

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технология машиностроения»

СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Пособие
для студентов специальности
1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Минск
БНТУ
2022

УДК 621.793/.795+621.787 (075.8)

ББК 30.61я7

С73

С о с т а в и т е л и:

*И. О. Соколов, С. Э. Крайко, О. Г. Девойно,
А. С. Володько, Л. И. Пилецкая*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра материаловедения и технических систем
Белорусского государственного технологического университета;
зам. начальника отделения технологий машиностроения
и металлургии, зав. лаб. машиностроительных
и сверхтвердых материалов Объединенного института машиностроения
НАН Беларуси, д-р тех. наук *В. И. Жорник*

С73

Способы упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин : пособие для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» / сост.: И. О. Соколов [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – 62 с.

ISBN 978-985-583-387-2.

В пособии описаны методы подготовки поверхностей под плазменное и газопламенное напыление. Приведена технология и оборудование получения металлических порошков, плазменного и газопламенного напыления. Подробно рассмотрены лабораторные методы определения качества получаемых защитных и износостойких покрытий.

Издание предназначено для студентов дневной и заочной форм получения высшего образования специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения», а также может быть использован студентами других машиностроительных специальностей.

УДК 621.793/.795+621.787 (075.8)

ББК 30.61я7

ISBN 978-985-583-387-2

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Подготовка поверхности деталей под нанесение покрытия. Струйно-абразивная обработка.....	4
Лабораторная работа № 2. Классификация методов получения порошков и подготовка их к напылению	16
Лабораторная работа № 3. Изучение технологии нанесения покрытий методом газопламенного напыления.....	26
Лабораторная работа № 4. Изучение технологии нанесения покрытий методом плазменного напыления	34
Лабораторная работа № 5. Контроль качества напыленных покрытий и методы его определения	46
Приложения	54
Приложение 1	54
Приложение 2	59

Лабораторная работа № 1

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПОД НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЯ. СТРУЙНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Цель работы:

1. Ознакомление с классификацией способов подготовки поверхности изделия под нанесение покрытия и технологическими процессами механической очистки поверхности.

2. Изучение технологии и оборудования струйно-абразивной (дробеструйной) обработки для подготовки поверхности под нанесение покрытия.

3. Практическое приобретение навыков определения влияния режимов дробеструйной обработки (давления, сжатого воздуха, дистанции, диаметра сопла, материала испытываемого образца) на шероховатость поверхности.

Оборудование и материалы:

Дробеструйная установка, набор сопловых наконечников, набор испытываемых образцов, эталонные образцы шероховатости, перчатки, очки.

Работа рассчитана на шесть академических часов.

Общие сведения

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к покрытиям, является прочность сцепления нанесенного слоя с основой. Вид этого сцепления, а также способ, которым оно осуществляется, могут быть различны и меняются в зависимости от требований к покрытию и условий эксплуатации детали.

В большинстве случаев при напылении соединение осуществляется посредством механического сцепления напыляемого покрытия с основой, следовательно, предварительная обработка поверхности основы становится важным фактором для обеспечения надежности процесса нанесения покрытия на деталь. Одними из главных показателей поверхности под напыление является шероховатость, увеличение площади поверхности сцепления и создание большей активности основы за счет снятия окисных пленок. Однако следует учитывать, что перечис-

ленные факторы, хоть и главенствующие, не являются достаточным условием для получения прочного соединения покрытия с основой.

Определение технологического процесса очистки и подготовки поверхности изделия зависит от многих факторов. Преобладание одного из таких факторов является решающим при выборе метода обработки. Выявление факторов начинается с анализа состояния поверхности детали.

В зависимости от вида загрязнения подготовка поверхности может включать одну, две или три группы работ:

1) мойку поверхности от консервационных материалов, производственных загрязнений (масла, абразивных пастх, эмульсий, маркировки) и эксплуатационных загрязнений;

2) очистку поверхности от окалины, ржавчины, элементов окраски поверхности и т. п.;

3) обработку, связанную с удалением с поверхности металла слоя, загрязненного элементами внедрения: водородом, азотом и др.

На последующий выбор метода очистки поверхности влияют следующие технические характеристики:

– вид и физико-механические свойства материала детали;

– конструкционные особенности детали или поверхности (сложность формы, наличие тонких стенок или легко повреждаемых поверхностей, пазов, глухих отверстий, поверхностей, не требующих обработки и т. п.);

– возможность предупреждения коррозии во время очистки или в период хранения деталей, методы транспортировки подготовленных деталей;

– наличие производственных площадей и квалифицированных специалистов, масштабы производства;

– экономические соображения;

– экологический фактор (удаление отработанных моющих растворов, пыли и др., расходы на транспортировку отходов или на оборудование по их обезвреживанию и т. п.).

В общем виде последовательность выбора метода очистки следующая:

– определить с конструкцией и конструктивными особенностями детали, уточнить в каких условиях работала или будет работать очищаемая деталь;

– определить вид загрязнения;

– оценить механические, физические свойства материала детали, его химический состав.

– назначить методы очистки поверхности и контроля качества очищенной поверхности;

– сравнить предложенные варианты очистки и выбрать оптимальный с точки зрения экономической целесообразности, охраны труда и экологии.

Способы очистки поверхностей деталей подразделяются на механические, физико-химические и термохимические. Классификация является в значительной степени условной, так как по отдельности данные способы почти не применяются. Чаще всего очистка деталей производится сочетанием двух способов (например, механического и физико-химического).

Общее представление об основных положениях, технологических методах, областях применения, преимуществах и недостатках процессов очистки и подготовки поверхности металлов приводится в виде краткого обзора в табл. П1.1.

Механические способы подготовки поверхности рассмотрим более подробно. Приведенные ниже технологические процессы непосредственно используются для очистки и подготовки поверхности под газопламенное и плазменное напыление.

Преимуществами механических способов являются: возможность тщательного удаления загрязнений, высокая скорость очистки, возможность обработки изделий, состоящих из нескольких металлов, наряду с очисткой могут производиться дополнительные операции, например образование шероховатых поверхностей, полировка, устранение дефектов, декоративная отделка.

Недостатки механических способов: высокая стоимость оборудования и рабочей силы, возможность повреждения очищаемой поверхности, вредные условия работы для персонала, обслуживающего струйно-абразивные установки, высокая стоимость ремонта и ухода за оборудованием.

Нарезка полукруглой резьбы. Перед напылением очень толстых покрытий (в несколько миллиметров) и обеспечения высокой прочности их сцепления с поверхностью детали на последних нарезают полукруглую резьбу (рис. 1.1, *а*). После нарезки витки резьбы накапывают роликом для осуществления пластической деформации их наружных слоев (рис. 1.1, *б*).

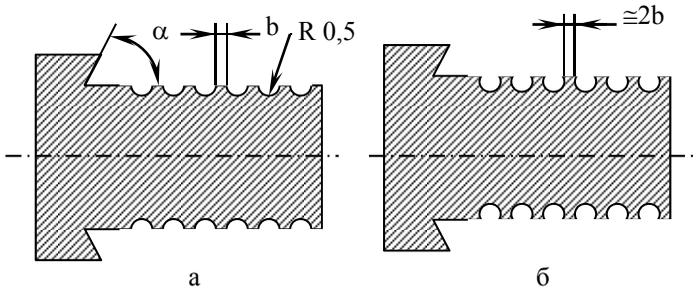


Рис. 1.1. Подготовка к напылению валов нарезанием полукруглой резьбы: а – профиль резьбы после нарезки; б – профиль резьбы после обкатки. Для чугуна $b = 0,6 \dots 0,65$ мм, для других материалов $b = 0,4$ мм, диаметр меньше или равен 1,0 мм, угол $\alpha = 5 \dots 20^\circ$

Проходы при газотермическом напылении выполняют под углом 45° к напыляемой поверхности, попеременно с левой и правой стороны, что гарантирует заполнение канавок напыляемым материалом.

Накатывание резьбы. При выполнении накатки целесообразно применять оправку, обеспечивающую одновременное воздействие на обрабатываемую поверхность двух роликов, расположенных в одной плоскости с двух сторон детали. Получаемый на обрабатываемой поверхности профиль представлен на рис. 1.2.

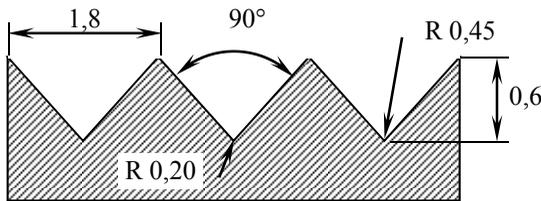


Рис. 1.2. Профиль, выдавливаемый роликом при кривой сетчатой накатке

Ролики изготавливаются из стали У10А, после термообработки они должны иметь твердость HRC 60–62. Окружная скорость детали при накатывании составляет 3...4 м/мин. Врезание роликов на полную глубину накатки следует осуществлять за 1...2 оборота детали без включения продольной подачи с минимальным числом оборотов шпинделя. При накатывании поверхность детали смачива-

ется машинным маслом. Последующие витки накатывают за один проход с продольной подачей 0,5...1 мм/об.

Нарезка рваной резьбы. Применяется для увеличения прочности сцепления покрытия с основой и активации поверхностного слоя. Используется для нанесения тонких покрытий (до 0,5 мм) из самофлюсующихся сплавов или покрытий подвергаемых оплавлению, в основном на цилиндрических деталях.

При подготовке поверхности деталь устанавливается в центрах станка, а резец располагают с большим вылетом ниже центра детали (рис. 1.3). Во время обработки резец получает изгибающий момент ($M_{изг}$) и кроме нарезания резьбы осуществляет «скобление» (или «подрыв») поверхностного слоя.

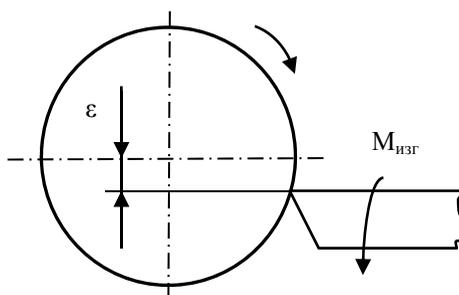


Рис. 1.3. Схема процесса нарезания рваной резьбы

Режимы обработки для нарезания рваной резьбы приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Режимы обработки при нарезании рваной резьбы

Диаметр обработки, d , мм	Эксцентриситет, ϵ , мм	Частота вращения, n , об/мин
20	2	150
50	3,5	60
100	4,5	30
200	6	15

Струйно-абразивная обработка. Данный вид обработки является наиболее распространенным и технологически отработанным для подготовки поверхности перед напылением. В зависимости от источника энергии, сообщаемого движением зернам абразива, различают абразивно-пневматический, абразивно-центробежный и абразивно-гравитационный способы очистки поверхности. Кроме того, в промышленности применяются комбинированные методы очистки, например абразивно-пневможидкостный, абразивно-пневмоцентробежный и др.

Одним из наиболее производительных и экономичных способов очистки деталей является абразивно-пневматический или дробеструйный способ очистки. В нем абразивные частицы разгоняются сжатым воздухом и, вытекая из сопла в виде струи, ударяются с большой скоростью об обрабатываемую поверхность. Для обработки поверхности может быть использован любой абразив из выпускаемых промышленностью.

В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку, корунд, карбид кремния, кварцевый песок, гранит и другие материалы. Абразивный материал выбирают в зависимости от размера обрабатываемой детали, формы и твердости ее материала. Физико-механические свойства некоторых абразивных материалов приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные физико-механические свойства
абразивных материалов

Абразив	Плотность, 10^3 кг/м^3	Насыпная плотность, 10^3 кг/м^3	Твердость
Дробь стальная (ДСЛ, ДСК)	7,4	4,23...4,75	HRC 35...48
Дробь чугунная (ДЧЛ, ДЧК)	7,2	3,35...4,64	HRC 54...62
Карборунд	3,2	1,6	HRC 54...62
Электрокорунд	3,96	1,895	HRC 50...52

Технология струйно-абразивной обработки. Параметры технологического процесса очистки поверхности металлической дробью зависят от физико-механических свойств абразива, параметров носителя абразива (давления сжатого воздуха, скорости его истечения из сопла, расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности, угла атаки), а также от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Участки поверхности деталей, не подлежащие напылению, должны быть защищены от воздействия струйно-абразивной обработки экранами или другими приспособлениями.

Зона обработки должна быть на 5 ± 2 мм больше зоны напыления.

После дробеструйной обработки деталь обдувают сжатым воздухом для удаления частиц абразива с поверхности.

В большинстве случаев перед напылением производят обработку дробью с размером зерна 0,5...1,0 мм. Обдувку крупными зернами 0,9...2,0 мм применяют для придания шероховатости поверхностям деталей машин. Мелкую крошку в основном используют для обработки поверхностей, на которые напыляют антикоррозионные покрытия.

При обдувке металлической крошкой применяют сжатый воздух под давлением $(2,8...5,3) \times 10^5$ Па.

Допустимый разрыв во времени между подготовкой поверхности и металлизацией зависит от условий выполнения работы и не должен превышать 6 ч в закрытых помещениях (желательно проводить операцию напыления в течение первых двух часов); 3 ч на открытом воздухе в сухую погоду; 30 мин под навесом в сырую погоду. Во избежание ослабления прочности сцепления с изделием недопустимо попадание на подготовленную поверхность влаги или образование на ней конденсата.

При использовании одного и того же абразивного материала и при одном и том же сопле дробеструйного устройства с увеличением давления сжатого воздуха увеличивается производительность процесса обдувки.

С увеличением размера частиц абразивного материала производительность обдувки возрастает.

После окончания обдувки необходимо произвести контроль поверхности и убедиться в однородности ее шероховатости.

