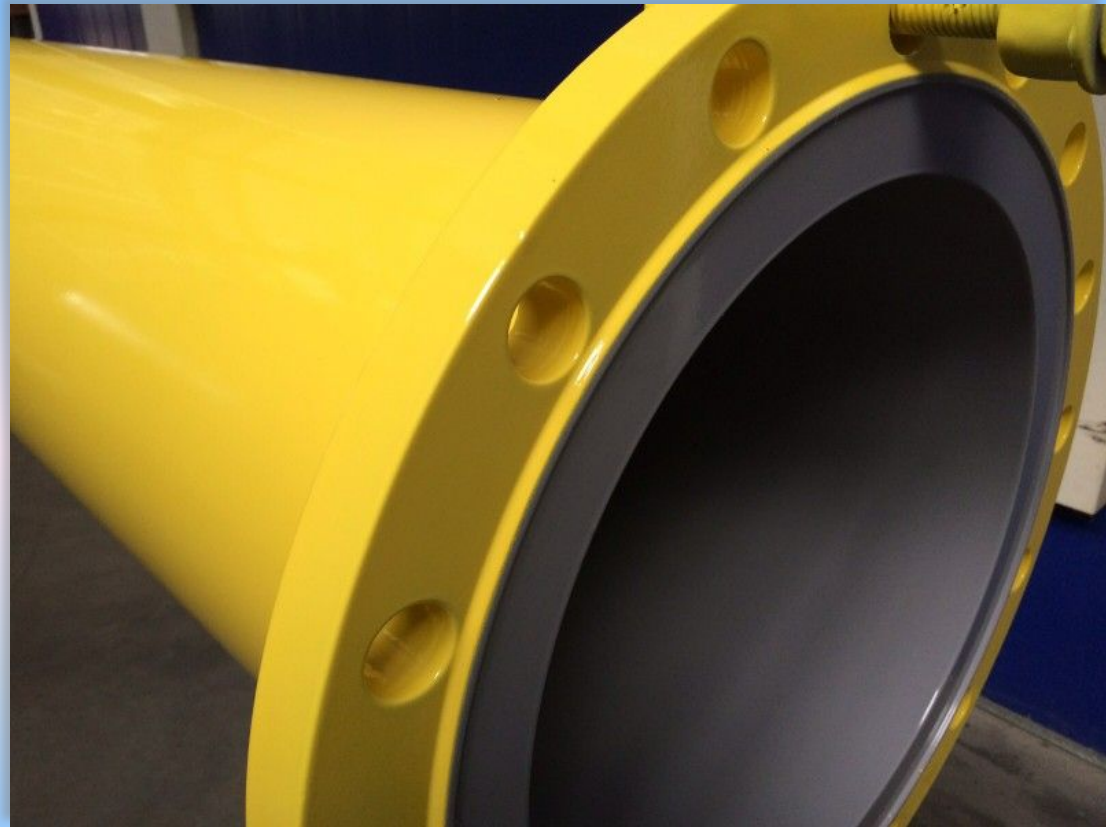
Кроме того, внутренние покрытия мало пригодны для восстановления после эксплуатационных поверхностей изделий, особенно в результате износа.

При разработке технологического процесса необходимо руководствоваться в первую очередь вышеизложенными закономерностями изменения качества покрытий.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Прочность покрытий на четко выраженной границе раздела называют прочностью сцепления или адгезионной прочностью (G_a).

Для внутренних покрытий и покрытий, формирующихся на расплавленной поверхности, отсутствует четкая граница раздела, поэтому данный параметр качества покрытия для них не определяется.



В зависимости от технологии нанесения и толщины покрытия существует множество методов оценки адгезионной прочности.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Испытания на отрыв.

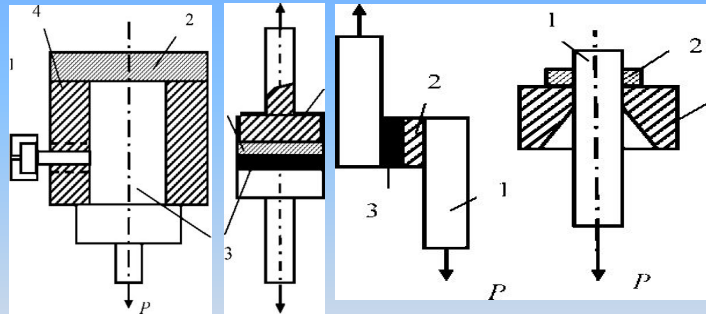


Рис. 3.1. Схемы испытаний покрытий на отрыв (а, б) и на сдвиг (в, г): а - клеевая (паяная) методика; б - штифтовая методика; в - сдвиг по клею или припою; г - срез покрытия припоём; 1 - образец; 2 - покрытие; 3 - клей или припой; 4 - втулка-образец; 5 - штифт

