



## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ ВОЗДУШНОГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ПАРАМЕТРЫ СТРУИ ПЛАЗМОТРОНА

**В. Н. ПАЩЕНКО**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Исследована возможность управления энергетическими параметрами плазмотронов с комбинированным подводом энергии. Показано, что путем изменения содержания углеводородного компонента в исходной плазмообразующей смеси в процессе работы можно менять в достаточно широких пределах абсолютное значение мощности плазмотрона и его удельные энергетические параметры, а также влиять на окислительно-восстановительный потенциал рабочего тела и условия работы электродов. Предложено несколько возможных режимов эксплуатации плазмотронов с углеводородным компонентом в исходной плазмообразующей смеси, которые позволяют в рамках одной неизменной конструкции менять условия проведения технологического процесса.

*Ключевые слова:* нанесение покрытий, поверхностная обработка, плазмотроны, комбинированный подвод энергии, управление мощностью плазмотрона, окислительно-восстановительный потенциал среды

Плазменные источники тепла (плазмотроны) широко используются в процессах инженерии поверхности для нанесения покрытий и поверхностной обработки изделий с целью управления свойствами поверхностного слоя и восстановления исходных геометрических размеров изношенных деталей.

Наибольшее распространение получили дуговые плазмотроны. В процессе взаимодействия с потоком омывающего дугу газа дуговой электрический разряд отдает газу часть своей энергии, достаточную для перевода вещества в состояние низкотемпературной плазмы. Традиционно используются нейтральные и инертные плазмообразующие газы и их смеси с газовыми компонентами, повышающими общий уровень энтальпии плазменного потока.

В Институте газа НАН Украины в 1960-х годах были начаты работы по созданию нагревательных устройств с использованием электроусиления пламени — электрогазовых горелок, а впоследствии дуговых плазмотронов, работающих на горючих смесях воздуха с углеводородными газами (газовоздушных смесях). Использование смесей воздуха с углеводородными газами (метаном, пропан-бутаном, природным газом) позволяет управлять окислительно-восстановительным потенциалом среды, в которой осуществляется обработка материала, и вносить дополнительную энергию с горючим компонентом плазмообразующего газа.

Отмеченная характерная особенность плазменных потоков, которые генерируются из смесей воздуха с углеводородными газами, выгодно от-

личает плазменные процессы обработки материалов и поверхностей изделий от традиционных процессов, реализуемых с использованием инертных и нейтральных газов.

Плазменные струи газозвуковых плазмотронов за счет выделения тепла при догорании горючих компонентов ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) высокотемпературного газового потока при подсосе воздуха из окружающей среды имеют более наполненные профили температуры и скорости на всех дистанциях обработки материала. Равномерное распределение упомянутых параметров в рабочем объеме струи позволяет эффективнее использовать исходный материал, активно защищать его от взаимодействия с кислородом подсосываемого воздуха. Напыление газозвуковыми плазмотронами может быть реальной альтернативой сверхзвуковым газопламенным процессам. За счет резкого повышения температурного уровня ведения процесса значительно расширяется номенклатура материалов, из которых формируются покрытия. При этом сохраняются характерная для газопламенных процессов возможность управления окислительно-восстановительным потенциалом среды, в которой осуществляется обработка материала, и высокие значения скорости потока высокотемпературного газа, присущие сверхзвуковым газопламенным процессам.

Плазмотроны, использующие горючие компоненты в составе исходной плазмообразующей газовой смеси, относятся к высокотемпературным источникам нагрева с комбинированным подводом энергии. Общая энергия поступает к рабочему телу (потоку газа) от источника электроэнергии через электромагнитное поле, а также от продуктов сгорания горючего компонента плазмообразующей смеси в виде тепловой энергии.



Процесс передачи электрической энергии определяется значением тока дуги, вольт-амперной характеристикой аппарата, коэффициентом полезного действия и осуществляется в основном в пределах конструкции плазматрона. Доля этой составляющей потока энергии достигает, как правило, 85...95 % и является определяющей в энергетическом балансе рабочего тела.

Наряду с основной составляющей потока энергии формируется и тепловая энергия сгорания. Значительное влияние на обе составляющие энергетического баланса оказывает содержание углеводородного (горючего) компонента исходной плазмообразующей газовой смеси.

Влияние горючего компонента на мощность газоздушных плазматронов исследовано в работах [1–4].