Оборудование для струйно-абразивной обработки. Конструкция установок для абразивно-пневматической очистки деталей состоит

из следующих основных узлов: струйного аппарата, системы сбора, регенерации и подачи на повторное использование абразива, системы подготовки воздуха (регулирование давления, осушка и очистка от масла), вентиляции и средств механизации для подачи и установки в требуемом положении очищаемых деталей.

В промышленности применяются аппараты двух систем: нагнетательной и всасывающей. В аппаратах нагнетательного типа (рис. 1.4) абразив из питательного бункера 1 через клапан 2 периодически подается в камеру 3, находящуюся под давлением сжатого воздуха. Из камеры абразив поступает в смеситель 4, где подхватывается потоком воздуха, поступающего из магистрали по трубопроводу 7. Смесь воздуха с абразивом по шлангу 6 поступает к соплу 5 и затем в виде струи направляется на обрабатываемую поверхность. Струйные аппараты нагнетательного типа делятся на аппараты периодического и непрерывного действия.

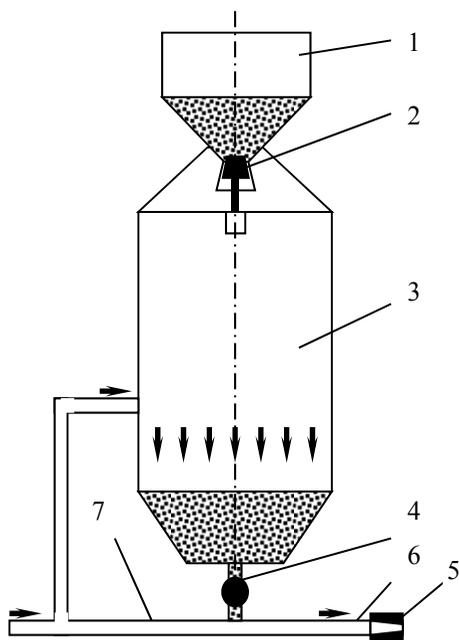


Рис. 1.4. Схема дробеструйного аппарата нагнетательного типа:
1 – питательный бункер; 2 – клапан; 3 – камера; 4 – смеситель;
5 – сопло; 6 – шланг

Аппараты периодического действия имеют рабочую камеру, в которую засыпается определенная порция абразива. После израсходования абразива аппарат перезаряжают, для чего снижают давление в рабочей камере до атмосферного, открывают клапан и засыпают новую порцию абразива.

Использование аппаратов непрерывного действия или двухкамерных позволяет избежать необходимости остановок технологического процесса очистки для наполнения камеры абразивом. В таких аппаратах абразив засыпается из бункера в верхнюю камеру через клапан.

В аппаратах всасывающего типа (рис. 1.5) струя воздуха, выходящая из сопла 1, создает в камере-смесителе 2 и патрубке 4 разрежение, в результате чего в патрубок через отверстия в насадке засасывается атмосферный воздух, перемещающий абразив из бункера 5 в смеситель.

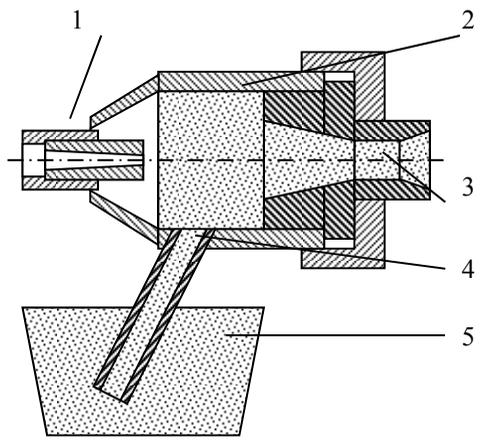


Рис. 1.5. Схема аппарата всасывающего типа:
1 – сопло; 2 – камера-смеситель; 3 – выходное сопло;
4 – патрубок; 5 – бункер

Абразив подхватывается потоком воздуха из сопла 1, направляется в сопло 3 и из него в виде струи абразива подается на обрабатываемую поверхность.

При одинаковых диаметрах рабочего сопла и одинаковых технологических параметрах (давление воздуха, тип и зернистость абразива) производительность по абразиву у аппаратов нагнетательного типа на 15–25 % выше. Поэтому аппараты всасывающего типа

в основном используются для обработки небольших партий деталей в рамках единичного и мелкосерийного производства.

Для увеличения производительности аппаратов нагнетательного типа периодического действия и аппаратов всасывающего типа используют систему регенерации абразива и систему сбора и подачи абразива пневмотранспортом.

На рис. 1.6 приведен пример такой дробеструйной камеры для очистки изделий.

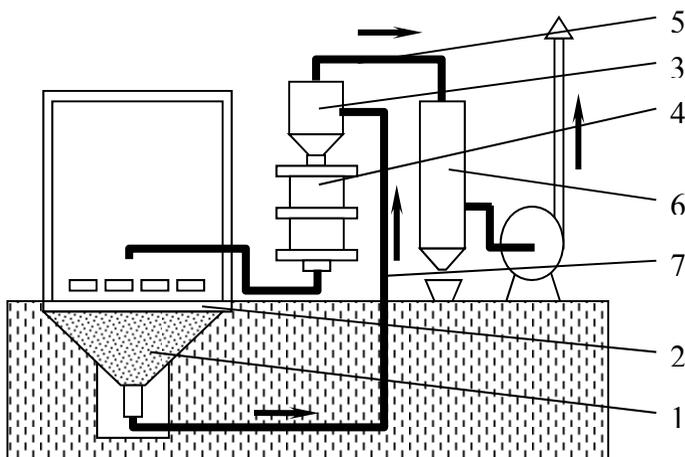


Рис. 1.6. Дробеструйная камера с системой сбора абразива пневмотранспортом:

1 – бункер; 2 – решетчатый пол; 3 – дробеотделитель;
4 – сито; 5 – трубопровод; 7 – циклон; 8 – трубопровод

Отработанный абразив через решетчатый пол 2 ссыпается в бункер 1, в нижней части которого расположена приемная труба 7 системы пневмотранспортера, конец трубы соединен с дробеотделителем 3, работающим по принципу расширения. Попавший по трубе 7 в дробеотделитель абразив подвергается очистке (годный для дальнейшего использования абразив и крупные частицы продуктов очистки, осаждаясь, попадают в сито 4). При просеивании годный абразив ячейки сита просыпается в приемный бункер струйного аппарата для повторного использования, крупные частицы продуктов очистки задерживаются ситом, а пыль и мелкие частицы абразива отсасываются по трубопроводу 5 в циклон 6.

Для подачи абразива из бункера в струйный аппарат вместо пневмотранспортера могут использовать систему из ленточного или шнекового горизонтального транспортера и ковшового вертикального транспортера.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с теоретическим материалом и методическими указаниями лабораторной работы.

1. Приготовленные заранее образцы из стали 45 и СЧ20 разложить на стеллаже в порядке возрастания, по группам, в зависимости от диаметра сопла, дистанции и давления при обработке.

2. Установить в пистолет смесителя сопло диаметром 0,008 м и закрепить.

3. Установить расстояние от сопла до приспособления с образцом, равное 0,05 м (образец № 1).

4. Установить на входном манометре избыточное давление 2×10^5 Па.

5. Включить установку и открыть кран подачи дробы. Время дробеструйной обработки контролировать по секундомеру.

6. Выключить подачу дробы через 30 с., закрыв кран подачи дробы.

7. Заменить образец № 1 на образец № 2.

8. Произвести дальнейшие исследования по указанной выше методике, руководствуясь табл. 1.3.

9. Сравнить шероховатость поверхностей образцов с эталонными образцами и сделать выводы.

Таблица 1.3

Протокол измерения шероховатости поверхности
(время обработки 0,5 мин., грануляция дробы 0,5–2,0 мм)

№ об.	Режимы обработки				Результаты сравнения с эталоном
	Давление, Па	Диаметр сопла, м	Дистанция, м	Материал образца	
1	2	3	4	5	6
1	2×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
2	4×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
3	6×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
4	5×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45	

1	2	3	4	5	6
5	5×10^5	5×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
6	5×10^5	12×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
7	5×10^5	15×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
8	5×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45	
9	5×10^5	8×10^{-3}	0,05	Сталь 45, HRC 55	
10	5×10^5	8×10^{-3}	0,05	СЧ 20	
11	5×10^5	8×10^{-3}	0,15	Сталь 45	
12	5×10^5	8×10^{-3}	0,03	Сталь 45	
13	5×10^5	8×10^{-3}	0,15	Сталь 45	
14	5×10^5	8×10^{-3}	0,25	Сталь 45	

Содержание отчета

1. Название, цель и оборудование для лабораторной работы.
2. Краткий конспект общих сведений и методических указаний.
3. Эскизы механических способов подготовки поверхностей и дробеструйной установки с указанием ее составных элементов.
4. Протокол измерения шероховатости поверхности и результатов сравнения с эталонными образцами.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Сколько групп работ по подготовке поверхности существует и что относится к каждой из этих групп?
2. Какие технические соображения влияют на выбор способа очистки и подготовки поверхности?
3. Какие существуют способы механического удаления загрязнений?
4. Перечислите виды струйно-абразивной обработки и принципы, положенные в основу их работы?
5. Какие группы абразивных материалов применяются в промышленности?
6. Какие параметры технологического процесса струйно-абразивной обработки задаются для очистки поверхности?
7. Перечислите основные узлы установки для абразивно-пневматической очистки деталей.

Лабораторная работа № 2

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ И ПОДГОТОВКА ИХ К НАПЫЛЕНИЮ

Цель работы:

1. Ознакомление со способами, технологией и оборудованием производства порошков.
2. Изучение классификации областей применения порошковых материалов.
3. Практическое определение гранулометрического состава металлического порошка, измерение текучести этого порошка и предложения способов повышения текучести того же порошка.

Оборудование и материалы:

Весы лабораторные, прибор для определения текучести порошка, секундомер, порошок ПГ-12Н-01, сушильный шкаф, ситовой прибор для просеивания порошковых материалов.

Работа рассчитана на четыре академических часа.

Общие сведения

На выбор способа получения порошка для нанесения покрытия влияют различные факторы. Некоторыми из основных факторов являются:

- вид используемого сырья (руда, скрап, окалина, растворы солей и других химических соединений, чистые металлы и т. п.);
- свойства получаемого порошка (величина и форма частиц, насыпной вес, спекаемость и т. п.);
- стоимость готового продукта (стоимость изготовления полуфабрикатов, оборудования для изготовления, затрат на обслуживание и рабочих и т. п.)

Большинство способов получения порошков условно можно разделить на 3 большие группы: механические, физико-механические, термохимические (химические и физико-химические).

К **механическим способам** относятся такие способы, при которых порошок изготавливается из исходного материала без изменения его химического состава и агрегатного состояния. Механические способы получения порошков основаны на измельчении твер-

дых веществ в порошкообразное состояние дроблением, размолом или истиранием. Процесс измельчения производится в шаровых, молотковых, вибрационных и вихревых мельницах.

Механические способы получения порошков нашли применение в производстве порошков хрупких металлов и сплавов. Значительно хуже измельчению данным способом поддаются вязкие пластичные металлы (например, медь, алюминий и др.), которые при ударных нагрузках в большей степени пластически деформируются, чем дробятся. Получение порошков химически активных металлов и сплавов (например, магния) производится в защитной атмосфере во избежание их интенсивного окисления и самовозгорания.

Основным преимуществом механических способов изготовления металлических порошков является простота осуществления процесса. Главным недостатком – низкая производительность и высокая энергоемкость.

Размол в шаровых мельницах. В основе данного способа лежит ударное, скалывающее и истирающее действие стальных, чугунных или твердосплавных шаров, постоянно перемещающихся вместе с размалываемой массой внутри вращающегося вокруг своей горизонтально расположенной оси полого цилиндрического барабана, изготовленного из износостойких сталей. Интенсивность размола зависит от скорости вращения барабана. Размеры частиц порошка, изготавливаемого таким путем, находятся в пределах 40–300 мкм. Недостатком этого способа является загрязнение получаемого порошка продуктами размалывающих тел и барабана.

Размол в вибрационных мельницах. Применяется для обеспечения тонкого и сверхтонкого (частицы размером 60 мкм и менее) размола твердых веществ. Сущность его заключается в воздействии на измельчаемую шихту присутствующих в ней размалывающих шаров, которые под действием знакопеременных нагрузок перемещаются в различных направлениях. Вибрационные мельницы – более производительные агрегаты, чем шаровые, и поэтому более широко используются в промышленности.

Измельчение в вихревых мельницах. Способ, при котором процесс разрушения частиц измельчаемого материала происходит за счет их соударения друг с другом при движении в вихревых потоках воздуха или инертного газа. Вихревые потоки создаются двумя или более пропеллерами, вращающимися с большой скоростью внутри герме-

тичной камеры. Важным достоинством вихревого измельчения является возможность использования в качестве шихты пластичных металлов, а также то, что данный процесс практически не вносит продуктов загрязнения в получаемый порошок. Производительность вихревых мельниц намного выше, чем шаровых и вибрационных при меньших энергозатратах, а гранулометрический состав изготавливаемых вихревым способом порошков колеблется от 60 до 400 мкм.

В основу **физико-механических способов** положено изменение агрегатного состояния материала путем плавления с последующим дроблением струи расплава энергоносителем высокого давления (водой, воздухом, газом), либо механически (с помощью вращающегося диска, вибрирующей пластины, ультразвука и т. п.). В результате охлаждения диспергированного расплава образуются частицы порошка. Химический состав исходного материала при этом остается неизменным.

Физико-механические способы получили широкое распространение в промышленном производстве металлических порошков. Это связано с высокой производительностью и простотой осуществления, низкой стоимостью изготовления, возможностью регулирования однородности структуры, формы и размеров частиц, их химического состава.