. При испытании создают напряжение на границе раздела покрытия с основным материалом. Большое применение получили разновидности клеевых или паяных, а так же штифтовых методик

Неравномерное разрушение поверхности покрытия, обусловленное одновременным действием не только нормальных напряжений, но и частично касательных, не позволяет получить истинные значения адгезионной прочности покрытия.

Статистика показала, что при нагружении отрыв часто происходит не только по поверхности раздела, но и по материалу покрытия. Такое разрушение наиболее вероятно при невысокой когезионной прочности покрытия и наличии в нем различных несплошностей. Обычно разрушение цилиндрического стыка начинается с периферии образца и затем распространяется на остальную площадь.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Следует отметить, что при испытании на отрыв по штифтовой методике (штифтовой пробе) необходимая толщина покрытия должна составлять не менее 0,2 - 0,3 мм.

В противном случае возможен срез покрытия по периферии образца.

Штифтовые пробы наиболее пригодны для оценки адгезионной прочности порошковых покрытий, в меньшей мере твердофазных.



Клеевые или паяные пробы могут быть использованы для любых покрытий. Толщина покрытия, как правило, не регламентируется. Следует учитывать возможность капиллярного затекания клея или припоя в несплошности покрытия в процессе изготовления пробы.

При наличии сквозной пористости происходит увеличение адгезионной прочности исходного образца.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Испытания на срез (сдвиг).

Конструктивные схемы образцов представлены на рис 3.1 в и г. При этом методе испытаний, также применяются клеевые (паяные) или штифтовые пробы. Практика испытаний показала зависимость адгезионной прочности от размеров площади разрушения. Отмечена особенность неравномерного нагружения образцов по покрытию, что затрудняет получение истинных значений прочности сцепления при сдвиге.



Испытания адгезионной прочности покрытий позволили выявить ряд закономерностей, полученных в одинаковых условиях нанесения покрытий:

1. Влияние размерного фактора. Например, при испытании на отрыв с увеличением диаметра напыленного образца прочность сцепления существенно возрастает.
2. Влияние толщины покрытия. При газотермическом напылении (порошковые покрытия) прочность сцепления резко падает с увеличением толщины покрытия.
3. Влияние метода испытания. В большинстве случаев прочность при испытании на сдвиг значительно более высокая, чем при испытании с отрывом покрытия от.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Наряду с количественными оценками адгезионной прочности покрытий широко используются и качественные.

Их целесообразность заключается в сопоставлении полученных результатов применительно к конкретным технологиям.



Наибольшее применение получили следующие методики: испытание на изгиб; испытание царапанием; испытание циклической ударной нагрузкой и испытание вдавливанием.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Различные испытания

Испытание на изгиб. Покрытие наносится на плоский образец. В процессе изгиба на поверхности покрытия появляется трещина. Качественный показатель оценивается по углу изгиба.



Испытание царапанием. Резцом поверхность покрытия прорезается двумя параллельными канавками. Отслаивание происходит при минимальном расстоянии между канавками.

Испытание циклической ударной нагрузкой. Прочность сцепления определяется числом ударов при сбрасывании ударного инструмента (шарика, блока и т.д.) на определенный участок поверхности покрытия.

ПРОЧНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА

Испытания вдавливанием. Стальной твердый шарик вдавливается в поверхность основного материала с противоположной покрытию стороны. Визуально оценивается деформированное состояние покрытия в месте деформации. Например, испытывают плоский образец толщиной 1,5 - 2,0, длиной 75 и шириной 45 мм.

Наряду с отмеченными оценками применяют для качественной оценки кручение, износ, термоциклирование и др. Исключительно важны неразрушающие методы контроля адгезионной прочности для дальнейшего развития технологических процессов при нанесении покрытий. Наибольшего внимания заслуживает применение ультразвукового контроля, позволяющего распознавать на границе раздела различные дефекты: поры, трещины, местные отслоения и др.



По их количеству и распространению осуществляют качественную оценку состояния границы раздела, а следовательно, и уровень адгезионной прочности (хороший, умеренный, слабый).

