

СОВРЕМЕННЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

МНОГООБРАЗИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЗВОЛЯЕТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ИХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ САМЫХ РАЗНООБРАЗНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗАДАЧ.

Плазменными технологиями являются производственные процессы, использующие воздействие плазмы (четвертого агрегатного состояния вещества) на различные материалы с целью изготовления, обслуживания, ремонта и/или эксплуатации изделий [1]. Под плазмой понимается ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных электрических зарядов практически одинаковы.

Следует отметить, что в плазменных процессах может полностью отсутствовать механический контакт инструмента (твердого, жидкого или газообразного тела) с обрабатываемой деталью, а воздействие осуществляется только плазмой, или может быть совместное действие традиционного инструмента с плазмой.

Оборудование для плазменных методов обработки призвано обеспечивать создание и функционирование, как источника тепловой энергии, так и источник заряженных частиц. При этом может реализоваться целая гамма технологических процессов: плавка, переплав, сварка, резка, наплавка, напыление, осаждение, упрочнение, модификация, закалка, очистка, активация, бактерицидная обработка, переработка и уничтожение отходов и многие другие.

Использование плазмы базируется на следующих эффектах:

- тепловые и газодинамические свойства плазменных потоков;
- наличие и воздействие направленного потока ионизированных и возбужденных частиц;
- испускание инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения;
- образование озона;
- наличие низкочастотных и высокочастотных пульсаций плазмы;
- неоднородность распределения температуры и структуры потока плазмы;
- перемешивание турбулентного плазменного потока с холодным газом окружающей среды;
- взаимодействие плазменного потока с поверхностью материалов, на которых всегда имеются ионизированные пылевые частицы, слой жировых и водяных молекул, адсорбированный слой кислородных анионов и нейтральных молекул воздуха.

Все плазменные технологии можно классифицировать по виду протекания электрического тока в газовом промежутке, который называется газовым разрядом. Рассмотрим основные характеристики разрядов постоянного и переменного тока, а также отдельные примеры их использования.

1. КОРОННЫЙ РАЗРЯД

Данный вид газового разряда возникает в резко неоднородных полях при атмосферном давлении. Главная его особенность в том, что ионизационные процессы между электронами происходят только в небольшой части промежутка вблизи электрода с малым радиусом кривизны (так называемого коронирующего электрода). Эта зона характеризуется повышенными значениями напряженности поля по сравнению со средними значениями для всего промежутка.

Коронный разряд наиболее эффективно используется для плазменной активации и плазменной очистки поверхности. Локальное воздействие с поверхностями деталей, изготовленных из полимерных, металлических, керамических, стеклянных, резиновых и других материалов при использовании высокоэнергетических плазменных струй способствует удалению загрязнений, залечиванию дефектов, бактерицидной обработке, активации поверхностного слоя. Результатом является повышение смачиваемости поверхности и способности к образованию усиленных связей с растворителями, клеями, красками, лаками и покрытиями, без изменения ее внешнего вида.

Это актуально при процессах склеивания, опрессовки, печати, каширования, нанесения покрытий, сварки, пайки, обеззараживания и других. В отдельных случаях технология может использоваться одновременно и для нанесения тонкопленочных покрытий. Кроме этого, она находит применение при обработке посадочного материала (семян); волокон в текстильной промышленности; газоразделительных мембран с целью улучшения их газоразделительных свойств; при изготовлении арамидных волокон, углепластиков и других композиционных материалов на основе полимеров и др.

Под воздействием плазмы поверхность полимера может становиться, как более гидрофильной, так и более гидрофобной. При этом модификации подвергается только обрабатываемая поверхность материала и очень тонкий приповерхностный слой от нанометров до нескольких микрон. Основной же объем полимера не изменяется, сохраняя механические, физико-химические и электрофизические свойства исходного материала. С точки зрения практического использования модифицированных полимеров важным является сохранение гидрофильности в течение длительного времени, что достигается дополнительным нанесением тонкопленочного покрытия.

