



УДК 533.6.011+621.365.29

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЛАЗМОТРОНА КОСВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ С ВИХРЕВОЙ ПОДАЧЕЙ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА

В. А. Шаповалов, К. А. Цыкуленко, В. Р. Бурнашев, Д. М. Жиров

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью определения области устойчивой работы плазмотрона косвенного действия исследовали поведение дуги в плазмотроне с вихревой подачей плазмообразующего газа при регулировании тока дуги, давления и направления подачи газа. Установлено, что подача газа только через осевой канал катода не может обеспечить устойчивую работу плазмотрона из-за привязки дуги к горизонтальной площадке анода, что приводит к быстрому износу последнего. Подача газа в завихритель, расположенный в межэлектродной области плазмотрона, позволила перемещать анодное пятно дуги с горизонтальной на цилиндрическую поверхность осевого канала сопла и обеспечивать вращение анодного, а при повышении давления – и катодного конца дуги. Получена область устойчивого горения дуги в координатах ток–давление подаваемого газа. Одновременная подача газа через боковой завихритель и центральный осевой канал при встречных направлениях вихревых потоков способствует увеличению области устойчивого горения дуги. Показано, что конфигурация камеры плазмотрона оказывает существенное влияние на стабильность дугового разряда. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят определить конструктивные параметры плазмотрона косвенного действия, обеспечивающие его стабильную и эффективную работу. Библиогр. 4, ил. 4.

**Ключевые слова:** плазмотрон косвенного действия; вихревая подача газа; устойчивость дугового разряда; режим работы; привязка дуги; газодинамика плазмотрона

В плазмотронах косвенного действия струя плазмы выносится из сопла кинетической энергией газа, подаваемого в камеру. В отличие от плазмотрона прямого действия, где электрический столб дуги совмещен с плазменной струей, в плазмотронах косвенного действия тепловая энергия передается к обрабатываемому объекту только нагретой плазменной струей [1]. Одним из способов применения такого плазмотрона является нагрев различных газов до высоких температур, что позволяет реализовать новые технологические решения, связанные с использованием горячего газа, в различных областях науки и техники.

В настоящее время большинство плазмотронов работает на постоянном токе. Такая ситуация обусловлена тем фактором, что дуга постоянного тока горит более устойчиво, чем дуга переменного тока [2]. Однако, кроме вида тока, дополнительным и весьма существенным фактором, влияющим на устойчивость горения дуги, является поток подаваемого в плазмотрон газа, воздействующий на электрическую дугу. Характер взаимодействия электрической дуги и струи подаваемого газа определяет устойчивость работы плазмотрона и влияет на его рабочие характеристики. В частности, для повышения ресурса работы сопла и плазмотрона во многих конструкциях предусмотрена вихревая подача

плазмообразующего газа, при которой анодное пятно дуги перемещается (вращается) по рабочей поверхности сопла, тем самым снижая тепловую нагрузку на стенку. В работе [3] установлено, что скорость движения анодного пятна дуги близка к скорости движения газового потока. Сделан вывод о том, что снос электрической дуги вдоль канала в значительной степени обусловлен ее взаимодействием с потоком газа.

Целью настоящей работы было определение области устойчивой работы плазмотрона косвенного действия, предназначенного для нагрева газов.

На рис. 1 представлена схема плазмотрона, режим работы которого изучали в процессе экспериментов. В плазмотроне предусмотрена вихревая подача газа (аргона) как через центральный осевой канал катода, так и через боковой завихритель, расположенный между катодом и соплом–анодом. В торец медного водоохлаждаемого катода впаяны вольфрамовые вставки, в том числе и на поверхности его осевого канала. В условиях эксперимента газ в плазмотрон подавали под давлением до  $5 \cdot 10^5$  Па, а ток дуги регулировали в диапазоне 200...500 А.