Экспериментально установлена зависимость изменения напряженности электрического поля вдоль столба дуги от содержания углеводородного компонента в исходной плазмообразующей смеси. В формуле обобщенной вольт-амперной характеристики учитывается интегральное влияние содержания углеводорода на напряжение на дуге комплексом вида  $(1 + n)^m$ , где  $n$  — содержание углеводорода в смеси, об. %;  $m$  — эмпирический коэффициент, значение которого в зависимости от конструктивной схемы плазматрона изменяется в пределах 0,530...0,778 [1]. Замечено, что прирост напряжения на дуге зависит от места ввода углеводородного компонента. На этом факте основывается предложенный в работе [4] способ стабилизации напряжения на дуге. В работе [5] проведена количественная оценка влияния углеводородного компонента на интегральное значение напряжения на дуге (в том числе при малом содержании углеводорода).

Однако на сегодня практически отсутствует комплексный анализ влияния углеводородного компонента на энергетические параметры плазменной струи, не сформулированы также основные принципы управления этими параметрами, в том числе с учетом окислительно-восстановительных способностей рабочего тела.

Возможность управления энергетическими параметрами плазматронов путем изменения количества и места ввода углеводородного компонента плазмообразующей смеси исследовали на экспериментальном стенде с использованием в качестве углеводорода природного газа (до 16 об. % или 4...5 об. % пропан-бутана). Исследования проведены на двухэлектродных плазматронах линейной схемы с вихревой пространственной стабилизацией дуги и автогазодинамической стабилизацией ее длины. Установлено [5], что добавление природного газа (метана) в исходный плазмообразующий воздух существенно изменяет условия горения дуги. Это проявляется как в повышении

общего уровня напряжения на дуге, так и в изменении характера распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль дугового канала. Упомянутые эффекты проявляются уже при незначительном (менее 1 об. %) содержании природного газа в исходной плазмообразующей смеси.

На рис. 1 показаны характерные этапы (*I–IV*) изменения напряжения на дуге при увеличении содержания природного газа в плазмообразующей смеси.

На этапе *I* наблюдается резкое (на 10...16 %) увеличение напряжения при переходе от воздуха к смеси с содержанием углеводорода не более 0,2...0,7 об. %.

При повышении содержания углеводорода в смеси до 4...5 об. % (этап *II*) темп возрастания напряжения значительно снижается, а при 5...9 об. % (этап *III*) значение напряжения практически остается постоянным.

Обогащение смеси углеводородом более чем на 10 об. % (этап *IV*) вызывает увеличение напряжения на дуге с монотонностью приблизительно 3 % значения напряжения на каждые 5 об. % углеводорода. Такое резкое увеличение напряжения на дуге при добавке незначительной объемной доли углеводородного компонента может иметь несколько вариантов пояснений [6, 7]. Наиболее вероятным является версия о влиянии на напряженность электрического поля изменения условий горения электрической дуги как следствия радиального распределения компонентов плазмообразующей смеси под действием термодиффузии [6].

Если предположить наличие существенного эффекта в распределении компонентов в дуговом канале в результате термодиффузии при применении газовых смесей системы N–C–O–H, можно

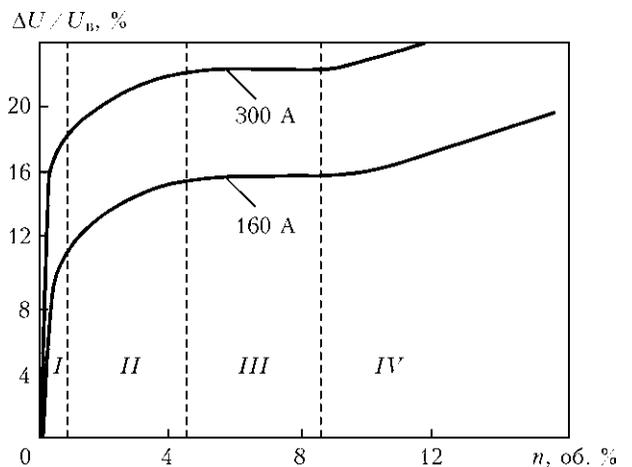


Рис. 1. Зависимость степени повышения напряжения на дуге плазматрона  $\Delta U/U_{в}$  от содержания  $n$  углеводорода в исходной плазмообразующей смеси:  $\Delta U$  — увеличение напряжения на дуге при добавлении горючего компонента по сравнению с его исходным значением на воздухе;  $U_{в}$  — напряжение на дуге при работе на воздухе; *I–IV* — см. в тексте



считать, что при добавлении углеводорода дуга из «азотной» превращается в «водородную». При этом происходит перестройка электропроводной области потока газа: диаметр столба дуги увеличивается, а температура и удельный тепловой поток уменьшаются. Падение электропроводности пристенного слоя газа изменяет условия шунтирования дуги. Имеет место удлинение дуги при прочих неизменных условиях [7].