Ширина обрабатываемой поверхности в зависимости от применяемого оборудования, дистанции обработки, материала подложки и конкретных условий применения – 10-50 мм, глубина обрабатываемых пазов или отверстий – до 20 мм, скорость – до 30 м/мин, температура поверхности изделий не превышает 50°C. В качестве технологического и охлаждающего газа используется воздух. Основными параметрами процесса являются – скорость движения плазменной струи и расстояние между соплом плазмотрона и обрабатываемой поверхностью. Скорость плазменного потока – до 10 м/мин. В отдельных конструкциях оборудования используются вращающиеся сопла, обеспечивается автоматизированный контроль параметров процесса по диагностике спектра излучения плазменной струи.

Основным элементом данного оборудования является плазмотрон (**рис. 1**).

На **рис. 2 и 3** в качестве примера представлено оборудование и вид струи для плазменной очистки и активации поверхности, использующее высокочастотный коронный разряд при атмосферном давлении.

Состав оборудования:

- блок аппаратуры для получения электрического разряда (1 кВА, 25 кГц, габариты – 590x530x250 мм, масса – 35 кг, питание – 100–250 В, 16 А, длина кабеля – 2,5 м),

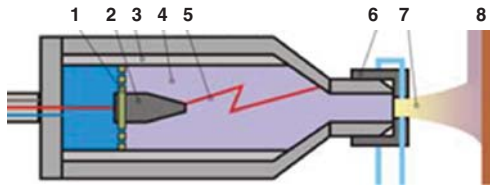


Рис. 1. Схема плазмотрона для активации и очистки поверхности, где 1 — распределитель газа; 2 — электрод; 3 — изолятор; 4 — разрядная камера; 5 — поджигающий разряд; 6 — насадка для подвода дополнительных паров материалов (прекурсоров); 7 — плазменная струя; 8 — подложка (изделие).



Рис. 2. Комплекс оборудования для плазменной очистки и активации с использованием высокочастотного коронного разряда, где а — блок аппаратуры; б — плазмотрон; в — высоковольтный трансформатор; г — модуль подготовки сжатого воздуха.

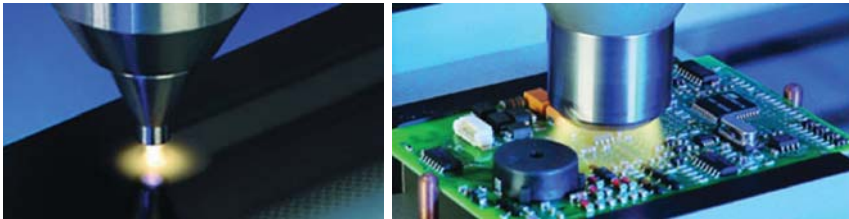


Рис. 3. Вид плазменной струи при плазменной активации и очистки изделий.

с модулем контроля вращения сопла плазмотрона и модулем контроля спектра плазменной струи — предназначен для преобразования сетевого в высокочастотное напряжение;

- плазмотрон с вращающимся соплом и гибким газоподводом длиной 4 м;
- высоковольтный трансформатор для функционирования плазмотрона с одним соплом (масса — 10 кг, длина кабеля — 5 м);
- модуль подготовки и подачи сжатого воздуха.

