УДК 621.387.143

-

Повышение эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов

К.А. Корсунов, Р.Н. Брожко

Рассмотрены подходы, позволяющие повысить эффективность электродуговых плазмотронов для физико-технической обработки материалов: напылении, наплавки, резки, строжке и др. Показано, что повышение ресурса работы электродной системы плазмотронов и теплового КПД достигается за счет профилирования разрядного канала, стабилизации прикатодного участка и локализации катодного пятна дуги, организации работы плазмотрона с расщепленной дугой, создания условий для образования диффузной привязки дуги.

PACS: 52.75.Hn

Ключевые слова: электрическая дуга, плазмотрон, расщепление дуги, диффузная привязка, профилирование канала.

Введение

В современном производстве широкое применение получили процессы обработки материалов, основанные на применении потоков электродуговой плазмы: плазменная резка, напыление, наплавка, строжка и др. Большим преимуществом этих методов является их широкая универсальность по составу покрытий (от пластмасс до самых тугоплавких металлов, оксидов, карбидов) и основы обрабатываемой детали (металлы, керамика, бетон, пластмасса, дерево и др.). Одним из главных слагаемых успеха практического применения плазменных технологий в производстве является создание надежного высокопроизводительного оборудования. В то же время, несмотря на большую гамму разработанных как отечественными, так и зарубежными производителями плазменного оборудования для обработки материалов, по-прежнему актуальной задачей остается повышение высокоэффективных электродуговых плазмотронов. В дальнейшем под эффективностью будем понимать как энергетические параметры, которые характеризуются тепловым КПД плазмотрона, эффективным КПД нагрева или промышленным КПД, так и другие показатели, например, ресурс работы и мощность плазмотрона, температуру и массовый расход нагреваемого газа, характер распределения теплового потока по пятну нагрева и др.

Корсунов Константин Анатольевич, зав. кафедрой. Брожко Ростислав Николаевич, аспирант. Восточноукраинский национальный университет. Украина, 91043, г. Луганск, кв. Молодежный, 20-а Тел.: (0642)-50-08-29. E-mail: korsunof@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 января 2013 г.

© Корсунов К.А., Брожко Р.Н., 2013

Целью работы является анализ известных и поиск новых подходов к повышению эффективности работы электродуговых плазмотронов для обработки материалов. Учитывая, что в последнее время в различных технологических процессах часто применяются потоки воздушной электродуговой плазмы, то рассмотрим как известные, так и полученные авторами результаты исследований по повышению эффективности электродуговых плазмотронов для нагрева воздуха.