В производстве нашли применение три варианта ультразвуковой дефектоскопии: зеркально-теневой с отражением от границы раздела; то же с отражением от данной поверхности и сквозные прозвучивания.

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ

Прочность материала покрытия (когезионная прочность) σ_k - важнейший параметр его качества. Большинство эксплуатационных требований связано с необходимостью получения покрытий с высокими значениями

При нанесении твердофазных покрытий и покрытий, формирующихся из расплавленного состояния, прочность материала покрытия достаточно высокая.



Оценка когезионной прочности таких покрытий не производится. Тонкие покрытия и пленки (единицы микрон и менее), полученные из атомарных потоков, из-за несовершенства кристаллического строения имеют невысокие показатели когезионной прочности.

Однако методы их количественной оценки весьма затруднены. Количественная оценка когезионной прочности применяется в основном для порошковых покрытий

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ

Количественные оценки когезионной прочности в основном проводятся на растяжение и изгиб.

Для испытаний на растяжение применяется несколько методик, из которых наиболее часто - трубчатый метод.

Для определения когезионной прочности используют образцы с клеевыми и паяными покрытиями. Испытания проводят на отрыв или растяжение в направлении увеличения толщины покрытия.



При испытаниях материала покрытия на изгиб используют образцы прямоугольной формы, изготовленные из отделенных от основы покрытий. Предел прочности покрытий в 2 - 3 раза ниже прочности исходного материала в литом или деформированном состоянии.

ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ

Для оценки когезионной прочности покрытий применяются и качественные испытания, например аналогичные описанным применительно к анализу адгезионной прочности.

Когезионную прочность можно удовлетворительно оценить при замере твердости по Роквеллу и Виккерсу - невысокие значения показателей твердости свидетельствуют о слабых межчастичных связях в материале покрытия, что подтверждается также размытым отпечатком при измерении твердости по Виккерсу.



Рис.5



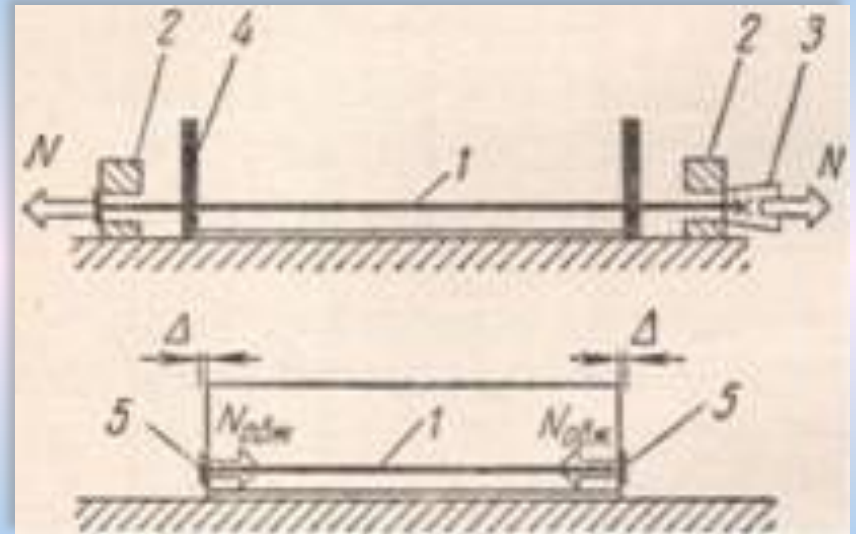
Рис.6

Часто для анализа когезионной прочности используют металлографические исследования покрытий.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Эксплуатационные свойства изделий с нанесенными покрытиями в значительной мере зависят от остаточных напряжений, формирующихся как в материале покрытия, так и в поверхностных слоях основного материала на границе раздела.

Как правило, наиболее высокий уровень остаточных напряжений наблюдается на границе раздела. В зависимости от свойств материалов покрытия и изделия (основного материала), условий формирования покрытий, его толщины и ряда других факторов возможно образование как растягивающих, так и сжимающих напряжений.



Если величина остаточных напряжений в материале покрытия близка к пределу прочности, то происходит либо отслоение покрытия, либо образование в нем трещин. Считают, что остаточные напряжения оказывают влияние на механические, физические и химические характеристики покрытия.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Следует различать остаточные напряжения во всем объеме покрытия - макронапряжения и в отдельных его участках - микронапряжения. Особенно неблагоприятны объемные макронапряжения.