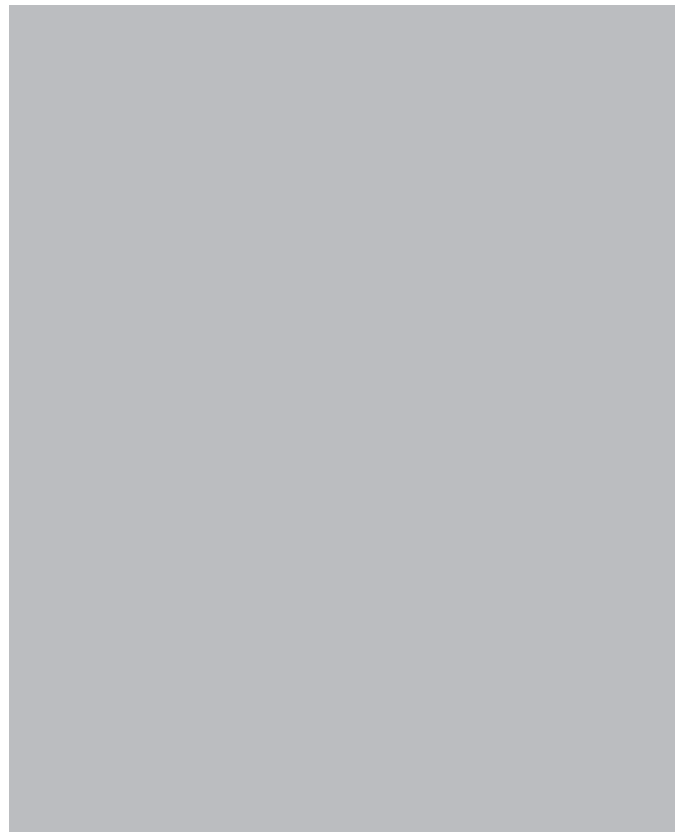
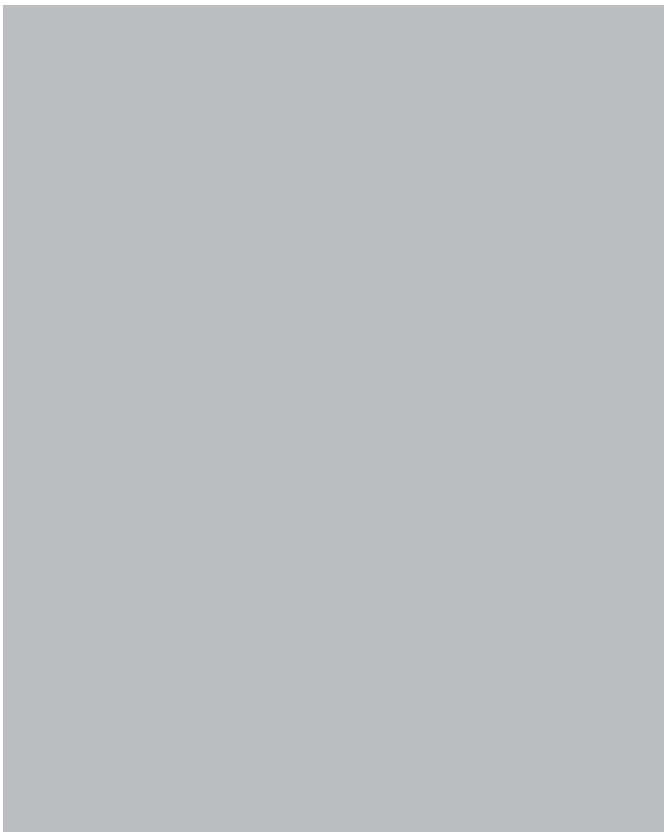
Важно отметить, что данное оборудование может легко встраиваться в существующие производственные линии, устанавливаться на роботизированных комплексах и других средствах механизации и автоматизации.

2. ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

При прохождении электрического тока через газ возникает искровой разряд, существующий при атмосферном давлении и сопровождающийся характерным звуковым эффектом — «треском» проскакивающей искры. Этот вид разряда наиболее эффективно используется для нанесения функциональных покрытий. Данная технология получила название электроискрового легирования (электроискрового или плазменно-искрового нанесения покрытий) [2].

