

УДК 621.791.755

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ В ДВУХКАМЕРНЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ

Щицын Ю.Д., Косолапов О.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
e-mail: koa@msa.pstu.ru*

В настоящей статье описано взаимодействие закрученных газовых потоков в двухкамерных плазматронах с последовательным расположением вихревых камер. Произведена оценка выходных параметров истекающей струи. Опытным путем установлено явление пульсации сжатой дуги на выходе из двухкамерного плазмотрона. Предложено теоретическое описание взаимодействия закрученных потоков при последовательном, соосном расположении вихревых камер. Показана возможность активного управления технологическими процессами плазменной обработки металлов путем изменения параметров взаимодействия закрученных потоков, истекающих из анодной и стабилизирующей камер плазмотрона. Рассмотрены условия взаимодействия газовых струй при различных условиях соотношения диаметров анодной и стабилизирующей камер. К пограничным случаям относятся полное загибание струи и ее свободное истечение. Между ними находится область регулирования характеристик процесса.

Ключевые слова: плазмотрон, вихревые камеры, сжатая дуга, плазменные технологии, сварка, резка, металлизация, пульсация, анод, катод, газовые потоки, плазмообразующее сопло, анодная камера, стабилизирующая камера, закрученные газовые потоки

CREATING THE OUTPUT PARAMETERS OF THE JETS IN THE TWO-CHAMBER PLASMA TORCHES

Schitsyn Yu.D., Kosolapov O.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: koa@msa.pstu.ru

This article describes the interaction of swirling gas flows in the two-chamber plasma torches with a serial arrangement of the vortex chambers. The estimation of the output parameters of the effluent stream was held. There was established by test the phenomenon of compressed arc pulsation in output of the dual-chamber plasma torch. Invited theoretically the interaction of swirling flows in sequential, coaxial vortex chambers. The possibility of active management in technological process of metals plasma processing by changing the parameters of swirling flows interaction. The possibility of active management of technological processes of plasma processing of metals by changing the parameters of the interaction of swirling flows flowing from the anode chambers and stabilizing the plasma torch. The conditions for interaction between the gas jets under different conditions and the ratio of the diameter of the anode stabilizing cameras. For borderline cases are full jet lock and its expiration free. Between them is the area of process control features.

Keywords: plasma torches, vortex chambers, compressed arc, plasma technology, welding, cutting, metal coating, pulsation, anode, cathode, gas flows, plasma forming spray pipe, anode chamber, stabilizing the camera, swirling gas flow

В плазматронах для комбинированных технологий (плазменная сварка плавящимся электродом, плазменная металлизация, плазменная резка с комбинированной подачей газов и др.) используются системы с многоканальной подачей газов и наличием нескольких, последовательно расположенных вихревых камер. Использование закрученных газовых потоков расширяет возможности активного изменения тепловых и газодинамических характеристик плазматронов.

Характер движения и скорость газовой среды на поверхности нагретых тел определяет интенсивность конвективной теплопередачи, а в замкнутых объемах – и особенности теплообмена между элементами системы [1, 2, 7]. Движение газового потока в плазмообразующей камере при тангенциальном подводе можно рассматривать как вихревое движение в цилиндрической

камере со сбросом через осевое отверстие в торцевой стенке. Следует добавить, что структура и скорости течения закрученного потока во многом определяют свойства сжатой дуги на срезе плазмообразующего сопла (поперечное сечение, распределение температур и скоростей по сечению, плотности тока и др.) и ее технологические возможности [3, 4].

Закрученные потоки в стесненных условиях с истечением через осевое отверстие в торцевой стенке имеют сложный трехмерный характер и отличаются весьма сложным распределением давлений, скоростей и направлений перемещения по главным сечениям объема. При последовательном расположении вихревых камер возможно несколько вариантов смешения газовых потоков, которые обеспечивают различные параметры газовых струй на выходе [5, 6].