Конструкции плазмотронов для нагрева воздуха

В большинстве технологических процессов обработки материалов чаще всего применяют электродуговые линейные плазмотроны, которые по сравнению с плазмотронами других схем обладают простотой конструкции, сравнительно большим ресурсом работы электродов, возможностью регулирования мощности разряда не только изменением силы тока дуги, но и за счет изменения напряжения на дуге. В зависимости от схемы включения в плазмотронах может использоваться дуга прямого действия, горящая между электродом и обрабатываемым изделием, или косвенная дуга, замыкающаяся внутри плазмотрона на выходной электрод. Классификация электродуговых плазмотронов, построенная на основе взаимодействия дуги и обдувающего ее потока газа с учетом геометрии электродных узлов и разрядного канала, достаточно подробно приведена в [1, 2 и др.]. Такие плазмотроны содержат последовательно установленные катодный и анодный узлы, разделенные камерой подачи плазмообразующего газа. Если в качестве плазмообразующего газа применяется воздух, то, как правило, катодный узел содержит стержневой термохимический катод из циркония или гафния, запрессованный заподлицо в катододержатель. Это позволяет значительно упростить конструкцию плазмотрона, но и накладывает определенные ограничения. Во-первых, термохимические катоды работают в режиме с расплавленной рабочей поверхностью под опорным пятном дуги, на которой образуются оксонитридная пленка, играющая роль эмиттеров электронов, но такой режим работы ограничивает силу тока дуги до величин 350-450 А. Во-вторых, термохимические катоды имеют большую пусковую эрозию, которая обусловлена тем, что при выключении плазмотрона расплавленная поверхность кратера катода охлаждается и кристаллизуется, а при повторном запуске за счет теплового удара поверхность кратера растрескивается, происходит сильный осколочный, а затем и капельный унос материала при последующем плавлении поверхности кратера. После разогрева термохимического катода и образования зоны расплава на поверхности кратера эрозия материала снижается до обычной величины (порядка 10-10 кг/Кл). Из-за большой пусковой эрозии термохимических катодов ресурс работы плазмотронов, работающих в режиме кратковременного включения, снижается до 7-8 часов, поэтому конструкции многих промышленных плазмотронов оптимизированы для быстрой замены вышедших из строя катодных узлов. Проблему пусковой эрозии можно решить за счет предварительного прогрева термохимического катода от независимого источника энергии, но такой подход не получил распространения в производственных условиях. К другим недостаткам плазмотронов такой конструкции, применяемых, например, в процессах нанесения покрытий, следует отнести относительно невысокий уровень напряжения (30-100 В в зависимости от рода плазмообразующего газа) и недостаточную протяженность зоны взаимодействия плазменного потока с нагреваемыми частицами, в связи с чем для получения необходимой мощности для качественного прогрева частиц необходимо повышать силу тока до 500-600 А и более. При этом ресурс работы электродов (как катода, так и анода) с ростом тока значительно уменьшается. Нарушение в процессе эксплуатации плазмотрона конфигурации выходного электрода (сопла) также отрицательно сказывается на параметрах генерируемой плазменной струи и на качестве получаемого продукта.

Применение межэлектродных вставок

Частичное решение указанных проблем достигается при использовании плазмотронов с межэлектродными вставками (МЭВ). Наличие МЭВ способствует повышению напряжения на дуге, что дает возможность вложить большую мощность и получать более высокую температуру плазменной струи при одинаковых значениях силы тока, расхода и давления нагреваемого газа. Кроме того, снижаются крупномасштабные пульсации тока, напряжения и параметров плазменной струи [2, 3 и др.]. Известен ряд разработок плазмотронов с МЭВ, например, плазмотроны, разработанные в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, Институте теплофизики СО РАН, Институте газа НАНУ и др. Конструктивно МЭВ может выполняться либо в виде удлиненной одиночной секции, либо состоящей из нескольких электроизолированных секций. Секционированная МЭВ в сочетании с распределенной подачей газа позволяет повысить эффективность нагрева газа (т.е. тепловой КПД плазмотрона) и дает возможность дополнительно управлять свойствами плазменной струи [2-4]. Эффективным способом воздействия на свойства дуговой плазмы и характеристики плазмотрона является профилирование разрядного канала. Так, сужение канала в направлении течения газа приводит к повышению энтальпии дуговой плазмы на выходе из сопла плазмотрона, перераспределению напряженности электрического поля и локального теплообмена по длине канала. К преимуществам плазмотронов с расширяющимся каналом относятся снижение теплового потока на наиболее теплонапряженном - конечном участке канала и высокие значения местного КПД нагрева газа. Ряд конструкций плазмотронов со сложной геометрией разрядного канала был разработан в Институте газа НАНУ [5, 6]. Одна из конструкций плазмотронов имеет разрядный канал, цилиндрическая часть которого переходит в диффузор с углом при вершине 13-14°. Диффузор заканчивается ступенчатым расширением, после чего канала сужается. Такая сложная геометрия разрядного канала способствует формированию восходящей вольт-амперной характеристики и диффузной привязки дуги на аноде. В другой конструкции плазмотрона в разрядном канале за уступом располагается участок большего диаметра с ребристой поверхностью, на которой осуществляется разрушение вихревого течения газа и, как следствие, происходит изменение характера теплообмена, что способствует повышению теплового КПД. Еще в одной конструкции повышение энтальпии дуговой плазмы, снижение уровня турбулентности и аэродинамического шума достигается за счет сброса пристеночного не прогретого в дуге газа с большой окружной скоростью в атмосферу из прианодного участка канала большего диаметра [6].

