

Аналитическое обоснование параметров сопла плазменной горелки для восстановления деталей

П.А. Бойков^{1a}, А.С. Безрук^{1b}, Ю.И. Мельников^{1c}, О.Л. Картавец^{1d},
В.Г. Козлов^{1e}, А.В. Скрыпников^{2f}

¹ Воронежский государственный аграрный университет им. Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

^a don.boikov2017@yandex.ru, ^b bezruk@mail.ru, ^c skrypnikovvsafe@mail.ru, ^d oll_kart@mail.ru,

^e vya-kozlov@yandex.ru, ^f aleksei-skrypnikov@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8943-5622>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-3763-7120>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>

Статья поступила 25.10.2023, принята 17.11.2023

В настоящее время внимание исследователей и практиков привлекает использование плазменной струи не только в промышленных целях, но и при восстановлении изношенных поверхностей деталей при наплавке или напылении. Благодаря своим свойствам, плазменная струя в настоящее время широко используется при резке, сварке металлов, металлзации, плазменной металлургии, плазмохимии. Поскольку контур сопла плазменной горелки оказывает большое влияние на характеристики плазменной струи, к геометрии плазменной горелки (параметрам сопла) предъявляются жесткие требования, особенно в отношении размеров внутреннего канала, где происходит формирование плазменного пучка. В связи с этим в статье представлено аналитическое обоснование параметров сопла плазменной горелки для восстановления деталей с целью расчета его параметров — внутреннего диаметра и длины цилиндрической части канала сопла плазменной горелки, а также представлены аналитические зависимости их взаимосвязи для установления рационального соотношения этих параметров. Из которых следует, что для каждого плазмообразующего газа должна быть своя оптимальная геометрия сопла плазменной горелки. Представленная формула (20) наглядно показывает, что диаметр и длина цилиндрической части сопла горелки неразрывно взаимосвязаны: чем больше диаметр, тем больше длина и наоборот. Теоретические предположения подтверждены экспериментальными исследованиями, позволившими определить рациональные параметры сопла. Практика показала, что наиболее целесообразное соотношение $L_c/d_c \approx 1$, т. е. диаметр канала сопла должен быть равен длине цилиндрической части.

Ключевые слова: плазменная горелка; сопло; плазмотрон; давление; геометрия.

Analytical substantiation of the parameters of the plasma burner nozzle for the restoration of parts

P.A. Boikov^{1a}, A.S. Bezruk^{1b}, Yu.I. Melnikov^{1c}, O.L. Kartavtsev^{1d}, V. G. Kozlov^{1e}, A.V. Skrypnikov^{2f}

Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, 1, Michurin St., Voronezh, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, Russia

^a don.boikov2017@yandex.ru, ^b bezruk@mail.ru, ^c skrypnikovvsafe@mail.ru, ^d oll_kart@mail.ru,

^e vya-kozlov@yandex.ru, ^f aleksei-skrypnikov@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8943-5622>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-3763-7120>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>

Received 10.11.2023, accepted 17.11.2023

Currently, the attention of researchers and practitioners is attracted by the use of a plasma jet not only for industrial purposes, but also when used to restore worn surfaces of parts during surfacing or spraying. Due to its properties, the plasma jet is currently widely used in cutting, welding of metals, metallization, plasma metallurgy, plasma chemistry. Since the contour of the plasma burner nozzle has a great influence on the characteristics of the plasma jet, strict requirements are imposed on the geometry of the plasma burner (nozzle parameters), especially with regard to the size of the inner channel where the plasma beam is formed. In this regard, the article presents an analytical justification of the parameters of the plasma burner nozzle for the restoration of parts in order to calculate its parameters – the inner diameter and length of the cylindrical part of the plasma burner nozzle channel, and also presents analytical dependencies of their relationship to establish a rational ratio of these parameters. From which it follows that for each plasma-forming gas there should be its own optimal geometry of the plasma burner nozzle. The presented formula (20) clearly shows that the diameter and length of the cylindrical part of the burner nozzle are inextricably interrelated: the larger the diameter, the longer the length and vice versa. The theoretical assumptions are confirmed by experimental studies, which allowed us to determine the rational parameters of the nozzle. Practice has shown that the most appropriate ratio is $L_c/d_c \approx 1$, that is, the diameter of the nozzle channel should be equal to the length of the cylindrical part.