Как уже отмечалось, на устойчивость дуги существенное влияние оказывает скорость газового потока. К сожалению, в условиях эксперимента на работающем плазмотроне измерить ее не представ-

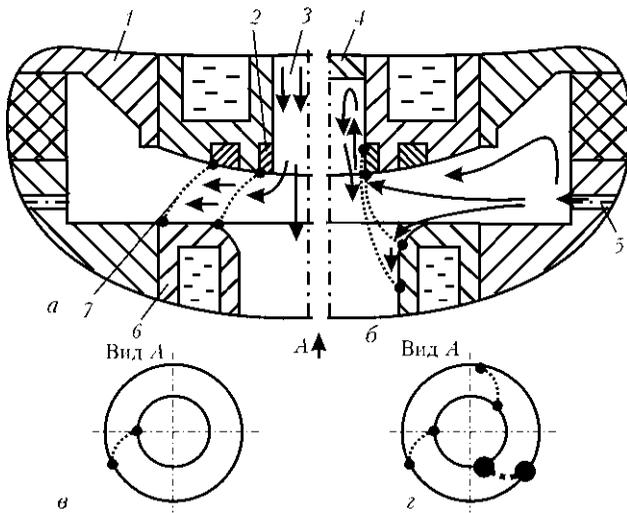


Рис. 1. Схема экспериментального плазматрона (стрелками показаны направления газовых потоков): 1 – катод; 2 – катодная вставка; 3 – осевой канал катода; 4 – заглушка; 5 – канал бокового завихрителя; 6 – сопло-анод; 7 – дуга; а – движение газовых потоков и расположение дуги при подаче газа через осевой канал; б – то же, при подаче газа через боковой завихритель; в – вид А; з – вид А при формировании нескольких дуг

лялось возможным. Однако можно утверждать, что до критических значений она зависит от давления газа, подаваемого в плазматрон. Поэтому в экспериментах регулировали и фиксировали давление, с его увеличением возрастала скорость газового потока.

Подача газа только через осевой канал катода не обеспечивает устойчивую работу плазматрона. Дуга, как правило, привязывалась к горизонтальной площадке анода, что вызывало быстрый износ последнего и даже прогар стенки. Вихревой газовый поток, выходящий из катода, под действием центробежных сил резко расширялся, что приводило к выносу за пределы осевых каналов как катодного, так и анодного пятен, перемещению их по соответствующим рабочим поверхностям. Из-за потери давления вихревой газовый поток уже не может обеспечить необходимое вращение (рис. 1, а).

Подача газа через завихритель, расположенный в межэлектродной области плазматрона, позволила перемещать анодный участок дуги с горизонтальной на цилиндрическую поверхность осевого канала сопла (рис. 1, б). Необходимо отметить, что при этом осевой канал катода был заглушен. В ходе исследований установлено, что устойчивость горения электрической дуги и режим работы плазматрона при подаче газа только через боковой завихритель зависит от соотношения значений токовой нагрузки и давления подаваемого в плазматрон газа.

На рис. 2 показана область устойчивого горения дуги, полученная в условиях эксперимента. К сожалению, в экспериментах не удалось зафиксировать начало вращения анодного участка дуги. Можно только предполагать, что скорость вращения анодного участка дуги увеличивается с повышением давления вихревого потока. Нижняя кривая соответствует условиям, когда катодное пятно дуги начинает время от времени срываться с места привязки

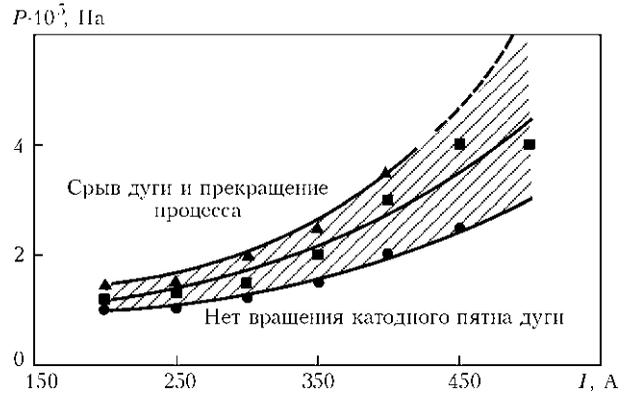


Рис. 2. Область устойчивого горения дуги

и занимать новое положение. По мере повышения давления вихревого потока такие срывы происходят чаще, затем можно зафиксировать и вращение катодного участка дуги – пятно становится практически не различимым, размытым.

