

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра машиностроительных технологий и оборудования



ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Методические указания к проведению лабораторных работ
по дисциплине "Нанотехнологии в машиностроении"
для магистров направления подготовки 15190 "Конструкторско-
технологическое обеспечение машиностроительных производств"

Курск 2013

УДК 621.793.14

Составитель Н.Д. Тутов

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент *В.В. Малыхин*

Плазменные технологии нанесения покрытий: методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплине "Нанотехнологии в машиностроении" / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Н.Д. Тутов. Курск, 2013. 15 с.

Методические указания состоят из кратких теоретических и методических сведений по выполнению лабораторной работы, обработке результатов и замеров.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки магистров 151900 "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств".

Предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л.0,87. Уч.-изд. л.0,94. Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Лабораторная работа №3

Плазменные технологии нанесения покрытий

Цель работы: Ознакомление с плазменными методами получения износостойких покрытий.

План работы

1. Изучить устройство и принцип работы плазменной установки и ее приборного оснащения.
2. Составить план эксперимента и определить последовательность проведения опытов.
3. Подготовить установку к проведению экспериментов.
4. Под руководством учебного мастера включить оборудование и провести эксперименты.

Оборудование и принадлежности

1. Плазменная установка УПС-301
2. Плазмотрон.
3. Баллоны с аргоном и углекислым газом
4. Подложки – стальные пластины толщиной 10÷16 мм.

Краткие теоретические сведения

Плазменное напыление - процесс нанесения покрытия на поверхность детали (изделия) с помощью плазменной струи. Плазменная струя - это частично или полностью ионизированный газ, обладающий свойством электропроводности и имеющий высокую температуру.

Различают высоко- и низкотемпературную плазму. Первая практически ионизирована, и ее электронная температура оценивается в сотни тысяч и более градусов. Низкотемпературная плазма, с температурой в несколько тысяч или десятков тысяч градусов, ионизирована частично и содержит значительную часть нейтральных частиц.

Низкотемпературная плазма - многокомпонентная система, состоящая из атомов или молекул в основном состоянии; молекул, атомов, радикалов в различных возбужденных квантовых

состояниях; ионов, электронов. Для нанесения плазменных покрытий применяется низкотемпературная плазма.

Сущность плазменного напыления заключается в том, что в высокотемпературную плазменную струю подается распыляемый материал, который нагревается, плавится и в виде двухфазного потока направляется на подложку (рис. 1). При ударе и деформации происходит взаимодействие частиц с поверхностью основы или напыляемым материалом и формирование покрытия

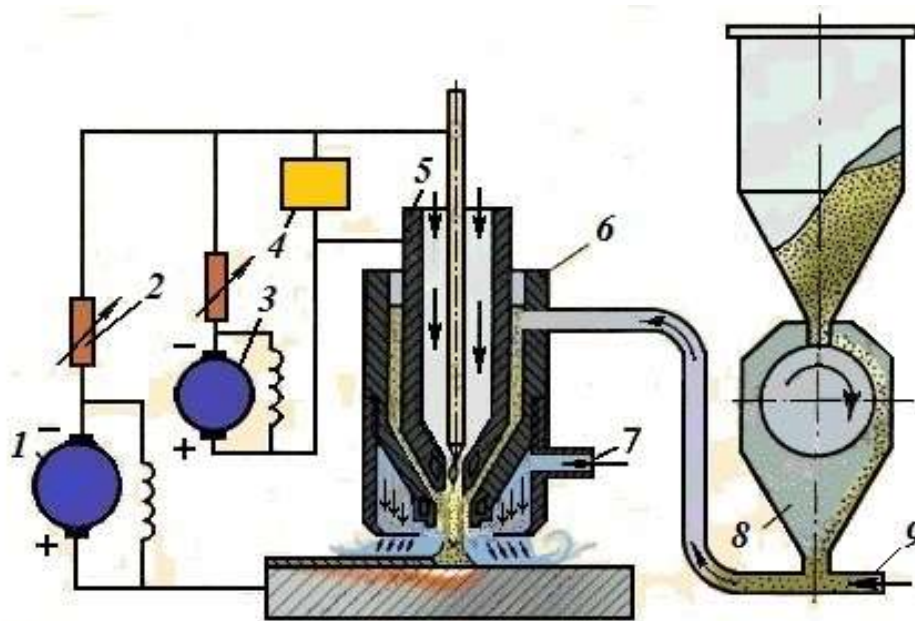


Рис.1 Схема установки плазменного напыления:

1 - источник дуги прямого действия; 2 - балластные сопротивления; 3 - источник питания дуги косвенного действия; 4 - осцилятор; 5 - сопло для плазмообразующего газа; 6 - корпус; 7 - ввод защитного газа; 8 - питатель порошка; 9 - трубка по которой подается газ, несущей порошок

Плазменный процесс состоит из трех основных стадий:

- генерация плазменной струи;
- ввод распыляемого материала в плазменную струю, его нагрев и ускорение;
- взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц с основанием.

Плазменным напылением наносятся износостойкие, антифрикционные, жаро- и коррозионностойкие, другие покрытия.

Напыление с помощью низкотемпературной плазмы позволяет:

- наносить покрытия на листовые материалы, на конструкции больших размеров, изделий сложной формы;
- покрывать изделия из самых разнообразных материалов, включая материалы, не терпящие термообработки в печи (стекло, фарфор, дерево, ткань);
- обеспечить равномерное покрытие как на большой площади, так и на ограниченных участках больших изделий;
- значительно увеличить размеры детали (восстановление и ремонт изношенных деталей). Этим методом можно наносить слои толщиной в несколько миллиметров;
- легко механизировать и автоматизировать процесс напыления;
- использовать различные материалы: металлы, сплавы, окислы, карбиды, нитриды, бориды, пластмассы и их различные комбинации; наносить их в несколько слоев, получая покрытия со специальными характеристиками;
- практически избежать деформации основы, на которую производится напыление;
- обеспечить высокую производительность нанесения покрытия при относительно небольшой трудоемкости;
- улучшить качество покрытий. Они получаются более равномерными, стабильными, высокой плотности и с хорошим сцеплением с поверхностью детали.

К основным недостаткам метода нанесения покрытий напылением можно отнести:

- малая эффективность и неэкономичность процесса напыления при нанесении покрытий на небольшие детали из-за больших потерь напыляемого материала. В таких случаях покрытие лучше наносить другими способами;
- высокий шум, ультрафиолетовое излучение, образование вредных для здоровья работающих соединений напыляемого материала с воздухом, которое сопровождает процесс напыления.

1.1 Оборудование для плазменного напыления

Для получения плазмы используются различные генераторы низкотемпературной плазмы, которые должны отвечать следующим требованиям:

- температура плазмы на выходе должна быть достаточно высокой (от 2500 до 20000 К);

- плазма должна быть достаточно чистой, т. е. свободна от загрязнения такими частицами, которые не входят в состав рабочего тела;

- высокая эффективность преобразования электрической энергии в тепловую и возможность получения максимального КПД технологического процесса;

- параметры низкотемпературной плазмы должны быть стабильными, управляемыми и обеспечивать оптимальные условия процесса;

- генерация плазмы должна обеспечиваться в течение длительного промежутка времени;

- возможность использования различных плазмообразующих сред;

- простота эксплуатации, легкость возбуждения электрического разряда, причем желательно без ввода дополнительных устройств (поджигающих электродов, проволочек) в область разрядного канала;

- легкость ввода исходного материала в плазменный поток.

Для организации промышленных технологических плазменных процессов наиболее перспективными в настоящее время считаются электродуговые и высокочастотные генераторы низкотемпературной плазмы, поскольку именно они удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Наиболее простой вариант нагревателя газа представляет собой дуговой электрический разряд, горящий между двумя торцовыми электродами, обдуваемый газом в осевом или перпендикулярном направлении. В этом случае за разрядом образуется плазменная струя с высокой температурой.

Электродуговые установки позволяют получить следующие параметры плазменных струй:

- скорость нагретого газа на выходе из дуговых плазмотронов от 10 до 1000 м/с (в зависимости от расхода плазмообразующего газа, диаметра сопла плазмотрона, мощности в дуге);

- максимальная температура на оси струи - от 10000 до 50000 К.