Стабилизация прикатодной области дуги

Пожалуй, впервые в работах [7, 8] было показано, что в плазмотронах с термохимическими катодами пространственная стабилизация прикатодной области дуги существенно зависит от величины диаметров катода d_{ι} и прикатодного участка разрядного канала d₁. При больших диаметрах d_{L} опорное пятно дуги испытывает радиальные перемещения, в результате чего кратер на поверхности катода образуется неправильной формы, больших размеров, а тепловой поток и эрозия материала катода резко возрастают. Следовательно, для локализации прикатодной области дуги вблизи геометрической оси разрядного канала, снижения теплового потока через катод и его эрозии необходимо, чтобы диаметры d_{i} и d_{j} были связаны соотношениями, проверенным для силы тока в диапазоне 50 $\leq I \leq 300 \text{A}$ [7]:

$$d_k = a + bI, \tag{1}$$

$$d_k = 1, 2d_l, \tag{2}$$

где $a = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 1,25 \cdot 10^{-5}$ м/А.

Проведенные нами под руководством проф. Дзюбы В.Л. исследования показали, что тепловые и эрозионные характеристики термохимических катодов с учетом зависимостей (1) и (2) и профилирования разрядного канала можно значительно улучшить (см. таблицу). Опыты проводились на линейном плазмотроне, содержащем последовательно установленные катодный узел с термохимическим катодом из циркония, секционированную МЭВ и анодный узел. Разрядный канал плазмотрона выполнялся цилиндрическим с диаметром $d_1 = 5 \cdot 10 - 3$ м, а также ступенчато расширяющимся от $5 \cdot 10 - 3$ м до $8, 5 \cdot 10 - 3$ м. Как видно из данных таблицы, тепловые потоки Q_k в катод можно значительно уменьшить путем профили-

рования (расширения в направлении течения газа) разрядного канала, при этом обнаруживается такая закономерность, что минимальным тепловым потокам через катод соответствуют также минимальные значения удельной эрозии. Кроме того, было установлено, что величина теплового потока Q_k растет с ростом кратера в циркониевом катоде. При силе тока 140 А кратер катода растет со скоростью около 10⁻⁷ мс⁻¹, а величина скорости его эрозии составляет порядка (0,4-2)·10⁻¹⁰ кгс⁻¹А⁻¹.

Расщепление приэлектродных участков дуги

Повышение ресурса работы плазмотронов с термохимическим катодом может быть достигнуто за счет расщепления прикатодного участка дуги. Так как для термохимических катодов удельная эрозия экспоненциально растет с повышением силы тока, т.е. $\overline{G} \sim \exp(kI)$, то при расщеплении катодной области дуги на несколько участков суммарное значение удельной эрозии $\overline{G} = \sum_{i} \overline{G_i} \sim \sum_{i} \exp(kI_i)$ значительно меньше величины удельной эрозии в случае протекания всего тока через один катод.

Существует несколько различных подходов к созданию плазмотронов с расщепленными дугами, некоторые из них рассмотрены в работах [2, 9, 10]. Для плазмотронов с термохимическими катодами наиболее целесообразным является установка нескольких катодов в одном катододержателе, при этом все катоды находятся под одним потенциалом. Механизм расщепления дуги в этом случае практически не известен из-за трудности проведения экспериментальных исследований, но выполненные в Институте теплофизики СО РАН исследования [1, 9] позволяют сделать несколько выводов. Во-первых, было установлено, что процесс расщепления дуги носит ярко выраженный пороговый характер, т.е. расщепление одного прикатодного участка дуги на два с образованием двух опорных пятен дуги происходит при достижении Таблица