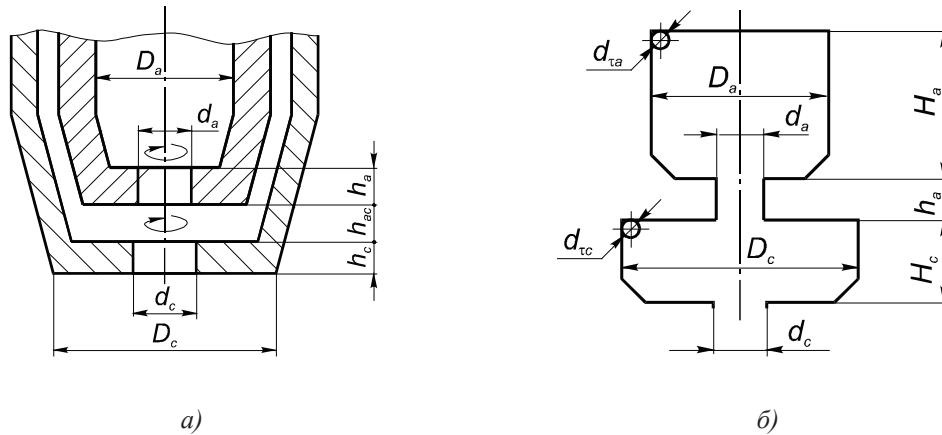


Рис. 1. Анодно-сопловая часть плазмоторна: а – конструктивная схема; б – расчетная схема

Взаимодействие газовых потоков внутри плазмоторна с последовательным расположением вихревых камер можно рассмотреть на примере работы плазмоторна для плазменной сварки плавящимся электродом. При исследовании работы плазмоторна с кольцевым анодом без подачи плавящегося электрода авторами были выявлены зоны при определенном соотношении геометрических параметров плазмоторна и технологических параметров процесса, в которых обеспечивалось существование пульсирующей сжатой дуги. Плазмоторн с кольцевым анодом и стабилизирующим соплом представляет собой двухкамерную систему с вихревой подачей газов (рис. 1). В принципе, вихревых камер может быть больше при использовании дополнительных фокусирующих насадок.

Тангенциальная подача анодного (плазмобразующего) и стабилизирующего газов обуславливается рядом причин. Во-первых, характерное распределение давлений и скоростей по сечению выходного осевого отверстия обеспечивает «втягивание» активных пятен сжатой дуги на цилиндрическую поверхность анода, что обеспечивает пространственную и временную стабилизацию дуги, улучшенное охлаждение анода и стабилизирующего сопла и увеличение срока службы анода и сопла. Во-вторых, снижаются требования к обеспечению соосности плавящегося электрода и сжатой дуги.

В двухкамерной системе с вихревой подачей газов и соединении камер осевым отверстием возникает сложное взаимодействие газовых потоков, определяющее параметры струи, истекающей из стабилизирующего сопла. Характер взаимодействия

потоков зависит от геометрических параметров системы и характеристик газовых струй на выходе из тангенциальных каналов (рис. 1). Определяющими параметрами взаимодействия газовых потоков являются: D_a , d_a , h_a , D_c , d_c , h_c , n_a , d_{ta} , n_c , d_{tc} , h_{sc} , Q_n , Q_c , направления закрутки газов, где D_a – диаметр анодной камеры, d_a – диаметр кольцевого анода, h_a – высота кольцевого анода, D_c – диаметр стабилизирующей камеры, d_c – диаметр стабилизирующего сопла, h_c – высота стабилизирующего сопла, n_a – количество тангенциальных каналов подвода плазмобразующего газа, d_{ta} – диаметр подводящих каналов плазмобразующего газа, n_c – количество тангенциальных каналов подачи стабилизирующего газа, d_{tc} – диаметр подводящих каналов стабилизирующего газа, p_{na} и p_{nc} – давления в подводящих каналах в анодную и стабилизирующую камеру соответственно, Q_n , Q_c – расход плазмобразующего и защитного газов.

Для уяснения газодинамической обстановки в плазмоторне необходимо рассмотреть структуру газовых потоков в стабилизирующей камере и анодной камере отдельно (рис. 2–3).

Параметры газового потока на выходе из кольцевого анода: p_{ra} – давление по радиусу струи на выходе, u_{ta} – тангенциальная скорость закрученного потока, u_{za} – осевая скорость на выходе, $d_{ea}(r_{ea})$ – внутренний диаметр (радиус) кольцевого сечения потока на выходе. Эти параметры определяются величиной Q_a , p_{na} , n_a , d_{na} , D_a , d_a , h_a , и $p_{a\text{вых}}$ – давление на выходе из кольцевого анода. Стабилизирующая камера представляет собой вихревую камеру с двумя осевыми выходами на противоположных торцевых стенках (рис. 2).