Таким образом, можно утверждать, что повышение напряжения на дуге при добавлении углеводородного компонента осуществляется двумя путями: прогнозируемым повышением напряженности электрического поля (дуга стала «водородной») и увеличением длины дуги.

Результаты исследования влияния увеличения длины дуги на падение напряжения на ней свидетельствуют о том, что ее удлинение на зафиксированные 20...40 % может способствовать по сравнению с работой на плазмообразующем воздухе повышению интегрального значения напряжения лишь на 4...6 % (с учетом повышения на 20...25 % напряженности электрического поля на основном участке столба дуги). Поэтому установленное опытным путем возрастание напряжения на дуге на 7...25 % при добавлении углеводородного компонента в основном происходит в связи с изменением локальных значений напряженности электрического поля на характерных участках электрической дуги.

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что первым энергетическим режимом эксплуатации плазмотрона с комбинированным подводом энергии может быть режим с добавлением к исходному плазмообразующему воздуху около 1 об. % углеводорода (около 0,3 об. % пропан-бутана). При этом коэффициент расхода окислителя исходной плазмообразующей смеси  $\alpha = 15...20$ , т. е. повышение мощности практически не влияет на окислительно-восстановительный потенциал плазменной струи — струя плазмотрона остается окислительной. Переход на такую плазмообразующую смесь за счет изменения условий существования дугового разряда позволяет скачкообразно повысить напряжение на дуге (а соответственно и мощность плазмотрона) на 8...16 % без увеличения токовой нагрузки на электроды. Углеводородный компонент плазмообразующей среды в данном случае является лишь инструментом управления общей мощностью генератора.

Добавление до 1 об. % углеводорода в плазмообразующую смесь ощутимо не влияет на уровень теплового потока в термохимический катод (в пределах ошибки измерений), хотя условия его работы меняются в связи с изменением химического состава компонентов газовой смеси на приэлектродном участке дуги.

Тепловой поток в выходной электрод возрастает, что связано с удлинением дуги в пределах анода. При этом интенсификация эрозии материала анода в зоне привязки электродного пятна не происходит.

Темпом возрастания мощности плазмотрона в рассматриваемом случае можно управлять, используя раздельную подачу компонентов плазмообразующей смеси или изменив место введения углеводорода в дуговой канал.

Применение плазмотронов с комбинированным подводом энергии для нанесения покрытий из материалов, для которых характерен достаточно высокий коэффициент трудности плавления [8] и которые отличаются чувствительностью к химическому составу той среды, где осуществляется их нагрев и ускорение, целесообразно при повышении содержания углеводородного компонента до значений, близких к стехиометрическому (8...10 об. % метана или  $\alpha = 1$ ). Это второй энергетический режим эксплуатации плазмотрона.

Кроме прогнозируемого возрастания мощности на 16...20 %, в этом случае появляются реальные возможности управления размером активной зоны плазменной струи, ее химическим составом, а также процессом передачи энергии материалу, формирующему покрытие. Например, изменение коэффициента расхода окислителя плазмообразующей смеси от  $\alpha = \infty$  (воздух) до 1 приводит к увеличению энтальпии на продольной оси струи плазмы на расстоянии (дистанции)  $L = 50...200$  мм от среза сопла плазмотрона на 3...8 %, а при  $L < 40$  мм — на 20...25 % (рис. 2). Одновременно происходит повышение температуры плазменной струи, при  $L = 50...130$  мм оно составляет 8...10 % исходной (на воздухе).