Keywords: plasma torch; nozzle; plasma torch; pressure; geometry.

Введение. При ремонте и восстановлении узлов трения ответственных деталей машин (подшипников скольжения) сварочно-наплавочные работы занимают значительное место [1]. Объем наплавочных работ при восстановлении деталей лесозаготовительной техники на предприятиях лесного комплекса в связи с санкционной политикой возрос более чем в два раза и в настоящее время составляет около 40 т напавленного металла в год [2]. При этом получается огромная экономия за счет дальнейшего использования отремонтированных деталей. Наплавлять можно как слои металла, одинаковые по составу, структуре и свойствам с основным металлом, так и значительно отличающиеся, например, с повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью и др. [3].

При разработке и внедрения в производство современных методов наплавки большое значение имели работы И.И. Фрумина, К.К. Хренова, И.Р. Пацкевича, И.К. Походни, Е.О. Патона, И. Е. Ульмана, Н.М. Новожилова, Г.Л. Петрова, Ю.Л. Красулина, И.Д. Кулагина и других отечественных ученых. С развитием наплавки рос и уровень механизации наплавочных работ, который в нашей стране достиг 50 % [3–8].

В настоящее время существует большое количество специализированных способов механизированной наплавки, нашедших широкое применение при ремонте деталей. Последние, в свою очередь, постоянно пополняются новыми, более прогрессивными. Анализ применяемых способов наплавки на заводах, ремонтирующих лесозаготовительную технику, показывает, что количество восстанавливаемых деталей колеблется от 100 до 300, причем большая часть из них подвергается наплавке. А наибольшее применение получили следующие способы наплавки: под флюсом, в среде углекислого газа, вибрирующим электродом с комбинированной защитой дугой, в среде водяного пара. Эти способы имеют свои достоинства и недостатки. Они достаточно хорошо освещены в специальной литературе, и по ним проведено большое количество исследований [8; 9].

Известно, что свойства наплавки и соединения с основным металлом в большей мере зависят от глубины проплавления основного металла, перемешивания его с напавленным и перехода элементов основного металла в напавленный, при этом, чем больше глубина проплавления, степень перемешивания и переход элементов, тем хуже качество наплавки. Поэтому наплавку ответственных деталей следует проводить в два-три слоя, что удорожает процесс и приводит к большим затратам времени.

Постановка задачи. Перспективной, но еще недостаточно исследованной областью является плазменная наплавка металлов. Благодаря ряду исследователей — И.И. Фрумину, А.Е. Вайнерману, В.Д. Веселкову, А.Н. Сюгьеву, В.В. Архипову, Л.Н. Усову, А.И. Борисенко, А.И. Сидорову [1; 2; 11–13] и др. удалось установить, что при наплавке энергетические, тепловые и газодинамические параметры струи низкотемпературной плазмы сравнительно легко регулируются в широких пределах, что позволяет получать покрытия с минимальной глубиной проплавления основного металла (до 0,3 мм) и с минимальной степенью перемешивания (5–7 %), при высокой производительности — до 6–10 кг/ч. Все это говорит о том, что плазменная наплавка свободна от вышеуказанных недостатков различных способов электродуговой наплавки, вместе с тем, она не требует сложного оборудования и специальных источников питания и может быть освоена на ремонтных заводах лесной промышленности [11; 14].

Плазменная наплавка открывает широкие возможности для ремонта и упрочнения деталей, получения покрытий с высокими физико-механическими свойствами, резкого увеличения срока службы деталей машин.

