

УДК 621.793.06

**Исследование влияния напыляемого материала на режимы работы и тепловые характеристики плазматрона**

**В.Г. Исаев**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
управления качеством и стандартизации,

**А.Г. Костылев**, к.т.н., доцент кафедры управления качеством и  
стандартизации,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Авторами представлены результаты исследования влияния присадок на характеристики плазматрона при их вводе в плазменную струю генератора низкотемпературной плазмы. Для исследования влияния напыляемого материала на режимы и тепловые характеристики плазматрона авторами вводился порошок меди дисперсностью 15-20 мкм. По результатам исследований были выбраны характеристики, обеспечивающие оптимальный режим работы генератора плазмы. Отмечено, что плазматроны с представленными характеристиками целесообразно использованы для получения парогазовых потоков применительно к технологии нанесения защитных покрытий.*

Покрытие, плазма, технологии.

**Investigation of the effect of the sprayed material on the operating modes and thermal characteristics of the plasma torch**

**V.G. Isaev**, PhD, associate professor, head of the department of  
quality management and standardization,

**A.G. Kostylev**, PhD, associate professor of quality management  
and standardization,

State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*Authors have presented results of a research of influence of additives on characteristics of the plasmatron at their input to a plasma stream of the generator of low-temperature plasma. For a research of influence of napylyaemy material on the modes and thermal characteristics of the plasmatron by authors copper powder was entered by dispersion of 15 - 20 microns. By results of researches the characteristics providing an optimum operating mode of the generator of plasma have been chosen. It is noted that plasmatrons with the submitted characteristics are expediently used for receiving steam-gas streams in relation to technology of drawing sheetings.*

Covering, plasma, technologies.

Развитие новых технологических процессов невозможно без разработки и исследования новых технологических инструментов. Одним из новых направлений является использование паров и плазмы материалов, используемых в качестве защитных покрытий. Особый интерес представляет использование плазмы металлов, позволяющих получать покрытия с новыми свойствами при рекомбинации ионов напыляемого материала на подложке.

Поэтому пристальный интерес для получения паровых составов заданной концентрации и плазмы металлов вызывают мощные генераторы плазмы, выполненные по схеме дуговых каналовых плазмотронов. Обладая достаточно высоким КПД, они могут обеспечить получение активной среды оптимального состава для получения требуемых характеристик покрытий.

Следует отметить, что для получения паров металлов заданного состава и концентрации целесообразно подавать рабочее тело в виде порошка с целью его расплавления и испарения в плазменной струе. Поэтому используемый для этих целей генератор низкотемпературной плазмы (ГП) должен отвечать многим требованиям [2], к главным, из которых следует отнести обеспечение интенсивного нагрева и испарения мелкодисперсных частиц материала присадки, а также обеспечение работы ГП в течение длительного промежутка времени.

Таким условиям отвечают электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока, высокочастотные и сверхвысокочастотные. Более широкое применение получили электродуговые плазмотроны постоянного тока каналового типа. Наиболее обще эту группу можно разделить на две: дуговые плазмотроны с независимой и зависимой дугой [1, 4]. Как правило, чаще используются плазмотроны с косвенной дугой. В этом случае дуга замыкается на стенку канала (сопла) и выдувается наружу в виде плазменного факела потоком газа. Важным значением для стабильной работы плазмотрона является выбор способа пространственной стабилизации плазменной дуги: аксиальная, вихревая, магнитная, стабилизация стенкой [3]. Конструктивная простота, достаточно высокий тепловой КПД нагрева газа и большой срок службы – являются основными факторами широкого применения на практике плазмотронов с вихревой стабилизацией. Способ ввода плазмообразующего газа в электрический разряд оказывает существенное влияние на эффективность преобразования энергии, стабилизацию разряда и т.д. Условно можно отметить четыре различных вида ввода: аксиальный, тангенциальный, распределенный и через пористую вставку.

Тангенциальная подача обеспечивает более стабильное горение дуги, тогда как при осевой подаче происходит более равномерное распределение порошка в объеме плазменной струи.