Она основана на использовании искрового разряда с малой длительностью $10^{-6} \leq t_{\text{и}} \leq 10^{-3}$ с и прохождении мощных импульсных токов при разряде конденсатора с плотностью тока до 10^6 А/мм². От источника генератора импульса на электрод-анод (рис. 4) подается плюс, а на изделие-катод — минус. В результате теплового и газодинамического воздействия искрового разряда происходит эрозия материала электрода и перенос продуктов эрозии в жидкой, твердой и паровой фазах на изделие. Температура плазмы в межэлектродном промежутке может достигать 7000-11000°С. При этом на поверхности изделия за счет протека-

Она основана на использовании искрового разряда с малой длительностью $10^{-6} \leq t_{\text{и}} \leq 10^{-3}$ с и прохождении мощных импульсных токов при разряде конденсатора с плотностью тока до 10^6 А/мм². От источника генератора импульса на электрод-анод (рис. 4) подается плюс, а на изделие-катод — минус. В результате теплового и газодинамического воздействия искрового разряда происходит эрозия материала электрода и перенос продуктов эрозии в жидкой, твердой и паровой фазах на изделие. Температура плазмы в межэлектродном промежутке может достигать 7000-11000°С. При этом на поверхности изделия за счет протека-



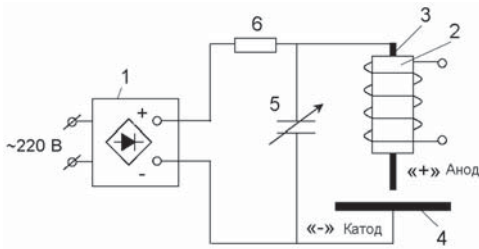


Рис. 4. Принципиальная схема плазменно-искрового нанесения покрытий, где 1 — генератор импульса тока; 2 — вибратор; 3 — электрод; 4 — изделие; 5 — конденсатор; 6 — сопротивление.



Рис. 5. Установка для плазменно-искрового нанесения покрытий (а), нанесение износостойкого покрытия из сплава ВК8 (б), нанесение электропроводящего серебряного покрытия (в).

ния металлургических процессов образуется композиционный материал, в составе которого присутствуют материалы электрода и изделия, продукты их взаимодействия друг с другом и с элементами межэлектродной среды. Немаловажным фактором качественного формирования покрытия является эффект катодной очистки, при котором обеспечивается разрушение и удаление поверхностных пленок с обрабатываемой поверхности изделия (катода) за счет высокой плотности выделяемой энергии в микрокатодных пятнах искрового разряда.

Основными областями применения данной технологии являются:

- восстановление и упрочнение деталей машин, инструмента, штампов;
- нанесение функциональных (износостойких, электропроводящих, декоративных) покрытий;
- снижение переходного сопротивления электрических контактов (оловянирование, лужение, никелирование, серебрение).

Для упрочнения инструмента и технологической оснастки в качестве электродов применяют твердые сплавы (Т15 К6, Т17 К12, ВК6, ВК8, ВК20 и др.), материалы на основе карбидов и боридов металлов (TiC, WC, Mo₂B₅, CrB₂, TaV₂ и др.), графит и др.

Основные преимущества технологии:

- возможность локального формирования покрытий в строго указанных местах радиусом от долей миллиметра и более, не защищая при этом остальную поверхность;
- нанесение покрытий на крупногабаритные и массивные детали с локальными зонами для лужения, оловянирования, никелирования, серебрения и т. д.;
- высокая адгезия покрытия с подложкой;
- отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки;
- возможность использования в качестве электродов

Таблица 1.

Характеристики установки для плазменно-искрового нанесения покрытий

Потребляемая мощность, кВт	0,5
Напряжение питания сети, В	220
Энергия импульсов, Дж	0,11-10
Частота импульсов, Гц	5-1600
Частота вибрации электрода, Гц	600
Количество режимов	70
Габаритные размеры генератора, мм	160×320×360
Масса генератора, кг	14
Максимальная толщина покрытия из сплава Т15К6 на стали 45, мкм	500
Высота неровностей профиля покрытия Ra, мкм	2,0
Максимальная производительность, см ² /мин	15

различных токопроводящих материалов, как из чистых металлов, так и их сплавов, порошковых материалов и др.

- сравнительная простота технологии, которая не требует специальной предварительной обработки поверхности;
- простота обслуживания и надежность оборудования, которое малогабаритно и транспортабельно;
- низкая энергоемкость ручных и механизированных процессов (0,5–2,0 кВт);
- высокий коэффициент переноса материала (60–80%).