Данные способы применяются для изготовления легированных порошков, позволяют улучшать физико-механические свойства традиционных сплавов, создавать новые сложные составы порошков. Физико-механическими способами можно получать порошки практически из любых металлических жидкостей с температурой в нескольких тысяч градусов. Форма порошковых тел зависит от условий диспергирования расплава и его физических характеристик и может изменяться от осколочной до шарообразной. К недостаткам описываемых способов следует отнести трудности обеспечения 100 % выхода порошков требуемых фракций, а также наличие плавильных агрегатов и необходимость в ряде случаев восстановительного отжига готового продукта.

В качестве примера рассмотрим наиболее распространенные способы – центробежное разбрызгивание вращающимся диском и распыление инертным газом.

Первый способ заключается в том, что струя перегретого на 100–120 °С жидкого металла или сплава, попадая на вращающийся диск,

распыляется центробежными силами на дисперсные частицы, которые в результате последующего охлаждения формируются в виде гранул порошка. Скорость вращения диска может достигать 4000 об/мин и чем она выше, тем тоньше получаются порошки. Таким путем изготавливают порошки цветных металлов, чугуна, стали и ферросплавов с размером частиц 100–500 мкм и более. Производительность установки при разбрызгивании, например, алюминия или его сплавов достигает 100 кг/ч.

Установка (рис. 2.1) осуществляет гранулирование следующим образом.

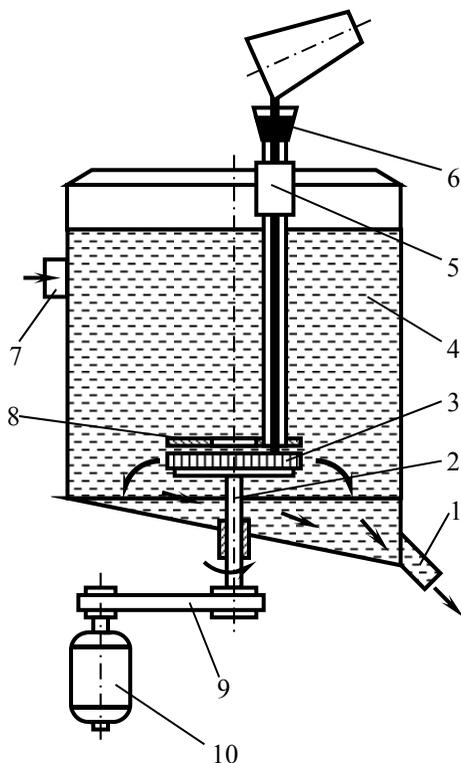


Рис. 2.1. Схема устройства для производства гранул центробежным разбрызгиванием расплава:

- 1 – сборник гранул в таре; 2 – вал; 3 – лопастной диск; 4 – сборник гранул;
- 5 – воронка; 6 – металлоприемник; 7 – патрубок; 8 – диск;
- 9 – ременная передача; 10 – электродвигатель

Расплавленный металл, залитый в металлоприемник, через отверстие в днище в виде струи поступает в воронку и далее на лопастный вращающийся диск. Последний дробит расплав на мелкие капли, которые под действием центробежных сил отбрасываются в воду. Кристаллизуясь с высокой скоростью охлаждения, капли превращаются в твердые частицы, которые затем выгружаются вместе с водой через патрубок.

Основной недостаток способа заключается в постепенном налипании разбрызгиваемого металла на рабочую поверхность диска, что требует его периодической замены.

Гораздо шире, чем центробежное разбрызгивание, применяется распыление жидких металлов и сплавов инертным газом под большим давлением в герметизированных устройствах.

Сущность его состоит в том, что на свободно истекающую струю металлического расплава с большой скоростью направляются мощные потоки распыляющего газа, создаваемые кольцеобразным соплом, как бы охватывающим эту струю, или несколькими отдельными форсунками. В зоне схождения этих потоков, происходит разрушение струи расплава на отдельные капли, которые, охлаждаясь, падают в бак с водой для предотвращения сваривания частиц между собой (рис. 2.2).

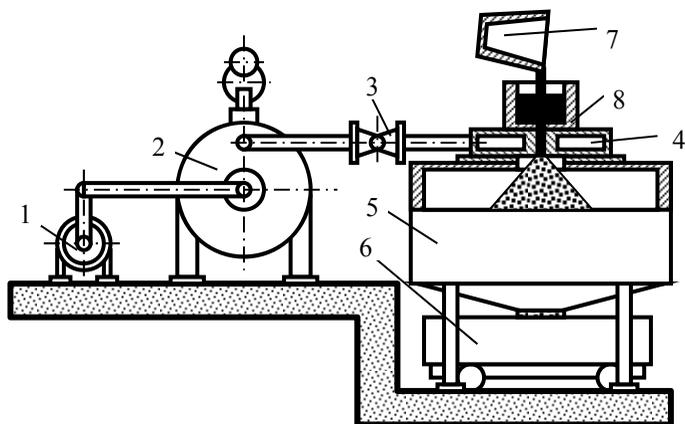


Рис. 2.2. Установка для получения порошков распылением расплавов:

- 1 – компрессорная установка; 2 – ресивер; 3 – редуктор;
- 4 – распылительная форсунка; 5 – распылительная камера;
- 6 – приемный бункер; 7 – разливной ковш; 8 – металлоприемник

Гранулометрический состав порошков, получаемых распылением, 50–250 мкм.

Сущность **химических способов** получения порошков составляют химические реакции, в результате которых изменяется химический состав исходного сырья: восстановление окислов чистых металлов или их соединений, обезуглероживание.

Физико-химические способы охватывают процессы, связанные одновременно с протеканием химических реакций и различными физическими явлениями. Это электролиз водных растворов и расплавленных сред, термическая диссоциация карбониллов, межкристаллитная коррозия.

Следует отметить, что технологический процесс получения порошков на определенных этапах может осуществляться различными способами, например механическим размолотом спекшейся губки, полученной при восстановлении окислов металлов.

Некоторые виды порошков, их состав и области применения отображены в таблицах прил. 2.

Методические указания

Частицы порошков должны отвечать постоянству следующих факторов: форме и размерам частиц порошка (округлая, осколочная, чешуйчатая); химическому состоянию поверхности частиц (степень окисленности, количество адсорбированных газов, влаги); макростроению поверхности частиц (гладкая, шероховатая, пористая); физико-механическому и технологическим свойствам (твердость, текучесть, насыщенная плотность, удельная поверхность); чистоте по примесям и структуре материала частиц.

Частицы порошка, не отвечающие требованиям, затрудняют подачу порошка из бункера в горелку. В бункере питателя во время работы образуются карнизы из порошка, которые периодически разрушаются, вызывая пульсацию расхода напыляемого материала, что снижает стабильность процесса напыления и окончательное качество покрытия.

Размер частиц напыляемого порошка и его гранулометрический состав оказывают сильное влияние на процесс напыления и свойства получаемого покрытия.

Размер частиц порошка в основном выбирают в зависимости от характеристик источника тепловой энергии и теплофизических свойств напыляемого материала, температуры плавления, удельной

теплоемкости, плотности и других параметров. При хранении и использовании необходимо следить, чтобы порошки были сухими.

Какой бы способ получения металлического порошка из приведенных выше ни использовался, его частицы никогда не имеют одинаковых размеров.

Самая грубая классификация порошка по размерам может быть сделана путем отнесения его к определенной группе дисперсности. Так, например, сверхмелкие – 0,5 мкм, очень мелкие – 0,5...40 мкм, мелкие – 40...100 мкм, средние – 100...160 мкм, крупные – 160...200 мкм, более крупные – гранулы. Порошки, частицы которых имеют размеры 20...30 мкм, 50 мкм и более 50 мкм считаются соответственно: высокодисперсными, дисперсными, грубодисперсными.

Существует несколько методов определения гранулометрического состава порошков: **ситовой, микроскопический, седиментационный.**

Ситовой метод применяют в основном при исследовании грубодисперсных порошков. Для этого навеску порошка просеивают сквозь набор сит из бронзовой проволоки с квадратными отверстиями, размер которых в свету составляет от 1000 до 40 мкм. Диаметр проволоки сита всегда равен размеру отверстия, этим же размером определяется номер сита.

Для определения содержания более тонких фракций (размер частиц 1...100 мкм) применяют так называемый седиментационный метод, при котором используется зависимость скорости осаждения частиц в жидкости от их диаметра.

При использовании микроскопического метода определения гранулометрического состава порошков применяется оптический микроскоп, снабженный окуляром-микроскопом, который позволяет измерять размеры частиц и их относительное количество. Главным недостатком этого метода является длительность и трудоемкость.

Одним из главных параметров, оказывающих влияние на процесс напыления, является текучесть. Она оказывает большое влияние на производительность процесса напыления, равномерность нанесенного покрытия. Текучесть зависит, главным образом, от гранулометрического размера частиц, формы частицы, коэффициента трения и влажности. В общем случае текучесть рассматривается как время истечения порошкового материала из питателя, самопроизвольно просыпающегося через калиброванное отверстие.

Порядок выполнения работы

Раздел 1

1. Подготовить насыпку порошка ПГ-СР4.
2. Уложить в стопку сита в следующей очередности: № 006, № 012, № 018.
3. Содержимое насыпки пересыпать в сито № 018.
4. Включить установку для просеивания порошка нажатием кнопки «Пуск». Одновременно засечь время по минутной стрелке.
5. Через 5 минут выключить установку нажатием кнопки «Стоп».
6. Содержимое сита № 018 пересыпать в емкость с № 3, № 012 – в емкость № 2, № 006 – в емкость № 1.
7. В емкости № 4, № 5 и № 6 отсыпать приблизительно половину содержимого порошка емкостей № 1, № 2 и № 3 соответственно.
8. Открыть сушильный шкаф и установить в нем емкости с номерами № 4, № 5 и № 6.
9. На передней панели регулятором «Температура» установить $T = 200^{\circ} \text{C}$. Закрыть и включить сушильный шкаф.

Раздел 2

1. Порция порошка (200 гр.) из емкости № 1 засыпается в конусную воронку (рис. 2.3).

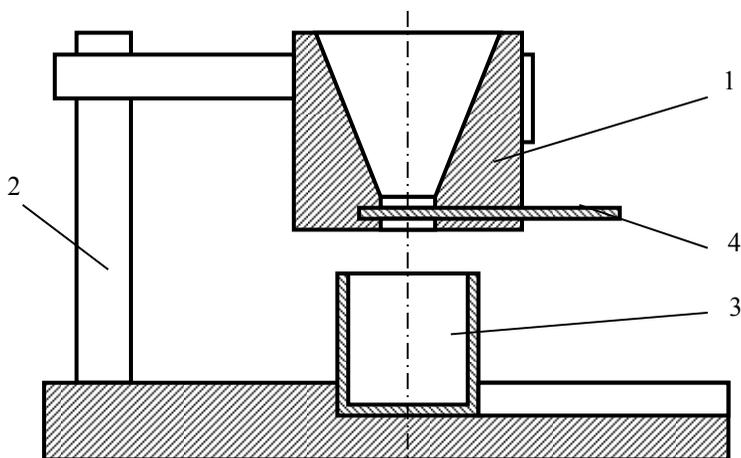


Рис. 2.3. Прибор для измерения текучести порошка:
1 – воронка; 2 – штатив; 3 – емкость; 4 – движжка

2. После заполнения воронки порошком открыть задвижку и одновременно включить секундомер.

3. Опыт с порошком из емкости № 1 проводится не менее трех раз для получения более достоверных результатов.

4. Аналогичные исследования проводятся с порошковыми материалами, находящимися в емкостях № 2, № 3.

5. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.1.

Раздел 3

1. Отключить сушильный шкаф.

2. Достать емкости № 4, № 5 и № 6 с помощью специального приспособления.

3. Повторить опыты второго раздела для просушенных порошков.

4. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.1.

Раздел 4

1. Проанализировать полученные результаты.

2. По данным таблицы построить графики зависимости текучести от грануляции для просушенного и непросушенного порошка.

3. Сравнить полученные результаты сделать выводы.

Таблица 2.1

Результаты измерений текучести порошков

№ п. п.	Грануляция, мкм	Просушенный / непросушенный порошок	Время истечения порошка, сек	Текучесть
1	2	3	4	5

Текучесть порошка (с.) определяется по формуле:

$$\tau = Kt,$$

где К – корректирующий коэффициент;

t – время истечения порошка, с.

Корректирующий коэффициент равен величине 25,3, разделенной на клеймо воронки.

Содержание отчета

1. Название, цель и оборудование для лабораторной работы.
2. Краткий конспект общих сведений и методических указаний.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Таблица с результатами измерений.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависит выбор способа получения порошка?
2. Какие существуют способы получения порошков?
3. Какой принцип положен в основу и как работает установка для получения порошков распыливанием расплавов воздухом?
4. Каковы требования, предъявляемые к порошковым материалам?
5. Постоянству каких факторов должны отвечать порошковые материалы?
6. Какова классификация порошка по размерам?
7. Какие существуют методы определения гранулометрического состава порошка?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Цель работы:

1. Ознакомление со способами, технологией и оборудованием газопламенного напыления.
2. Практическое определение производительности газопламенной установки, дистанции напыления, коэффициента использования порошка.

Оборудование и материалы:

Газопламенная установка: горелка, пульт управления; напыляемый порошок, лабораторные весы, секундомер, испытываемые образцы.

Работа рассчитана на четыре академических часа.

Общие сведения

Метод газопламенного напыления имеет широкое применение в различных отраслях промышленности. Он позволяет восстанавливать изношенные поверхности деталей машин, а при упрочнении значительно увеличивать сроки службы по сравнению с новыми деталями.

Газопламенный способ напыления покрытий состоит в формировании на поверхности изделий слоя из напыляемого материала. Особенность напыления состоит в отсутствии расплавления поверхности основного материала, что обеспечивает незначительную деформацию детали. Соединение металлических частиц с поверхностью детали и между собой носит в основном механический характер.