Впервые плазма была получена более 150 лет назад в виде дугового разряда, но лишь в 1923 г. американские физики Ленгрюмор и Токс дали этому процессу свое название [15].

Плазма может быть определена как вещество, находящееся в сильно ионизированном состоянии, или плазма — это газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц в таких пропорциях, при которых общий заряд равен нулю. При этом в 1 см³ плазмы содержится 10⁹–10¹⁰ заряженных частиц. Плазма — электропроводящий газ. Электропроводность плазмы обусловлена тем, что она образована смесью положительных ионов и свободных электронов, последние могут переносить электрический ток. Необходимым условием существования плазмы является ее квазинейтральность, т. е. она не должна содержать заметного избытка зарядов одного знака над знаками другого порядка [16].

Ионизация газа происходит в результате потери одного или нескольких электронов из оболочки атома под действием внешних сил, в качестве которых может быть электрическое поле высокой частоты или высокая температура. Под действием электрического поля возникает направленное движение частиц. Столкновение электронов и положительных ионов, движущихся с большей скоростью, с нейтральными атомами приводит к повышению степени ионизации, которая определяется из уточненного уравнения Саха [17]:

$$133,32 \frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot a^2 T^{5/2} e^{-\frac{eV_i}{kT}}, \quad (1)$$

где X — степень ионизации; P — действительное давление, H/m^2 ; T — температура газа, $^{\circ}K, grad$; V_i — потенциал ионизации; $e = 2,71828$; $K = 1,37 \cdot 10^{-23}$ Кл (заряд электрона); a^2 — 1:4, зависит от положения газов в периодической системе элементов.

Из уравнения (1) видно, что высокая степень ионизации обуславливает и высокую температуру плазмы.

В отличие от обычной газовой среды, все частицы которой имеют одинаковую среднюю кинетическую энергию беспорядочного теплового движения, у электронов, ионов и нейтральных атомов плазмы газового разряда средняя кинетическая энергия различна. Электроны обладают гораздо более высокой энергией, чем ионы, а те, в свою очередь, могут иметь энергию выше, чем нейтральные атомы и молекулы. Из-за различия в энергиях будет различна и температура, т. е.:

$$T_e \gg T_i > T_a, \quad (2)$$

где T_e, T_i, T_a — соответственно температура электронов, ионов, нейтральных атомов.

Электрон должен испытать очень много столкновений с ионами, прежде чем отдаст имеющийся у него избыток энергии. Но параллельно процессу обмена энергиями идет процесс приобретения энергии электронами от источников ионизации. Поэтому в плазме все время поддерживается большой перепад энергии, а, следовательно, и температур между электронами и ионами.

Понятие «низкотемпературная плазма» относительно, поскольку температура плазменной струи достигает 10000–15000 $^{\circ}K$ и выше. Среднемассовую температуру плазменной струи можно оценить по формуле:

$$T = \frac{EY}{\pi \alpha_c \alpha_k} \left[1 - \exp \frac{\pi \alpha_c \alpha_k l_g}{C_p Q} \right], \quad (3)$$

где E — градиент потенциала в столбе дуги; l_g — длина дуги; α_k — коэффициент теплоотдачи; $C_p Q$ — соответственно теплоемкость газа и его расход; α_c — диаметр канала сопла плазменной горелки.

Для первоначальной ионизации необходимо иметь два электрода, находящихся в среде плазмообразующего газа. К электродам подводится постоянный ток, напряжение которого выбирается в зависимости от потенциала ионизации плазмообразующего газа. В результате короткого замыкания в точках замыкания в точках их контакта выделяется большое

количество тепла. Высокая температура приводит к ионизации плазмообразующего газа.

Процесс ионизации интенсифицируется путем обдува дуги соосным потоком газа.

Поток газа, пропускаемый через канал, образует ионизированную газовую оболочку, температура которой близка температуре стенок сопла. Она охлаждает сопло, предотвращает его оплавление, дополнительно сжимает дугу, увеличивает плотность тока в ней и тем самым повышает температуру. Практически весь газ, проходящий сквозь столб сжатой дуги, ионизируется и превращается в плазму.