На рис. 5 показана установка и процесс нанесения покрытий. Оборудование состоит из блока аппаратуры, совмещенного с генератором импульсов, электровибратора и соединительных кабелей. В табл. 1 приведены технические характеристики.

3. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

Тлеющий разряд – самостоятельный электрический разряд в газе с холодными электродами при токах 10^{-5} – $1,0$ А и низком давлении ($5 \cdot 10^{-2}$ – 10^3 Па), имеющий характерную структуру в виде чередующихся светящихся участков различного цвета и различной интенсивности свечения. Его отличительный признак – существование вблизи катода слоя с большим положительным объемным зарядом, сильным полем у поверхности и значительным падением потенциала 100–400 В и более.

Одним из применений тлеющего разряда являются технологии плазменной химико-термической обработки металлов, которые предназначены для повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности, задиристости, теплостойкости и коррозионной стойкости за счет насыщения поверхности обрабатываемых изделий азотом, углеродом, бором, кадмием и несколькими элементами одновременно. При обработке изделия погружаются в плазму тлеющего разряда, горящего между катодом (изделиями) и анодом (стенками вакуумной камеры) и содержащего необходимый насыщающий элемент. Положительно заряженные ионы насыщающего элемента под действием электрического поля ускоряются по направлению к изделию, бомбардируют и внедряются в их поверхностный слой. При этом энергия ионов в тысячи раз больше энергии атомов при газовой химико-термической обработке. Температура

нагрева изделий при обработке составляет 300–600°С.

Наиболее востребован в мире процесс плазменного азотирования (азотирование в тлеющем разряде, ионно-плаз-

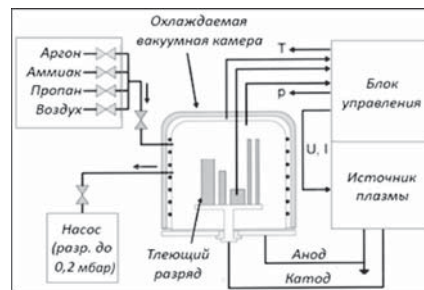


Рис. 6. Схема плазменного азотирования.



Рис. 7. Установка плазменного азотирования, диаметр рабочей камеры 350 мм, высота 500 мм, потребляемая мощность 3 кВт (а), вид изделий в тлеющем разряде в процессе плазменного азотирования (б).

менное азотирование) (рис. 6, 7). В качестве рабочих газов используется аммиак, аргон, пропан, природный газ и др. Регулирование и управление технологическим процессом полностью автоматизировано и осуществляется по заданной технологической программе. В водоохлаждаемой камере смонтировано смотровое окно для визуального наблюдения за процессом.

Отличительными характеристиками данного процесса по сравнению с газовой химико-термической обработкой являются:

- сокращение продолжительности обработки в 2–5 раз, за счет большей скорости насыщения;
- экономичность процесса, за счет сокращения расхода рабочих газов в 20–100 раз;
- повышение коэффициента использования электроэнергии, за счет уменьшения расхода электроэнергии в 1,5–3 раза;
- возможность качественной обработки глухих и сквозных отверстий;
- простота и надёжность экранной защиты от азотирования неупрочняемых поверхностей;
- незначительные деформации изделий в процессе обработки и изменение параметров шероховатости, меньшие температуры;

- получение равномерного по толщине азотированного слоя на всех поверхностях изделий;
- улучшение санитарно-гигиенических условий производства

В табл. 2 приведены отдельные типы изделий и инструмента, а также свойства поверхности после плазменного азотирования.

Таблица 2.