При газопламенном напылении источником тепловой энергии является пламя, образующееся в результате горения смеси кислород – горючий газ. При сгорании горючей смеси образуется пламя, которое нагревает поступающий материал до высокопластичного или жидкого состояния и переносит его частицы на напыляемую поверхность. Наиболее широко применяемые горючие смеси приведены в табл. 3.1.

Для поддержания стабильного процесса горения и температуры пламени, газы, составляющие горючую смесь, отвечают постоянству своих свойств в соответствии со стандартами, например, аце-

тилен (ГОСТ 5457), кислород (ГОСТ 5583), пропан – бутан (ГОСТ 20448) и т. п.

Таблица 3.1

Температуры пламени горючих смесей

№ п. п.	Состав смеси	Температура, °С
1	Кислород – ацетилен	3100
2	Кислород – МАФ	2850
3	Кислород – бутан	2760

В процессе напыления также используется сжатый воздух, очищенный от масла и влаги. Его применяют для охлаждения сопловой части горелки и обдува факела пламени. Обдув факела пламени способствует его «обжиму», а также повышает скорость полета частиц порошка.

Напыление, в зависимости от состояния напыляемого материала, может быть трех видов: проволочное, прутковое (стержневое) и порошковое.

На рис. 3.1 показаны схемы газопламенного напыления с применением порошка.

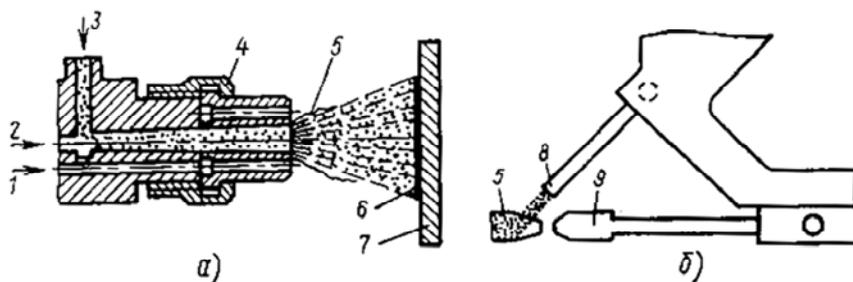


Рис. 3.1. Схемы газопламенного напыления с применением порошка:
a – напыление транспортирующим газом;
б – напыление с внешним подводом порошка;
 1 – рабочий газ; 2 – транспортирующий газ; 3 – напыляемый порошок;
 4 – сопло; 5 – пламя; 6 – покрытие; 7 – деталь;
 8 – трубка для подвода порошка; 9 – мундштук

В лабораторной работе рассматривается газопламенное напыление порошкового материала транспортирующим газом (рис. 3.1, а).

Напыляемый порошок поступает в горелку сверху из бункера через отверстие, разгоняется потоком транспортирующего газа и на выходе из сопла попадает в пламя, где происходит его нагревание. Увлекаемые струей горячего газа частицы порошка попадают на напыляемую поверхность. Предварительно нагретые в пламени горелки частицы порошка контактируют с покрываемой поверхностью, которая нагрета до температуры, определяемой свойствами наносимого порошка. При соприкосновении с поверхностью частицы порошка прилипают к поверхности и, сливаясь друг с другом, образуют слой покрытия.

Технологический процесс нанесения покрытий включает подготовку порошкового материала, детали и нанесение покрытия.

Перед напылением порошок просеивают через набор сит и выдерживают в сушильном шкафу при температуре 250...260 °С в течение 5...6 часов. Перед напылением поверхность подвергают дробеструйной или другой предварительной обработке и, перед началом процесса напыления, нагревают газовой горелкой до температуры, при которой порошок лучше прилипает к детали.

Для повышения плотности нанесенного покрытия в качестве дополнительной обработки применяют прикатывание роликом и оплавление покрытия горелкой или в печи. В последнем случае температура оплавления должна быть на 10...15 °С ниже температуры растекания материала.

Основные достоинства газопламенного напыления покрытий:

- относительно малое тепловое воздействие на основу, что позволяет наносить покрытия на поверхность различных материалов, включая пластмассы, дерево, картон и т. п.;

- толщина покрытия может быть обеспечена от 50 мкм до 10 мм и более;

- возможность регулирования газового режима работы горелки позволяет управлять химическим составом среды (восстановительная, нейтральная, окислительная) и энергетическими характеристиками струи и напыляемых частиц;

- высокая производительность процесса (например, 8...10 кг/ч для порошков самофлюсующихся сплавов при расходе ацетилена 0,9 м³/ч) и высокий коэффициент использования материала (0,60...0,95);

- возможность нанесения покрытий на изделия практически без ограничения их размеров при наличии необходимых средств механизации и обеспечения правил техники безопасности;
- низкий уровень шума и излучений;
- возможность нанесения покрытий при любом пространственном положении аппарата;
- легкость и простота обслуживания оборудования;
- гибкость технологии и мобильность оборудования, что позволяет осуществлять напыление на месте, без демонтажа изделий;
- возможность автоматизации процесса и встройки в автоматическую линию с небольшими затратами и др.

Основными недостатками газопламенного способа напыления покрытий из порошковых материалов являются:

- недостаточная прочность сцепления покрытий с основой (5...45 МПа) при испытании на отрыв;
- наличие пористости (обычно в пределах 5...25 %), которая препятствует применению покрытий в коррозионных средах без дополнительной обработки;
- невысокий коэффициент использования энергии газопламенной струи на нагрев порошкового материала (2...12 %);
- возможность появления дефектов в виде отдельных вздутий или отслоений, которые возникают в результате нарушения технологии подготовки поверхности или температурных режимов обработки.

В качестве примера оборудования для газопламенного напыления рассмотрим установку, предназначенную для нанесения порошковых материалов с температурой плавления до 2000 °С, при работе на метил-ацетиленовой фракции (МАФ), на внутренние и наружные поверхности. Установка также может работать с применением в качестве горючего газа пропан-бутана или ацетилена. Для обжима пламени и транспортирования порошка может использоваться сжатый воздух. Грануляция порошка может меняться в пределах 0,03...0,15 мм.

Установка для газопламенного напыления включают следующие основные элементы (рис. 3.2): газопламенную горелку для распыления порошка 2 или проволоки (прутка) 1 для нанесения покрытия; устройство подачи напыляемого материала в газовое пламя (для напыления порошков – это порошковый дозатор 3, а для проволоки – бухта 4); механизм подачи проволоки или прутка (воздушная турбина или электродвигатель), расположенный непосредственно на

горелке, устройство для контроля и управления расходами и давлениями газов (манометры и редукторы 6, расходомеры 5); систему подачи газов (газовые баллоны 11, шланги, компрессор для подачи сжатого воздуха 10, ресивер 8, осушитель 7, теплообменник 9). Осушитель и теплообменник установлены на магистрали сжатого воздуха с целью удаления влаги и масла из воздуха.

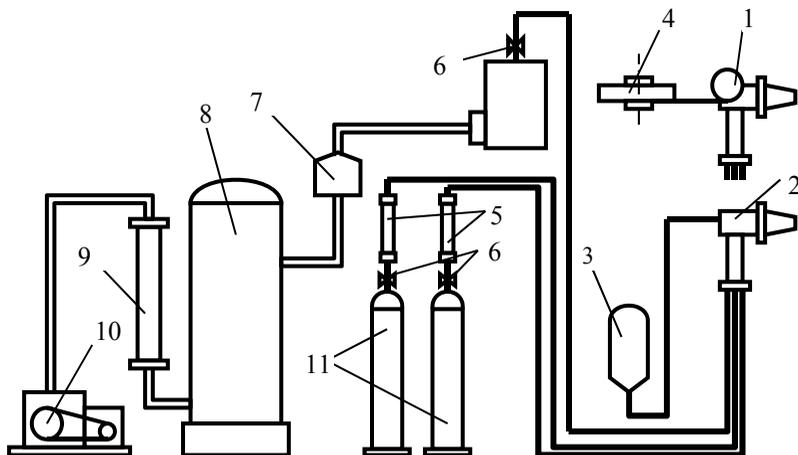


Рис. 3.2. Схема установки для газопламенного напыления покрытий порошковым материалом или проволокой

Технические характеристики установки приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Технические характеристики установки

Параметры	Величина
Полезный объем питательного бачка	0,0005 м ³
Рабочее давление газа / расход газа:	
– кислород	0,2 МПа / 3,0 м ³ /ч
– пропан-бутан	0,1 МПа / 1,0 м ³ /ч
Производительность распыления	12...15 кг/ч

Технология газопламенного напыления довольно проста, а стоимость оборудования и затраты на эксплуатацию низкие. В связи с этим этот способ является наиболее распространенным.

Методические указания

Одним из основных технологических параметров газопламенного нанесения покрытия является дистанция напыления. Она определяет интенсивность нагрева поверхности основы, температуру и скорость частиц материала, прочность сцепления покрытий с основой. Максимальных значений прочность сцепления достигает при напылении на расстоянии 0,18...0,22 м от сопла пистолета и значениях скоростей частиц в пределах 25...35 м/с. При увеличении дистанции напыления тепловое воздействие пламени уменьшается, частицы и поверхность охлаждаются, что приводит к снижению прочности соединения и уменьшению коэффициента использования порошка.

Для исследования влияния дистанции напыления на коэффициент использования порошка производится напыление на поверхность образца диаметром 0,08 м при расстояниях от среза сопла до поверхности образцов равных 0,1; 0,15; 2,0; 0,25 м без относительного перемещения горелки. Время напыления составляет 60 секунд на каждый образец.

Коэффициент использования порошка определяете и по формуле

$$K = (P_1 / P_2) \cdot 100 \%,$$

где P_1 – разность в весе образца до и после напыления, кг;

P_2 – расход порошка за время напыления, кг.

Производительность напыления определяется по формуле:

$$\Pi = P_1 / T,$$

где P_1 – разность в весе образца до и после напыления, кг,

T – время напыления, ч.

Имея обоснованные дистанцию напыления, взаимосвязь формы полученного слоя и дистанции напыления можно произвести расчет подачи скорости перемещения пистолета (детали) и числа оборотов детали. При этом главным должно быть условие получения заданной толщины покрытий за один проход с максимальной эффективностью.

Порядок выполнения работы

Раздел 1

1. Изучить инструкцию по эксплуатации термораспылительной установки.

2. Начертить табл. 3.3 для измерений и расчета полученных данных.

3. Установить термораспылительную головку в специальное приспособление.

4. Взвесить все имеющиеся образцы.

5. Установить приспособление для крепления образцов, закрепить в нем образец № 1. Отрегулировать расстояние от среза сопла до поверхности образца равным 10 см.

6. Из емкости № 1 отсыпать порошок грануляция 20–63 мкм в насыпку. Вес порошка в насыпке должен быть не более 0,2 кг.

7. Засыпать взвешенный порошок в бункер пистолета.

8. Включить установку согласно инструкции.

9. Открыть кран подачи порошка и одновременно засечь время по секундомеру. Время напыления – 1 минута.

10. Закрыть кран подачи порошка.

11. Повернуть рукоятку подачи рабочих газов на горелке в исходное положение, погасив этим самым пламя.

12. Высыпать из бункера пистолета оставшийся порошок в навеску и взвесить. После взвешивания пересыпать порошок в емкость № 1.

13. Достать из приспособления образец № 1, закрыть образец № 2, взвесить образец № 1.

14. Из емкости № 2 отсыпать порошок грануляция 63–100 мкм в насыпку. Вес порошка в насыпке – 0,2 кг.

15. Повторить пункты 7–13.

16. Высыпать из бункера пистолета оставшийся порошок в навеску и взвесить. После взвешивания пересыпать порошок в емкость № 2.

17. Полученные результаты занести в табл. 3.3.

Раздел 2

1. Повторить опыты первого раздела для расстояния от среза сопла до поверхности образца 0,15 м, 0,20 м и 0,25 м.

2. Полученные результаты занести в табл. 3.3.

Раздел 3

1. Проанализировать полученные результаты.

2. Построить зависимость коэффициента использования порошка от грануляции и дистанции напыления.

3. Построить зависимости производительности напыления от грануляции и дистанции напыления.

4. Сделать выводы.

Таблица 3.3

Результаты проведения эксперимента

№	Время напыления, мин	Дистанция напыления, мм	Грануляция, мкм	Вес детали, кг.		Вес порошка в бункере		К	П, кг/ч
				до напыления	после напыления	до напыления	после напыления		
1	1	0,1	20–63			0,2			
2	1	0,1	63–120			0,2			
3	1	0,15	20–63			0,2			
4	1	0,15	63–120			0,2			
5	1	0,2	20–63			0,2			
6	1	0,2	63–120			0,2			
7	1	0,25	20–63			0,2			

Содержание отчета

1. Название, цель и оборудование для лабораторной работы.
2. Краткий конспект общих сведений и методических указаний.
3. Эскиз газопламенной установки с указанием ее составных элементов.
4. Протокол измерений производительности напыления.
5. Основываясь на полученных данных, построить графические зависимости коэффициента использования порошка от дистанции напыления при различных гранулометрических составах исследуемого порошка.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальная сущность газопламенного напыления?
2. В чем преимущества и недостатки газопламенного напыления?
3. Каковы оптимальные технологические параметры газопламенного напыления?
4. Какие горючие газы используют при газопламенном напылении?
5. От чего зависит расход газов?

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Цель работы:

1. Ознакомление со способами, технологией и оборудованием плазменного напыления.
2. Практическое определение производительности напыления плазменной установки, коэффициента использования порошка при напылении данной детали.
3. Изучение особенностей напыления керамических покрытий.

