

*Брошко Р.Н.,
к.т.н. Сергиенко С.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ

Наведено результати експериментальних досліджень плазмотронів для напилу, завдяки ресурсним випробуванням, встановлено технічні характеристики плазмотронів, що розробляються.

Ключові слова: *плазмотрон, напил, розрядний канал, катодний вузол, анод.*

Приведены результаты экспериментальных исследований плазмотронов для напыления, благодаря ресурсным испытаниям, установлены технические характеристики разрабатываемых плазмотронов.

Ключевые слова: *плазмотрон, напыление, разрядный канал, катодный узел, анод.*

Известно, что наиболее высокую экономичность технологических процессов, гибкость и маневренность производства, минимальное загрязнение окружающей среды обеспечивают плазменные технологии, использующие в качестве рабочего инструмента электродуговые плазмотроны [1, 2]. Среди разнообразных технологий нанесения защитных и восстановительных покрытий интенсивное развитие получило плазменное напыление. Однако применяемые для этой цели плазмотроны, выпускаемые отечественной промышленностью, обладают целым рядом недостатков: недостаточная протяженность зоны взаимодействия плазменного потока с напыляемыми частицами, низкие КПД и производительность, а также небольшой ресурс работы электродов. Из-за ухудшения ситуации с разработкой новых конструкций плазмотронов для напыления и в связи с падением машиностроительного производства, отраслевой и академической науки рынок заполнили иностранные машиностроительные и инжиниринговые фирмы, создавая и поставляя плазмотроны и плазменные установки более высокого качества, даже с большей стоимостью, вытесняя отечественные предприятия и фирмы. Учитывая эту ситуацию, нами были созданы более эффективные плазмотроны для напыления, принципиальные схемы которых приведены на рисунке 1.

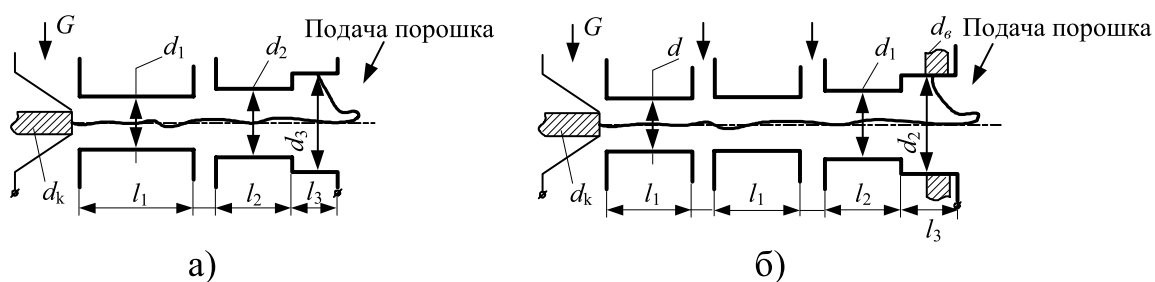


Рисунок 1 – Принципиальные схемы плазматронов для напыления:

а) плазмотрон ПТ-1; б) плазмотрон ПТ-2

Основные геометрические размеры разрядного канала плазматронов ПТ-1 и ПТ-2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные геометрические размеры разрядного канала плазматронов ПТ-1 и ПТ-2

Тип	d_k , м	d_1 , м	d_2 , м	d_3 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	d_6 , м	n_6 , КОЛ
ПТ-1	0,003	0,004	0,004	0,006	0,023	0,041	0,015	–	–
ПТ-2	0,003	0,005	0,006	0,01	0,014	0,032	0,014	0,002	4

В плазматронах ПТ-1 и ПТ-2 в качестве рабочего газа используется воздух. Для повышения КПД в плазматроне ПТ-2 рабочий газ (воздух) подается распределённо вдоль разрядного канала через тангенциальные отверстия.

Материалом катодной вставки плазматрона ПТ-2 могут служить цирконий, гафний или вольфрам. Поэтому в нем предусмотрены два варианта катодного узла. В одном варианте используется гафниевая (циркониевая) вставка, предназначенная для работы в окислительных средах без защитного газа. Другой вариант катодного узла предназначен для вольфрамовой вставки с использованием защитного газа (аргона). Аргон подается в разрядный канал плазматрона ламинарным потоком через полости между катодом (катодной вставкой) и катододержателем с расходом не более $0,01 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Образующееся над выступающей частью электрода облачко аргона надежно защищает вольфрамовый катод от воздействия агрессивного плазмообразующего газа. Наибольшего изменения в конструкции плазматрона ПТ-2 претерпел анод, где с целью увеличения его ресурса работы выполнено принудительное расщепление анодного пятна дуги с помощью установленных внутри расширяющейся части разрядного канала анода четырех термохимических

вставок диаметром $(2-3) \cdot 10^{-3}$ м, наличие которых позволяет равномерно распределить ток по поверхности анода. Привязка пятна дуги к вставкам обусловлена разностью температур поверхностей медного анода и термохимической вставки, а расщепление – газодинамикой в заступной части разрядного канала. При токах более 200 А привязка дуги является диффузной [3]. Эффект рециркуляции электронов на поверхность вставок исключает их интенсивное разрушение в среде воздуха при подключении положительного полюса источника питания.