Наиболее широко на практике используются два типа плазмотронов с самоустанавливающейся дугой и с секционированным каналом. Основным недостатком плазмотронов с самоустанавливающейся дугой является наличие

падающей вольтамперной характеристики, что влияет на стабильность параметров плазменной струи. Кроме этого, следует отметить снижение коэффициента использования порошка из-за большого градиента температур в радиальном направлении плазменной струи и пульсации параметров потока, а также ограничение электрической мощности, связанное с малой длиной дуги. Поэтому все большее распространение получают плазмотроны, в которых протяженная дуга создается за счет секционирования канала. Это так называемые плазмотроны с межэлектродной вставкой (МЭВ). Наилучшим решением в данном случае было бы использование одной диэлектрической протяженной вставки, но в настоящее время не существует достаточно термостойких материалов, которые имели бы необходимый ресурс работы. Поэтому секционированные каналы изготавливают из охлаждаемых металлических вставок, как правило, медных, определенной длины, разделенных электроизолирующими прокладками. Благодаря фиксированной протяженной дуге работа плазмотрона происходит по восходящей ветви вольтамперной характеристики. Это приводит к положительному энергобалансу, несмотря на увеличение теплопотерь в протяженном секционированном канале. Термический КПД таких плазмотронов согласно работе может достигать 65-80% без существенного увеличения силы тока.

Для эффективного испарения материала присадки плазмотроны должны отвечать следующим дополнительным требованиям:

- а) иметь достаточно протяженную зону взаимодействия мелкодисперсных материалов с высокотемпературным газовым потоком,
- б) иметь высокую стабильность параметров плазмы,
- в) обеспечивать возможность работы с требуемыми плазмообразующими газами,
- г) обладать минимальными тепловыми потерями в зоне передачи энергии от плазмы к порошку.

Применительно к плазмотронам, служащим для создания высокотемпературного потока газа, в котором вводимые частицы претерпевают фазовые превращения и приобретают скорость перемещения, необходимо добиться равномерной подачи порошка в струю плазмы, его интенсивного разогрева испарения и поддержание такого состояния полученной смеси в течение требуемого интервала времени.

Одним из факторов, влияющих на разогрев и ускорение частицы, а, следовательно, на концентрацию паров материала присадки, является место ввода порошка в плазменную струю, т.е. это определяется температурой той зоны струи, куда попадает порошок.

Исходя из требований по получению парогазовых потоков с достаточно высокой концентрацией паров металлов для проведения экспериментов, авторами была выбрана схема плазмотрона с МЭВ, обладающая высоким коэффициентом преобразования подведенной электрической энергии в энтальпию потока. Стабильность параметров дуговой плазменной струи достигается за счет работы ГП по восходящей ветви вольтамперной характеристики. Дан-

ная схема позволяет осуществить ввод мелкодисперсного материала в канал плазмотрона в любом его сечении. Стабилизация разряда твердой стенкой с аксиальным вводом плазмообразующего газа с закруткой обеспечивает более равномерное распределение частиц по сечению плазменной струи. В турбулентном потоке, несмотря на некоторое улучшение эффективности нагрева порошка по сравнению с ламинарным, существует опасность зарастания канала, связанная с осаждением расплавленных частиц на стенки. Поэтому наиболее целесообразен ламинарный режим течения. Выбор конструкции определяется также с учетом увеличения температуры газа на оси канала, что достигается применением катодов больших диаметров при прочих равных условиях. Исходя из вышесказанного, за прототип ГП авторами была принята конструктивная схема плазмотрона, предложенная в работе [5].

Получение данных по распределению теплового потока газа по длине канала является важным условием при изучении условий теплового взаимодействия частиц с плазмой с целью определения оптимальных режимов работы ГП. Тепловой баланс определялся авторами из экспериментальных измерений распределения потенциала плазмы по длине канала и тепловых потерь в стенки плазмотрона. Измерение потенциала определялось относительно катода. Секции МЭВ в данном случае служили одновременно и шайбамизондами, потенциал которых принимался равным потенциалу точки дуги, примерно соответствующей среднему сечению секции. Прямолинейный участок на всех режимах работы ГП указывает на стационарный характер течения (рисунок 1).