Оборудование и материалы:

Плазменная установка УПУ-3Д, источник питания ИПН-160/600, плазматрон ПП-25, штангенциркуль ШЦ-11, лабораторные весы, секундомер, специальный питатель-бункер, самофлюсующийся порошок ПГ-12Н-01, порошок Al_2O_3 , испытываемые образцы, цифровые клейма.

Работа рассчитана на 4 академических часа,

Общие сведения

При упрочнении и восстановлении деталей в зависимости от их формы, условий работы применяют несколько разновидностей плазменной наплавки, отличающихся типом присадочного материала, способом его подачи на упрочняемую или изношенную поверхность и электрической схемой подключения.

Плазменная наплавка – это процесс нанесения покрытия плазменной струей, когда деталь включена в цепь нагрузки. В процессе обработки плазменная струя нагревает упрочняемую или восстанавливаемую поверхность и наносимый материал.

Плазменная струя – это газ, который в процессе продувания сквозь электрическую дугу приобретает свойства плазмы – становится ионизированным и электропроводящим. В качестве плазмообразующего газа используется азот, аргон, гелий и водород. Чаще всего применяется азот и аргон, как недорогие и безопасные газы, дающие температуру струи около 10 000 °С.

Плазменную струю получают с помощью плазматронов, которые по различным классификационным признакам образуют следующие

группы: по способу взаимодействия дугового разряда с изделием, по способу сжатия дугового разряда, по числу дуг, по составу плазмообразующего газа, по виду сварочного тока, по способу дополнительного сжатия дуги, по способу подачи наносимого материала и по величине тока. У плазмотрона различают основную дугу – между анодом и деталью (прямого действия) и вспомогательную – между анодом и соплом (косвенного действия).

При плазменной наплавке по способу взаимодействия дугового разряда с изделием различают два типа горелок: плазменно-дуговые (прямого действия) и плазменно-струйные (косвенного действия), общий вид которых приведен на рис. 4.1.

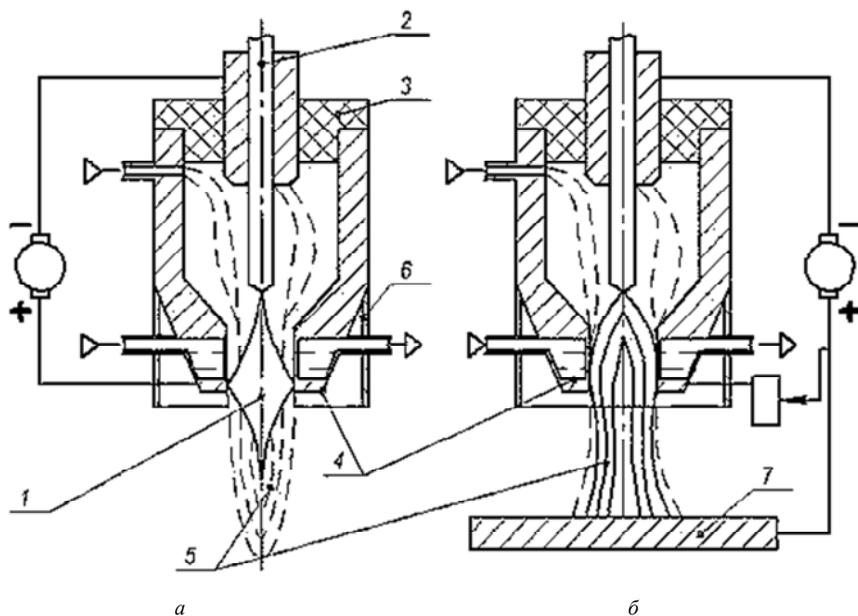


Рис. 4.1. Общий вид плазменных горелок:
а – плазменно-струйные; *б* – плазменно-дуговые;
 1 – дуга; 2 – вольфрамовый электрод; 3 – керамическая прокладка;
 4 – сопло; 5 – плазменная струя

В плазменно-дуговой горелке электрическая дуга горит между анодом, которым является обрабатываемый материал или экспериментальный образец, и катодом, изготовленным из вольфрама или

вольфрамового сплава, содержащего приблизительно 1...2 % тория. Дугу стабилизирует закрученный поток рабочего газа, истекающий из сопла горелки. В плазменно-струйной горелке дуга образуется между вольфрамовым катодом и анодом, которым является медное, охлаждаемое водой сопло. Дуга нагревает до высокой температуры рабочий газ, подаваемый с закруткой в камеру горелки, который вытекает из сопла в виде плазменной струи. Подача рабочего газа с интенсивной закруткой в камеру горелки оказывает стабилизирующее действие на процесс горения дуги и повышает ее температуру.

При плазменной наплавке различают следующие способы подачи наплавочного материала: напыление с вдуванием порошка в дугу (рис. 4.2, *а*) и плазменная наплавка с присадочной проволокой (рис. 4.2, *б*).

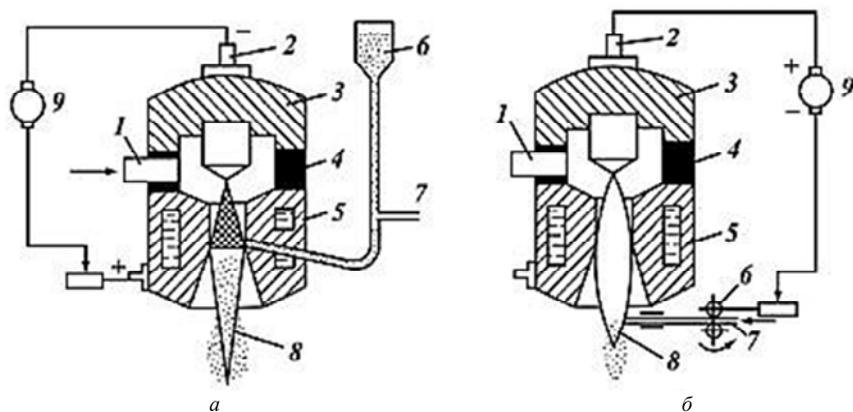


Рис. 4.2. Схемы плазменного напыления:

а – порошком; *б* – проволокой:

1 – подвод плазмообразующего газа; 2 – катод плазмотрона;

3 – корпус катода; 4 – изолятор; 5 – корпус анода;

6 – порошковый питатель (*а*) или механизм подачи проволоки (*б*);

7 – подвод газа, транспортирующего порошок;

8 – плазменная струя; 9 – источник питания

Существуют и другие способы подачи наплавочного материала, например комбинированный способ с одновременной подачей порошка и проволоки в зону наплавки, наплавка двумя плавящимися проволоками с дополнительным источником переменного тока,

наплавка с заранее насыпанным крупнозернистым порошком на наплавляемую поверхность, наплавка с подачей материала в хвостовую часть сварочной ванны для тугоплавких порошков и т. д.

Плазменная наплавка с вдуванием порошка в дугу или плазменное напыление получило широкое применение при упрочнении деталей и хорошие результаты при восстановлении деталей.

Основными преимуществами применения плазменного напыления являются:

- изменение в широких пределах толщины покрытия (0,1...7 мм), скорости (0,5...25 м/мин) и производительности наплавки (0,6...15 кг/ч), ширины наплавки (1...45 мм) и состава наплавляемого металла за счет изменения применяемых материалов и режимов процесса;

- простота управления вводом тепла в материал детали и глубиной его проплавления независимо от подачи материала;

- возможность выбора присадочного материала для получения покрытий (в том числе композиционных) различных составов и структур с заданными свойствами путем смешения различных порошков;

- достижение минимального припуска на механическую обработку покрытий;

- возможность автоматизации процесса;

- обеспечение наиболее продолжительной непрерывной работы оборудования для плазменно-порошковой наплавки по сравнению с аргонодуговой и газопламенной наплавкой.

Благодаря преимуществам плазменное напыление является одной из самых распространенных электротермических технологий нанесения защитных покрытий. Номенклатура напыляемых изделий и количество проектируемых технологических процессов постоянно возрастают.

Недостатками плазменного способа нанесения покрытий в открытой атмосфере являются низкая прочность сцепления покрытий с деталью для ряда условий эксплуатации при испытаниях на нормальный отрыв; высокий уровень шума (110...130 дБ) и излучения; относительно высокая стоимость оборудования, его стационарность и эксплуатационные затраты.

Основными технологическими параметрами плазменного напыления являются: состав порошкового материала; мощность дуги; расход плазмообразующего газа; расход газа на подачу порошка; скорость подачи порошка; размер его частиц; угол встречи потока

частиц с поверхностью напыления; дистанция напыления; скорость перемещения пятна напыления.

С увеличением **мощности дуги** интенсивно возрастает температура плазменной струи. Мощность дуги определяется напряжением и силой тока. Напряжение зависит от длины дуги, что в свою очередь определяется конструкцией распылителя, видом и расходом плазмообразующего газа.

При **расходе плазмообразующего газа** выше оптимальных значений существенно снижается плотность покрытий, уменьшаются коэффициент использования порошка и другие показатели эффективности напыления. С увеличением расхода плазмообразующего газа повышаются распыляющая способность плазменной струи, ее скорость и соответственно скорость напыляемых частиц, температура которых снижается. При плазменном напылении объемный расход плазмообразующего газа составляет 2,0...4,0 м³/ч, массовый – 1,8...7,2 кг/ч.

Вид газа оказывает большое влияние на тепловые характеристики плазменной струи. Наибольшая степень прогрева напыляемых частиц достигается при использовании азота и водорода.

Температуру струи можно менять в широком диапазоне, подбирая диаметр сопла и режимы работы распылителя. Это позволяет производить напыление различных материалов (металлов, керамики, органических материалов).

Расход газа на подачу порошка составляет около 10 % расхода плазмообразующего газа. Возрастание расхода транспортирующего газа облегчает и стабилизирует подачу порошка. При превышении оптимальных значений увеличивается скорость движения частиц, снижается температура и коэффициент использования порошкового материала.

Скорость подачи порошка обычно оценивают по его расходу. Повышенное количество порошка, подаваемого в плазменную струю, уменьшает тепловую энергию для нагрева напыляемой частицы. При этом снижается эффективность процесса. Для подачи порошка используют газы, аналогичные плазмообразующим.

Для плазменного напыления применяют **порошок** со средним диаметром частиц 10...200 мкм. С увеличением их размера возникают трудности при нагреве до температуры плавления. Особенно сложно проплавливать крупные частицы тугоплавких материалов с низкой теплопроводностью или малой плотностью. В результате

ухудшаются показатели процесса напыления. Однако напыление крупных фракций позволяет снизить угар легирующих элементов при нанесении покрытия.

Для плазменного напыления оптимальная **дистанция напыления** равняется 50...300 мм (при напылении керамики – 75...100 мм). Чрезмерно малые дистанции напыления не обеспечивают прогрев порошковых частиц, необходимую скорость их движения и возрастает опасность недопустимого нагрева изделия. С увеличением дистанции напыления снижаются температура и скорость плазменной струи.

Для реализации плазменного способа нанесения покрытий используют установки, включающие необходимый комплект оборудования и приспособлений (рис. 4.3). В странах СНГ используют установки разработанные в России, а также установки зарубежных фирм: "Metco Inc." (США), "Plasma-Technik" (Швейцария), "Plasma-dain" (США) и др.

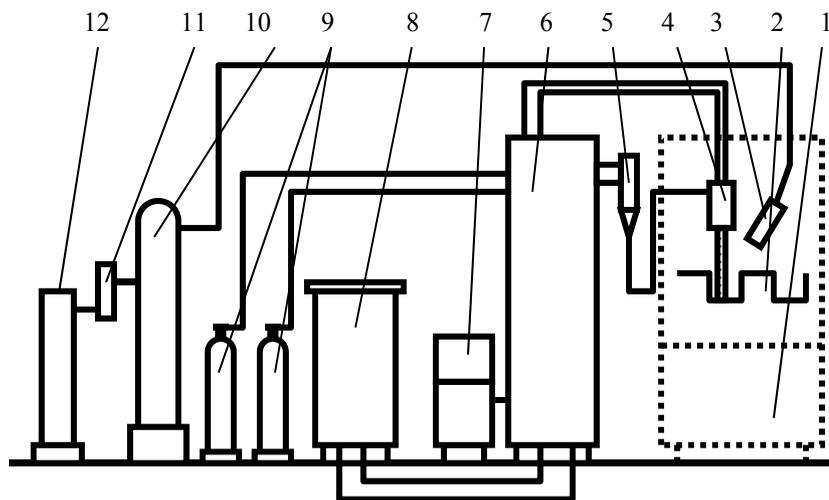


Рис. 4.3. Схема установки для плазменного напыления:

- 1 – вытяжной шкаф; 2 – обрабатываемая деталь;
- 3 – насадка подачи сжатого воздуха для охлаждаемой детали;
- 4 – плазматрон; 5 – порошковый питатель (дозатор); 6 – пульт управления;
- 7 – устройство подачи охлаждающей воды; 8 – источник питания;
- 9 – баллоны с газами; 10 – ресивер;
- 11 – маслоотделитель; 12 – компрессор

Оборудование для плазменного напыления постоянно совершенствуется, создаются различные виды плазмотронов и питатели для подачи порошка. Например, разработан питатель со взвешенным слоем порошка, со свободным истечением порошка под действием силы тяжести или вибрации, а также питатели с механическим дозированием порошка, вытекающего из бункера. В качестве дозирующего устройства используются профилированные барабаны, горизонтальные или вертикальные шнеки, плоский ротор. Для улучшения условий движения порошка в бункере, предотвращения образования сводов и зависаний, обеспечения равномерного поступления порошка в дозирующее устройство используют различные типы вибраторов – механические, пневматические, электромагнитные. Шнековые и барабанные питатели обеспечивают довольно равномерную подачу порошка, однако из-за жестких зазоров между вращающимся элементом и сопряженной стенкой они склонны к заклиниванию шнека или барабана при попадании в зазор частиц порошка.