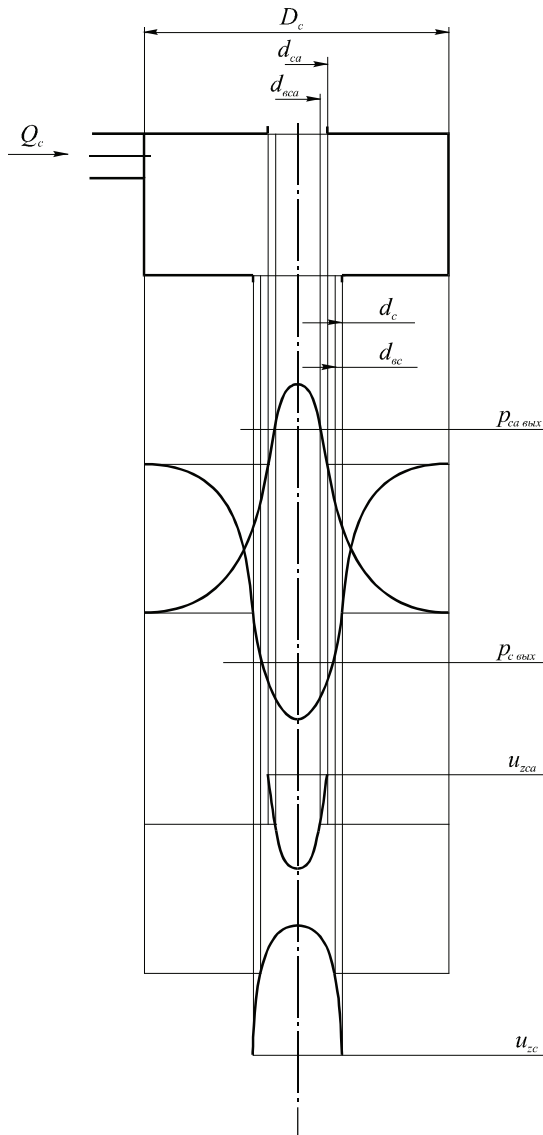


Рис. 2. Структура газовых потоков в стабилизирующей камере плазматрона

В такой камере обеспечивается двухстороннее истечение газа с параметрами потоков, определяемыми Q_c , p_{nc} , n_c , d_{nc} , D_c , d_{ca} , h_c и давлениями среды на выходе из отверстий ($p_{c\text{ вых}}$ и $p_{ca\text{ вых}}$). При равенстве d_c и d_{ca} и $p_{c\text{ вых}} = p_{ca\text{ вых}}$ обеспечивается симметричное истечение потоков. При $d_c \neq d_{ca}$ и $p_{c\text{ вых}} \neq p_{ca\text{ вых}}$ происходит нарушение симметрии истекающих потоков. В зависимости от соотношения параметров вихревых камер возможно несколько вариантов взаимодействия газовых потоков в канале их соединяющем и, как следствие, изменение параметров струи на выходе из стабилизирующего сопла. Необходимо рассмотреть их последовательно. Для упрощения будут рассматриваться усредненные значения параметров по сечению струй в выходных

каналах. Из тех же соображений считается $n_a = n_c$ и $d_{na} = d_{nc}$.

1. Вариант при соотношении выходных отверстий $d_c < d_{ca}$. При таком соотношении диаметров не обеспечивается устойчивая работа плазматрона без двойного дугообразования при любых соотношениях параметров газовых потоков в камерах. Поэтому этот вариант рассматриваться не будет.

2. Вариант $d_c > d_{ca} > d_{nc}$. При таком соотношении давление p_c , осевая скорость u_{zc} и расход Q_c и, соответственно p_{ca} , u_{zca} , Q_{ca} будут определяться из следующих соотношений:

средний радиус кольца выходных сечений потока:

$$r = \frac{r_c - r_{nc}}{2}; \quad (1)$$

$$r = \frac{r_{ca} - r_{nc}}{2}$$

где $r_{nc} = k_c \cdot r_c$; $r_{ca} = k_a \cdot r_{ca}$; k_c и k_a зависят от соотношения R_c и

$$r_{nc} = d_{nc}/2.$$

Осредненное давление на выходе определяется величиной тангенциальной скорости v_τ

$$p_c = p_{R_c} + [\rho \cdot (v_{\tau R_c}^2 - v_{\tau nc}^2) / 2]; \quad (2)$$

$$p_{ca} = p_{R_c} + [\rho \cdot (v_{\tau R_c}^2 - v_{\tau ca}^2) / 2], \quad (3)$$

где

$$v_{\tau nc} = v_{R_c} \cdot [2R_c / (r_c + r_{nc})]^{n-1}, \quad (4)$$

$$v_{\tau ca} = v_{R_c} \cdot [2R_c / (r_{ca} + r_{ca})]^{n-1}. \quad (5)$$

Тогда осредненная осевая скорость определяется как

$$v_{zc} = \sqrt{2\Delta p_c / \rho}, \quad (6)$$

$$v_{zca} = \sqrt{2\Delta p_{ca} / \rho}, \quad (7)$$

где Δp_c и Δp_{ca} перепад давлений на выходе из камеры через осевые отверстия.