Плазмотрон - газоразрядное устройство, служащее для нанесения плазменных покрытий (рис.2). Наиболее важным

элементом плазмотрона является сопло, от конструкции которого зависит длина дуги, стабильность ее горения, а также скорость и характер истечения струи. Сопловой (анодный) узел через электроизоляционный блок стыкуется с катодным узлом, представляющим собой стержневой электрод, изготовленный из вольфрама с добавкой тория, иттрия или лантана. Отрицательный вывод источника постоянного тока присоединяется к вольфрамовому стержню-катоду, а положительный к соплу-аноду. Плазмообразующий газ подается во внутреннюю межэлектродную камеру, образованную медным соплом-анодом и вольфрамовым электродом.

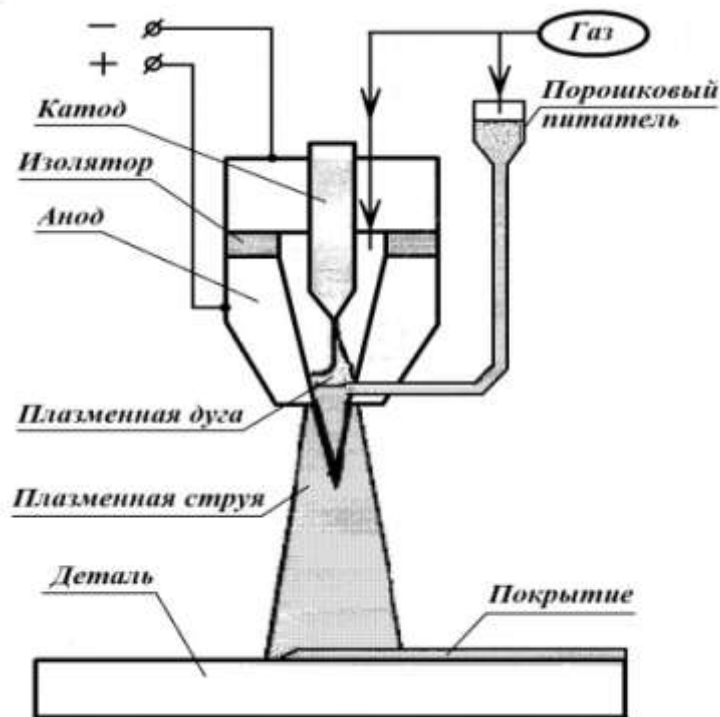


Рис. 2 Принципиальная схема плазмотрона косвенного действия

Важной конструктивной особенностью плазмотрона является место ввода напыляемого материала. Напыляемый материал может вводиться в столб дуги, в анодный сопловой узел и за срез плазмотрона.

При плазменном напылении покрытия наносятся на поверхность изделия в виде мелких расплавленных частиц. Полное плавление всего напыляемого материала легче достигается при распылении плазмой проволоки или стержней (рис. 2). Распыленные частицы на пути к изделию несколько остывают. Однако прямое

калориметрирование показывает, что температура частиц даже наиболее тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) на расстоянии 100...150 мм от плазмотрона близка к температуре плавления.

В случае нанесения покрытия из порошка трудно добиться его равномерного и полного плавления, несмотря на высокую температуру плазменной струи. Выбор места ввода зависит от теплофизических свойств материала, его сыпучести, склонности к комкованию. Это объясняется рядом причин. Во-первых, только немногие из применяемых плазмообразующих газов способны эффективно передавать тепло нагреваемому порошку. Во-вторых, большинство неметаллических порошков плохо прогревается, так как имеет низкую теплопроводность и, в-третьих, не весь порошок проходит через высокотемпературную зону плазмы. Кроме того, слишком мало время пребывания частиц в плазме. Время нагрева частиц порошка оценивается $\sim 10^{-3}$ сек.