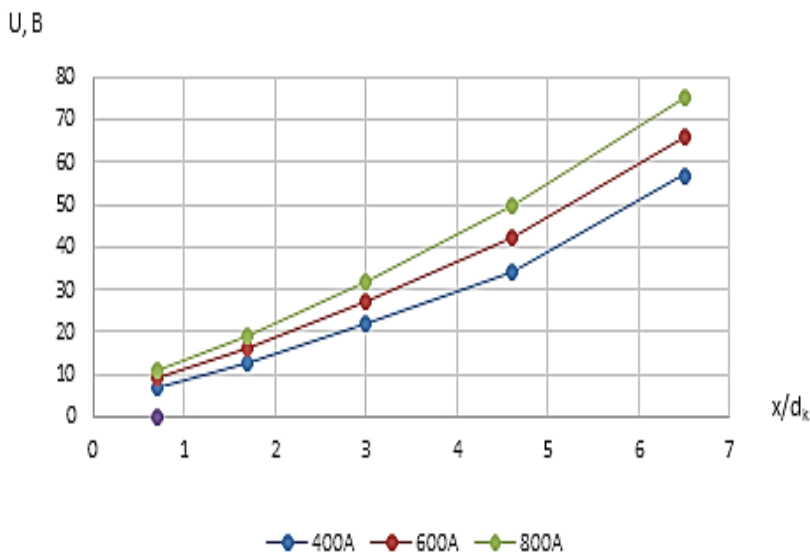


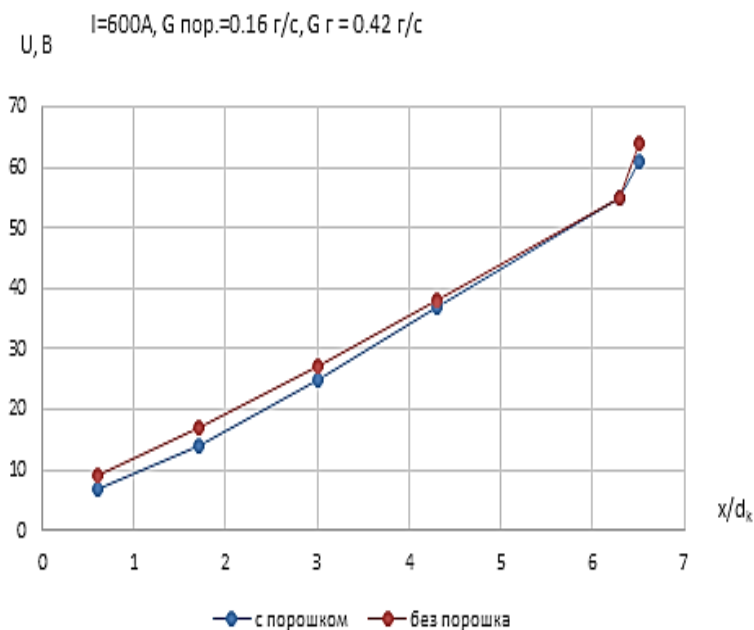
Рисунок 1 – Распределение потенциала плазмы по длине канала

Напряженность поля при этом остается практически неизменной. Ис-

следования режимов работы проводились в широком диапазоне подводимой мощности (23-67 кВт) при расходах газа от 0,17 г/с до 1 г/с.

Для исследования влияния напыляемого материала на режимы и тепловые характеристики плазматрона авторами вводился порошок меди дисперсностью 15- 20 мкм.

Как показали проведенные исследования наличие порошка (Cu) несущественно сказывается на угле наклона кривой при различных значениях подводимой мощности, что вероятно связано с малыми изменениями проводимости плазмы (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Распределение потенциала плазмы по длине канала при наличии и отсутствии порошка (Cu)**

Очевидно, испарение в канале невелико, т.к. давление газа выше, чем давление насыщенных паров данного материала при данной температуре частиц материала присадки.

Тепловые потери в секции плазматрона и в катоде определялись калориметрическим путем

$$\Delta Q_{2i} = G_i C_p \Delta T_i$$

где  $G_i$  – расход охлаждающей воды;  $C_p$  - теплоемкость воды;  $\Delta T_i$  – перепад температур на выходе и входе шайбы.