Расходы:

$$Q_c = v_{zc} \cdot \pi \cdot (r_c^2 - r_{nc}^2), \quad (8)$$

$$Q_{ca} = v_{zca} \cdot \pi \cdot (r_{ca}^2 - r_{nc}^2). \quad (9)$$

При $d_{ca} < d_c$, $p_{ca} < p_c$ осевая скорость истекающей струи $v_{zca} < v_{zc}$, тогда $Q_{ca} < Q_c$.

Рассматривая истечение газового потока из верхней (анодной) вихревой камеры, следует отметить, что параметры струи определяются аналогичным образом. Необходимо помнить, что $R_a < R_c$ из конструкции плазматрона и толщина кольцевого сече-

ния струи, истекающей из анодной камеры, при прочих равных условиях будет больше (рис. 3). В зависимости от соотношения поперечных размеров струй, а также p_{za} ; p_{zca} ; v_{za} ; v_{zca} ; v_{tba} ; v_{tba} возможны различные механизмы взаимодействия струй. Необходимо рассмотреть два крайних случая.

1. Полное запыриание истечения газа из анодной полости при $p_a < p_{ca}^{a_{вых}}$. Такой вариант возможен при $d_a > d_c^{a_{вых}}$, а также при определенном соотношении Q_{ca} ; Q_c и геометрических параметров камер. Запыриание истечения газа из кольцевого анода приводит к нарушению устойчивого горения сжатой дуги, повышает вероятность двойного дугообразования. Анодные пятна располагаются на торце анода, наблюдаются участки подплавления поверхности анода. Использование таких режимов работы плазмотрона для технологических целей невозможно.

2. Свободное истечение струи из анодной камеры без взаимодействия с вихревым потоком сопловой камеры. Такой случай возможен при $d_a < (d_{ac} - 1)$ при $H_c = 1-3$ мм и при близких расходах Q_n и Q_c . При таком соотношении параметров сжатая дуга горит устойчиво, анодные пятна втягиваются на цилиндрическую поверхность кольцевого анода, столб дуги имеет цилиндрическую форму с диаметром близким к d_c . Такой вариант работы плазмотрона обеспечивает стабильность ведения процесса плазменной сварки плавящимся электродом с различной формой переноса металла.

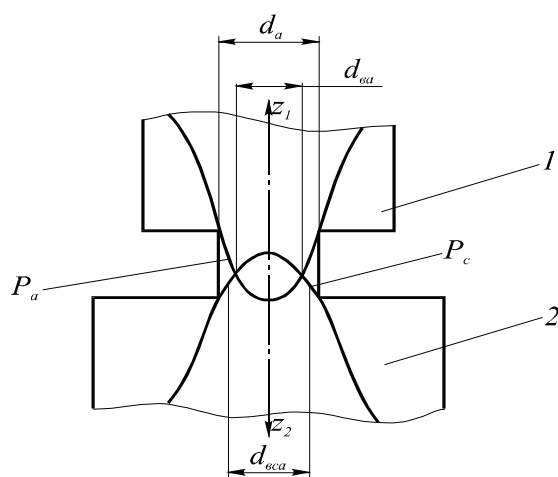


Рис. 3. Схема взаимодействия газовых потоков в плазмотроне (где 1 – анодная камера; 2 – стабилизирующая камера)

Между описанными крайними случаями работы плазмотрона могут существовать промежуточные зоны с различными

параметрами результирующих газовых потоков, определяющих устойчивость горения и степень сжатия дуги и стабильность ведения процесса в целом.

Применение осредненных значений v_r , v_r , v_z , p для описания взаимодействия газовых потоков возможно при идеализации процесса без учета потерь в камере на трение, размеров пограничных слоев, гидравлических сопротивлений на входе и выходе из камеры. При рассмотрении взаимодействия газовых потоков при работе сжатой дуги необходимо учитывать неравномерность распределения давлений и температур по сечению сжатой дуги. Наличие плавящегося электрода по оси выходных каналов, особенно при крупнокапельном переносе металла и горении дуги с него внутри плазмотрона, также нарушает упорядоченность взаимодействия закрученных потоков.