При наплавке этот процесс реализуется в плазмотронах, или плазменных горелках.

В технике применяются плазменные горелки трех типов, отличающиеся конструкцией и способом включения в электрическую цепь (рис. 1) [12; 18]: горелки со стабилизированной сжатой дугой прямого действия, горящей между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием (рис. 1, а); горелки для получения высокотемпературной плазменной струи, которая создается дугой косвенного действия, горящей между вольфрамовым электродом и охлаждаемый водой соплом горелки (рис. 1, б) и горелки комбинированного типа, у которых от одного электрода одновременно горят две дуги — прямого и косвенного действия (рис. 1, в).

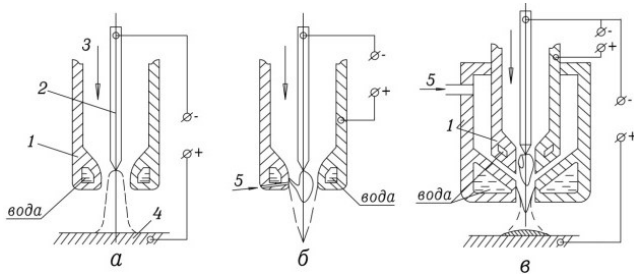


Рис. Схемы плазменных горелок: а — с дугой прямого действия; б — с дугой косвенного действия; в — комбинированного типа. 1 — сопло; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — ввод плазмообразующего газа; 4 — изделие; 5 — канал для подачи порошка

Для наплавки применяются плазменные горелки, представленные на рис. 1, а, в.

Тип горелки, показанный на рис. 1, б, применяется для металлизации и напыления тугоплавких металлов и соединений. В качестве присадочного материала при наплавке могут служить проволока, порошок, лента, пруток, крупка [19].

Подавляющее число плазмотронов для наплавки металлов выполняется на постоянном токе прямой полярности, т. е. вольфрамовый электрод — катод, а анодом является или изделие, или присадочная проволока. Это объясняется прежде всего физической особенностью дуги, заключающейся в том, что на аноде дуги выделяется большее количество тепла, чем на катоде. Следовательно, наименьшую тепловую нагрузку несет вольфрамовый электрод горелки, являющийся катодом. Предельно допустимая токовая нагрузка на вольфрамовый электрод на переменном токе примерно в два раза, а на обратной полярности, при использовании постоянного тока — в десять раз ниже, чем на прямой полярности. Поэтому плазмотроны постоянного тока имеют наиболее высокий коэффициент полезного использования мощности. Столб сжатой дуги при прямой полярности легко стабилизируется вдоль оси электрода и сопла горелки. При смене полярности и при применении переменного тока дуга сжимается и стабилизируется труднее.

Важным преимуществом плазмотронов постоянного тока по сравнению с плазмотронами переменного тока является большая стабильность горения дуги. Напряжение холостого

хода источника питания переменного тока должно значительно превышать рабочее напряжение дуги.

В последнее время внимание исследователей и практиков привлекает использование плазменной струи для промышленных целей. Благодаря своим свойствам плазменная струя широко используется при резке, сварке металлов, металлизации, плазменной металлургии, плазмохимии.

К плазменной горелке предъявляются жесткие требования, особенно в отношении размеров внутреннего канала сопла, где происходит формирование плазменного пучка. В связи с этим необходимо провести теоретический анализ процессов, проходящих в этом узле с целью выяснения возможности расчета его параметров — внутреннего диаметра и длины цилиндрической части канала сопла плазменной горелки, а также выявления их взаимосвязи для установления рационального соотношения этих параметров.

Характерными признаками плазмы являются [7–15]:

- а) высокая степень ионизации газа;
- б) полное равенство концентраций заряженных частиц обоих знаков;
- в) отсутствие термодинамического равновесия даже при стационарном режиме.