Порошковые питатели служат для подачи порошкообразных материалов в плазмотрон. От стабильности работы порошкового питателя во многом зависит качество покрытий.

Имеется ряд технических решений конструкций порошковых дозаторов, к основным из которых относятся (рис. 4.4):

- дозаторы пневматические – порошок транспортируется движущимся под незначительным избыточным давлением газом (аргоном, азотом и др.);

- дозаторы порошка вибрационные – порошок сыпается в транспортирующую магистраль под действием собственной массы и вибрации, где, увлекаемый потоком газа, подается в плазменную струю;

- дозаторы механического типа – порошок дозируется движением деталей – роторов, шнеков, дисков, лопастей и других элементов конструкции, которые сыпают порошок в транспортирующую магистраль, где, увлекаемый газом, он перемещается в плазменную струю. Эффективность работы этих дозаторов зависит от грануляции порошка, частицы которого должны быть не менее 50 мкм, так как мелкие частицы порошка заклинивают зазоры, вследствие чего процесс нарушается.

Во всех конструкциях порошковых дозаторов расход транспортирующего газа ориентировочно составляет 10 % расхода плазмообразующего газа. Транспортирующий газ, попадая в плазменную

струи, снижает ее энтальпию и скорость, что заставляет производить его дислокацию непосредственно перед плазменной струей, в результате чего порошок сыпается в плазменную струю преимущественно за счет сил инерции.

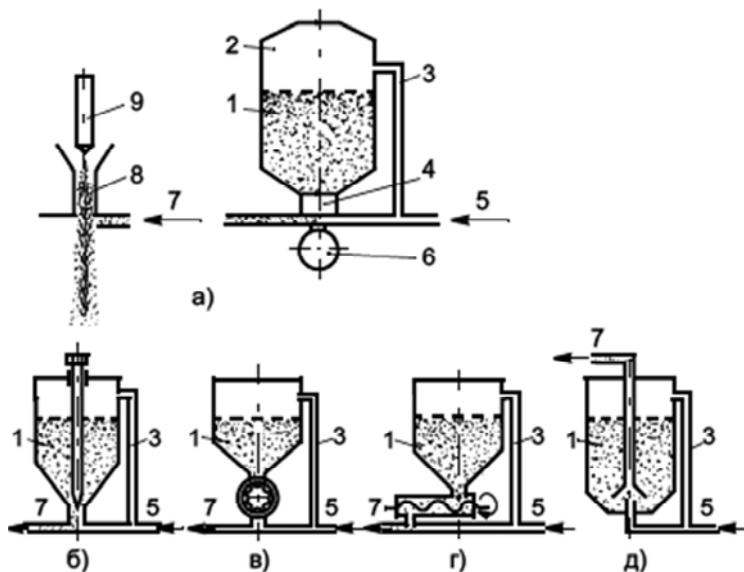


Рис. 4.4. Принципиальные схемы конструкций порошковых дозаторов (питателей):

- а* – обобщенная схема; *б* – с дозирующей иглой;
- в* – с дозирующим барабаном; *г* – с дозирующим горизонтальным шнеком;
- д* – с дозировкой за счет расхода транспортирующего газа;
- 1* – порошок; *2* – бункер; *3* – система выравнивания давления газа;
- 4* – дозирующее устройство; *5* – направление движения транспортирующего газа; *6* – вибратор; *7* – газопорошковая смесь;
- 8* – сопло-анод плазмотрона; *9* – катод плазмотрона

Независимо от типа конструкций порошкового дозатора он должен удовлетворять следующим общим требованиям:

- стабильность подачи порошка в плазменную струю;
- равномерное регулирование скорости подачи порошка в плазменную струю;
- малая масса конструкции дозатора порошков;
- простота, долговечность, компактность конструкции порошкового дозатора;

- возможность дистанционной автоматизации в управлении подачи порошка;
- невысокая стоимость дозатора;
- несложный и недорогой ремонт дозатора в случае отказа в работе;
- высокие эстетические показатели (применение прозрачных материалов).

Повышение надежности и совершенствование конструкции порошкового дозатора до настоящего времени являются актуальной технической задачей

Методические указания

Самыми существенными параметрами, которые определяют работоспособность плазмотрона, являются производительность процесса напыления и коэффициент использования материала. На эти параметры плазменного напыления наибольшее влияние оказывает сила тока дугового разряда и расход плазмообразующего и транспортирующего газов.

Для определения производительности процесса напыления воспользуемся методом взвешивания. Для этого перед напылением взвешивается порошок, засыпаемый в бункер. После зажигания плазмотрона включается подача порошка и производится напыление на подготовленный заранее диск диаметром 60–70 мм в течение одной минуты. После напыления взвешивается оставшийся в бункере порошок и напыленный образец.

Производительность напыления и коэффициент использования материала определяются по формулам:

$$\Pi = P_{\Pi} - P_{\text{н}};$$

$$K = (P_{\text{пн}} - P_{\text{пк}}) / (P_{\Pi} - P_{\text{н}}),$$

где Π – производительность процесса напыления;

K – коэффициент использования материала;

$P_{\text{н}}$ – масса образца до напыления;

P_{Π} – масса образца после напыления;

$P_{\text{пн}}$ – масса порошка в бункере до напыления;

$P_{\text{пк}}$ – масса порошка в бункере после напыления.

Порядок выполнения работы

1. Вычертить принципиальную схему плазменного напыления.
2. Вычертить таблицу для измерений и расчета полученных данных.
3. Взвесить все имеющиеся образцы, пронумеровать их специальными клеймами.
4. Установить плазмотрон в специальное приспособление.
5. Установить специальное приспособление для крепления образцов, закрепить в нем образец № 1. Отрегулировать расстояние от среза сопла плазмотрона до поверхности образца равным 150 мм.
6. Из емкости № 1 отсыпать порошок ПГ-12Н-01 грануляцией 100–160 мкм в насыпку. Вес порошка в насыпке должен быть 0,3 кг.
7. Засыпать взвешенный порошок в бункер, зафиксировать на цифровой линейке наличие порошка, записать данную цифру в таблицу измерений.
8. Оператору плазменной установки включить плазмотрон. Установить режимы согласно табл. 4.1.
9. Включить подачу порошка и одновременно засечь время по секундомеру. Время напыления – 1 мин.
10. Закрыть кран подачи порошка.
11. Выключить плазмотрон.
12. На цифровой линейке зафиксировать наличие порошка, записать показания в табл. 4.1. Досыпать в бункер порошок до первоначальной отметки.
13. Достать из приспособления образец № 1, закрепить образец № 2. Взвесить образец № 1. Обратит внимание на то, что напыленный образец имеет высокую температуру. Снимать его необходимо осторожно, специальным инструментом.
14. Провести дальнейшее исследование по указанной выше методике, руководствуясь таблицей и изменяя соответственно грануляцию, силу тока, расход плазмообразующего газа.
15. Подсчитать среднее значение производительности напыления плазмотроном ПП-25.

Содержание отчета

1. Название и цель лабораторной работы.
2. Краткий конспект общих сведений и методических указаний.

3. Таблица с результатами измерений и расчетов.

4. Графические зависимости коэффициента использования порошка и производительности процесса плазменного напыления от силы тока.

5. Выводы.

Таблица 4.1

Таблица результатов измерений

№ группы образцов	Сила тока, <i>A</i>	Напряжение, <i>B</i>	Расход газа, м ³ /час	Дистанция, мм	Марка и грануляция порошка	Производительность, кг/час	Коэффициент использования порошка
1	2	3	4	5	6	7	8
1	150	80...100	3,7	150	ПГ-СР-4 160...200		
	175						
	200						
	225						
	250						
2	150	80...100	3,7	150	ПГ-СР-4 100...160		
	175						
	200						
	225						
	250						
3	150	80...100	4,3	150	ПГ-СР-4 160...200		
	175						
	200						
	225						
	250						
4	150	80...100	4,3	150	ПГ-СР-4 100...160		
	175						
	200						
	225						
	250						
5	150	80...100	5,0	150	ПГ-СР-4 160...200		
	175						
	200						
	225						
	250						
6	150	80...100	5,0	150	ПГ-СР-4 100...160		
	175						
	200						
	225						
	250						

Контрольные вопросы

1. Что такое плазменная дуга и какой процесс лежит в ее основе?
2. Какие газы используются для формирования плазменной дуги в плазменных установках и какова температура горения дуги?
3. Какие типы плазменных горелок существуют и в чем их отличие?
4. Каковы основные технологические параметры плазменного напыления?
5. От чего зависит температура и мощность дуги?
6. Что входит в комплект оборудования и приспособлений для плазменного напыления?
7. Какова принципиальная конструкция плазмотрона?
8. Какие существуют порошковые питатели и в чем их особенности?
9. Перечислите преимущества и недостатки плазменного напыления керамики?
10. Как определяется производительность процесса плазменного напыления?

Лабораторная работа № 5

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАПЫЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Цель работы:

1. Ознакомление с основными дефектами напыленных покрытий и видами контроля покрытий.
2. Ознакомление с методами измерения прочности сцепления
3. Практическое освоение выбора технологических параметров подготовки поверхности для получения оптимальной прочности сцепления напыленных покрытий из самофлюсующихся сплавов с основным материалом.

Материалы и оборудование:

Токарно-винторезный станок 16К20; плазменная установка модели УПУ-3Д; плазменная горелка модели ПП-25; порошок ПГ-СР-4 грануляцией 100...160 мкм; образцы штифтовые (подготовленные, после дробеструйной обработки); приспособление для испытания образцов.

Работа рассчитана на четыре академических часа

Общие сведения

Надежность, работоспособность, экономичность изготовления и эксплуатации деталей с покрытием во многом зависят от качества изготовленного покрытия. Требования, предъявляемые к качеству покрытия, определяются назначением и условиями эксплуатации поверхности деталей, на которые эти покрытия нанесены.

Дефекты в покрытии различают по месту их расположения (наружные и внутренние) и причинам возникновения. К основным дефектам напыленного покрытия можно отнести высокую или сплошную пористость, трещины, отслоения или вспучивание покрытия, отклонение от прочностных и пластических свойств покрытия, низкую прочность сцепления покрытия с основой, отклонения от заданных размеров покрытия (наплывы или кратеры), неоднородность структуры и др. Обычно дефекты возникают при несоблюдении технологического процесса получения покрытия, при неисправности оборудования, низкой квалификации рабочих, плохой подготовке поверхности детали перед напылением и т. п.

Для снижения количества дефектов или их полного исключения при производстве напыленных изделий производят следующие виды контроля: контроль параметров процесса и окончательный контроль покрытий.

Контроль выбранных параметров режима напыления и поддержание их стабильными при полном цикле напыления изделия в значительной мере гарантирует получение заданных свойств покрытия. Окончательный контроль напыленных изделий состоит из следующих операций: определение толщины покрытия, внешний осмотр напыленного изделия, выявление скрытых дефектов и оценка адгезионной прочности. Дополнительно у покрытий могут контролировать косвенные показатели – пористость, плотность, износостойкость и коррозионную стойкость.

Толщину покрытия определяют мерительными инструментами, весовыми способами, специальными толщиномерами и другими приемами.

При внешнем осмотре покрытия контролируется общее состояние поверхности напыления, сравнивается с эталоном наличие внешних дефектов: трещин, сколов, вспучиваний и т. д. Для более тщательного осмотра применяют лупы с большим увеличением или микроскопы.

Выявление таких скрытых дефектов как микротрещины, локальные отслоения, макро- и микронесплошности производятся с большой трудностью или вовсе не поддаются контролю. В ряде случаев некоторые дефекты удается выявить, применяя ультразвуковые методы контроля.

Оценить адгезионную прочность непосредственно на напыленном изделии представляет большую сложность. Поэтому обычно ее определяют на образцах-свидетелях с помощью косвенных или прямых способов.

К косвенным способам относятся царапанье, изгибание и т. п. Эти методы испытаний дают лишь более или менее относительные результаты и в значительной степени зависят от аккуратности и наблюдательности испытателя.

К прямым способам относятся отрыв или сдвиг части покрытия. Преимущество этих способов в возможности получения абсолютных данных, которые позволяют непосредственно сравнивать результаты измерения различными методами, использование различных технологий подготовки поверхности и получения покрытия,

использования покрытия для различных видов поверхностей деталей. Эти способы основаны на различии физико-механических свойств металлов покрытий и основного металла детали. Большинство прямых методов основаны на создании и придании образцу специальной формы с последующей сильной деформацией образца, при которой происходит разрушение покрытия или основного металла. Метод контроля выбирают в зависимости от металла покрытия, вида и назначения детали. Для контроля применяются оборудование и приспособления различных типов: разрывные машины, прессы и т. п. Применение этих способов в производственных условиях сдерживается трудностью изготовления специальных образцов и высокой стоимостью испытательных стендов.

В литературе перечисленные выше способы для оценки прочности сцепления покрытий с основой имеют и другое название – это неразрушающие и разрушающие методы оценки прочности сцепления покрытия с основой.

Пористость – косвенный показатель условий напыления, который может служить параметром оптимизации процесса. С другой стороны, она непосредственно влияет на эффективность защитных свойств покрытия, его тепло- и электропроводность, механические и другие характеристики.

Все материалы, полученные по технологии порошковой металлургии, содержат поры. Их подразделяют на две группы: закрытые поры – не сообщающиеся с окружающей средой и открытые поры – сообщающиеся с окружающей средой.

