

Материалы Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность-2012»

УДК 537.527

**Аньшаков А.С.^{1,2}, Урбах Э.К.¹, Чередниченко В.С.²,
Урбах А.Э.¹, Фалеев В.А.¹**

¹Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, РФ

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, РФ

Разработка и исследование дуговых плазмотронов для нагрева воздуха с длительным ресурсом работы

Приведены результаты исследований электродуговых генераторов термической плазмы (плазмотронов) с газовыхревой стабилизацией дугового разряда. Установлены соотношения определяющих параметров, при которых скорость разрушения медных трубчатых электродов минимальна. На примере конкретных схем плазмотронов показана их эффективность для различных электротехнологий.

Ключевые слова: электродуговой плазмотрон, стабилизация разряда, эрозия электродов, разрядная камера, вольт-амперная характеристика, тепловой КПД.

Наведено результати дослідження електродугових генераторів термічної плазми (плазмотронів) з газовихревою стабілізацією дугового розряду. Встановлено співвідношення визначаючих параметрів, за яких швидкість зруйнування мідних трубчастих електродів є мінімальною. На прикладі конкретних схем плазмотронів показано їх ефективність для різних електротехнологій.

Ключові слова: електродуговий плазмотрон, стабілізація розряду, ерозія електродів, розрядна камера, вольт-амперна характеристика, тепловий ККД.

Для стационарного нагрева газовых сред до состояния низкотемпературной плазмы (3–15) × 10³ К при атмосферном давлении и выше широко применяются электродуговые плазмогенераторы. По мере роста технических приложений генераторов дуговой плазмы возрастают требования к их надежности, связанные, главным образом, с ресурсом работы электродов, особенно при больших (сотни ампер) токах.

В настоящее время сложилось устойчивое мнение, что главной причиной разрушения электродов в контрагированном дуговом разряде является термическое воздействие опорных пятен на поверхность металла. Играя незначительную роль в общем энергетическом балансе,

тепловые и электрофизические процессы в областях контакта дугового разряда с электродами оказывают решающее влияние на скорость их разрушения.

Для нагрева воздуха и других кислородсодержащих сред в конструктивных схемах плазмотронов используются медные трубчатые электроды. Относительно низкий уровень удельной эрозии электродов (около 10⁻⁹ кг/Кл для катодов и 10⁻⁹–10⁻¹¹ кг/Кл для анодов) обеспечивается рассредоточением плотности теплового потока от опорных пятен дуги на большую поверхность их быстрым перемещением за счет аэро- и электродинамических сил, действующих на радиальный участок дугового разряда.

Создано немало жизнеспособных конструкций электродуговых нагревателей воздуха (плазмотронов) применительно к различным технологическим процессам. Среди разработанных устройств заметную долю составляют плазмотроны с газовихревой стабилизацией дуги. Поэтому естественно, что аэродинамика потока в трубчатом электроде будет существенно влиять на скорость и глубину перемещения опорных пятен дуги, то есть определять местоположение и величину удельной эрозии электродов [1–3].

Результаты исследований последних лет свидетельствуют о положительной тенденции увеличения ресурса работы плазмотронов для нагрева воздуха. Достигается это газодинамическим сканированием радиального участка дугового разряда, изменением самовосстанавливающегося катода из углеводородов, модифицированием материала электрода ультра- или нанодисперсными порошками [2, 4]. Как будет показано ниже, существенное влияние на скорость разрушения электродов оказывают геометрия разрядной камеры, расход и давление плазмообразующего газа.

Цель работы — исследование энергетических и ресурсных характеристик электродуговых плазмотронов для нагрева воздуха на примере оригинальных конструктивных схем.

Экспериментальная установка

Практика использования двухкамерных электродуговых плазмотронов с медными трубчатыми (цилиндрическими полыми) электродами показала их высокую технологическую надежность [1, 3]. В них, как правило, внутренний электрод является катодом, а выходной — анодом. Столб дуги стабилизируется на оси электродов вихревым потоком газа. В полости катода радиальный участок располагается в зоне встречи потоков G_1 и G_2 , и с изменением соотношения G_1/G_2 зона выработки электрода будет изменяться. В выходном электроде анодный участок дугового разряда находится в области шунтирования дуги, которая с ростом силы тока смещается вверх по потоку, а длина дуги при этом сокращается. В силу этого вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги имеет падающий вид.