Методика исследования. Пребывание газа в состоянии термодинамически неравновесной плазмы поддерживается за счет энергии проходящего через плазму разрядного тока. Основными упрощающими предположениями будут следующие:

- 1) рекомбинации в объеме газа отсутствуют, а происходят лишь на стенках канала сопла;
- 2) начальные плотности электронов и ионов одинаковы и зависят от радиуса;
- 3) число ионизаций (u) пропорционально концентрации заряженных частиц (n), т. е. $u = \beta \cdot n$, где β — коэффициент пропорциональности.

Из рассмотрения баланса частиц в элементарном слое на расстоянии r от оси канала сопла получаем уравнение:

$$D_a \frac{d^2 n}{dr^2} + D_a \frac{1}{r} \frac{dn}{dr} + \nu_i n = 0, \quad (4)$$

где r — расстояние элементарного слоя от оси канала сопла; ν_i — частота ионизирующих соударений; D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, определяемый по формуле:

$$D_a = \frac{D_i K_e + D_e K_i}{K_e + K_i}, \quad (5)$$

где D_i, D_e, K_i, K_e — соответственно коэффициенты диффузии и подвижности ионов и электронов.

Если $T_e \gg T_i$, то $D_a \approx D_i$, и коэффициент амбиполярной диффузии можно с достаточной степенью точности представить следующей формулой:

$$D_a \approx \frac{K K_i T_i}{e}, \quad (6)$$

где T_e, T_i — температура электронов и ионов; K — постоянная Больцмана; e — заряд электрона.

Допустим, что нам нужно найти численное решение уравнения (4) на некотором полуинтервале. Проведем вычисления, применив матричный метод с использованием формулы Бейкера.

$$Y(\alpha) = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=1}^n \alpha^{k-1} \cdot \Delta_{k-1}, \quad (7)$$

где α — квадратная матрица; $Y(\alpha)$ — матричный многочлен; Δ — определитель Вандермонда.

Считаем, что $\alpha^0 = E$ — единичная матрица.

Предполагается, что все собственные значения матрицы α не обязательно вещественны, но различны.

Чтобы использовать формулу Бейкера, представим уравнение (4) в виде системы уравнения 1-го порядка, предварительно приведя его к безразмерным переменным t и

$\frac{n}{n_0}$, где n_0 — концентрация заряженных частиц на оси канала. При этом уравнение (4) примет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{n_1}{n_0} \\ \frac{n_2}{n_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -\frac{1}{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{n_1}{n_0} \\ \frac{n_2}{n_0} \end{bmatrix}.$$

Здесь $n_1 = n$, $n_2 = \frac{dn}{dt}$, или, сокращенно:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha X. \quad (8)$$

Предположим, известны начальные данные:

$$n(2) = 0,224n_0 \left(\frac{dn}{dt}\right)_{t=2} = -0,577n_0.$$

Примем шаг равным $t_{k+1} - t_k = 0,1$. Имеем следующий алгоритм:

$$x(t_{k+1}) = e^{\bar{\alpha}(t_{k+1}-t_k)} \cdot x(t_k), \quad (9)$$

где $\bar{\alpha}$ — матрица, полученная из квадратной матрицы α осреднением на шаге ее элементов; X — матрица — столбец.

Результаты вычисления сведем в таблицу.

K	1	2	3	4	5	6	7
t_k	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\frac{n_1}{n_0}$	0,224	0,167	0,110	0,055	0,000	-0,048	-0,097
$\frac{n_2}{n_0}$	-0,577	-0,568	-0,556	-0,540	-0,520	-0,497	-0,470

Видим, что при $t > 2,4$ функция $\frac{n}{n_0}$ принимает отрицательные значения, что не может соответствовать реальной картине физического состояния. Следовательно, $t = t_5 = 2,4$ — вторая граница нашего решения. Этот факт позволяет получить следующую связь:

$$t_5 = 2,4 = R \sqrt{\frac{V_i}{D_a}}, \quad (10)$$

где R — радиус внутреннего канала цилиндрической части сопла плазменной горелки:

$$\text{откуда:} \quad R = \frac{2,4}{\sqrt{\frac{V_i}{D_a}}}. \quad (11)$$

Приведенный выше пример является чисто иллюстративным, поскольку решение уравнения (4) очевидно: это бесселева функция нулевого порядка с множителем n_0 :

$$n = n_0 Y_0(t),$$

t_5 — первый корень уравнения $Y_0(t) = 0$.