Дальнейшее повышение давления вихревого потока приводит к обрыву дуги. Как видно из рис. 2, чем меньше уровень тока дуги, тем уже область ее устойчивого горения. Так, при токе 250 А обрыв дуги происходит уже при давлении подаваемого в плазматрон газа  $1,5 \dots 1,7 \cdot 10^5$  Па, в то время как для тока дуги, например 400 А, это значение составляет уже  $3,5 \cdot 10^5$  Па.

Вращение столба электрической дуги под действием вихревого потока газа начинается с перемещения анодного пятна дуги на цилиндрическую поверхность осевого канала сопла плазматрона. При этом плотность тока в анодном пятне, по всей видимости, снижается, участок анодной привязки с повышением давления потока газа становится все более размытым и менее заметным. Дуга изгибается в направлении газового потока и растягивается (рис. 1, б, в), о чем свидетельствует повышение напряжения (рис. 3). Увеличение давления вихревого газового потока может приводить к формированию нескольких отдельных дуг. В ходе эксперимента отмечалось два, а иногда даже три, катодных пятна привязки дуги (рис. 1, з).

Одновременная подача газа (через боковой завихритель и центральный осевой канал катода) в камеру плазматрона при закрутке указанных потоков в одном направлении, вероятно, должна способствовать более интенсивному вращению катодного пятна и, следовательно, сужению области устойчивого горения дуги. Для оценки совместного влияния указанных вихревых потоков при их разнонаправ-

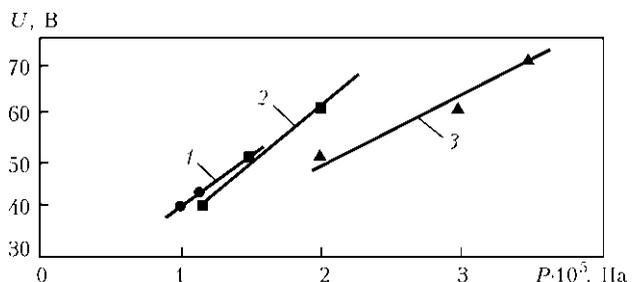


Рис. 3. Зависимость напряжения от давления подаваемого в плазматрон газа при токе, А: 1 – 200; 2 – 300; 3 – 400

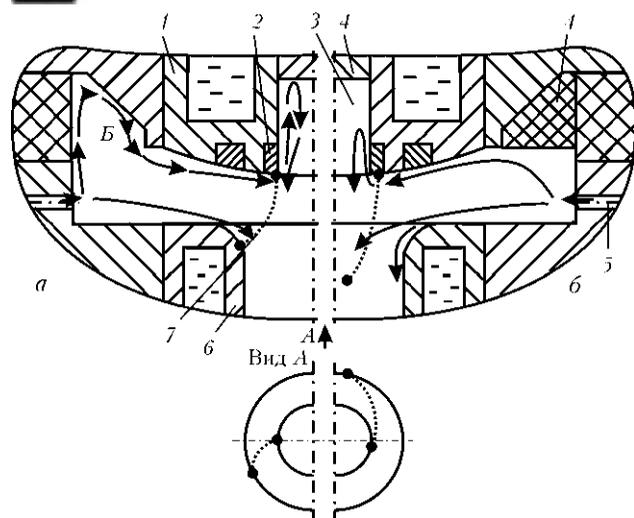


Рис. 4. Схема газовых потоков при наличии (а) и отсутствии (б) полости между боковым завихрителем и держателем катода; обозначения поз. 1–7 см. на рис. 1

ленной подаче боковой поток закручивали в одном направлении, а осевой — в противоположном.

Такой способ подачи газа несмотря на парадоксальность влияния двух встречных вихревых потоков привел к заметному расширению области устойчивого горения дуги. В ходе эксперимента давление бокового вихревого потока изменяли в пределах  $(2,0...5,0) \cdot 10^5$ , осевого —  $(1,0...2,5) \cdot 10^5$  Па. Дуга устойчиво горела во всем указанном диапазоне. При повышении давления бокового вихревого потока напряжение на дуге увеличивается, а осевого вихревого потока — уменьшается. Это дает возможность регулировать уровень напряжения на дуге от 40 до 70 В.