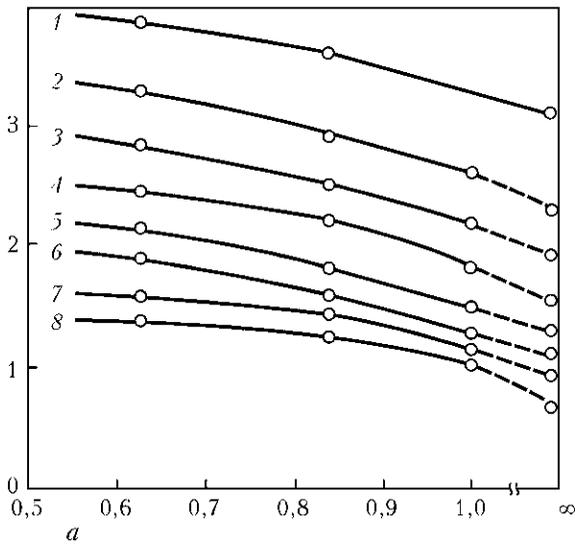
Соотношение горючего и окислительного компонентов исходной плазмообразующей смеси, близкое к стехиометрическому значению, позволяет несколько снизить содержание кислорода в активной зоне плазменной струи (зоне нагрева напыляемого материала). Однако содержание восстановительных компонентов в потоке высокотемпературного газа явно недостаточно для защиты напыляемого материала от кислорода, который подсасывается из окружающей среды (рис. 3).

Переход от плазмообразующего воздуха к его смеси с углеводородом с приблизительно стехиометрическим соотношением между компонентами изменяет условия работы электродов плазмотрона. Так, на 6...7 % повышается абсолютное значение теплового потока в термохимический катод, что при недостаточном охлаждении может привести к увеличению его эрозии.

Напротив, условия работы анода становятся более благоприятными в плане эрозии вследствие существенного замедления процесса окисления меди в зоне привязки опорного пятна дуги. По



$T \cdot 10^{-3}, \text{K}$



$H \cdot 10^{-3}, \text{кДж/кг}$

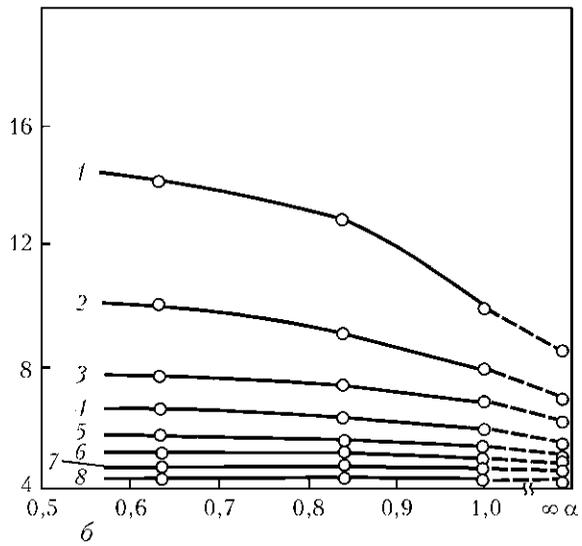


Рис. 2. Зависимость температуры  $T$  (а) и энтальпии  $H$  (б) от коэффициента  $\alpha$  расхода окислителя плазмообразующей смеси на продольной оси струи плазмы (ток  $I = 200 \text{ A}$ ; расход плазмообразующей смеси  $Q = 6,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; мощность плазмотрона  $P = 24 \text{ кВт}$ ) на дистанциях  $L = 40$  (1),  $60$  (2),  $80$  (3),  $100$  (4),  $120$  (5),  $140$  (6),  $160$  (7),  $180$  (8) мм