Схема разрядного канала	Время непрерывной работы, ч	Тепловой поток Q _k , Вт	Глубина кратера, 10 ⁻³ м	Диаметр углубления, 10 ^{-з} м	Удельная эрозия, Ψ, 10 ⁻¹⁰ кг/Кл
цилиндрический, $d_K = d_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	1,0	620	2,9	5,1	1,12
цилиндрический, $d_k = 1,2d_1$	1,1	540	1,45	3,6	0,96
ступенчато расширяющийся	1,3	190	0,65	3,2	0,49

Тепловые и эрозионные характеристики термохимического катода

Примечание. Все опыты проводились при силе тока I = 140 A и расходе воздуха $G = 0.8 \cdot 10-3$ кг/с.

силы тока определенного критического значения *І*_{кл}. Дальнейшее деление прикатодного участка на три – при достижении критического тока I_{kn2} и т.д. Величины критических значений силы тока *I*_{*kp*1}, *I*_{*kp*2}, ... зависят от множества факторов, таких как геометрия прикатодной области плазмотрона и особенности расположения термохимических вставок, характер течения газа в прикатодной области, особенности ввода газа в разрядный канал и др. Поэтому определение критических значений токов возможно только экспериментальным путем для конкретной конструкции плазмотрона. Во-вторых, с точностью до 10% экспериментальные данные показали равенство токов через расщепленные участки дуги. Следовательно, идентичными будут и вольт-амперные характеристики расщепленных участков. В-третьих, при образовании расщепленных участков напряжение на каждом из них снижается на некоторую величину ΔU_{ν} , т.е. режим с расщепленной дугой является более устойчив с физической точки зрения, так как в этом случае выделяется меньшая мощность:

$$IU_k > \sum_{i=1}^N I_i (U_k - \Delta U_k),$$

где $I = \sum_{i=1}^{N} I_i$, N – число расщепленных прика-

тодных участков дуги (N > 1).

В данном случае, пожалуй, мы сталкивается со своего рода проявлением принципа минимума энергии, который был сформулирован еще Штеенбеком при создании каналовой модели дуги.

Один из вариантов катодного узла с несколькими термохимическими вставками был исследован авторами. На рис. 1 показан катодный узел лабораторного плазмотрона, в котором для расщепления катодного пятна дуги установлены пять термохимических вставок диаметром 2·10⁻³ м каждая, которые запрессованы в отверстия на торцевой поверхности медного катододержателя. Экспери-



Рис. 1. Внешний вид катодного узла лабораторного плазмотрона с пятью термохимическими катодными вставками

ментально было установлено, что расщепление дуги на два участка наблюдалось при силе тока более 280 А. Другое конструктивное решение было предложено в работе [10] и отличается тем, что в катододержателе помимо центральной термохимической вставки диаметром 2,5·10⁻³ м установлены еще три радиальные вставки диаметром 1,6·10⁻³ м через 120°.

Диффузная привязка дуги к аноду

Основное преимущество диффузной привязки дуги к аноду заключается в распределении тепловой нагрузки на большую поверхность разрядного канала, что приводит к снижению скорости эрозии материала анода и повышению его ресурса работы. Кроме того, в этом случае значительно улучшаются условия взаимодействия плазменного потока и обрабатываемого материла, снижаются пульсации параметров плазменной струи, происходит формирование восходящего участка вольт-амперной характеристики и повышается мощность разряда. Несмотря на ряд работ, посвященных исследованию диффузной привязки дуги, многое в механизме формирования и функционирования диффузной привязки дуги остается неясным. По мнению авторов, переходу от контрагированной к диффузной привязки дуги способствует разрушение структуры холодного пристеночного потока газа, что приводит к выравниванию полей скоростей, концентраций и температур и обусловливает одновременное развитие нескольких шунтирующих каналов, формирующих протяженную зону контакта дуги с анодом. Исходя из этого предположения авторами был исследован плазмотрон (рис. 2), на рабочей поверхности разрядного канала анода которого были выполнены продольные выемки (канавки).