Необходимо отметить, что конфигурация камеры плазматрона, форма и размеры ее внутренней поверхности, по которой распространяются вихревые потоки газа, может оказывать определенное влияние на стабильность дугового разряда. Данные о стабильности горения электрической дуги, представленные на рис. 2, а, получены в условиях, когда в камере плазматрона поверхностями бокового завихрителя и держателя катода образована кольцевая область Б (рис. 4, а), которая аналогично полю электроду плазматрона [4] способствует формированию двух вихревых потоков. Поток газа, выходящий из канала, в соответствии с направлением

закрутки распространяется вдоль стенки завихрителя в направлении как катода, так и анода. Направленный к аноду вихревой поток вызывает перемещение анодного участка привязки дуги на поверхность осевого канала сопла плазматрона. Вихревой поток, направленный к катоду, распространяется вверх, в имеющуюся свободную область Б, отражается от держателя катода и распространяется вдоль него, воздействуя на катодный участок столба электрической дуги.

Наличие области Б, а следовательно, и отраженного от держателя катода нисходящего вихревого потока приводит при повышении давления газа сверх определенного значения к обрыву дуги. Использование специальной заглушки, закрывающей указанную область Б (рис. 4, б), способствовало более стабильной работе плазматрона. Дуга горела даже при повышении давления подаваемого в камеру газа вплоть до  $5 \cdot 10^5$  Па. При этом для малых значений токовой нагрузки (200...250 А) удалось существенно увеличить длину дуги — напряжение достигало 140 В (подача газа только через боковой завихритель).

Таким образом, влияние конфигурации камеры плазматрона с вихревой подачей плазмообразующего газа на характер и стабильность горения дуги еще недостаточно изучено, необходимы дополнительные исследования. Кроме того, представляет определенный интерес сравнение работы плазматрона в условиях однонаправленного и встречного вращений бокового и катодного вихревых потоков. Продолжение исследований позволит определить конструктивные параметры плазматрона косвенного действия, обеспечивающие его стабильную и эффективную работу.

1. Даутов Г. Ю., Дзюба В.Л., Карп И. Н. Плазматроны со стабилизированными электрическими дугами. — Киев: Наук. думка, 1984. — 167 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 712 с.
3. Меркулов В. В. Исследование тепловых и электрических характеристик плазматрона с самоустанавливающейся длиной дуги: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2011. — 20 с.
4. Вихревой эффект и газодинамика в полом электроде плазматрона / К. А. Цыкуленко, В. А. Шаповалов, В. В. Степаненко, Д. М. Жиров // Современ. электрометаллургия. — 2013. — № 4. — С. 47–53.

To determine the region of a steady operation of the indirect-action plasmatron, the arc behavior in plasmatron with a turbulence supply of plasma-forming gas at adjustment of arc current, pressure and direction of gas supply was investigated. It was found that the gas supply only through an axial channel of cathode cannot provide the stable operation of the plasmatron due to arc binding to horizontal area of anode, thus leading to a quick wear of the latter. Gas supply to a turbulator, arranged in the interelectrode region of the plasmatron, allows moving the arc anodic spot from horizontal to cylindrical surface of the nozzle axial channel and providing the rotation of arc anodic end, while at increase in pressure — the rotation of the arc cathode end. Region of stable arc burning in current-pressure of supplied gas coordinates was obtained. Simultaneous supply of gas through a lateral turbulator and central axial channel at opposite directions of turbulence flows promotes the increase in region of a stable arc burning. It is shown that the configuration of the plasmatron chamber influences greatly the stability of the arc discharge. The further investigations in this direction will make it possible to determine the design parameters of the direct-action plasmatron, providing its stable and effective operation. 4 Ref., 4 Figures.

**Key words:** indirect-action plasmatron; turbulence gas supply; stability of arc discharge; operation mode; arc binding; plasmatron gas flow dynamics

Поступила 24.04.2014