Свойства изделий и инструмента после плазменного азотирования

Тип изделий и инструмента	Сталь	Толщина слоя, мм	Поверхностная твердость, HV
Зубчатые колеса, винты, плунжеры, коленчатые и распределительные валы, шнеки, цилиндры, оси, втулки, гильзы	45	0,3-0,4	450-600
	20X	0,3-0,5	450-600
	40X	0,2-0,5	600-750
	40XMA	0,25-0,5	650-850
	18XГТ	0,25-0,5	650-750
	38XMA	0,3-0,6	650-850
	38XМФА	0,3-0,5	850-1100
	38X2МЮА	0,2-0,5	850-1250
	12X2H4A	0,2-0,5	550-700
	35XГСА	0,2-0,5	650-720
Пресс-формы, матрицы	38XН3МФА	0,2-0,5	450-750
	12X18H10T	0,05-0,15	900-1250
	20X13	0,05-0,2	900-1250
	5XHM	0,2-0,3	600-700
	5XHMФ	0,15-0,3	600-700
Штампы, пуансоны для глубокой вытяжки	3X2B8	0,15-0,3	900-1100
	4X4BMФC	0,15-0,3	900-1150
	30X3M3Ф	0,15-0,3	900-1100
Фрезы, сверла, метчики, развертки, протяжки, резцы	X12	0,06-0,15	900-1100
	X12M	0,06-0,15	900-1100
	X12MФ	0,06-0,16	900-1100
Фрезы, сверла, метчики, развертки, протяжки, резцы	P18	0,01-0,05	900-1200
	P6M5	0,01-0,05	900-1200
	P9K10	0,01-0,05	900-1200

Перспективным направлением дополнительного повышения износостойкости деталей, обработанных с использованием плазменного азотирования, является последующее нанесение тонкопленочных трибологических покрытий с использованием PVD и CVD процессов.

4. ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Важно отметить, что большинство известных плазменных технологий базируются на применении именно дугового разряда (электрической дуги) в качестве источника энергии для ведения технологических процессов.

Дуговыми называют разряды при плотности тока 10^2-10^3 А/мм² и относительно низком катодном падении потенциала (порядка потенциалов ионизации и возбуждения атомов газовой среды или испаряемого металла). Последнее — результат действия иных механизмов катодной эмиссии электронов, чем в тлеющем разряде. Они создают плотность тока, обеспечивающую протекание полного разряда. Катоды дуг испускают электроны в результате термоэлектронной, автоэлектронной и термоавтоэлектронной эмиссий. Характерные параметры дуговых разрядов: ток 1–105 А, напряжение от 20–30 В (короткие дуги) до киловольт.

Основными типами дуговых разрядов, которые широко используются для технологических целей, являются: при низком давлении разряд с холодным катодом и перемещающимися катодными пятнами (эмиссия происходит из постоянно перемещающихся катодных пятен с плотностью тока 10^4-10^7 А/см²); при высоком давлении (0,1–1,0 атм) — плотная низкотемпературная равновесная плазма с электронной температурой 0,5–1,0 эВ и выше.

В отличие от дугового разряда при нормальном (атмосферном) давлении дуговой разряд в вакууме происходит в парах металла, при этом он локализуется в небольших областях, имеющих микронные размеры и хаотически перемещающихся по поверхности катода. Плотность мощности в таких областях, называемых катодными пятнами, достигает значений 10^9 Вт/см². Благодаря этому за время 5–40 нс (время покоя катодного пятна при его хаотическом движении) давление паров металла достигает значений $\sim 10^5$ Па, а степень ионизации паров металла может составлять величину, близкую к 100%. Электронная температура плазмы дугового разряда в вакууме имеет значение 5–20 эВ.

Основные технологии дугового разряда при атмосферном давлении наиболее широко используются в качестве:

- источника тепловой энергии, способной расплавить материал подложки и дополнительный присадочный материал (процесс плазменной наплавки-напыления, РТА-процесс);
- источника тепловой энергии только для нагрева и разгона присадочного порошкового материала (процесс плазменного и микроплазменного напыления);
- источника заряженных частиц для различной обработки материалов (процесс микроплазменной обработки биологических объектов);
- источника заряженных частиц, усиливающих протекание плазмохимических реакций (процесс финишного плазменного упрочнения).