Температура воды определялась термопарами хромель-капель, диаметром 0,5 мм с помощью автоматизированной системы на базе ЭВМ. Сигнал от термопары поступал на коммутатор, выполненный в одном блоке с аналого-цифровым преобразователем, а оттуда на ЭВМ, где обрабатывался. Оп-

рос каналов осуществлялся последовательно. На каждом режиме цикл измерений проводился по 5 раз. Предварительная тарировка термпар выполнялась с использованием термометра типа TGL-II. Погрешность измерения теплового потока, идущего в стенку канала, составляла до 5,2%. Влияние расхода газа на теплотери в стенку канала представлена на рисунке 3.

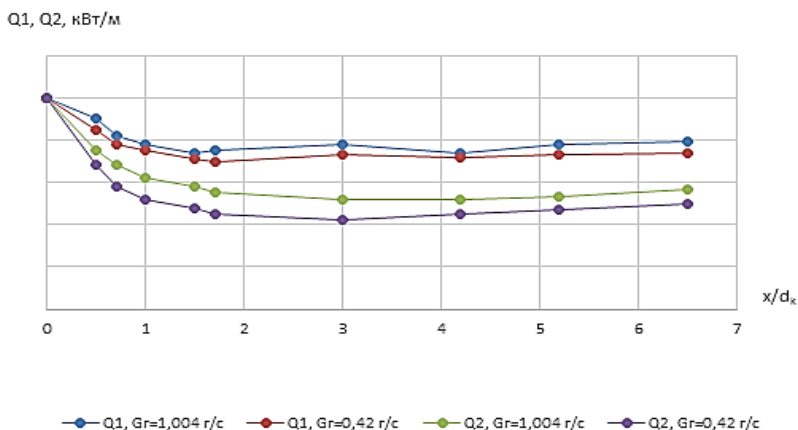


Рисунок 3 – Влияние расхода газа на теплотери в стенку канала

Измерения проводились для двух длин канала 74 и 105 мм. Тепловая мощность, выделяющаяся в канале на каждой секции:

$$\Delta Q_{li} = J \cdot \Delta \varphi$$

где:  $\Delta Q_{li}$  – тепло выделяющееся в столбе разряда;  $J$  – ток;  $\Delta \varphi$  – потенциал точки дуги относительно катода; а также прикатодных и прианодных областях разряда:

$$\Delta Q_k = \Delta \varphi_k \cdot J - Q_k; \Delta Q_a = \Delta \varphi_a \cdot J - Q_a$$

где:  $\Delta \varphi_k, \Delta \varphi_a$  – величины катодного и анодного падения потенциала, соответственно;  $Q_k, Q_a$  – тепло, отводимое от катода и анода, соответственно.

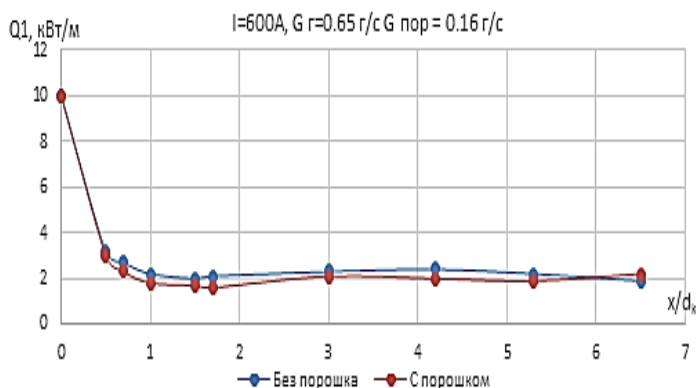


Рисунок 4 – Влияние порошка на распределение подведенной мощности ( $Q_1$ )

На участке от катода до рассматриваемого участка тепловая мощность, идущая на нагрев газа в канале, определялась выражением:

$$Q_r = J \cdot U - (Q_k + \sum_{i=1}^n \Delta Q_{2i} + Q_a)$$

где:  $n$  – число секций в канале.

Приращение полной энтальпии по длине канала определялась как

$$\Delta i = Q_r / G$$

Влияние порошка на распределение подведенной мощности ( $Q_1$ ) и отведенного тепла в стенки канала ( $Q_2$ ) для одного из режимов представлено на рисунке 4.

Увеличение расхода позволяет повысить эффективность нагрева газа на всем протяжении канала (см. рисунки 5 и 6).

