

Тополянский П.А., Соснин Н.А. Технологический аудит процессов нанесения покрытий и упрочнения.// Технолог по сварочному производству промышленных предприятий, объектов энергетики и строительства. Материалы 3-й Всероссийской практической конференции 30 мая - 1 июня 2002 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ. Санкт-Петербург. 2002. - С. 132-141

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И УПРОЧНЕНИЯ**

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А., СОСНИН Н.А.

НПФ «Плазмацентр», СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия

Технологический аудит процессов нанесения покрытий (упрочнения) состоит в подтверждении достаточного качества процесса изготовления деталей с покрытием, включающего предварительные и последующие операции, каждая из которых прошла этап сертификации.

Процесс технологического аудита состоит в изучении конструкторской и технологической документации, программ обучения и подготовки кадров, методик проведения измерений, сертификатов на основное и вспомогательное оборудование и программ обеспечения ритмичности производственного процесса, являющихся гарантией того, что процесс обеспечивает изготовление продукции высокого качества даже в предельно напряженном рабочем режиме.

Для проведения технологического аудита процесса нанесения покрытий необходимо сертифицировать все операции связанные с его созданием и все виды используемого оборудования. Кроме того, процесс должен продемонстрировать свою способность производить продукцию высокого качества, отвечающего требованиям потребителей. Сертификат удостоверяет достижение достаточного уровня, подтверждающего способность производственной операции или оборудования производить продукцию в соответствии с требованиями технической документации.

На первом этапе аудита организуется сбор соответствующей информации, определяются основные позиции контроля, изучаются возможности производства. На втором этапе – изучается процесс нанесения покрытия, рассчитанный на опытное (единичное) изготовление деталей с покрытием. При этом определяются:

- характеристики оборудования и процессов, используемых для производства деталей с покрытиями;
- свойства покрытий, деталей с покрытиями;

- готовность процесса к переходу от опытных (единичных) работ к регулярному производству.

На третьем этапе предусматривается проведение оценки процесса на предмет его соответствия требованиям потребителя, при этом, в большинстве случаев, проверяется процесс имеющий ограниченные возможности по серийности производства продукции. На четвертом этапе обеспечивается тестирование процесса при производстве серийной продукции, отвечающей требованиям потребителя.

Сертификация отдельных операций состоит из:

- работы с документацией;
- работы с сертификатами на технологическое и испытательное оборудование, что позволяет удостовериться в способности оборудования выполнять конкретную операцию и находиться в работоспособном состоянии;
- оценки требований к операции на соответствие техническим условиям, приемлемости и гарантии получаемых результатов.

### **Основные понятия и определения технологического процесса нанесения покрытия**

*Технологический процесс нанесения покрытий (упрочнения)* – это часть производственного процесса, содержащая действия по последовательному изменению геометрических размеров и физико-механических свойств деталей или заготовок и их контроль. При этом используются разнообразные технологические процессы, имеющие различную классификацию. Например, в зависимости от толщины наносимых покрытий процессы подразделяются на наплавку, напыление и осаждение.

Производственный процесс включает:

- ◆ изготовление и обработку заготовок для получения из них деталей, на которые будут наноситься покрытия или производиться процесс упрочнения;
- ◆ сборку деталей, узлов и изделий, имеющих покрытия или упрочненные поверхности, их испытание;
- ◆ технический контроль, хранение и перемещение деталей и изделий с покрытиями или упрочнением на всех стадиях изготовления;
- ◆ организацию снабжения и обслуживания рабочих мест и участков, задействованных в изготовлении деталей и изделий с покрытиями или упрочнением;
- ◆ управление всеми звеньями производства деталей и изделий с покрытиями или упрочнением;

♦ работы по технической подготовке производства изготовления деталей и изделий с покрытиями или упрочнением.

Технологический процесс нанесения покрытий или упрочнения выполняется на рабочем месте. *Рабочее место* – это участок производственной площади, соответственно оборудованный для выполнения заданной работы.

Технологический процесс нанесения покрытий или упрочнения состоит из операций. *Технологическая операция* – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте (например, обезжиривание, абразивно-струйная обработка, контрольная операция и др.). Операция является основой производственного планирования и учета. На основе операций определяются трудоемкость изготовления деталей, узлов и изделий, а также потребное количество рабочих, оборудования, приспособлений и инструментов, устанавливается себестоимость обработки, производится календарное планирование и контроль производства.

Операция может выполняться за один или несколько установок обрабатываемой детали. *Установ* представляет собой часть технологической операции, выполняемой при одном закреплении или положении заготовки.