$T \cdot 10^{-3}, \text{K}$

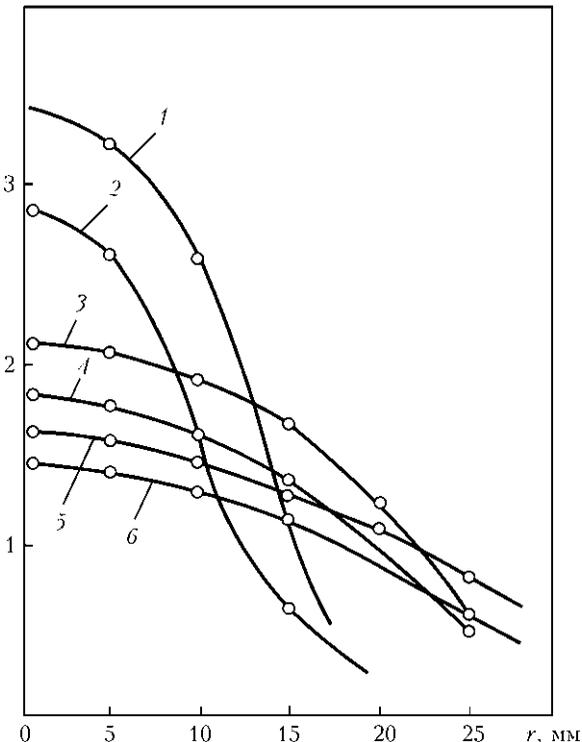


Рис. 3. Распределение температуры в поперечном сечении струи плазмы при изменении состава плазмообразующей смеси и дистанции  $L = 50, 100$  и  $150 \text{ мм}$  ( $I = 200 \text{ A}$ ;  $Q = 6,25 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $P = 24 \text{ кВт}$ ): 1, 3, 5 —  $\alpha = 0,63$ ; 2, 4, 6 —  $\alpha = 1$ ;  $r$  — расстояние от продольной оси струи плазмы до исследуемой точки

мнению авторов работы [4], это способствует также изменению характера привязки дуги на аноде, когда значительная часть тока замыкается через диффузный разряд.

Дальнейшее повышение содержания углеводорода в смеси (богатые смеси) приводит к повышению общего уровня энтальпии (третий характерный энергетический режим эксплуатации плазменного нагревателя). Изменение значения коэффициента расхода окислителя от 1,00 до 0,63 приводит к увеличению энтальпии на дистанции от 50 до 200 мм на 8...10 %, а при  $L \leq 40 \text{ мм}$  — на 30...40 % (рис. 2).

На этом этапе значительно (на 30...40 % исходного значения) повышается температура плазменной струи на дистанции 50...130 мм, что можно объяснить дополнительным тепловыделением при сгорании компонентов смеси при подсосе кислорода из окружающей среды.

Несмотря на более низкую расчетную среднемассовую температуру плазмы на срезе сопла плазмотрона для газовых смесей с большим содержанием углеводорода характерно повышение значений локальной температуры энтальпии в поперечном сечении струи (рис. 3) на дистанции от 3...5 калибров выходного диаметра сопла до 20...25 калибров.

При повышении содержания углеводорода скорость плазменной струи возрастает в связи с увеличением объема продуктов диссоциации исходной смеси. Увеличение скорости сохраняется на всех дистанциях обработки материала (рис. 4).

Таким образом, вследствие перехода от сложной смеси негорючих молекулярных газов (воздушной плазменной струи) к смеси с горючим компонентом увеличивается активная зона струи плазмы, в которой возможно увеличение нагрева и ускорение движения дисперсного материала в 1,5...2,0 раза, а ее объема — в 4...5 раз.

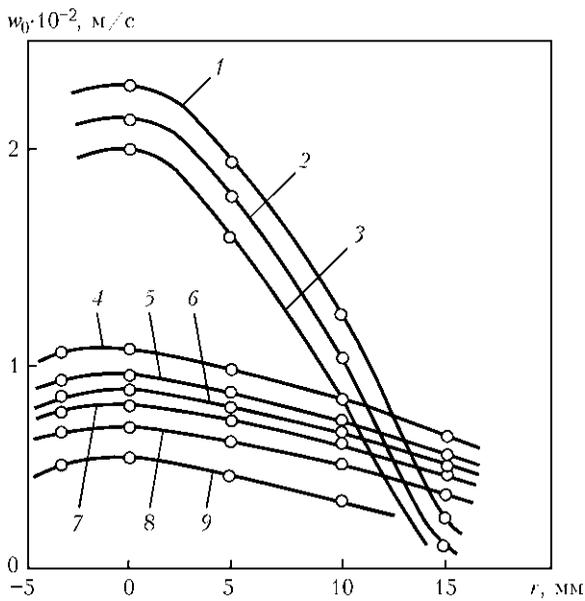


Рис. 4. Поперечный профиль скорости  $w_0$  плазмы: 1 —  $L = 50$  мм,  $\alpha = 0,63$ ; 2 —  $L = 50$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 3 —  $L = 50$  мм,  $\alpha = \infty$ ; 4 —  $L = 100$  мм,  $\alpha = 0,63$ ; 5 —  $L = 100$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 6 —  $L = 100$  мм,  $\alpha = \infty$ ; 7 —  $L = 150$  мм,  $\alpha = 0,63$ ; 8 —  $L = 150$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 9 —  $L = 150$  мм,  $\alpha = \infty$

Наряду с повышением энергетических характеристик плазменной струи богатая смесь углеводорода с воздухом позволяет оперативно в процессе нанесения покрытия изменять окислительно-восстановительный потенциал среды, в которой обрабатывается дисперсный материал. Это становится возможным за счет значительного увеличения содержания восстановительных компонентов ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) в струе плазмы при обогащении смеси углеводородом.