Однако приведенный пример показывает хорошее совпадение с точным решением и, в случае необходимости, может быть применен и к нестандартному уравнению с переменными коэффициентами, решения которого не табулированы, а в применении к линейной системе с постоянными коэффициентами метод становится точным. Помимо этого, достоинство метода в единообразии приемов.

Частота ионизирующих соударений ν_i зависит от температуры, давления и природы газа.

Частоту ионизирующих соударений можно приближенно представить в виде:

$$\nu_i = 9 \cdot 10^7 a p x^{1/2} V_i^{3/2}, \quad (12)$$

где a — начальный наклон кривой относительной ионизации, определяемой по таблице; p — давление ионизированного газа; V_i — потенциал ионизации плазмообразующего газа, значение X можно представить:

$$x = \frac{eV_i}{kT_e}. \quad (13)$$

Подставляя (12), (13) в (11), получим следующее приближенное выражение для определения радиуса сопла горелки:

$$R \approx \sqrt[2,4]{\frac{9 \cdot 10^7 \cdot a \cdot p \cdot \frac{eV_i}{kT_e} \cdot \frac{1}{2} V_i^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT_e}\right) e}{k_i k T_i}}. \quad (14)$$

Заменяя в формуле (14) постоянные физические константы e и k их значениями и производя необходимые вычисления, получим следующую эмпирическую зависимость:

$$R \approx \frac{0,11}{V_i \sqrt[4]{\frac{a p \exp(-3,48 \cdot 10^6 \frac{V_i}{T_e})}{k_i T_i^{0,5}}}} * \quad (15)$$

* *Примечание.* Вычисление удобнее проводить в системе СГС, поскольку эта система до сих пор является наиболее широко употребляемой отечественными и иностранными учеными в теории плазменных процессов и физике плазмы.

Для определения длины канала сопла воспользуемся общеизвестной формулой:

$$E_z = \frac{U}{L_c}, \quad (16)$$

где E_z — продольный градиент электрического поля; U — разность потенциалов на концах сопла длиной L_c .

Воспользуемся выражением для E_z , определенным в работе [6]:

$$E_z = \sqrt{\frac{\delta M_e k T_e}{2}} \cdot \frac{\nu_m}{e}, \quad (17)$$

где ν_m — частота столкновений с ионами (значения определены в справочниках при давлении 1 мм рт. ст.); M_e — масса электрона; $\delta = \frac{2M_e}{M_0}$ — относительная доля энергии, передаваемая при соударениях с атомами и ионами; M_0 — масса атома.

Тогда длина цилиндрического канала сопла горелки выразится формулой:

$$L_c \approx \frac{U}{E_z} \approx \frac{U}{\sqrt{\frac{\delta M_e k T_e \nu_m}{2}}}. \quad (18)$$

В работе [8] получено значение E_z , выраженное следующей формулой:

$$E_z \approx \frac{2,4}{R} \sqrt{\frac{D_a V_i}{\gamma(K_i + K_e)}}, \quad (19)$$

где $D_a V_i K_i K_e R$ — то же, что и в предыдущих формулах; γ — доля энергии тока, идущей на поддержание ионизации.