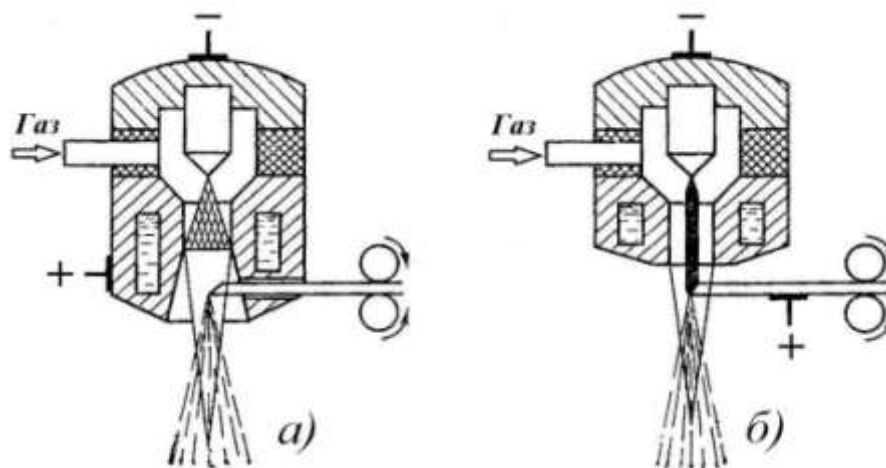


Рис.2 Схема распыления дуговой плазмой нейтральной (а) и токоведущей (б) проволоки (открытый анод)

Лучше всего нагреваются порошки, подаваемые в столб сжатого дугового разряда (рис. 3а). Однако трудно найти достаточно надежное конструктивное оформление такого плазмотрона. Поэтому в большинстве случаев порошок вводят за анодным пятном дуги уже в плазменную струю (рис. 3б). Чтобы зафиксировать длину дуги и тем самым стабилизировать режим ее горения, обычно делаются ступеньки в сопле или сопло несколько расширяют на выходе.

Для возбуждения дуговой плазмы напряжения, прикладываемого к электродам, недостаточно. Поэтому для

возбуждения дуги прибегают к дополнительным мероприятиям, обеспечивающим возникновение ионизированных частиц в межэлектродном пространстве. Для возбуждения плазменной струи обычно используют высокочастотную искру, которую получают от осциллятора, встроенного в источник питания. Генератор высокой частоты дает первоначальный импульс, от которого газ возбуждается. Между полюсами загорается дуга, поддерживающая уровень ионизации.

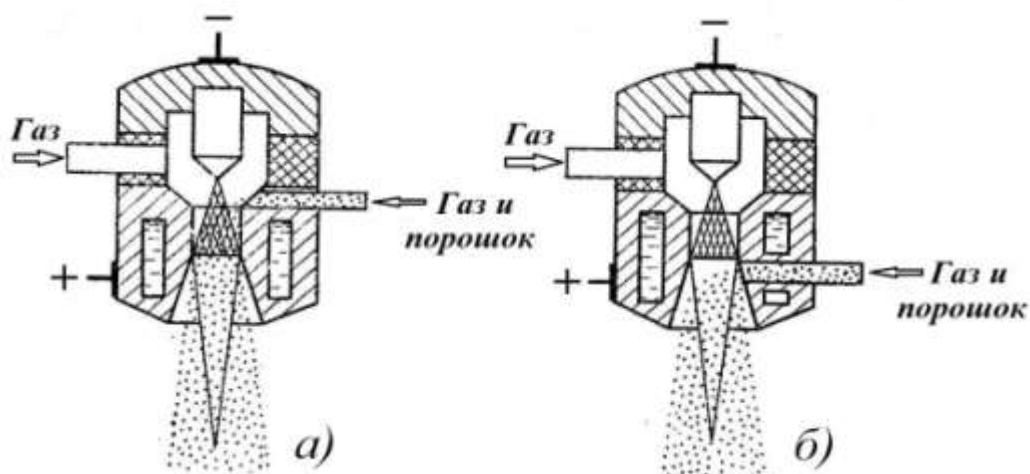


Рис.3 Схема ввода напыляемого порошка в столб плазменной дуги (а) и в плазменную струю (б)

Плазменная струя оформляется медным соплом. Благодаря охлаждающему действию стенок сопла, наружные слои столба деионизируются и сечение ионизированной части столба уменьшается. Это приводит к повышению напряжения дуги и значительному увеличению плотности тока в столбе дуги. Плазменная струя обжимается еще магнитным полем, создаваемым самим потоком заряженных частиц в плазме. Обжатие плазменной струи ведет к росту ее температуры. Нагретый ионизированный поток газа выносится с высокой скоростью из сопла в виде светлой, светящейся плазменной струи.