Эффективным средством получения восходящих ВАХ дуги является применение в однокамерном плазмотроне выходного электрода ступенчато расширяющегося. Газодинамика потока в нем такова, что примыкание радиального анодного участка дуги происходит за уступом вниз по потоку. В этом случае средняя длина

дугового разряда фиксируется при изменении силы тока, и на ВАХ дуги реализуется восходящая ветвь. Последнее обстоятельство приводит к существенному повышению устойчивости горения дуги при любой внешней характеристике источника электропитания.

Аналогичное явление наблюдается в двухкамерном плазмотроне с выходным ступенчатым электродом — анодом (рис.1). Здесь оно выражено значительно меньше, чем в однокамерном плазмотроне, когда катодное пятно разряда жестко фиксируется на термокатоде. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, радиальный участок в полости катода при изменении расходов G_1 и G_2 и силы тока разряда смещается относительно зоны встречи потоков. Участок дуги, находящийся во внутреннем электроде, из-за высокой степени турбулентности газового потока имеет слабо падающую ВАХ. Во-вторых, участок разряда на входе в канал диаметром d_2 имеет большой тепловой слой, и шунтирование дуги в выходном электроде происходит раньше, чем в однокамерном плазмотроне. Поэтому длина этого участка дугового разряда небольшая, его вклад в возрастание ВАХ дуги также невелик. Однако средняя длина дуги фиксируется, и напряжение с ростом тока изменяется существенно меньше, чем в двухкамерном плазмотроне с гладким трубчатым анодом.

Исследования ВАХ дуги, теплового КПД и эрозии электродов проводились на плазмотронах различной мощности. Электропитание плазмотронов осуществлялось от источников питания с напряжением холостого хода 1300 и 530 В. Суммарный расход воздуха $G_1 + G_2$ изменялся от $4 \cdot 10^{-3}$ до $16 \cdot 10^{-3}$ кг/с, диаметр катода d_1 — от $2 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ м, d_2 — от $2 \cdot 10^{-2}$ до $3,8 \cdot 10^{-2}$ м, сила тока I — от 100 до 500 А, давление газа $p = (1-1,5) \cdot 10^5$ Па.

Соленоид в месте пребывания опорного пятна дуги в выходном электроде (см. рис.1) предназначен для создания осевого магнитного

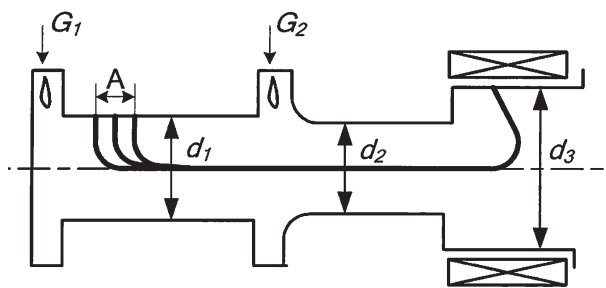


Рис.1. Схема двухкамерного плазмотрона с выходным ступенчатым электродом.

поля, способствующего равномерной выработке электрода за уступом.

Энергетические характеристики

Эксперименты показали, что при прямой полярности подключения электродов анодный участок дуги горит за уступом только до определенного значения тока, превышение которого приводит к скачкообразному переходу опорного пятна дуги на участок электрода диаметром d_2 . При этом резко снижается напряжение на дуге. Поэтому для заданного диапазона тока при эксплуатации плазмотрона важно правильно рассчитать длину части выходного электрода диаметром d_2 .

На рис.2 представлены типичные ВАХ дуги в плазмотроне со ступенчатым выходным электродом (штрихами нанесены линии равных мощностей). В зависимости от расхода воздуха при токах в интервале более 150–200 А вольт-амперные характеристики дуги практически не зависят от силы тока I .