Общепринятой методикой определения открытой пористости является гидростатическое взвешивание. Измерение плотности жидкости или твердого тела методом гидростатического взвешивания основано на использовании закона Архимеда. Определение осуществляют по результатам двух измерений массы исследуемого предмета. Подвешенный к коромыслу весов исследуемый образец взвешивают сначала в воздушной среде, затем в жидкости с известной собственной плотностью. Обычно в качестве жидкости используют дистиллированную воду. Первое взвешивание позволяет определить массу образца, а второе, по разности обоих взвешиваний, позволяет вычислить объем, а затем подсчитывают искомую плотность образца. Пористость так же определяют измеряя проницаемость покрытий, отделенных от подложки, которая характеризуется

скоростью прохождения газа через слой соответствующего размера при определенном различии давлений на разных сторонах образца.

Износостойкость напыленных покрытий в условиях сухого трения или со смазкой определяется на машинах трения.

Коррозионная стойкость покрытия определяется уровнем сдерживания проникновения агрессивной среды и защиты основного материала. Данный показатель обычно рассматривается во взаимосвязи с другими показателями. Например, покрытие с высокой коррозионной стойкостью полностью защищает основной металл, а для пористого покрытия или при наличии в нем дефектов агрессивные компоненты среды беспрепятственно проникают на поверхность основного металла.

Покрытие, связанное с основным металлом, подвержено влиянию температуры, механических нагрузок, нагрузок от внутренних напряжений, а также других внешних и внутренних сил. 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.

Адгезия покрытия к основному материалу обеспечивается преимущественно механическим сцеплением. Это значит, что прочность сцепления покрытия с основой определяется величиной и характером шероховатости поверхности основного металла.

Для определения прочности сцепления покрытия с основным металлом применяют следующие способы испытаний, связанные с применением растягивающей или схожей с ней нагрузки:

1. Штифтовая проба или испытание на прочность сцепления вытягиванием штифта (рис. 5.1, *a*).

Сущность данного способа заключается в том, что в цилиндрическое или коническое центральное отверстие, выполненное в основном металле *A*, вставляют штифт *B* таким образом, чтобы торцовая поверхность штифта и поверхность основы находились в одной плоскости. После сборки и предварительной обработки (например, дробеструйной обработки) на верхнюю поверхность собранных образцов напыляют покрытие. При испытаниях основу *A* устанавливают на упоры, а штифт *B* вытягивают вниз. Отношение нагрузки, при которой происходит отрыв штифта от покрытия, к площади его напыленного торца характеризует прочность сцепления покрытия с основой.

2. Клеевая проба или испытание на прочность сцепления на отрыв с использованием клея (рис. 5.1, б).

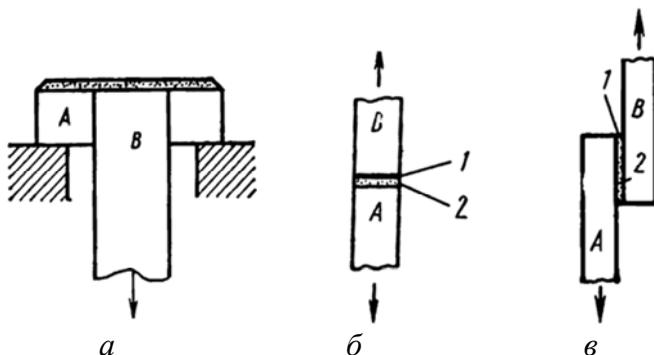


Рис. 5.1. Схемы испытания на прочность сцепления:
а – штифтовая проба; б – клеевая проба; в – плоский клеевой образец;
А – основной металл; В – образец;
1 – клей; 2 – покрытие

Сущность данного способа заключается в том, что торцовую поверхность цилиндрического образца А (основной металл) подвергают предварительной обработке для придания шероховатости, а затем напыляют на нее требуемое покрытие. К поверхности покрытия приклеивают цилиндрический образец В, диаметр которого равен диаметру образца с покрытием, и проводят испытание на растяжение. Прочность сцепления в таком случае определяется как отношение разрушающей нагрузки к площади торцевой поверхности. Этот метод испытаний применим только для покрытий, прочность сцепления которых с основой не превышает прочности клея.

3. Плоский клеевой образец является вариантом клеевой пробы (рис. 5.1, в). Испытания проводят с использованием образца, получаемого приклеиванием металлической пластины В к поверхности покрытия с основным металлом А. Во время испытаний определяют максимальное усилие, при котором происходит отделение покрытия от основного металла. Путем деления значения этого усилия на площадь приклеивания определяют прочность покрытия на сдвиг. Основное требование при исследованиях – в процессе действия сдвигающей нагрузки на основной металл и металлическую пластину в рабочей зоне образца должны возникать чистые напряжения среза.

4. Прочность сцепления покрытия определяют также путем испытания на сдвиг по схеме, показанной на рис. 5.2. На центральную часть поверхности цилиндрического образца *A* (основного металла) напыляют исследуемое покрытие. Образец без покрытия входит по скользящей посадке в матрицу. Затем образец с покрытием устанавливают в матрице таким образом, чтобы покрытие опиралось на торцовую поверхность матрицы. Размеры цилиндрического образца и покрытия показаны на рис. 5.3. Прочность сцепления при сдвиге для данного образца определяют как отношение усилия срезающей нагрузки к площади цилиндрической поверхности, на которую нанесено покрытие.

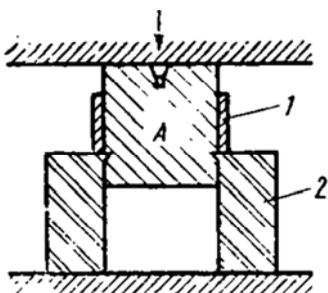


Рис. 5.2. Испытание на прочность сцепления покрытия при сдвиге (цилиндрический образец):
1 – покрытие; 2 – матрица

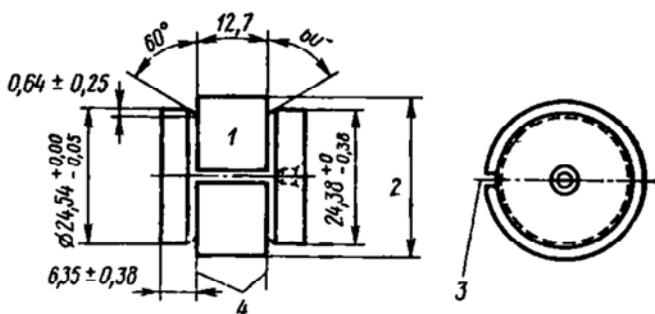


Рис. 5.3. Размеры образцов для испытания на прочность сцепления при сдвиге:
1 – покрытие; 2 – 29,36 мм после напыления и 28,35 мм после чистовой обработки

Рассмотренные способы испытания на прочность сцепления при растяжении и сдвиге позволяют дать количественную оценку прочности сцепления покрытия с основой. Однако в случаях, когда необходимо качественное сопоставление покрытий, существует ряд перечисленных ниже упрощенных способов испытаний: испытание на изгиб, испытание царапанием, испытание циклической ударной нагрузкой, испытание выдавливанием.

Методические указания

Прочность сцепления зависит во многом от степени наклепа или кинетической энергии дробы на единицу площади A , времени выдержки между операцией подготовки поверхности и нанесением покрытия, а также температуры подогрева поверхности.

Величина энергии на подготовку поверхности изменяется в зависимости от времени обработки и оценивается по формуле

$$A = (KQtv^2)/(2S), \quad (5.1)$$

где K – коэффициент использования дробы;

Q – производительность, кг.;

t – время обработки, с.;

v – скорость дробы м/с;

S – площадь дробеструйной обработки, м².

Прочность сцепления покрытия с основой измеряется по закону убывания:

$$\sigma = a + bt + ct^2, \quad (5.2)$$

где σ – прочность сцепления, МН/м²;

t – время выдержки, ч.;

a, b, c – коэффициенты.

В конечном варианте для верхней границы функции $\sigma = f(t)$ запишется следующим образом:

$$\sigma_{\text{в}} = 1,27 + 0,01t + 0,000067t^2. \quad (5.3)$$

Для нижней границы:

$$\sigma_{\text{н}} = 0,85 + 0,029t + 0,00034t^2. \quad (5.4)$$

Порядок выполнения работы

1. Изучить параметры, характеризующие качество покрытия.
2. Рассмотреть способы контроля адгезионной прочности покрытия с основой.
3. Построить график функции $\sigma = f(t)$ по формулам (5.3) и (5.4).
4. По формуле (5.1) определить максимальную прочность сцепления.
5. Провести эксперименты, внести результаты в табл. 5.1
6. Построить зависимость $\sigma = f(A)$.
7. По графикам зависимости определить время выдержки перед напылением.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Перечислить параметры, характеризующие качество покрытия.
3. Описать способы контроля адгезионной прочности покрытия с основой.
4. Расчеты и график функции $\sigma = f(t)$.
5. Результаты эксперимента и график функции $\sigma = f(A)$.
6. Время выдержки перед напылением и выводы.
7. Результаты экспериментов занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Зависимость прочности сцепления от удельной кинетической энергии

σ , МН/м ²							
A , кг/с ²							

Контрольные вопросы

1. Какие разрушающие методы измерения прочности сцепления существуют?
2. Какие не разрушающие методы измерения прочности сцепления существуют?
3. Что такое пористость покрытия и от чего она зависит?
4. От чего зависит коррозионная стойкость покрытий?
5. Что такое износ и износостойкость, от чего зависит их величина?
6. Перечислить параметры, характеризующие качество покрытия.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П1.1

Способы очистки и применяемое оборудование
для устранения загрязнений

Способ очистки	Применяемое оборудование	Вид загрязнений							
		маслянистые, жирные	нагары, лаки, осадки	старые лакокрасочные покрытия	накипь	продукты коррозии	дорожная грязь	консервационные покрытия	консистентные смазки
механиче- ский	Ручной инструмент	-	+	+	-	+	+	-	-
	Механизированный инструмент	-	+	+		+	+	-	-
	Галтовочные барабаны	+	+	-	-	+	-	-	-
	Гидровибрационные установки	+	+	+	-	+	+	-	-
	Гидропескоструйные установки	+	-	+	-	+	+	-	-
	Установки для очистки косточковой крошкой	+	+	-	-	-	-	-	-
	Дробеструйные установки	+	+	+	-	+	+	-	-
физико- химический	Ванны	+	+	+	+	+	+	+	+
	Установки с пульсацией жидкости	+	+	-	+	-	-	-	-
	Струйные установки	+	+	+	+	+	+	+	+
	Электролитические установки	+	+	-	-	+	-	+	+
	Ультразвуковые установки	+	+	-	+	+	-	+	+
термо- химический	Паяльные лампы, газопламенные горелки	-	+	+	-	-	-	-	-
	Ванны с расплавами солей	-	+	-	+	-	-	-	-

Контроль качества очистки поверхностей деталей

Прежде всего необходимо уточнить понятие «чистая» поверхность. В производстве чистой считается поверхность, на которой количество загрязнений меньше или равно допустимому. Эти допустимые загрязнения определяются видом дальнейшей обработки деталей, ее назначением, условиями эксплуатации и др. Например, газовая сварка допускает наличие небольших окислов и органических загрязнений, а для пайки необходимо полное удаление окислов и не допускаются следы жирных загрязнений. Детали электронных приборов требуют удаления даже мельчайших атмосферных пылинок. Определение качества очищенных поверхностей, прежде всего, связано с выбором правильного метода контроля. Удобного и универсального метода определения качества очистки поверхности среди разработанных до настоящего времени не существует. Поэтому выбор метода контроля, прежде всего, зависит от требований к качеству поверхности, необходимости выявления загрязнений того или иного типа, материала и формы деталей и др.

Наиболее простым, но и наименее точным является *визуальный контроль* качества очистки. Он используется при сплошном контроле в серийном и массовом производствах, если процесс очистки хорошо отлажен с применением на этапах отладки более чувствительных методов и применяется выборочный контроль качества очистки поверхности деталей с использованием этих методов.

Протирание поверхности фильтровальной бумагой или батином позволяет обнаружить наличие твердых частиц загрязнений, сажи, травильного шлама и др., однако не дает их количественной оценки. Кроме того, чувствительность метода сильно зависит от степени прижима при протирании, что затрудняет сравнение результатов контроля. Этим методом удобно контролировать качество очистки поверхностей глубоких каналов и отверстий.

Метод разрыва водной пленки основан на погружении детали в проточную воду (желательно дистиллированную или деионизованную) и наблюдении сплошности водной пленки на поверхности после извлечения детали из ванны. Свободная от жировых загрязнений поверхность имеет гидрофильный характер и удерживает сплошную водную пленку, в то время как в местах загрязнений наблюдаются ее разрывы. Этот метод может привести к ошибкам, если на поверхности имеются смачиваемые водой загрязнения. При

применении в растворах для очистки ПАВ последние адсорбируются на жировых загрязнениях и хорошо смачиваются водой. Все это создает ложную непрерывность водной пленки. Для ее устранения можно предварительно погружать детали в слабокислый раствор, в котором разлагаются мыла с образованием гидрофобных жирных кислот. Однако при этом возникает опасность коррозии металла, кроме того, кислоты не реагируют с синтетическими ПАВ. Другой недостаток метода разрыва водной пленки – неприемлемость для контроля качества очистки гидрофобных поверхностей, получаемых очисткой в растворителях и эмульсиях.

Разновидностью рассмотренного метода является *метод распыления воды* на поверхность детали. Свободная от гидрофобных загрязнений поверхность равномерно смачивается водой, в то время как на загрязнениях образуются отдельные капли с большими краевыми углами, которые хорошо заметны в течение 15–20 мин после распыления.

Чувствительность этого метода при загрязнении деталей минеральным маслом в 30–50 раз выше, чем чувствительность метода разрыва водной пленки. Распылять воду необходимо на влажную деталь или сразу же после сушки, так как после выдержки на воздухе очищенных деталей более 1 ч они настолько загрязняются из атмосферы, что контроль показывает 100 %-ную загрязненность. В состав воды могут вводиться пигменты для окрашивания загрязненных участков. Однако окрашенная площадь поверхностей несколько превышает площадь загрязненных участков, что необходимо учесть для объективной оценки качества очистки поверхности. Это обстоятельство может быть причиной завышения оценки чувствительности метода распыления воды с пигментом.