Мощность плазмотрона зависит от размеров межэлектродного пространства. Коэффициент полезного действия плазмотрона 60...80 %, т. е. 0,6...0,8 всей мощности плазмотрона расходуется на нагрев плазмообразующего газа. Наибольшему разрушению подвергается сопло плазмотрона, поэтому оно делается сменным. Срок службы сопла зависит от режима работы плазмотрона, вида

плазмообразующего газа, системы охлаждения и составляет от 15 до 1000 ч.

Плазменные покрытия наносят обычно на воздухе в специальном шкафу с вытяжной вентиляцией или в герметичной камере с контролируемой атмосферой, чаще всего с нейтральной. Для нанесения плазменных покрытий применяются такие установки, как УПУ-ЗД, УМП-6, "Киев-7" (табл.1). Установки предназначены для получения плазменным напылением теплозащитных, жаростойких, электроизоляционных, износостойких и антикоррозионных покрытий из металлических порошков и керамики на внутренние и наружные поверхности тел вращения.

Таблица 1

Технические характеристики плазменных электродуговых установок

Параметры	УПУ-ЗД	УМП-6	"Киев 7"
Потребляемая мощность, кВт	35	30	40
Максимальный ток дуги, А	400	-	250
Расход газов, м ³ /ч	0,9...6,0	3,0...5,0	3,2...3,8
Рабочее давление газов, МПа	0,3...0,4	0,4...0,5	0,12...0,18
Расход воды, м ³ /ч	0,48...0,60	-	0,6
Производительность распыления, кг/ч	до 2	до 7	до 5
Размеры, мм	1650x700x450	1640x1100x400	1600x600x600
Масса, кг	200	265	350

Установка для плазменного напыления включает: распылитель (плазмотрон), источник питания, газораспределительную систему, механизм подачи материала, система охлаждения, пульт управления и различные элементы оснастки. На рис. 4 представлена схема универсальной плазменной установки.

Дистанционный пульт управления позволяет плавно и достаточно точно регулировать основные энергетические параметры плазменной струи (электрические параметры, расход плазмообразующего и транспортирующего газов).

Независимо от типа плазмотрона надежная работа установок для плазменного напыления зависит от ряда факторов, одним из которых является эффективность системы охлаждения. Наиболее эффективное охлаждение можно обеспечить, используя системы

замкнутого типа с применением специальных устройств, улучшающих отвод тепла. Надежная работа плазменных установок может быть обеспечена предварительным снижением температуры охлаждающей воды в емкости холодильного агрегата до $+2^{\circ}\text{C}$, электромагнитной обработкой охлаждающей воды, использованием дистиллированной воды в качестве хладагента.

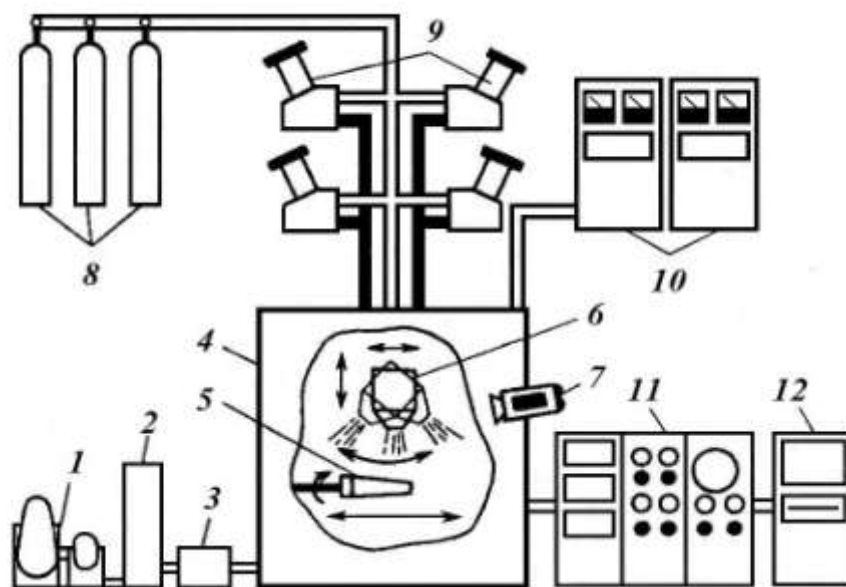


Рис. 4 Схема плазменной установки для нанесения покрытий в динамическом вакууме: 1 - вакуумные насосы; 2 - фильтры; 3 - теплообменник; 4 - вакуумная камера; 5 - деталь; 6 - плазмотрон и механизм его перемещения; 7 - оптический пирометр; 8 - баллоны с газом; 9 - порошковые питатели; 10 - источники питания ; 11 блок измерений и контроля; 12 - компьютер