Стенд экспериментальных испытаний был оснащен всем необходимым для снятия основных электрофизических характеристик плазмотронов мощностью до 100 кВт. Для измерения напряжения на дуге использовался вольтметр кл. точности 0,5, силы тока – милливольтметр кл. точности 1,0 с шунтом кл. точности 0,5. Определение тепловых характеристик (КПД, среднемассовых энтальпии и температуры плазменной струи) производилось методом калориметрирования. С этой целью с помощью поплавковых ротаметров кл. точности 2,5 измерялись расходы охлаждающей воды, а с помощью ртутных термометров с ценой деления 1°C – перепад температуры охлаждающей воды в каждом из узлов плазмотрона, после чего вычислялись потери теплоты, отводимые водой.

Для измерения давления и расхода рабочего, защитного и транспортирующего газа на входе в плазмотрон применялись образцовые манометры кл. точности 0,4.

Первый запуск плазмотрона ПТ-1 производился при помощи осциллятора, включенного параллельно в схему электропитания. Плазмотрон работал устойчиво при подаче рабочего газа (воздуха) $G=1\text{г/с}$ в диапазоне от 90 до 200 А. Через 5 минут работы он был отключен, разобран и осмотрен. Было установлено, что запуск плазмотрона произошел за счет образования каскадной дуги: катод – секция МЭВ – анод. Видимых следов эрозии электродов не наблюдалось.

Ресурсные испытания плазмотрона ПТ-1 включали несколько периодов с разной продолжительностью непрерывной работы. В конце каждого периода работы, после отключения, плазмотрон разбирался и поверхность разрядного канала подвергалась осмотру.

Через час работы. Пятно дуги на катоде находилось на оси катода, совпадающей с осью разрядного канала. Диаметр оплавленного участка катода около 0,2 см. Эрозия катода незначительна, менее 0,05 см. Пятно на аноде располагалось в передней (входной) части анода. Величина продольного шунтирования составляла до 1,5 см. Состояние поверхности секции МЭВ хорошее.

Через три часа двадцать минут работы. Заметных изменений на катоде не отмечено. Секция – в прежнем состоянии. На аноде наметилась коническая выработка (эрозия) со смещением в сторону выхода из анода.

Через четыре часа сорок семь минут работы. Катодное пятно начало углубляться внутрь гафниевой вставки – скорость эрозии возросла. На цилиндрической поверхности секции МЭВ появился белый налет, являющийся продуктом эрозии катода. Поверхность разрядного канала анода существенных изменений не претерпела.

Через шесть часов пять минут работы. Углубление катодного пятна составило около 3 мм. Отмечено некоторое отклонение до 0,08 см пятна от соосности разрядного канала. Значительная эрозия катода может быть объяснена не только временем непрерывной работы, но и тем, что в течение пятнадцати минут до отключения плазмотрона режим работы резко изменился: при силе тока 100 – 120 А расход рабочего газа изменялся от 0,6 до 4,0 г/с. Коническая эрозионная выработка на входе анода увеличилась, максимальный диаметр конуса увеличился до 0,8 см, высота – до половины анода, исчезло смещение оси эрозионного конуса от разрядного канала анода. Следует отметить, что плазмотрон работал устойчиво и при резком изменении режима работы.

После проведения эксперимента на продолжительность работы плазмотрона поверхности катода и секции МЭВ были зачищены, а канал анода изменился с $d_2 = 0,5$ см до $d_2 = 0,7$ см при прежнем $d_1 = 0,6$ см. При этих геометрических параметрах разрядного канала и прежних длинах его составляющих с учетом выработки катода на 0,3 см были сняты электрические и тепловые характеристики. Длительность снятия характеристик составила полтора часа. Выработка катода достигла 0,6 см. Медный корпус катододержателя в зоне стержня (вставки) имел цвета побежалости, однако его кромка практически не эродирована, то есть позволяла эксплуатировать его в дальнейшем после продвижения катодной вставки.

Для снятия электрических и тепловых характеристик применялись известные методика измерений и оценка погрешностей измерений. Во время горения дуги в плазмотроне на заданном режиме не ранее, чем через 30 сек после выхода на заданный режим, снимались показания с приборов. Программа эксперимента, как правило, выполнялась трижды. Уверенность в правильности полученных данных основывалась на их близости к ранее полученным значениям измеряемых величин.

Как видно из рисунка 2, вольтамперные характеристики при $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м имеют восходящие участки, начинающиеся с силы тока 150 А, что объясняется наличием в разрядном канале МЭВ – если МЭВ соединить электрически с анодом, то дуга укоротится, перейдет на МЭВ и станет самоустанавливающейся. При $d_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м восходящий участок характеристик наблюдается лишь при малом расходе газа (воздуха). Следует отметить, что сравнение кривых 1 и 4, 2 и 5 (рисунок 2) показывает повышение напряжения на 10 – 15 % при $d_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м, что

объясняется удлинением дуги и смещением минимума вольтамперных характеристик в сторону больших токов.