Различная смачиваемость чистой и загрязненной поверхностей лежит в основе *методов конденсации и запотевания*. В первом случае деталь охлаждают до температур жидких газов, а после возвращения в помещение с комнатной температурой следят за узорами смачивания таявшего инея. Во втором случае поверхность обрабатывается водяным паром. Сплошность адсорбирования частиц воды на поверхности зависит от степени очистки.

Количество удаленных загрязнений может быть определено *взвешиванием* детали до и после очистки. Однако, этот метод приемлем для мелких деталей, он обладает низкой чувствительностью и не позволяет выявить характер расположения загрязнений на поверхности.

Счетный метод контроля основан на подсчете количества частиц, не удаленных с поверхности детали. Для обнаружения таких частиц используют микроскоп. Этот метод применяют при изготовлении подложек интегральных схем. Для контроля чистых внутренних полостей деталей через них прокачивают чистую жидкость, затем ее фильтруют и подсчитывают загрязнения, оставшиеся на фильтре.

Для лучшего наблюдения загрязнений используют явление *флуоресценции* некоторых веществ под действием ультрафиолетового облучения. Такими веществами являются масла, ПАВ. Для обнаружения других загрязнений в состав технологических сред применяемых при обработке деталей, вводят люминесцентные добавки. Светящиеся загрязнения определяются визуально, фотографированием, с помощью индикационных приборов и электронных схем с фотоумножителем.

Кондуктометрический метод широко применяют в производстве микросхем. Он основан на измерении электрического сопротивления деионизованной воды до и после прополаскивания в ней подложек.

Измерением *краевого угла смачивания* выявляется присутствие жирных пленок на поверхности. При загрязнении поверхности растворителем, содержащим разный процент масла, наблюдаются краевые углы 61; 63; 66; 74; 78 с соответствующим процентом масла – 0,00; 0,005; 0,01; 0,1; 0,5.

Это лабораторный метод. Его целесообразно применять для подтверждения результатов контроля очистки другими методами.

В научных исследованиях процессов очистки применяют *метод радиоактивных изотопов*, обладающий наибольшей чувствительностью. Эти изотопы искусственно вводятся в состав загрязнений. После очистки поверхность контролируется с помощью счетчика Гейгера. Применение метода в промышленности ограничивается значительными организационными и технологическими трудностями.

Обнаружить остатки продуктов коррозии можно *измерением контактного электрического сопротивления* очищенной поверхности с эталонным медным контактом. Для очищенной поверхности оно составляет 140×10^{-4} Ом, в то время как коррозионная пленка повышает переходное сопротивление вплоть до 2000 Ом. Аналогичным целям служит *метод измерения контактной термо-ЭДС*.

Рассмотренные методы контроля являются **неразрушающими**.

Кроме них существует ряд **разрушающих** методов, к которым относят *коррозионный метод*, основанный на реакции очищенных участков стальной поверхности с раствором железосинеродистого калия и хлористого аммония (в результате реакции продукты реакции окрашиваются); *метод восстановления более благородных металлов из растворов их солей* при контакте соли с чистыми участками поверхности металла (например, при погружении стальных, чугунных или алюминиевых деталей в 3 %-ный раствор CuSO_4 на чистых поверхностях осаждается медь); *испытания трением образцов* (наличие загрязнений на поверхностях изменяет коэффициент трения); *измерения сцепления покрытий* с очищенной поверхностью и др.

Сведения о степени очистки поверхностей деталей можно получить проверкой их эксплуатационных характеристик. Например, наличие загрязнений на поверхности полупроводниковых приборов может понизить пробивное напряжение р-п-переходов, создать обедненные или инверсионные каналы; загрязнения на поверхностях, подвергаемых пайке, снижают усилие разрыва паяных соединений и т. д.

ПОРОШКИ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ И НАПЛАВКИ ПОКРЫТИЙ

Таблица П2.1

Индекс	Марка	Состав	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	HRC	Свойства покрытий
A.01 A.02	ПН70Ю30 ПН85Ю15	Ni · 30,5 Al Ni · 13,5 Al	1630 1380	40 20	Высокая жаростойкость и теплостойкость, износостой- кость в парах трения с чу- гуном
A.03 A.04 A.05	ПН55Т45 ПТ86Н12 ПТ65Ю35	Ni · 45 Ti Ti · 11 Ni Ti · 37Al	1310 1000 1450	50 – –	Высокая износостойкость, устойчивость к коррозии Устойчивость к химической коррозии, жаростойкость
A.06 A.07 A.08 A.09	ПН75Ю23В ПХ20Н80 ПХ20Н70Ю10 ПХ16Н77Ю6	Ni · 23 Al 3Cr Ni · 20,5 Cr Ni · 17Cr · 9,5Al Ni · 17Cr · 6Al	1600 1450 1450 1450	– 35–40 35–40 35–40	Высокая стойкость к дей- ствию щелочей, карбониль- ной коррозии, газообразив- ному износу при повышен- ных температурах

Область применения: Защитные слои на деталях машин и оборудовании металлургического, энергетического, химического, нефтедобывающих производств, ДВС и др.

Наносятся плазменным и детонационным напылением.

Таблица П2.2

Индекс	Марка	Состав	Свойства покрытий
Б.01 Б.02 Б.03 Б.04 Б.05 Б.06	ПР – X18Н9 ПР – 06ХН28МДТ ПР – 04X19Н11М3 ПР – 08X19Н9Ф2С2 ПР – 10X16Н25АМ6 ПР – X20Н80	Fe · 18Cr · 9,5 Ni Fe · 23,5Cr · 27,5Ni · 3Mo · Cu · 1Ti Fe · 19Cr · 11Ni · 2,5Mo Fe · 19Cr · 9Ni · 2V · 1,6Si Fe · 16Cr · 25Ni · 6,7Mo · 0,15N Ni · 20,5Cr	Износостойкость и высокая устойчивость к химической коррозии в воде и агрессивных жидкостях, стойкость к кавитации, хорошая сопротивляемость изнашиванию потоком абразивных частиц при 500–550 °С

Область применения: Уплотнительные и защитные слои на деталях ДВС, вентиляторов, валов и подшипников, энергетического и химического оборудования, судовых механизмов.

Наносятся плазменным напылением и наплавкой.

Таблица П2.3

Индекс	Марка	Состав	$T_{пл.}$ °С	HRC	Свойства покрытий
B.01	ПР-Н80Х13С2Р	Ni · 0,3С · 13Cr · 2,4Si · 1,5В	1070	29–34	Высокая износостойкость, высокая коррозионная устойчивость и жаростойкость, хорошая прочность сцепления со сталями. Твердость и износостойкость сплавов возрастает, а сопротивление удару падает по мере увеличения в них содержания углерода, бора и кремния
B.02	ПР-Н77Х15С3Р2	Ni · 0,5С · 15Cr · 3,2Si · 2В	1050	37–42	
B.03	ПР-Н73Х16С3Р3	Ni · 0,7С · 16Cr · 3,2Si · 2,7В	1050	47–52	
B.04	ПР-Н70Х17С4Р4	Ni · 1С · 17Cr · 4,1Si · 3,6В	990	55–59	
B.05	ПР-Н67Х18С5Р4	Ni · 1,2С · 17,5Cr · 4,5Si · 4,3В	1000	60–62	
B.06	ПР-Н65Х25С3Р3	Ni · 1,2С · 25Cr · 2,7Si · 2,5В	1050	45–51	
B.07	ПР-Н68Х21С5Р	Ni · 0,4С · 21Cr · 4,5Si · 1,1В	1070	44–50	
B.08	ПГ-СР2	Ni · 0,3С · 13,5Cr · 2,5Si · 1,8В	1050	40–45	
B.09	ПГ-СР3	Ni · 0,5С · 15Cr · 3Si · 2,4В	1050	50–55	
B.10	ПГ-СР4	Ni · 0,8С · 16,5Cr · 3,7Si · 3,3В	990	58–62	
B.11	ПР-НХ7С4Р3	Ni · 0,4С · 6,8Cr · 4,1Si · 3В	980	50–52	Хорошая жидкотекучесть при оплавлении
B.12	ПР-НД42СР	Ni · 0,2С · 42,5Cu · 0,9Si · 1В	1065	200 НВ	Хорошая адгезия с чугуном
B.13	ПР-ОНСР	Cu · 8,2Sn · 1Si · 0,8В · 5Ni	700	140 МПа	
B.14	ПР-ОФНХСР	Cu · 8,2Sn · 0,4Р · 14,5Ni · 2,5Cr · Si · В	630	220 Мпа	Прочные и износостойкие слои на меди и стали
B.15	ПР-Х4Г2Р4С2Ф	Fe · 3,7Cr · 2,2Mn · 3,8В · 2,5Si · 0,8V	1200	58–60	Высокая износостойкость
B.16	ПР-ЖНДСР	Fe · Ni · Cu · Si · В	1025	240 НВ	Хорошая адгезия с чугуном

Область применения: Роторы и втулки насосов, шнеки и корпуса экструдеров пластмасс, кулачковые распредвалы, шейки валов, седла клапанов, калибры и штампы, детали запорной арматуры, лопат-

ки воздуходувок и газовых турбин, опорные цапфы и диски, детали станков и др.

Наносятся газоплазменным напылением, плазменным напылением и наплавкой.

Наряду с указанными в перечне марками порошков, АП ЛПС может производить и другие порошковые материалы по рецептуре потребителя, такие как: ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-10К-01, ПГ-19М-01.

Таблица П2.4

Индекс	Марка	Состав	$T_{пл}$, °С	HRC	Свойства покрытий
Д.01	ПГ-С27	Fe · 3,9C · 26Cr · 1,5Si · 1,7Ni · 0,3W · 1,1Mn	1280–1320	59	Высокая износостойкость при абразивном износе, эффект самозатачивания при обработке почвы
Д.02	ПГ-С1	Fe · 2,9C · 29Cr · 3,5Si · 4,2Mn · 4Ni	1280–1320	51	
Д.03	ПГ-УС25	Fe · 4,9C · 38Cr · 2,1Si · 2,5Mn · 1,4Ni	1280–1320	55	
Д.04	ПГ-ФБХ6-2	Fe · 4,5C · 34Cr · 1,7Si · 2,7Mn · 1,6B	1280–1320	52	
Д.05	ПР-Х18ФНМ	Fe – основа	–	44	Высокая износостойкость хорошая коррозионная стойкость хорошие сварочные свойства
Д.06	ПР-ЧН15Д7	Fe · 2,6C · 1,7Cr · 2,2Si · 1Mn · 15Ni · 6,5Cu	–	–	Хорошая износостойкость при повышенных температурах
Д.07	ПГ-Л101	Fe · 5,9C · 55Cr · 9Si · 3Mn · 5Ni	–	–	Наполнители лент и проволоки для покрытий, стойких к абразивному износу
Д.08	ПГ-Л102	Fe · 5,9C · 47Cr · 9Si · 3Mn · 2,4B	–	–	
Д.09	ПР-ХЗОСРНД	Fe · 4,9C · 30Cr · 3,2Si · Mn · 1,4Ni · 2B	1240–1260	59	Износостойкость в сочетании с жаростойкостью

Окончание табл. П2.4

Индекс	Марка	Состав	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	HRC	Свойства покрытий
Д.10	ПР-ХЗОГСП	Fe – основа	1200–1240	58	
Д.11	ПР-ФМИ	Fe · 3,5C · 2,5Si · 12Mn · 3B	1200	55	Высокая износостойкость

Область применения: Наплавочные сплавы для массового упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин, деталей эксгудеров, арматуры систем гидропривода и др.

Наносятся индукционной и плазменной наплавкой Д. 09, Д. 10, могут также наплавляться газопламенной горелкой с добавлением флюса в факел горелки.

Таблица П2.5

Индекс	Фракции, мкм	Индекс	Фракции, мкм
А.01, 04, 05	40, 20–63	Д.05	40–100, 100–200
А.02	20–63, 40–100, 100–140	Д.06	20–63, 40–100, 200–400, 40–630, 630
А.03	40–100, 100–140	Д.07–08	800
А.06	56, 40–100	Д.09–11	40–100, 63–630, 100–280, 630
А.07-09	40, 40–100, 100–280	Е.01–02	20–63, 40–100, 160, 400–800
Б.01-07	40, 20–63, 40–100	Е.03–09	20–63, 40–100, 100–280
Б.11, 16	80–160, 100–280		
Б.08-10	160, 40–100, 160–400, 400–800	Ж.01–07	40, 63, 40–100, 80–160, 160–280, 280
Б.12, 13	40, 40–100, 80–160	Ж.08	40, 40–100, 80–160, 160–280
Б.15	40–100, 100–630		280–400, 400–630, 630
В.01, 02, 06	20–63, 40, 40–100, 100–280, 80–160, 280–400	Ж.09–11	40–100, 63–200, 80–160, 200–400
В.03-05	80–400	К.01–05	40–100
Г.01-08	40–100, 80–250, 100–280, 160–315, 315–500, 630, 800	Л.01 Л.02–03	40, 40–100, 150 40, 40–100, 80–160
Г.09-19	100–280	М.01–03	40, 20–63, 40–100
Д.01-04	160, 160–400, 400–800	М.04–07	40–100

Учебное издание

**СПОСОБЫ УПРОЧНЕНИЯ
И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Пособие

для студентов специальности

1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Составители:

СОКОРОВ Игорь Олегович

КРАЙКО Сергей Эдуардович

ДЕВОЙНО Олег Георгиевич и др.

Редактор *Е. В. Герасименко*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 18.02.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,66. Уч.-изд. л. 2,86. Тираж 100. Заказ 350.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.