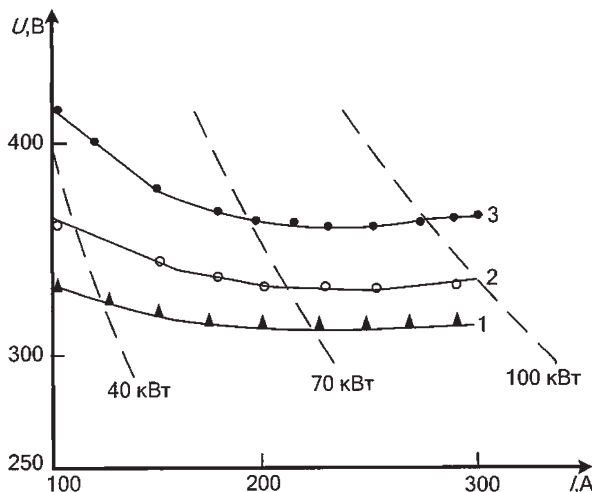


Рис.2. Вольт-амперные характеристики дуги ($d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $d_3 = 45 \cdot 10^{-3}$ м) при $G_1 + G_2$, кг/с: 1 — $8 \cdot 10^{-3}$; 2 — $10 \cdot 10^{-3}$; 3 — $12 \cdot 10^{-3}$.

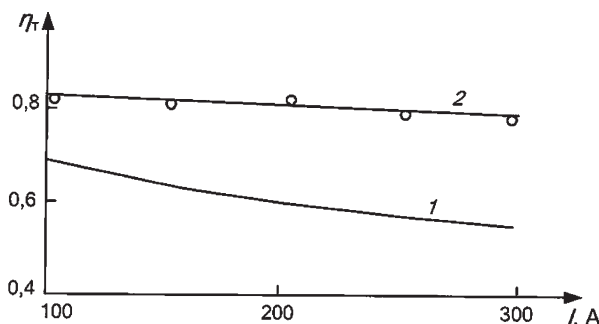


Рис.3. Тепловой КПД двухкамерных плазмотронов ($d_1 = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $d_2 = 28 \cdot 10^{-3}$ м, $G_1 + G_2 = 12 \cdot 10^{-3}$ кг/с): 1 — гладкий выходной электрод (расчет [1]); 2 — ступенчатый выходной электрод (эксперимент).

Приведенные данные показывают, что реальная мощность плазмотрона исследованной конструктивной схемы может достигать многих сотен киловатт.

На рис.3 приведено сравнение тепловых КПД двухкамерных плазмотронов с гладким выходным и со ступенчатым электродом.

Тепловые потери в электроды измерялись калориметрированием охлаждающей воды. Видно, что за счет оптимизации длины выходного электрода диаметром d_3 КПД плазмотрона со ступенчатым электродом заметно выше, чем для «классического» двухкамерного плазмотрона с гладкими трубчатыми электродами.

Ресурсные характеристики

Ресурс непрерывной работы электродов является определяющим параметром при реализации любого технологического процесса. Поэтому отыскание способов снижения скорости разрушения материала электрода является сверхактуальной проблемой в плазмотростроении. В данной работе приведены результаты исследований удельной эрозии электродов ($\bar{G} = \Delta m / (I \cdot t)$, кг/Кл, где Δm — масса выгоревшего металла; t — время) и некоторые способы увеличения ресурса их работы.

Эксперименты проводились на трехкамерном плазмотроне с выходным ступенчатым электродом, схема которого приведена в работе [3]. Внутренний трубчатый электрод подключался к положительному или отрицательному полюсу источника электропитания, являясь в одном случае катодом, а в другом — анодом. В торцевой крышке установлено кварцевое стекло, через которое с помощью скоростной кинокамеры СКС-1М производилась съемка радиального участка дугового разряда. Аэродинамика потока в полости внутреннего электрода исследовалась двухканальным пневмометрическим датчиком, что позволило достоверно определить вращательную составляющую скорости газа U_φ вблизи стенки электрода [2].

Экспериментальные исследования зависимости удельной эрозии трубчатого катода от силы тока дугового разряда показали, что имеет характерная особенность: для различных диаметров внутреннего электрода d_1 существует критическое значение тока $I_{кр}$, превышение которого приводит к резкому росту \bar{G} . Например, при $d_1 = 21 \cdot 10^{-3}$ м значение тока $I_{кр} = 320$ А, при $d_1 = 50 \cdot 10^{-3}$ м — $I_{кр} = 600$ А [2, 3].