В качестве плазмообразующих газов при нанесении покрытий используют аргон, азот, смесь аргона с азотом или водородом, реже применяют аммиак, гелий или смесь аргона с гелием. Все эти газы поставляются в баллонах. Баллоны с редукторами устанавливаются вне помещения, в специально оборудованных шкафах. Аргонная плазма (ионизированный газ) имеет высокую температуру 15000...30000 К. Температура азотной плазмы ниже (10000...15000 К), но имеет более высокое теплосодержание за счет поглощенной энергии диссоциации и ионизации, выделяемой при рекомбинации (при охлаждении газа в свободной плазменной струе). Аргон значительно дороже азота. Исходя из вышеизложенного, наиболее широко в качестве плазмообразующего газа применяется азот.

При плазменном нанесении покрытий в качестве исходного материала может использоваться проволока или порошок. Порошковое плазменное напыление более экономично, чем проволочное, позволяет получать покрытия более высокого качества.

Высокую стабильность подачи металлического порошка обеспечивает вибрационно-пневматический дозатор. В нем расход подаваемого порошка регулируется изменением амплитуды вибрации, величиной зазора сопло-диффузор и давлением транспортирующего газа.

1.2 Напыляемые материалы

В зависимости от требуемых свойств покрытий, получаемых при плазменном напылении, наиболее широко применяются следующие материалы:

1.2.1 Металлы и сплавы.

Вольфрам (W) имеет высокую температуру плавления ($T_{пл} = 3683$ К). Используется для нанесения износостойких и эрозионностойких покрытий. При плазменном напылении применяется вольфрамовый порошок марки В или В-1с размером гранул 40...100 мкм.

Молибден (Mo) хорошо сцепляется с поверхностью черных металлов, поэтому его часто используют для напыления подслоя, на который потом наносят покрытия других металлов. Молибденовые покрытия обладают хорошей износостойкостью. Для плазменного напыления также используют сплавы молибдена с железом, титаном, кремнием и механические смеси на основе молибдена с добавками окиси алюминия и окиси титана.

Порошковые сплавы на основе железа с высоким содержанием углерода имеют низкую стоимость, высокую износостойкость. Ярко выраженный недостаток этих порошков – склонность к окислению при напылении.

Группа терморегулирующих порошков на основе интерметаллидов (Ni-Ti; Ni-Al; Ni-Cr) отличается хорошими адгезионными свойствами вследствие экзотермических реакций компонентов и обеспечивает высокие плотность и износостойкость покрытий. Наибольшее распространение получили

самофлюсующиеся порошки системы никель-хром-кремний-бор марок ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04, ПГ-12Н-01 и др. Эффект самофлюсования у этих сплавов достигается тем, что при оплавлении кремний и бор связывают кислород, адсорбированный на поверхности порошка, в боросиликатные шлаки, которые всплывают на поверхность. Покрyтия из этих металлов обладают высокой износостойкостью, коррозионной и эрозийной стойкостью при повышенных температурах.

1.2.2 Оксиды.

Они широко используются для нанесения теплозащитных и износостойких покрытий. Покрyтия из оксида алюминия (Al_2O_3) имеют белый цвет, обладают хорошими теплоизоляционными свойствами и являются устойчивыми при высоких температурах. Их напыляют на трущиеся поверхности деталей, работающих без ударных нагрузок. Такие покрытия обладают высокой твердостью, низким коэффициентом трения и химической устойчивостью. Основным недостатком покрытий из окиси алюминия является хрупкость и низкая механическая прочность. При местных ударных нагрузках покрытия могут отделяться от основы.

Покрyтия из диоксида циркония (ZrO_2) имеют бледно-желтую окраску. Наиболее важными характеристиками покрытий из диоксида циркония являются их высокая жаростойкость, очень низкая теплопроводность. Эти покрытия химически неактивны.