Схемы плазмотронов для этих целей представлены на **рис. 8**.

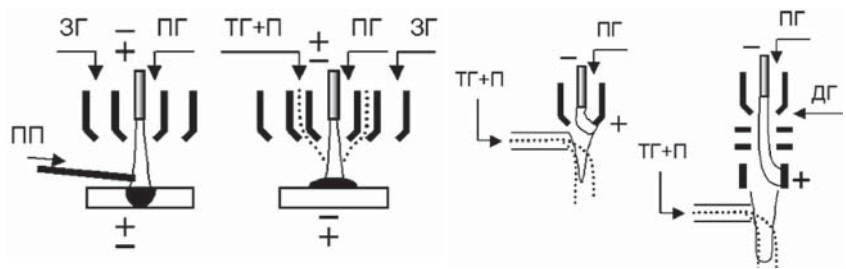


Рис. 8. Схемы плазмотронов для сварки (а), наплавки (а, б), напыления (в, г), финишного плазменного упрочнения (г), микроплазменной обработки (в — без П и ТГ); газы: ПГ — плазмообразующий, ЗГ — защитный, ТГ — транспортирующий, ДГ — дополнительный; ПП — присадочная проволока; П — порошок или реагенты упрочнения.

Процесс плазменной наплавки-напыления (РТА-процесс) обеспечивает использование пилотной (косвенной) дуги для расплавления вводимого порошка и основной дуги (переносимой) для поддержания необходимой температуры подложки и осаждаемых порошковых частиц. При этом увеличение времени нахождения частиц порошка при высокой температуре способствует максимальному сцеплению и уплотнению частиц с минимальным перегревом поверхности детали. Оптимизация основных характеристик процесса (токов основной и пилотной дуги, расстояния до изделия, скорости подачи порошка и скорости перемещения плазмотрона) выявило минимальную чувствительность к скорости подачи порошка и в определенных пределах к скорости перемещения плазмотрона. В современном оборудовании для РТА-процесса обеспечивается автоматизация поддержания и регулирования режимов (**рис. 9**).

Дуговой разряд применяется для получения высокоскоростных плазменных струй и реализации процессов плазменного и микроплазменного напыления порошковых материалов. Назначение данных методов связано с нанесением функциональных покрытий, восстановлением размеров изношенных и бракованных поверхностей, с плазменным формообразованием. При этом используются металлические, керамические, металлокерамические, полимерные и другие материалы.

Плазменное формообразование для изготовления изделий путем послыонного нанесения порошковых материалов в России разрабатывалось и активно применялось еще в 80 годах прошлого столетия [3, 4]. В настоящий момент данный процесс получает развитие под новым брендом — аддитивные технологии (изготовление детали посредством «добавления» (additive) материала, в противоположность «удалению» (subtractive) материала при обычных, «традиционных» технологиях механообработки).

Процесс микроплазменного напыления относится к прецизионным технологиям, где требуется нанесение функциональных покрытий на локальные зоны. Реализуемые свойства покрытий: износостойкость, антифрикционность, термостойкость, жаростойкость, эрозияустойчивость,



Рис. 9. Комплексное оборудование (блок аппаратуры, плазмотрон, порошковый дозатор) для плазменной наплавки-напыления и процесс нанесения покрытия на шнек.

фреттингостойкость, кавитационностойкость, коррозионностойкость, диэлектричность, поглощение и отражение излучения и др.

Комплекс основного оборудования для микроплазменного напыления (блок аппаратуры, плазматрон, порошковый дозатор) и вид плазменной струи показаны на **рис. 10**.



Рис. 10. Комплекс основного оборудования для микроплазменного напыления и вид плазменной струи.

С целью обеспечения локализации плазмы дугового разряда разработан плазматрон для микроплазменной обработки и оборудование для его функционирования (**рис. 11, табл. 3**). Его промышленное назначение — плазменная активация, очистка; медицинское — бактериостатическая и бактерицидная обработка, рассечение биологических тканей, коагуляция кровеносных сосудов, терапевтические и нетрадиционные методы лечения. Состав установки — блок аппаратуры, совмещенный с источником тока и системой охлаждения, микроплазматрон с комплектом наконечников, педаль дистанционного управления.