Анализ кинокадров радиального участка дуги при различных токах разряда свидетельствует о том, что в динамике поведения исследуемого участка наблюдаются три различных ре-

жима. При $I < I_{кр}$ катодное пятно равномерно и непрерывно движется по рабочей поверхности электрода. При $I \approx I_{кр}$ возникает катодная струя, которая перекрывает пространство электрода по диаметру. В этом режиме начинает нарушаться равномерность вращения радиального участка дуги из-за шунтирования разряда на противоположный участок поверхности катода. Третий режим соответствует диапазону токов $I > I_{кр}$. Здесь наблюдаются двойное дугообразование и остановки опорных пятен дуги, катод интенсивно разрушается.

Вихревая стабилизация дугового разряда на оси электродов требует определенных соотношений геометрических параметров разрядной камеры и расходных характеристик потока газа. При этом определяющими параметрами являются расход воздуха G , диаметр полости электрода d и давление в камере p . Именно они ответственны за стабилизирующее воздействие газового потока на дуговой разряд.

Устойчивость вращающегося потока газа определяется величиной окружного компонента скорости газа U_{ϕ} вблизи стенки электрода, а $U_{\phi} \sim G/(p \cdot d)$. Это соотношение можно считать одним из параметров, определяющих эффект стабилизации дугового разряда. Другим параметром, влияющим на устойчивость газового потока в трубчатом электроде, является ток дуги. Экспериментально показано, что при достижении критического значения тока $I_{кр}$ скорость вращения газа резко падает, поток в полости электрода теряет устойчивость, эрозия электрода возрастает.

Проведенный анализ уравнения сохранения импульсов для электродной струи с использованием экспериментальных данных по зависимости удельной эрозии трубчатого катода от тока дуги и скорости движения катодного пятна позволил установить необходимые условия длительного ресурса работы электрода в воздушной среде (все величины в системе СИ):

$$\begin{aligned} G/(p \cdot d) &\geq 2 \cdot 10^{-6}; \\ I < I_{кр} &= 1,6 \cdot 10^6 (G/p)^{1/2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для трубчатого анода (внутренний электрод в двухкамерном плазмотроне) эти условия можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} G/(p \cdot d) &\geq 4 \cdot 10^{-6}; \\ I < I_{кр} &= 1,6 \cdot 10^6 (G/p)^{1/2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Различие первых неравенств в (1) и (2) связано с тем, что эрозия анода значительно сильнее зависит от скорости перемещения дугового пятна, чем для случая катода. Кроме того,

скорость вращения анодного пятна по окружности рабочей поверхности электрода примерно в 1,5–2 раза ниже катодного.

Соотношения (1) и (2) можно назвать критериями работоспособности медных трубчатых электродов. Они позволяют еще на стадии проектирования технологического плазмотрона отнositельно расчетных параметров G , d , p оценить ресурс непрерывной работы электродов. Соотношения (1) и (2) проверены в диапазоне токов от 100 до 1000 А, диаметров d от $2 \cdot 10^{-2}$ до $9 \cdot 10^{-2}$ м, расходов воздуха G от $4 \cdot 10^{-3}$ до 0,1 кг/с, давлений в разрядной камере p от $1 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$ Па.

На основании вышеизложенного можно оценить реальный путь повышения ресурса работы медных электродов: величины расхода воздуха и геометрия полости электрода должны обеспечивать устойчивое стабилизирующее воздействие потока газа на дуговой разряд и при этом должны выполняться неравенства (1) и (2).

Обратим внимание на интересную закономерность удельной эрозии медных цилиндрических электродов при наложении на вращательное движение радиального участка дуги возвратно-поступательного перемещения вдоль оси с частотой 4–6 Гц. При этом длина зоны перемещения (сканирования) пятна дуги вдоль электрода составляет 2–3 диаметра канала.