Во многих случаях операции делят на позиции. *Позиция* – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной или установленной заготовкой (совместно с приспособлением), относительно неподвижной или движущейся части оборудования для выполнения определенной части операции. Например, позиция – это каждое из различных положений заготовки относительно плазматрона или плазматрона относительно заготовки при одном ее закреплении. Различие между позицией и установом состоит в том, что в каждом новом установе новое взаимное положение заготовки и, например, плазматрона для нанесения покрытия достигается путем перезакрепления заготовки, а в каждой новой позиции – без открепления заготовки, перемещением или поворотом заготовки или плазматрона в новое положение. Замена установов позициями всегда дает сокращение времени на нанесение покрытия, поскольку поворот приспособления с заготовкой или плазматрона занимает меньше времени, чем открепление, переустановка и закрепление заготовки.

Операции разделяют на переходы – технологические и вспомогательные. *Технологический переход* – законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством применяемого инструмента для нанесения покрытия и обрабатываемых поверхностей. Различают переходы простые и

сложные. Сложным называется переход, когда в работе участвуют одновременно несколько инструментов для нанесения покрытия (упрочнения). Замена простых переходов сложными сокращает время нанесения покрытия и повышает производительность труда. *Вспомогательный переход* – это законченная часть технологической операции, состоящая из действий человека или оборудования, которые не сопровождаются изменением формы, размера и свойств детали, но необходимы для выполнения технологического перехода. Примерами вспомогательных переходов являются установка заготовки, очистка сопла плазмотрона и др.

Технологический переход состоит из рабочих и вспомогательных ходов. *Рабочим ходом (проходом)* называется часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента для нанесения покрытия относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров или свойств заготовки, т.е. проход – часть перехода для нанесения одного слоя напыляемого материала. Переход делят на проходы в тех случаях, когда за один проход невозможно нанести необходимое покрытие или обеспечить необходимые свойства на поверхности заготовки.

*Вспомогательный ход* – часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента для нанесения покрытия относительно заготовки, не сопровождаемого изменением формы, размеров и свойств заготовки, но необходимого для выполнения рабочего хода.

Все действия рабочего, совершаемые им при выполнении технологической операции, делят на отдельные приемы. Под *приемом* понимают законченное действие рабочего. Обычно приемами являются вспомогательные действия, например включение установки, изменение параметров оборудования и т.д. Понятие прием используется при техническом нормировании операции.

### **Основные элементы сертификации**

После прохождения технологического аудита выдается сертификат на:

- способ нанесения защитного покрытия (упрочнения);
- профессиональную деятельность специалистов (аттестацию специалистов);
- деталь, изделие, конструкцию с покрытием.

Для каждого данного направления требуется произвести тестирование (испытание) способа, детали с покрытием, обслуживающего персонала.

Потребителями сертификата являются:

- предприятия, на основном или вспомогательном производстве которых используются процессы нанесения покрытий для собственных нужд;
- предприятия, выполняющие услуги по нанесению покрытий для сторонних заказчиков;
- предприятия, проводящие исследования, разрабатывающие новое оборудование, материалы, технологии, внедряющие их для сторонних заказчиков, участвующие в учебном процессе обучения специалистов в области нанесения покрытий.

Порядок проведения технологического аудита для получения сертификата состоит из рассмотрения:

- Организационной структуры (определение ответственных, отвечающих за проведение процессов нанесения покрытий).
- Конструкторской, технологической документации и договоров, связанных с процессами нанесения покрытий. В конструкторской документации должны быть отражены все требования к рабочим поверхностям с покрытием или упрочнением (твердость, микротвердость, шероховатость, материал покрытия, метод нанесения покрытия или упрочнения). Также должны быть указаны соответствующие ГОСТы, руководящие материалы, технологические инструкции на процессы нанесения покрытия или упрочнения. В технологической документации должны быть отражены: название; назначение; используемые материалы, оборудование, приспособление, инструмент, защитные средства; требования к изделиям; подготовительные процессы; порядок проведения основных процессов; требования и порядок определения качества процессов; требования техники безопасности. В договорах на выполняемые услуги должно быть техническое задание, а также определены правила приемки изделий.
- Процесса документооборота (хранение, доступность и т.д.) на процессы нанесения покрытий. Все исполнители технологических процессов должны знать нахождение необходимой конструкторской и технологической документации, ГОСТов, ТУ, сертификатов и иметь возможность их использования в любое рабочее время.
- Документов на приобретаемые материалы, используемые в процессах нанесения покрытий – договора поставки, сертификаты. Исполнители процессов должны знать местонахождение договоров поставок и сертификатов на используемые материалы. Они должны быть легко востребованы при первой необходимости.

