УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321- 2016-31-3-19-23

Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, М.Х. Гаджиев, Н.А. Демиров

Влияние угла раскрытия газоразрядного канала на энергоэффективность генератора низкотемпературной плазмы

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, Москва, Ижорская 13, строение 2, makhach@mail.ru

Исследования угла раскрытия газоразрядного тракта генератора низкотемпературной плазмы показали, что расширение по потоку между образующей и осью канала приводит к повышению устойчивости дуги по сравнению с цилиндрическим каналом постоянного сечения и оптимальным является угол раскрытия 6° .

Ключевые слова: *генератор низкотемпературной плазмы, расширяющийся канал, угол раскрытия, вольт-амперная характеристика.*

Введение

Генераторы низкотемпературной плазмы (ГНП) находят в последние годы широкое применение в разных областях науки и техники, особенно в промышленности: плазменная металлургия, теплоэнергетика, обработка материалов и нанесение покрытий, получение мелкодисперсных порошков, осуществление плазмохимических реакций и переработка различных отходов, а также в медицине [1–4].

При этом необходимо иметь надежный ГНП, в разрядном промежутке которого создается высокоэнтальпийный плазменный поток. ГНП с продольным потоком газа обычно выполнялись с цилиндрическим каналом постоянного сечения [5]. Электрический разряд, особенности течения высокотемпературного газа и параметры самого генератора плазмы с таким каналом достаточно хорошо известны. Недостатками большинства ГНП с продольным потоком газа и самоустанавливающейся длиной дуги является падающая вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда из-за неустойчивости горения электрической дуги [5, 6]. Это влечет за собой жесткие требования к источнику электрического питания. В таких генераторах для стабилизации дуги и термоизоляции ее от стенок канала применяются пористый вдув, аксиальные потоки или закрутка газа [6, 7], а также делаются различные полости, уступы, диафрагмы, межэлектродные вставки [8], что усложняет их конструкцию.

В конце 1970-х годов было предложено [9] выполнить генератор с расширяющимся каналом выходного электрода. Нужно отметить, что и до этого были разработаны конструкции генератора плазмы с профилированным участком, представлявшим собой сопло Лавалья, для получения сверхзвукового потока. Однако принципиальным отличием предложения [9] было то, что электрический разряд полностью горел в расширяющемся канале. Результаты первых исследований [10] показали целесообразность выполнения канала расширяющимся по потоку, что позволило работать с повышенной скоростью плазмообразующего газа на входе в канал в отличие от плазмотронов с каналом постоянного сечения.

Методика эксперимента и результаты

Для исследования влияния угла раскрытия α выходного электрода на электрофизические характеристики дугового разряда был создан ГНП, конструкция которого позволяла изменять геометрию разрядного канала (рис. 1). Плазмотрон состоял из вольфрамового катода 1, межэлектродной вставки (МЭВ) 2 и анодной части 3. МЭВ и анодная секция 3 образовывали разрядный канал, который выполнялся с углами раскрытия $\alpha = 0 \dots 6^\circ$. Длина и выходной диаметр канала сменных анодных секций 3 были постоянными. Применялась тангенциальная подача азота, способствующая стабилизации дугового разряда.

Объясняется тем, что давление больше влияет на напряжение горения дуги, чем диаметр. Исследуемые генераторы имеют достаточно длинные каналы выходного электрода, поэтому при одном и том же расходе в канале меньшего диаметра падение давления заметно выше.

Рис. 1. Схема экспериментального плазмотрона: 1 – катод; 2 – МЭВ (сопло); 3 – анод

Оснащение плазмотрона расширяющимся каналом выходного электрода обеспечивает горение дуги в ламинарном потоке при высокой скорости газа на входе МЭВ [9,10]. Еще одним важным преимуществом данного плазмотрона является его ВАХ с расширенной зоной устойчивого горения разряда [9, 10]. На рис. 2 показаны зависимости напряжения горения дуги разработанного генератора плазмы для рабочего газа азота при различных значениях угла раскрытия α и расхода плазмообразующего газа. Из-за недостаточного напряжения холостого хода источника питания ($U_{xx} = 300$ В) зажечь дугу в цилиндрическом канале и с $\alpha = 1^\circ$ не представилось возможным, в отличие от работы плазмотрона с $\alpha = 2 \dots 4^\circ$ и при $\alpha = 5$ и 6° , где дуга горела устойчиво только в расширяющемся канале анода 3 и в более широком диапазоне изменения расхода газа. Данный факт указывает на повышение интенсивности теплообмена между дугой и плазмообразующим газом при меньшей длине дуги. Исследование влияния угла раскрытия выходного электрода показало, что наиболее оптимальный угол расширения

$\alpha = 6^\circ$, который обеспечивает повышение эффективности ГНП в широком диапазоне изменения расхода плазмообразующего газа и увеличение ресурса работы плазмотрона. Из рис. 2 видно, что для получения большей тепловой мощности ГНП при больших расходах оптимальным углом раскрытия является угол $\alpha = 4^\circ$.