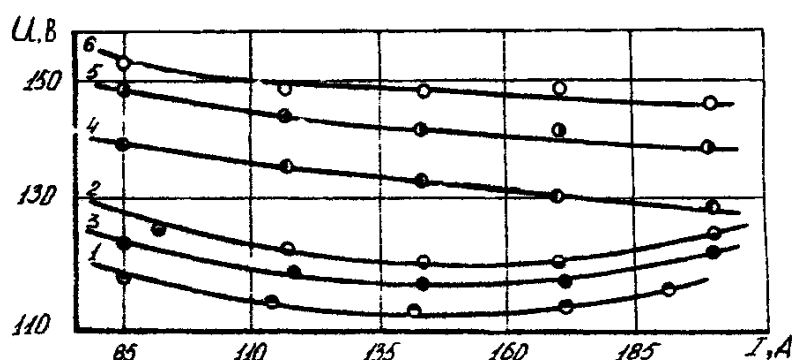


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики плазматрона ПТ-1:

1 – $G = 1,33 \cdot 10^{-3}$; 2 – $1,95 \cdot 10^{-3}$ кг/с при $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $G = 0,83$;
4 – $1,34 \cdot 10^{-3}$; 5 – $1,95 \cdot 10^{-3}$; 6 – $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с при $d_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м

Определение тепловых характеристик позволило выявить зависимости потерь энергии через катод, анод и МЭВ от силы тока дуги, расхода рабочего газа, геометрии разрядного канала и установить изменение теплового КПД плазматрона от этих же параметров. Из рисунка 3 видно, что при равных расходах рабочего газа и тока дуги (точки 1 и 4, 2 и 5) тепловой КПД плазматрона для $d_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м на 10 – 18% больше, чем для $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м.

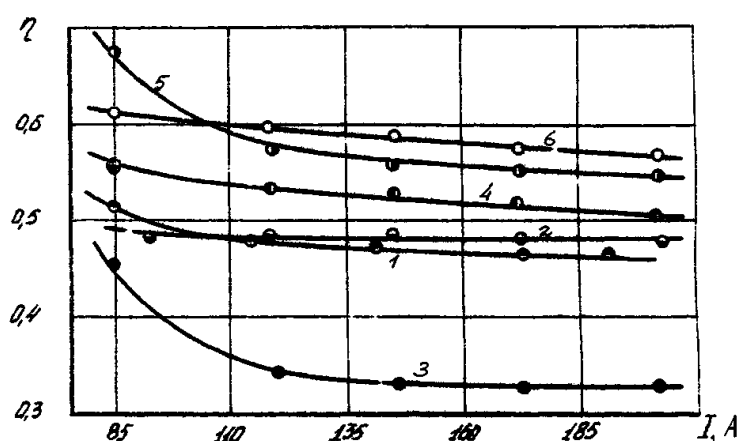


Рисунок 3 – Зависимость КПД плазматрона ПТ-1 от силы тока, расхода газа и геометрии разрядного канала: 1 – $G = 1,33 \cdot 10^{-3}$; 2 – $1,95 \cdot 10^{-3}$ кг/с при $d_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $G = 0,83 \cdot 10^{-3}$; 4 – $1,34 \cdot 10^{-3}$; 5 – $1,95 \cdot 10^{-3}$;
6 – $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с при $d_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м

Применение в плазмотроне МЭВ с пористым газовым охлаждением в совокупности с прианодной подачей газа позволит значительно увеличить КПД плазмотрона и повысить его конкурентоспособность.

Проведенные исследования позволили окончательно установить технические характеристики разработанных плазмотронов (таблица 2).

Таблица 2 – Технические характеристики плазмотронов

Тип	Мощность, кВт	Напряжение на дуге, В	Расход рабочего газа (воздуха) 10^{-3} кг/с	Расход воды на охлаждение, кг/с	Температура струи, К	КПД	Ресурс работы, ч
ПТ-1	60	200	1 – 2,5	0,14	5500	0,6	200
ПТ-2	100	260	1,5 – 3	0,35	5000	0,7	250

Таким образом, разработанные плазмотроны для напыления по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами обладают улучшенными энергетическими характеристиками. Применение МЭВ позволяет достигать среднемассовой температуры плазменной струи свыше 5000 К при меньшем токе дуги, что снижает эрозию электродов и упрощает конструктивное оформление процесса плазменного напыления. Разработанные плазмотроны для напыления могут найти применение и в других технологических процессах: сфероидизации порошков, оплавления и упрочнения поверхностей деталей, в плазменно-механической обработке и др.

Библиографический список

1. Дзюба В.Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов. – Луганск: ВНУ им. Даля, 2007. – 448 с.
2. Дресвин С.В. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии / С.В. Дресвин, С.Г. Зверев. – СПб: Политех. ун-т, 2007. – 208 с.
3. Дандарон Г.-Н.Б. Проблемы создания сильноточных катодов для электроплазменных устройств / Г.-Н.Б. Дандарон, А.Н. Тимошевский // Генерация потоков электродуговой плазмы. – Новосибирск, 1987. – С. 250 – 270.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Финкельштейном З.Л.