Экспериментально проверено влияние сканирования радиальных участков дуги с помощью пульсатора расходов газа на эрозию электродов \bar{G} двухструйного плазмотрона. Сканирование осуществлялось за счет непрерывного изменения расходов воздуха G_1 и G_2 при условии $G = G_1 + G_2 = \text{const}$. За время работы плазмотрона в течение 60 ч величина \bar{G} для катода оставалась на уровне 10^{-9} кг/Кл, а для анода $\bar{G} \approx 6 \cdot 10^{-11}$ кг/Кл [3]. Отсюда следует важный вывод: сканирование опорного пятна дугового разряда вдоль поверхности электрода на глубину 2–3 калибра является эффективным средством повышения ресурса непрерывной работы плазмотрона.

Упомянулось, что эрозия медного трубчатого анода намного меньше, чем катода. Это обусловлено различием механизмов переноса тока

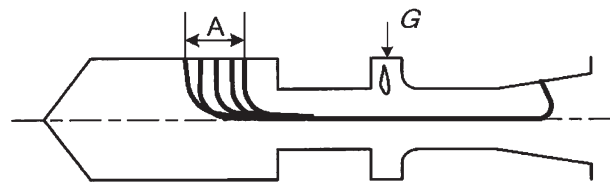


Рис.4. Схема плазмотрона с внутренним электродом ступенчатой геометрии.

вблизи поверхности электродов. Используя данное положение, разработали однокамерный плазматрон (рис.4) обратной полярности (внутренний электрод – анод). Оригинальность конструктивной схемы плазматрона заключается в расширении области разрушения анода за уступом (зона А) за счет аэродинамики потока во внутреннем электроде [5]. Плазматрон может работать и в струйном, и в плавильном режимах.

Экспериментально установлено, что при силе тока дугового разряда 650–700 А и мощности плазматрона 450–500 кВт ресурс анода составляет 500 ч и более (рабочий газ – азот). Переход на плазмообразующий газ, воздух, приведет к некоторому снижению времени непрерывной работы электрода, но вполне приемлемому для организации технологических процессов. Отсюда следует вывод: сегодняшние знания о влиянии геометрических и расходных параметров на скорость разрушения медных трубчатых электродов позволяют выбирать оптимальные технические решения для создания длительно работающих электродуговых плазмогенераторов.

Выводы

Показана высокая энергетическая эффективность конструктивной схемы двухкамерного плазматрона с выходным ступенчатым электродом.

Установлены определяющие параметры для эффективного воздействия на стабилизацию дугового разряда в полости электродов и приведены критерии работоспособности медных трубчатых электродов в воздушной среде.

Экспериментально показано существенное увеличение ресурса работы электродов с помощью сканирования опорного пятна дугового разряда вдоль оси рабочей поверхности электрода.

Список литературы

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазматроны). – М.: Наука, 1973. – 232 с.
2. Аньшаков А.С., Быков А.Н. и др. Взаимосвязь эрозионных процессов с аэродинамикой закрученного потока в цилиндрическом электроде плазматрона // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – Т. 9, № 4. – С. 623–632.
3. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2008. – 602 с.
4. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. – Новосибирск: Наука, 1999. – 712 с.
5. Пат. на полез. модель 111734 РФ, МПК⁷ Н 05 Н 1/34. Плавильный плазматрон / А.С.Аньшаков, Э.К.Урбах, В.С.Чередниченко и др. – Оpubл. 20.12.11, Бюл. № 35.

Поступила в редакцию 20.07.12

**Anshakov A.S.^{1,2}, Urbakh E.K.¹, Cherednichenko V.S.²,
Urbakh A.E.¹, Faleev V.A.¹**

¹ Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Russia

The Development and Investigation of Arc Plasmatrons for Air Heating with Long Service Life

The investigations results of electric-arc thermal plasma generators (plasmatrons) with gas-vortex of arc discharge stabilization are presented. The relations of determinant parameters for which the destruction rate of copper tubular electrodes is minimal are determined. The plasmatrons efficiency for on by the example of specific plasmatron schemes for different electrotechnologies is displayed.

Key words: electric-arc plasmatron, discharge stabilization, electrode erosion, discharge chamber, current-voltage characteristic, thermal efficiency.

Received July 20, 2012