Описанное выше явление пульсации сжатой дуги наблюдается при близких значениях p_{ca} и p_{ca} и при неравенстве $v_{za} \neq v_{zca}$; $v_{za} \neq v_{zca}$ (рис. 3). Такие устройства являются генераторами колебаний выходных потоков. Эксперименты показали, что при определенных сочетаниях геометрических параметров анодной и стабилизирующей камер и расходов Q_a и Q_c в плазмотроне могут генерироваться колебания параметров сжатой дуги с частотой от 3 до 50 ГЦ. Пульсации газового потока также возможны при встречной закрутке газовых потоков в камерах [5].

Исследования плазменной сварки плавящимся электродом с использованием режимов пульсирующей дуги показали благоприятное влияние такого режима на отрыв и перенос металла с плавящегося электрода при сварке обесточенной проволокой и при сварке с токоведущей проволокой с крупнокапельным переносом металла. При этом снижается размер капли и увеличивается частота их переноса. Эффект пульсации сжатой дуги может использоваться и для других сварочных процессов.

Таким образом, изменяя параметры взаимодействия закрученных газовых потоков в двухкамерных плазмотронах, можно в широких пределах менять характеристики газового потока на выходе из плазмотрона и технологические возможности плазменной обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Теория центробежной форсунки // Сборник ЦАГИ по промышленной аэродинамике. – 1994. – С. 46–63.
2. Борисенко Н.И., Тусишвили О.С., Гасишвили Г.П. Течение газов в катодной камере аксиального плазмотрона с торцовым катодом // Сварочное производство. – 1980. – № 12. – С. 26–28.
3. Исакиев Э.Х., Тюфяков А.С. Влияние геометрии сопла на характеристики дуги в плазмотроне для резки металлов. // Сварочное производство. – 1994. – № 7. – С. 23–24.
4. Киренский И.Е., Амосов А.П., Попов В.В. Нарушение стабильности горения сжатой дуги. // Сварочное производство. – 1997. – № 4. – С. 23–24.
5. Лебедев И.В. К расчету вихревых элементов струйной автоматики. Доклады НТК МЭИ, секция электромашиностроительная. Изд. МЭИ, 1969. – С. 35–43.
6. Теория термической электродуговой плазмы. Ред. Жуков М.Ф. – Новосибирск: Наука, 1987. – Ч. 1. – 287 с.
7. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А. О тепловых нагрузках на плазмотрон для сварки // Материалы 15 НТК «Пути и методы совершенствования систем и образцов ракетного вооружения, их эксплуатации и боевого применения». – Пермь, 1997. – С. 26–27.

References

1. Abramovich G.N. Teorija centrobezhnoj forsunki // Sbornik CAGI po promyshlennoj ajerodinamike. 1994. pp. 46–63.
2. Borisenko N.I., Tusishvili O.S., Gasishvili G.P. Techenie gazov v katodnoj kamere aksialnogo plazmotrona s torcovym katodom // Svarochnoe proizvodstvo. 1980. no. 12. pp. 26–28.
3. Isakiev Je.H., Tjufjakov A.S. Vlijanie geometrii sopla na harakteristiki dugi v plazmotrone dlja rezki metallov. // Svarochnoe proizvodstvo. 1994. no. 7. pp. 23–24.
4. Kirenskij I.E., Amosov A.P., Popov V.V. Narushenie stabilnosti gorenija szhatoj dugi. // Svarochnoe proizvodstvo. 1997. no. 4. pp. 23–24.
5. Lebedev I.V. K raschetu vihrevyh jelementov strujnoj avtomatiki. Doklady NTK MJeI, sekcija jelektromashinostroitelnaja. Izd. MJeI, 1969. pp. 35–43.
6. Teorija termicheskoj jelektrodugovoj plazmy. Red. Zhukov M.F. Novosibirsk: Nauka, 1987. Ch. 1. 287 p.
7. Shhicyn Ju.D., Kosolapov O.A. O teplovyh nagruzkah na plazmotron dlja svarki // Materialy 15 NTK «Puti i metody sovershenstvovanija sistem i obrazcov raketnogo vooruzhenija, ih jekspluatacii i boevogo primenenija». Perm, 1997. pp. 26–27.