Анализ осциллограмм переменной составляющей напряжения на дуге (рис. 3) позволил вы-



Рис. 2. Внешний вид плазмотрона, содержащий анод с продольными выемками на рабочей поверхности разрядного канала

явить разные режимы работы плазмотрона. Так, при силе тока дуги I = 130 A (рис. 3, а) размах колебаний напряжения, обусловленных крупномасштабным шунтированием дуги, составляет порядка 30 % от его среднего значения. При возрастании силы тока до I = 170 А характер осциллограмм меняется (рис. 3, б): размах колебаний за счет крупномасштабного шунтирования снижается до 15 %, и на осциллограмме регистрируются пульсации источника питания, что свидетельствует о устойчивом характере зоны привязки дуги к аноду. Для сравнения на рис. 3, в приведена осциллограмма холостого хода источника питания типа ТЕ-4, который применялся в данных исследованиях. Таким образом, можно полагать, что при силе тока I >160 А начинается перестройка прианодных процессов, приводящая к появлению диффузной зоны контакта дуги с анодом.



Рис. 3. Экспериментальные результаты: а – осциллограмма переменной составляющей напряжения на дуге при силе тока дуги I = 130 А, масштаб горизонтальной развертки 2·10⁻³ с/дел; б – осциллограмма переменной составляющей напряжения на дуге при силе тока дуги I = 170 А, масштаб горизонтальной развертки 2·10⁻³ с/дел; в – осциллограмма переменной составляющей напряжения холостого хода источника питания, масштаб горизонтальной развертки 1·10⁻³ с/дел Рассмотренные результаты исследований электродуговых технологических плазмотронов для обработки материалов, использующих в качестве плазмообразующей среды воздух и другие кислородсодержащие газы, показывают перспективность следующих подходов к повышению эффективности их работы:

- применение межэлектродных вставок с распределенной подачей газа в разрядный канал;

 профилирования разрядного канала плазмотрона;

 стабилизация прикатодного участка и локализации катодного пятна дуги путем правильного выбора геометрических размеров катода и прикатодного участка разрядного канала;

 организации работы плазмотрона в режиме с расщепленной дугой,

- создания условий для образования диффузной привязки дуги к электродам.

Литература

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975.

2. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отдел. РАН, 1999.

3. Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Засыпкин И.М. и др. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками. – Новосибирск: Наука. Сиб. отдел. РАН, 1981.

4. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. – К.: Наук. думка, 1984.

5. *Петров С.В., Карп И.Н.* Плазменное газовоздушное напыление. – К.: Наук. думка, 1993.

6. *Петров С.В., Сааков А.Г.* Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. – К.: ТОПАС, 2000.

7. Дзюба В.Л., Шавалиев Х.М., Мазурайтис И.С. // Спец. электрометаллургия. 1977. № 33. С. 104

8. Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Мазурайтис И.С., Шавалиев Х.М. // Физика и химия обработки материалов. 1986. № 6. С. 53

9. Новиков В.Я., Тамкиви П.И., Тимошевский А.Н. и др. Многодуговые системы. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988.

10. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 685

Improving the efficiency of electric arc plasmatrons for materials processing

K.A. Korsunov and R. N. Brozhko

East-Ukrainian National University 20-a Molodezhny ward, Lugansk, 91043, Ukraine E-mail: korsunof@mail.ru

The approaches that improve the efficiency of electric arc plasmatrons for materials processing: spraying, welding, cutting, gouging, etc. It is shown that an increase in the service life of the electrode system of plasmatron and thermal efficiency is achieved by profiling the discharge channel, stabilizing the cathode area and location of the cathode arc spot, the organization of the plasmatron with a split arc, creating the conditions for the formation of a diffuse attachment of the arc.

PACS: 52.75.Hn *Keywords:* electric arc, plasmatron, arc splitting, diffuse binding, shaping the channel

Bibliography – 10 references

Received January 25, 2013