- Отдельных этапов выполнения процессов, с целью определения всех характеристик, параметров и критериев качества нанесения покрытий и упрочнения.
- Управления процессом и соблюдения технологии нанесения покрытий. Обеспечение поэтапного контроля со стороны персонала отвечающего за проведение всего процесса.
- Процесса тестирования и испытаний нанесения покрытий. Определение ответственных за выполнение этих работ, наличие методик, инструкций.
- Способов и средств используемых для испытаний параметров процесса и его результатов.
- Методов устранения возможных ошибок, дефектов, брака, некачественных материалов и т.д.

К дополнительным элементам технологического аудита относится рассмотрение:

- 1) существующей системы качества нанесения покрытий;
- 2) процесса конструирования деталей с покрытием и управления этим процессом;
- 3) системы конструирования и изготовления заготовок под нанесение покрытий (в случае их приобретения - состояние поставки);
- 4) существующих положений и методик по испытанию деталей с покрытиями;
- 5) рациональности в применении деталей с покрытием по условиям их эксплуатации;
- 6) условий хранения, упаковки, отправки заказчику деталей с покрытием;
- 7) вопросов связанных с повышением квалификации и другим обучением специалистов в области нанесения покрытий;
- 8) сервиса по обслуживанию заказчиков;
- 9) применяемых статистических методов, оценивающих качество продукции.

### **Выбор критериев качества деталей с покрытиями (упрочнением)**

Выбор критериев надежности и работоспособности деталей с покрытиями, полученными различными технологическими способами основан на последовательном прохождении следующих этапов:

1. Оценка применимости технологии на основе классификационных и сравнительных характеристик методов

нанесения покрытий, а также отечественного и зарубежного опыта использования этих методов (информационных банков данных);

2. Анализ свойств покрытий и деталей с покрытиями при использовании конкретной технологии по разработанным методикам испытаний свойств на образцах;
3. Моделирование условий эксплуатации и проведение испытаний на модельных образцах деталей с покрытиями;
4. Проведения натуральных испытаний деталей с покрытиями.

Исходя из методологии выбора критериев надежности и работоспособности деталей с покрытиями, полученными различными технологическими способами, необходимо знать:

- классификацию и характеристики основных технологий нанесения покрытий, их отличительные особенности;
- основные методы исследования свойств покрытий и деталей с покрытиями;
- методы моделирования и создания стендов для испытания деталей с покрытиями применительно к конкретным условиям эксплуатации изделий;
- требования к проведению натуральных испытаний деталей с покрытиями.

С целью оптимального выбора для промышленного использования технологии нанесения покрытий на первом этапе, кроме основных теоретических возможностей методов, изучаются информационные банки данных, основанные на развиваемых базах применения технологий наплавки, напыления и осаждения. Это особенно важно, т.к. достоверность оценок, прогнозируемых на основе теоретических разработок, недостаточно высока, вследствие многообразия факторов, которые необходимо учитывать при проектировании технологий наплавки, напыления и осаждения.

### **Классификация методов исследования свойств покрытий на основе испытаний образцов**

С целью оценки и сравнения свойств покрытий, деталей с покрытиями, свойств поверхностного слоя после проведения технологий упрочнения используются различные методы [1-4]. Наиболее полная классификация методов исследования свойств покрытий и деталей с покрытиями приведена в табл. 1 [5]. С целью тестирования качества нанесения покрытия разработаны методики проведения конкретного метода исследования и разработан вид образца для испытания. Для сравнительной оценки качества

нанесения покрытия достаточно проведение выборочных испытаний свойств покрытий и деталей с покрытием. В табл. 2 приведены основные характеристики поверхностного слоя, которые влияют на эксплуатационные свойства деталей с покрытием и в частности напрямую связаны с долговечностью и надежностью систем подверженных износу или коррозии [6]. Для характеристики и оценки поверхностного слоя деталей с покрытием рекомендуется исследовать приведенные параметры, которые наряду с известными параметрами шероховатости и волнистости, деформационного упрочнения, остаточных напряжений, содержат параметры химического состава, структурно-фазового состояния, а также экзоэлектронной эмиссии.