На рис. 5 и 6 показано изменение содержания основных компонентов соответственно в продольном и поперечном сечениях струи плазмы, которая генерируется из смеси воздуха и метана. Как видно из рис. 6, длина восстановительного участка струи плазмы (заштрихованная область) зависит от содержания углеводородного компонента в исходной смеси. При этом содержание кислорода снижается при увеличении объемной доли углеводорода в исходной смеси.

Наличие значительной объемной доли углеводорода в исходной плазмообразующей смеси изменяет общий энергетический баланс процесса преобразования электрической энергии и энергии горючего компонента в тепловую энергию струи плазмы. При переходе на обогащенные смеси ( $\alpha < 1$ ) не только не происходит дальнейшего увеличения доли тепловой энергии струи, но и наблюдается ее уменьшение за счет расхода тепла на химические превращения в потоке высокотемпературного газа. Эта энергия выделяется уже вне плазмотрона в объеме струи плазмы при догорании компонентов плазмообразующей смеси.

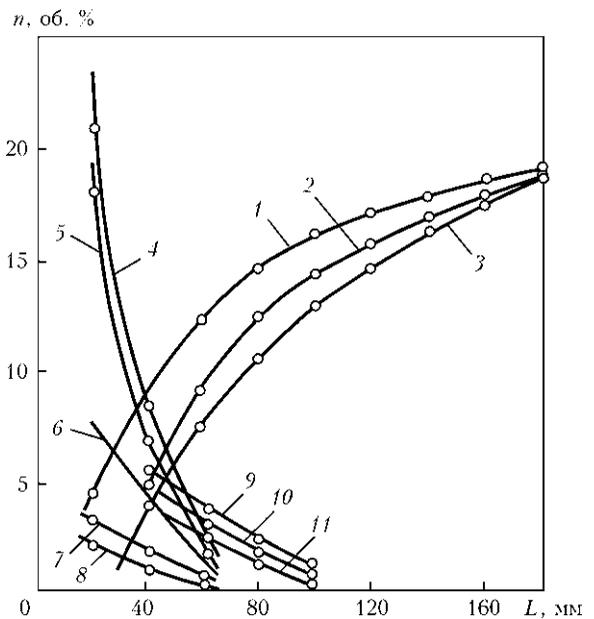


Рис. 5. Влияние исходного состава газовой смеси на содержание характерных компонентов в плазме —  $\text{O}_2$  (1, 2, 3),  $[\text{H}]$  (4, 5, 6),  $\text{H}_2$  (7, 8),  $\text{CO}$  (9, 10, 11) в продольном сечении струи плазмы: 1 —  $\alpha = 1,00$ ; 2 — 0,84; 3 — 0,63; 4 — 0,63; 5 — 0,84; 6 — 1,00; 7 — 0,84; 8 — 0,63; 9 — 1,00; 10 — 0,84; 11 — 0,63

Снижение коэффициента расхода окислителя ощутимо увеличивает тепловой поток в термохимический катод. Если переход от воздуха к стехиометрической смеси повышает уровень суммар-