Локальные микронапряжения более склонны к релаксации. Надежность и эксплуатационные характеристики в основном зависят от качества нанесенных покрытий. Микро- и макронапряжения в основном материале не оказывают существенного влияния. Поэтому в дальнейшем остаточные напряжения будут рассмотрены только применительно к материалу покрытия.



Большое влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства изделий с нанесенными покрытиями приводит к необходимости эффективного контроля этого параметра качества.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Механизм и кинетика формирования остаточных напряжений в покрытиях достаточно изучены и опубликованы. При разработке технологического процесса нанесения покрытия необходимо руководствоваться следующими положениями:

-значения коэффициентов термического расширения основного материала и материала покрытия должны быть максимально близки ($K_{ТРО} = K_{ТРП}$); при большой разнице их величин следует прибегать к нанесению промежуточных слоев;



-необходимо максимальное увеличение адгезионной прочности покрытий, так как на границе раздела наиболее высокий уровень напряжений; -при формировании покрытий следует тормозить образование усадочных процессов;

-целесообразно выбирать минимальные значения толщины покрытия.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Для контроля остаточных напряжений применяют неразрушающие и разрушающие методы. Особенно целесообразны неразрушающие методы, так как они позволяют осуществлять контроль непосредственно на изделии без его разрушения. Наибольшее применение получили физические методы: рентгеновский и распространение в покрытии упругих волн.

Рентгеновский метод базируется на изменении напряженности кристаллической решетки под воздействием остаточных напряжений. Измеряется изменение угла отражения проникающего излучения при деформации кристаллитов.



Определение остаточных напряжений распространением упругих волн осуществляется с применением акустических преобразователей или моно-хроматических когерентных потоков излучения (лазеров).

Физические методы контроля позволяют получать в основном качественную оценку напряженного состояния покрытия преимущественно локального характера, наиболее достоверные результаты - при контроле покрытий с высокой однородностью и минимальной анизотропией.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Количественные методы оценки остаточных напряжений связаны с измерением деформационных процессов в покрытии и основном материале. Часто используют методику определения величины остаточных напряжений по кривизне напыленного прямоугольного образца.

В этом случае покрытие наносят на длинную, узкую и тонкую пластину (основной материал). Покрытия различной толщины (5пк) из молибдена, никелевого сплава и оксида алюминия напыляли плазменным и газопламенным методами.



Многочисленные исследования показали, что, когда КТР покрытия больше КТР основы ($KTR_{п} > KTR_{о}$), в покрытии возникают остаточные напряжения растяжения ор. В других случаях ($KTR_{п} < KTR_{о}$) в покрытиях формируются остаточные напряжения сжатия. Остаточные напряжения деформируют пластину.

По радиусу кривизны определяют среднюю величину остаточных напряжений в покрытии.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Для определения остаточных напряжений по толщине покрытия при заданном его значении применяется последовательное снижение толщины слоя различными способами: шлифованием или травлением покрытия.

Наиболее часто используют травление в гальванических ваннах. Роль анода выполняет образец с нанесенным покрытием. Для определения модуля упругости материала покрытий (Еш) разработаны соответствующие методики. Обычно для этих целей изготавливают специальные образцы.



Для испытаний требуется сложное регистрирующее и измерительное оборудование и аппаратура. А. Ф. Пузряковым разработана оригинальная методика определения модулей упругости покрытий при плазменном напылении:

испытуемое покрытие напыляют на торцевые поверхности изделия типа поршневого кольца, сжатого до рабочего зазора; модуль упругости определяют исходя из условия равенства сжимающих и разжимающих усилий в зазоре.

Контрольные вопросы:

1. Назовите стадии контроля качества покрытий.
2. Перечислите основные показатели, по которым оценивается качество нанесенных покрытий.
3. Что происходит с покрытием при невысокой адгезионной прочности сцепления покрытия с поверхностью изделия?
4. В каких покрытиях пористость играет положительную роль?
5. Какую нежелательную роль играют остаточные напряжения в покрытиях?
6. Перечислите основные количественные методы определения адгезионной прочности покрытий.
7. Назовите основные качественные методы оценки адгезионной прочности покрытий.
8. Какие количественные методы применяются для оценки когезионной прочности материала покрытия?
9. Какой показатель качества покрытий оказывает наибольшее влияние на эксплуатационные свойства покрытых изделий?
10. Назовите основные неразрушающие методы контроля остаточных напряжений в покрытиях.



Кафедра технології металів і матеріалознавства

E-mail diana.borisovna@gmail.com

**Автор: доц. Глушкова Д.Б.
Lect9_1M_TKMIM_GDB_31.03.15**