Характеристики установки для микроплазменной обработки

Потребляемая мощность, кВт	0,5
Напряжение питания сети, В	220
Пределы ступенчатого регулирования тока, А	10-20
Рабочее напряжение, не более В	14
Расход аргона, не более, л/мин	1,5
Объем системы автономного охлаждения, л	4
Габаритные размеры микроплазматрона, (диаметр x длина), мм	(8-16)x(50-250)
Габаритные размеры, мм	500x450x250
Масса установки, кг	25

Дуговой разряд и образуемая им атмосферная плазменная струя используется в технологии бескамерного химического осаждения тонкопленочных покрытий при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой. В связи с тем, что нанесение покрытий на изделия происходит на заключительной стадии их изготовления или непо-



Рис. 11. Установка для микроплазменной обработки.

средственно перед их использованием, данный процесс назван финишным плазменным упрочнением (ФПУ). К основным достоинствам ФПУ относятся: осуществление процесса без вакуума и камер; минимальный нагрев изделий, не превышающий 200°C; возможность нанесения покрытий локально, в труднодоступных зонах и на изделиях любых габаритов; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования (**рис. 12**).

Основным принципом нанесения тонкопленочных износостойких покрытий, взятой за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких элементорганических препаратов, которые вводятся в плазмохимический реактор дугового плазматрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Для образования аморфных покрытий используются жидкие реагенты, имеющие в своем составе элементы-аморфизаторы, такие как бор и кремний. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной отличительной особенностью процесса ФПУ является также то, что нанесение покрытия может осуществляться многослойно при толщине каждого слоя порядка 2–20 нм полосами шириной 8–15 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). С целью минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3–150 мм/с.

Приведенные выше плазменные методы обработки материалов применяются практически во всех сферах производства.

Таблица 3.

Павел Абрамович Тополянский

ООО «Научно-производственная фирма «Плазмацентр»
www.plasmacentre.ru

Литература

1. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2008. 406 с.
2. Тополянский П. А. Электроискровое нанесение покрытий на инструмент и технологическую оснастку // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 6-й Международной практической конференции-выставки 13–16 апреля 2004 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2004, С. 352–361
3. Ковалевский А. А. Изготовление технологической оснастки с применением метода плазменного напыления. Рига. — Латинти. — 1979. — 44 с.
4. Петров Г. К., Тополянский П. А. Изготовление прессовых и литьевых форм плазменным напылением порошковых материалов // Технолог по сварочному производству промышленных предприятий, объектов энергетики и строительства. Материалы 3-й Всероссийской практической конференции 30 мая — 1 июня 2002 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ. Санкт-Петербург. — 2002. — С. 146–148.

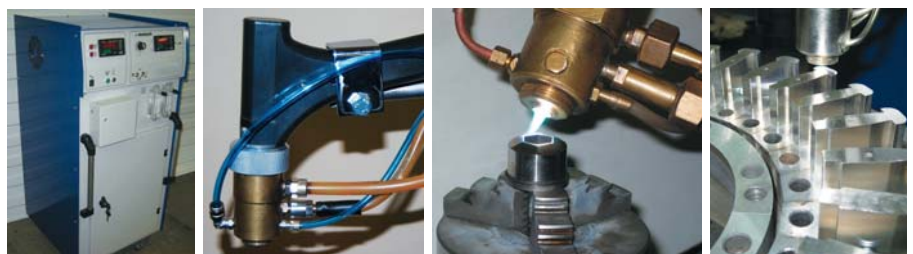


Рис. 12. Комплекс основного оборудования для финишного плазменного упрочнения (блок аппаратуры, плазматрон с плазмохимическим реактором) и вид процесса нанесения износостойких покрытий на основе соединений бора и кремния.