Для сравнительных исследований характеристик генераторов с цилиндрическим и расширяющимися каналами были разработаны три генератора плазмы. Первый генератор имел расширяющийся канал выходного электрода с диаметром минимального сечения 4мм. Два других генератора имели цилиндрические каналы постоянного сече-

ния с диаметрами 8 и 4 мм соответственно. Такие размеры каналов выходных электродов выбирались для того, чтобы генераторы могли работать в одних и тех же интервалах тока и расхода газа.

Рис. 2. Зависимость напряжения на дуге от расхода газа G и угла раскрытия канала α при $I = 300$ А

Так как расширяющийся канал позволяет работать в более широких интервалах указанных параметров, то были изготовлены два генератора с цилиндрическим каналом постоянного сечения, но различного диаметра. Один из них имел диаметр, близкий по значению к диаметру выходного сечения расширяющегося канала, а другой – равным минимальному диаметру расширяющегося канала. Исследования проводились на экспериментальной установке, состоящей из генератора плазмы с системами электрического питания, газоснабжения, водяного охлаждения, газодинамического тракта с теплообменником и вытяжной вентиляцией. Все системы обеспечивали работу генератора плазмы в широких интервалах параметров. В качестве рабочего газа применялся азот.

На рис. 3, 4 и 5 приведены ВАХ для генераторов плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода, цилиндрическими каналами, диаметр которых равен 8 и 4 мм. Исследования показали, что для ГНП с расширяющимся каналом ВАХ, как правило, возрастающая.

Рис. 3. ВАХ ГНП с расширяющимся каналом выходного электрода при разных расходах азота

Рис. 4. ВАХ ГНП с цилиндрическим каналом выходного электрода диаметром 8 мм при разных расходах азота

Рис. 5. ВАХ ГНП с цилиндрическим каналом выходного электрода диаметром 4 мм при разных расходах азота

При работе на токах 100–150 А имеется небольшой участок падающей ВАХ, и для его точного фиксирования необходимо определять ВАХ при более низких токах. Значения напряжения горения дуги в расширяющемся канале ближе к значениям напряжения горения дуги в цилиндрическом канале постоянного сечения диаметром 8 мм. Кроме того, значения напряжения горения в генераторе с цилиндрическим каналом диаметром 4 мм существенно выше, чем в генераторе с диаметром 8 мм.

Заключение

Проведённые исследования в целом показали, что геометрия канала выходного электрода оказывает существенное влияние на характер электрического разряда в продольном потоке газа. Найден оптимальный угол расширения выходного электрода 6° , обеспечивающий повышение эффективности плазменных технологий вследствие энергосбережения, интенсификации процессов и увеличения ресурса работы плазмотрона.

Литература

1. Rutberg Ph.G., Bratsev A.N., Safronov A.A. et al. The Technology and Execution of Plasma Chemical Disinfection of Hazardous Medical Waste // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2002. – V. 30, № 4. – P. 1445–1448.
2. Васильева О.Б., Кумкова И.И., Рутберг А.Ф., Сафронов А.А., Ширяев В.Н. Возможности применения плазменных технологий для переработки органосодержащих веществ. Особенности процессов в дуговых камерах плазмотронов // ТВТ. – 2013. – Т. 51, № 1. – С. 36–40.

3. Гаджиев М.Х., Тюфтяев А.С., Саргсян М.А., Демиров Н.А., Щербаков В.В. Диагностический комплекс для исследования взаимодействия плазменной струи с термостойкими материалами // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1. Естественные науки. – 2016. – Т. 31, вып. 1. – С. 22–27.
4. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты. – М.: Янус-К, 2011. – 520 с.
5. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.
6. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
7. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. – Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. – 712 с.
8. Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Влияние диафрагмы на вихревую термоизоляцию дуги в канале // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, вып. 17. – С. 31–36.
9. Башкатов В.А., Исакаев Э.Х., Крешин М.Б. и др. Электродуговой плазмотрон. А. с. № 814250 СССР. 1979. МКИ НО 5В 7/22.
10. Исакаев Э.Х., Григорьянц Р.Р., Спектор Н.О., Тюфтяев А.С. Влияние характеристики угла раскрытия канала выходного электрода на плазмотрон // ТВТ. – 1994. – Т. 32, № 4. – С. 627–628.

Поступила в редакцию 14 сентября 2016 г.

UDK 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2016-31-3-19-23

The influence of the discharge channel opening angle on the energy efficiency of the low temperature plasma generator

E.Kh. Isakayev, A.S. Tyuftayev, M.Kh. Gadzhiyev, N.A. Demirov

*Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya 13, Bd. 2;
makhach@mail.ru*

The study of the low temperature plasma generator's gas-discharge track opening angle revealed that the expansion on the upstream channel between the generatrix and the channel axis increases the stability of the arc when compared to a cylindrical channel with a constant cross section and the optimum opening angle 6°.

Keywords: *low-temperature plasma generator, expanding channel, opening angle, volt-ampere characteristic.*

Received 14 September, 2016