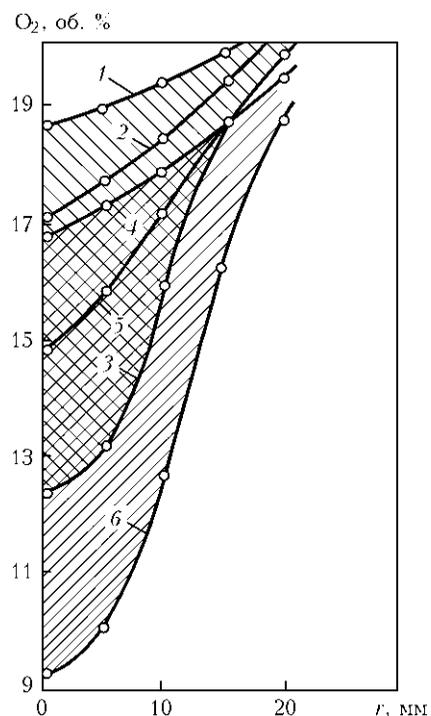


Рис. 6. Влияние исходного состава газовой смеси на содержание кислорода в поперечном сечении струи плазмы: 1 —  $L = 150$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 2 —  $L = 100$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 3 —  $L = 50$  мм,  $\alpha = 1,00$ ; 4 —  $L = 150$  мм,  $\alpha = 0,63$ ; 5 —  $L = 100$  мм,  $\alpha = 0,63$ ; 6 —  $L = 50$  мм,  $\alpha = 0,63$



ного теплового потока в катод на 6...7 %, то при уменьшении коэффициента расхода окислителя от 0,5 до 0,4 это повышение достигает 25...37 %. При сохранении условий охлаждения высокий уровень теплового потока приводит, как правило, к снижению ресурса работы термохимического катода на 20...25 %.

Как отмечалось выше, работа анода характеризуется резким снижением темпа эрозии [4]. Считается, что именно оксидные пленки на поверхности дугового канала являются причиной повышенной эрозии медных электродов в кислородсодержащих плазмообразующих средах [2]. Восстановительные компоненты газового потока ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) связывают кислород, предотвращая тем самым окисление меди в зоне привязки опорного пятна дуги.

### Выводы

1. Комбинированный подвод энергии к плазмообразующему газу значительно расширяет возможности управления размером, структурой и абсолютными значениями параметров активной зоны струи плазмы.

2. Незначительное (0,2...0,7 об. %) содержание углеводорода практически не влияет на химический состав рабочего тела, но при изменении условий горения дуги на 10...16 % увеличивает мощность плазматрона в рамках существующей конструкции (при сохранении токовой нагрузки на электроды).

3. Повышение на 15...20 % уровня вложенной в плазмообразующий газ энергии за счет увеличения содержания горючего компонента в плазмо-

образующей смеси на 30...40 % повышает температуру газа на дистанции 50...130 мм (по сравнению с работой на воздухе) и почти в 4...5 раз увеличивает объем его активной зоны.

4. Эффективное применение в процессах инженерии поверхности плазматронов с комбинированным подводом энергии требует дополнительных исследований влияния углеводорода на профили температуры и скорости струи плазмы при  $\alpha = 15...20$ .

1. Пащенко В. М. Дослідження струменів плазматронів для нанесення покриттів, що працюють на плазмоутворюючих сумішах системи С–N–O–H // Міжнар. конф. «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва», м. Київ, 25–28 травн. 1998 р. — К.: НТУУ «КПІ», 1998. — В IV т. — Т. IV. — С. 333–337.
2. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: Навч. посібник. — К.: Політехніка, 2001. — 416 с.
3. Пащенко В. Н. Особенности применения многокомпонентных газовых смесей в плазматронах для нанесения покрытий // Автомат. сварка. — 1998. — № 6. — С. 23–26.
4. Петров С. В., Карп И. Н. Плазменное газоздушное напыление. — Киев: Наук. думка, 1993. — 495 с.
5. Пащенко В. М., Солодкий С. П. Вплив вуглеводневого компонента на енергетичні характеристики плазмових розпилувачів, що працюють на сумішах повітря з вуглеводнями // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля. — 2003. — Вип. 11(69). — С. 64–68.
6. Основы расчета плазматронов линейной схемы: Оперативно-информ. материал / Под ред. М. Ф. Жукова. — Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1979. — 148 с.
7. Донской А. В., Клубниккин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1979. — 221 с.
8. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. — Киев: Техніка, 1986. — 223 с.

A possibility of controlling the energy parameters of plasma torches with a combined energy supply is studied. It is shown that changing the content of hydrocarbon component in the initial plasma-forming mixture allows variation of the absolute value of plasmatron power and its specified energy parameters in a rather broad range during operation, as well as influencing the oxidizing-reducing potential of the working medium and conditions of electrode operation. Several possible modes of operation of plasma torches with the hydrocarbon component in the initial plasma mixture are proposed, which allow variation of the conditions of conducting the technological process using one unchanged design.

Поступила в редакцию 02.09.2008