Табл. 1

Методы исследования свойств покрытий и деталей с покрытиями

Испытания покрытий	Испытания деталей с покрытиями
--------------------	--------------------------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>• определение механических свойств (модуля упругости, твердости, пластичности, когезионной прочности);</li> <li>• определение физических свойств (плотности, пористости, газопроницаемости, электропрочности, теплопроводности, коэффициента трения, теплового коэффициента линейного расширения, оптических);</li> <li>• определение защитных свойств (при высоких температурах, в коррозионных средах);</li> <li>• испытания на изнашивание (гидроабразивное, газоабразивное, в абразивной массе, ударно-абразивное, при фреттинг-коррозии, при трении скольжения);</li> <li>• определение прочности соединения (штифтовым методом, испытаниями на сдвиг, клеевым методом, методом склерометрии, вдавливанием индентора, ударными испытаниями);</li> <li>• структурные исследования (металлографический анализ, электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, растровая микроскопия, рентгеноспектральный анализ).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• определение остаточных напряжений (механическими методами, рентгеноструктурным анализом);</li> <li>• статические и динамические испытания (на растяжение, на твердость, на микропластичность, на высокотемпературное растяжение, оценка внутреннего трения);</li> <li>• усталостные испытания (многоцикловые, малоцикловые, контактные, термические);</li> <li>• испытания на трещиностойкость (статические, динамические, циклические).</li> </ul>
---	--

Из широкого спектра методов исследования свойств наплавленных покрытий [4] определяющими являются исследования эксплуатационных характеристик, например, способность противостоять абразивному износу, кавитации, коррозионно-механическому износу и т.д. Для напыленных покрытий наиболее значимым является прочность сцепления покрытия с основой [3]. Для покрытий полученных методами осаждения определяющими являются микротвердость и остаточные напряжения [2].

Табл. 2

Классификация параметров поверхностного слоя деталей  
с покрытиями (упрочнением)

Характеристика	Наименование параметра	Обоз-
----------------	------------------------	-------

поверхностного слоя			начение	
Неровности поверхности	Шероховатость	Наибольшая высота неровностей профиля, мкм	$R_{max}$	
		Высота неровностей профиля, мкм	$R_z$	
		Среднее арифметическое отклонение профиля, мкм	$R_a$	
		Среднее квадратичное отклонение профиля, мкм	$R_q$	
		Средний шаг неровностей профиля, мм	$S_m$	
		Средний шаг местных выступов профиля, мм	$S$	
		Радиус скругления впадин неровностей, мкм	$r_w$	
		Относительная опорная длина профиля, %	$t_p$	
		Направление неровностей	Угол между направлением неровностей и направлением действия внешней нагрузки, °	$\alpha_w$
			Волнистость поверхности	Высота волнистости, мкм
		Средний шаг волнистости, мм	$S_z$	

Физико-химическое состояние поверхностного слоя	Структура	Размер зерен, мкм Форма и распределение зерен Плотность дислокаций, см <sup>-2</sup> Концентрация вакансий, % Размер (форма) блоков, нм Угол разориентировки блоков, ° Размер областей когерентного рассеяния, нм	$I_3$ - $\rho$ $C_v$ $I_6$ $\alpha'_6$ $\langle D \rangle$
	Фазовый состав	Число, концентрация и распределение фаз Тип кристаллической структуры фаз Параметры решетки фаз, нм, °	- MS a,b,c $\alpha,\beta,\gamma$
	Химический состав	Профиль концентрации элементов в поверхностном слое, % Концентрация элементов в фазах, %	$C(x)$ $C_{\phi}$
	Деформация (наклеп)	Степень деформации, % Глубина наклепа, мкм Степень наклепа, % Градиент наклепа, HV/мм Микродеформация решетки, %	$\varepsilon$ $h_n$ $i_n$ $I_{гр}$ $\langle \varepsilon \rangle$
	Остаточные напряжения	Макронапряжения, МПа Микронапряжения, МПа Статические искажения решетки, МПа	$\sigma'_{ост}$ $\sigma''_{ост}$ $\sigma'''_{ост}$
	Экзоэлектронная эмиссия	Интенсивность эмиссии, импульс/с Работа выхода электронов, эВ	$I$ $\varphi$

### Литература:

1. Тополянский П.А. Опыт использования процессов газотермического напыления в электромашиностроении. - В кн. «Применение прогрессивных процессов газотермического напыления в промышленности», Л., 1989. - С. 37-42.
2. Соснин Н.А., Тополянский П.А., Вичик Б.Л. Плазменные покрытия (технология и оборудование).- СПб: О-во «Знание», 1992. - 28 с.
3. Кулик А.Я. Газотермические покрытия в дизелестроении. - Л.: ЛДНТП, 1989. - 24 с.
4. Толстов И.А., Коротков В.А. Справочник по наплавке. - Челябинск: «Металлургия», Челябинское отделение. 1990.- 384 с.
5. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. - Новосибирск: «Наука», 1986. - 200 с.
6. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: «Машиностроение», 1988. - 240 с.