Тогда длину L_c можно определить еще одной формулой:

$$L_c \approx \frac{U}{E_z} \approx \frac{RU}{2,4} \sqrt{\frac{\gamma(K_i + K_e)}{D_a V_i}}. \quad (20)$$

Заключение. Таким образом, получены аналитические зависимости для определения интересующих величин. Видно, что длина и диаметр плазменной горелки оказываются связанными с физическими константами ионизированного газа и зависят от рода плазмообразующего газа и условий протекания процесса. В заключение можно сделать вывод о том, что для каждого плазмообразующего газа должна быть своя рациональная геометрия сопла плазменной горелки. Формула (20) наглядно показывает, что диаметр и длина цилиндрической части сопла горелки неразрывно взаимосвязаны: чем больше диаметр, тем больше длина и наоборот.

Для подтверждения теоретических предположений были проведены экспериментальные исследования, позволившие определить рациональные параметры сопла.

Для этого были изготовлены три горелки с одинаковым диаметром, равным 5 мм, но с различной длиной цилиндрической части канала сопла, следующих соотношений L_c/d_c : 1; 2; 0,5. Практика показала, что наиболее целесообразное

соотношение $L_c/d_c \approx 1$, т. е. диаметр канала сопла должен быть равен длине цилиндрической части. При увеличенной длине цилиндрической части сопла необходима тщательная центровка вольфрамового электрода относительно оси канала, что не всегда удается осуществить. Вследствие этого появляется опасность образования дуги, горящей между охлаждаемым

соплом горелки и проволокой, что и наблюдалось на практике. При уменьшенной высоте канала затруднялось формирование плазменной струи, что, в свою очередь, приводило к снижению стабильности горения дуги и затруднению процесса наплавки.

Литература

1. Гайсин Ал.Ф., Насибуллин Р.Т. Об особенностях электрического разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 10. С. 959-966.
2. Гайсин Аз.Ф., Насибуллин Р.Т. Некоторые характеристики оксидного порошка железа, полученного в разряде с электролитическим катодом при пониженном давлении // Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы: сб. материалов Междунар. науч. конф. (16-18 окт. 2012 г.). Казань: КНИТУ, 2012. С. 150.
3. Банов М.Д., Масаков В.В. Специальные способы сварки и резки. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 208 с.
4. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 1987. 192 с.
5. Пузыряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
6. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
7. Пузыряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 360 с.
8. Лашченко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. Киев: Экотехнология, 2003. 64 с.
9. Валиев Р.И., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Гумеров А.З., Насибуллин Р.Т., Садриев Р.Ш., Саримов Л.Р., Хафизов А.А. Некоторые особенности получения мелкодисперсных порошков оксида железа в низкотемпературной плазме электрического разряда с жидким катодом // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 3-3. С. 66-69.
10. Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Многоканальная плазменная установка с электролитическим катодом // Автомобильная пром-сть. 2011. № 2. С. 36-38.
11. Гайсин Ал.Ф., Гумеров А.З., Саримов Л.Р., Насибуллин Р.Т. Модернизация плазменной установки для получения ферромагнитных нанопорошков // Науч.-технический вестн. Поволжья. 2011. № 4. С. 49-54.
12. Гумеров А.З., Насибуллин Р.Т., Саримов Л.Р. Способ автоматизации техпроцесса получения ферромагнитного порошка // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-технической конф. молодых ученых (17-18 нояб. 2011 г.). Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2011. С. 38.
13. Насибуллин Р.Т. Электрические разряды между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном и пониженных давлениях: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 114 с.
14. Pawlowski L. The science and engineering thermal spray coatings [M]. New York: John Wiley and Sons Press, 2008.
15. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J. A perspective on plasma spray technology [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2015. 35. P. 491-509.
16. Zhu L., Zhang N., Coddet C. An improvement of low power plasma torch for very low pressure plasma sprayed thin and dense ceramic coatings [C] // International Thermal Spray Conference & Exposition, Hamburg, Germany (27-29 september), 2011. P. 1367-1372.
17. Binl R., Monno M., Boulos M.I. Effect of cathode nozzle geometry and process parameters on the energy distribution for an argon transferred arc [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2007. 27. P. 359-380.
18. Semenov S., Cetegen B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2001. № 10 (2). P. 326-336.
19. Chen X. Heat transfer and flow in thermal plasma [M]. Beijing: Science Press, 2009.
20. Hospach A., Mauer G., Vaßen R. Characteristics of ceramic coatings made by thin film low pressure plasma spraying [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2012. № 21. P. 435-440.
21. Baik K.H., Grant P.S., Cantor B. The equiaxed-banded microstructural transition during low pressure plasma spraying [J]. Acta Materialia. 2004. 52. P. 199-208.