Коррозионностойкие покрытия должны обладать высокой плотностью, не иметь сквозных пор. Порошок диоксида титана (TiO_2) в напыляемой смеси служит легкоплавкой составляющей и благоприятствует достижению поставленной цели. Плотность покрытия может быть также повышена введением до 25 % фторидов, щелочно-земельных металлов или 2-5 % Cr_2O_3 .

Для предотвращения отслаивания покрытия от основы, что вызвано большой разницей в коэффициентах термического расширения, к оксидам добавляют порошки металлов, например меди. В практике часто используют смеси порошков окислов с металлами: Al_2O_3-Ni ; Al_2O_3-Mo ; Al_2O_3-Cr и другие. Возможность применения плазменных оксидных покрытий для защиты деталей машин от абразивного изнашивания, кавитации и коррозионного

воздействия агрессивных сред представляет большой интерес. Однако для залечивания пористости необходимы дополнительные операции по пропитке таких покрытий различными лаками, полимерами.

Метод плазменного нанесения покрытий используют в различных отраслях машиностроения для защиты поверхностей деталей и узлов машин от абразивного, эрозионного, коррозионного и других видов воздействия рабочей среды для восстановления деталей, изношенных во время эксплуатации, а также упрочнения деталей машин. Подбирая различные материалы покрытий, можно модернизировать свойства поверхностного слоя в широких пределах.

Технологический процесс нанесения покрытий включает следующие операции: предварительную подготовку поверхности изделия для обеспечения прочного сцепления напыляемого материала; подготовку материала; нанесение покрытия; механическую обработку покрытия после напыления.

Перед использованием напыляемые металлические материалы необходимо просушить или прокалить. Эту операцию следует проводить в сушильном шкафу или печи в течение 2...5 часов при температуре 200...600 °С. Порошки рассыпают на противнях тонким слоем (20...25 мм), периодически перемешивают. Просушка позволяет удалить из порошка гидратную и гигроскопическую влагу – источник диффузионного водорода, который вызывает повышенную пористость покрытия и появление трещин в покрытии.

1.3.2 Механическая обработка поверхностей

Предварительной механической обработке подвергаются бывшие в эксплуатации детали, подлежащие восстановлению. Для этого применяют грубую обдирку на наждачном камне, удаляя раковины, трещины, поры. Для придания правильной геометрической формы изношенным участкам, применяют точение. Глубина проточки регламентируется условиями эксплуатации. Если допустимый износ составляет 0,5 мм на радиус, глубина проточки должна составлять соответственно 0,65 мм. Проточка должна заканчиваться фаской с наклоном 40...45° к оси детали и выполняться концентрично. В противном случае толщина покрытия будет различной.

При нанесении покрытий толщиной более 1,0 мм для нагруженных деталей используют и специальную механическую обработку. К видам такой обработки относятся накатка роликом, насечка, фрезерование канавок, нарезание "рваной" резьбы. Не следует применять крупные резьбы или канавки. Это приводит к чрезмерной пористости и появлению газовых пузырьков в оплавленных покрытиях.

Накатку делают накатным роликом, закрепленным в резцедержателе токарного станка.

Насечки наносятся методом фрезерования (в несколько рядов при наклонном положении вращающейся фрезы), вручную или с помощью пневмозубила.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить к работе установку УПС-301 в соответствии с инструкцией по эксплуатации. Присоединить через редукторы к соответствующим штуцерам баллоны с аргоном и углекислым газом.

2. Изучить по чертежам и визуально конструкцию плазмотрона для плазменной сварки. Дополнительно ознакомиться с конструкцией термохимических катодов.

3. Установить на плазмотроне сменное сопло диаметром $d_c = 1\text{ мм}$. В качестве плазмообразующего газа использовать аргон. С помощью осциллятора возбудить и наблюдать дежурную дугу. Подвести сопло плазмотрона на расстояние 15 мм от стальной пластины и возбудить плазменную дугу. Установить значение ее тока 100 А. Зафиксировать напряжение на плазменной дуге и записать в таблицу.

4. Опыт по п.3 повторить для диаметров сопла 1,5 и 2 мм.

5. По данным таблицы построить график функции $U=f(d_c)$.

Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Схема плазмотрона прямого и косвенного действия.

3. Методика эксперимента.

4. Заполненная таблица 6.1.

5. Графики функций $U=f(d_c)$ и $U=f(N)$.

6. Краткие выводы.