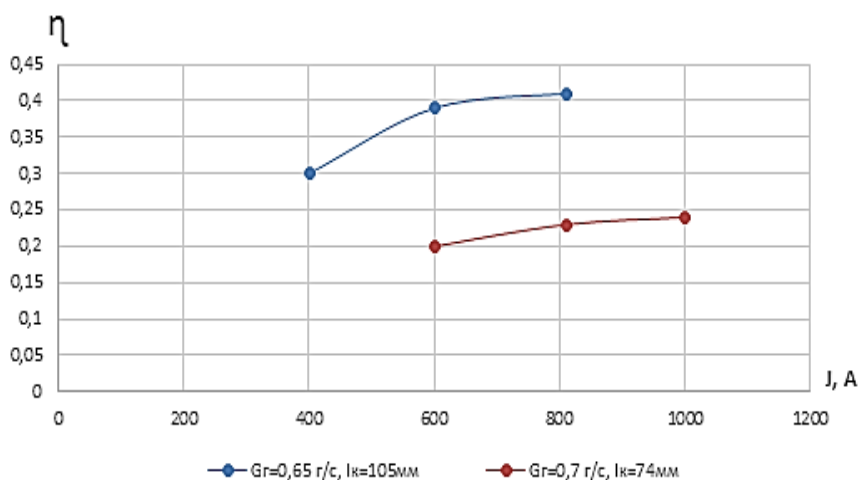


Рисунок 5 – Зависимость КПД генератора от длины канала

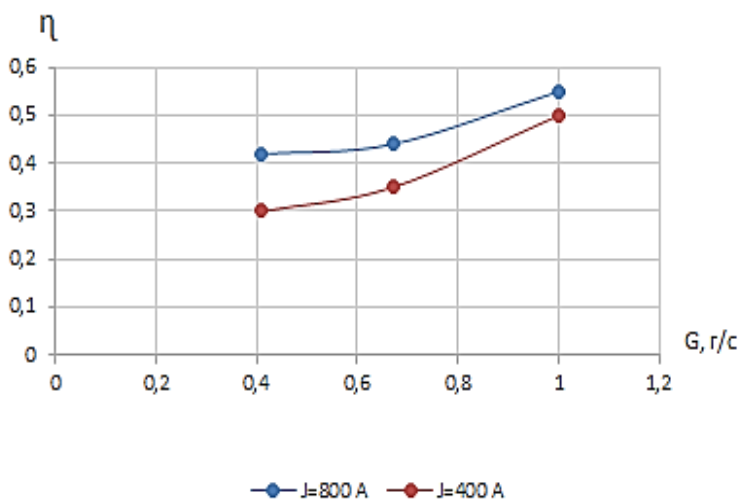


Рисунок 6 – Зависимость КПД генератора от расхода газа

**Заключение.** Проведенные авторами исследования и представленные полученные данные свидетельствуют о том, что данный генератор плазмы обладает хорошими энергетическими характеристиками. Применение плазмотрона с МЭВ позволяет увеличить КПД преобразования при увеличении длины канала. Благоприятно сказывается на КПД и увеличение расхода газа. Влияние порошка на характеристики плазмотрона в исследуемом диапазоне мощностей и давлений является незначительным.

По результатам исследований для оптимального режима работы генератора плазмы был выбран диапазон, характеризующийся следующими параметрами:

ток разряда	600-800 А;
расход газа	0,7-1 г/с;
длина канала	105 мм.

Дальнейшее увеличение длины канала не приводит к росту КПД.

Данные типы плазматронов могут быть успешно использованы для получения парогазовых потоков применительно к технологии нанесения защитных покрытий.

#### *Литература*

1. Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги. Под ред. Ф.Г Рутберга. 1973 // Л. Наука. С. 152.
2. Жуков М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы // Низкотемпературная плазма. 1999. Т. 17. С. 712.
3. Жуков М.Ф. Экспериментальные исследования плазматронов. Под ред. М.Ф. Жукова. 1977 // Наука. Сибирское отделение. С. 390.
4. Костылев А.М. Электродуговые установки (плазматроны) // М. МВТУ. 1969. С. 109.
5. Исаев В.Г., Костылев А.Г. Напыление в динамическом вакууме – дальнейший путь улучшения качества покрытий // Информационно-технологический вестник. 2016. № 3(09) С. 114-118.