References

1. Gajsin Al.F., Nasibullin R.T. About the features of the electric discharge between the electrolytic cathode and the metal anode // Plasma physics reports. 2011. V. 37, № 10. P. 959-966.
2. Gajsin Az.F., Nasibullin R.T. Some characteristics of iron oxide powder obtained in a discharge with an electrolytic cathode at reduced pressure // Plazmennye tekhnologii issledovaniya, modifikacii i polucheniya materialov razlichnoj fizicheskoy prirody: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. (16-18 okt. 2012 g.). Kazan': KNITU, 2012. P. 150.
3. Banov M.D., Masakov V.V. Special welding and cutting methods. M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2009. 208 p.
4. SHirshov I.G., Kotikov V.N. Plasma cutting. L.: Mashinostroenie, 1987. 192 p.
5. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2008. 360 p.
6. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. M.: Mashinostroenie, 2000. 320 p.
7. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma spraying technology. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2003. 360 p.
8. Lashchenko G.I. Plasma hardening and spraying. Kiev: Ekotekhnologiya, 2003. 64 p.
9. Valiev R.I., Gajsin Al.F., Gajsin F.M., Gumerov A.Z., Nasibullin R.T., Sadriev R.SH., Sarimov L.R., Hafizov A.A. Some features of obtaining finely dispersed iron oxide powders in a low-temperature plasma of an electric discharge with a liquid cathode // Russian Physics Journal. 2014. V. 57, № 3-3. P. 66-69.
10. SHakirov YU.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., SHakirova G.YU. Multichannel plasma installation with electrolytic cathode // Avtomobil'naya prom-st'. 2011. № 2. P. 36-38.
11. Gajsin Al.F., Gumerov A.Z., Sarimov L.R., Nasibullin R.T. Modernization of the plasma plant for the production of ferromagnetic nanopowders // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2011. № 4. P. 49-54.
12. Gumerov A.Z., Nasibullin R.T., Sarimov L.R. A method for automating the process of obtaining ferromagnetic powder // Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. molodyh uchenykh (17-18 noyab. 2011 g.). Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2011. P. 38.
13. Nasibullin R.T. Electrical discharges between a flowing electrolytic cathode and a metal anode at atmospheric and reduced pressures: dis. ... kand. tekhn. nauk. Kazan', 2013. 114 p.
14. Pawlowski L. The science and engineering thermal spray coatings [M]. New York: John Wiley and Sons Press, 2008.
15. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J. A perspective on plasma spray technology [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2015. 35. P. 491-509.
16. Zhu L., Zhang N., Coddet C. An improvement of low power plasma torch for very low pressure plasma sprayed thin and dense ceramic coatings [C] // International Thermal Spray Conference & Exposition, Hamburg, Germany (27-29 september), 2011. P. 1367-1372.
17. Binl R., Monno M., Boulos M.I. Effect of cathode nozzle geometry and process parameters on the energy distribution for an argon transferred arc [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2007. 27. P. 359-380.
18. Semenov S., Cetegen B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2001. № 10 (2). P. 326-336.
19. Chen X. Heat transfer and flow in thermal plasma [M]. Beijing: Science Press, 2009.
20. Hospach A., Mauer G., Vaßen R. Characteristics of ceramic coatings made by thin film low pressure plasma spraying [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2012. № 21. P. 435-440.
21. Baik K.H., Grant P.S., Cantor B. The equiaxed-banded microstructural transition during low pressure plasma spraying [J]. Acta Materialia. 2004. 52. P. 199-208.