

УДК 537.523 (575.2) (04)

**ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА
С КОЛЬЦЕВОЙ ПРИВЯЗКОЙ
НА ТОРЦЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАТОДА**

А. Жайнаков – академик НАН КР

Р.М. Урусов – докт. физ.-мат. наук

Т.Э. Урусова – канд. физ.-мат. наук

И.Э. Нам – соискатель

The results of calculation of the electric arc with annular binding on the end of cylindrical cathode are presented. The authors have analyzed gas flow and heating features as well as thermal effect influencing the anode.

Введение. Экспериментально установлено, что электрическая дуга может принимать различные пространственные формы. Например, возможна реализация кольцевой [1–3] и трубчатой [4] форм дуги, которые находят различное применение в электродуговых технологиях. В этой связи численные исследования указанных пространственных форм дугового разряда представляют определенный практический интерес.

Так, в работах [5, 6] рассматривается стационарная дуга с кольцевой привязкой на торце полого цилиндрического катода. В рамках двухтемпературной модели в приближении пограничного слоя выполнен расчет электродуговых потоков кольцевой формы. Обсуждаются влияние силы тока, расхода газа, радиуса канала на неравновесность и характеристики потока плазмы.

Изучение взаимодействия кольцевых потоков плазмы с поверхностью анода требует проведения дальнейших численных исследований.

Постановка задачи. В цилиндрической системе координат (z, r, θ) рассчитывается стационарная электрическая дуга силой тока I , межэлектродным расстоянием L , горящая в аргоне

атмосферного давления. Катодом "–" (рис. 1 а) является сплошной вольфрамовый цилиндр радиусом R . Полагается, что катодная привязка дуги является осесимметричной, равномерно рассредоточенной на торцевой поверхности цилиндра по кольцу с внешним радиусом R и шириной dR . На всех рисунках затемненная область катода является непроводящей электрический ток $j = 0$. Анодом "+" является охлаждаемая медная пластина толщиной 1 мм.

Численные расчеты проводятся в рамках двухмерной математической модели с учетом отклонения плазмы от термического и ионизационного равновесия. Приэлектродные процессы не рассматриваются. Наличие электродов в расчетной схеме учитывается с помощью метода фиктивных областей [7].

Обсуждение результатов расчета. На рис. 1 б и рис. 2 приведены распределения некоторых характеристик дуги при следующих внешних параметрах разряда: $I = 500\text{А}$, $L = 15\text{ мм}$, $R = 5\text{ мм}$ и $dR = 0.5\text{ мм}$. Следует отметить, что площадь катодной привязки дуги $S \approx 16.5\text{ мм}^2$ для рассматриваемой геометрии катода достаточно реальна. В самом деле, оценка плотности электрического тока на поверхности катода дает приближенное значение

$j \sim 10^7 \text{ A/m}^2$, что вполне отвечает параметрам электрической дуги.

Результаты расчета показали (рис. 1 б), что при данных параметрах разряда пространственная форма столба дуги внешне аналогична таковой традиционной дуги с колоколообразной формой. Однако наблюдаются и некоторые качественные различия. Так, линии максимальной температуры в поперечных сечениях дуги представляют собой окружности с центром на оси симметрии, т.е. дуга имеет трубчатую пространственную структуру. Не-

смотря на достаточно большую силу тока ($I = 500\text{A}$), наблюдаются сравнительно низкие значения температуры T ($\sim 13\text{kK}$) и скорости потока плазмы $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ (u, v – аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости), значения которой не превышают 20 м/с (рис. 2 а). Сравнительно низкие значения температуры и скорости потока плазмы обусловлены, по-видимому, пространственным осесимметричным рассредоточением дугового разряда.

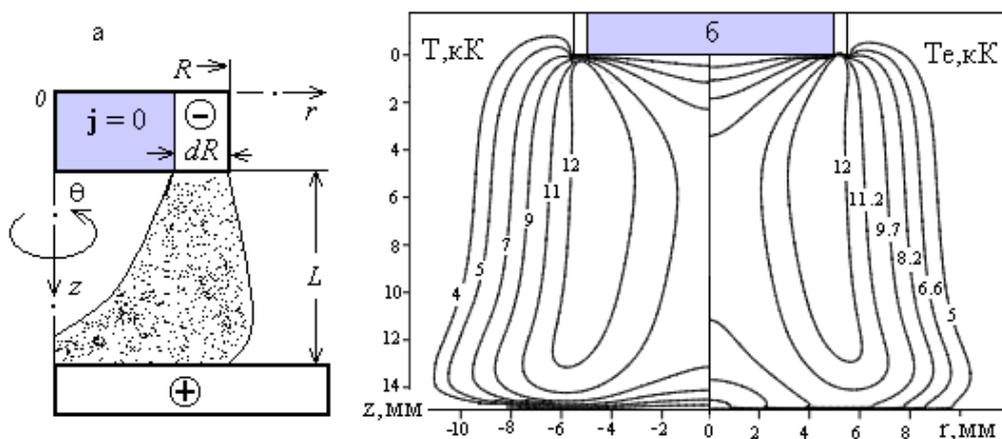


Рис.1. Схема стационарной электрической дуги
а – дугового разряда с кольцевой привязкой на торце катода,
б – поля температуры газа T и электронов T_e ; $I = 500\text{A}$, $L = 15 \text{ мм}$.

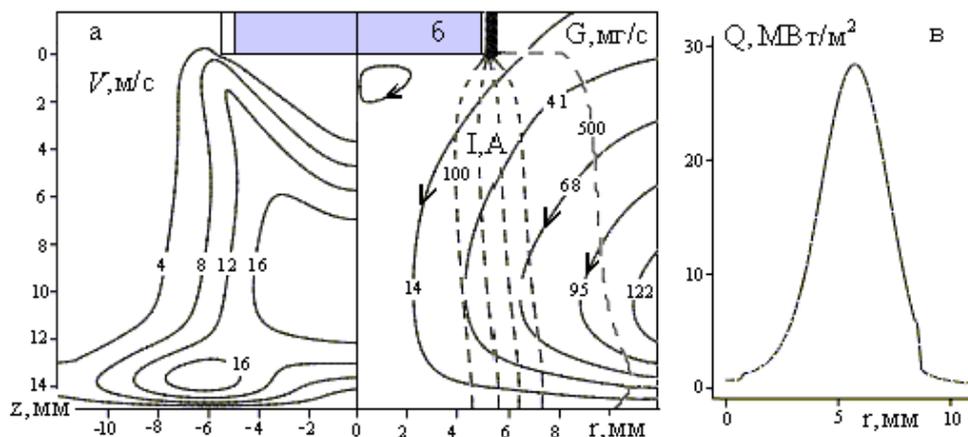


Рис. 2. Поля: а – скорости V , б – течения газа G и течения тока I (пунктир, шаг 100A);
в – радиальное распределение удельного теплового потока на анод. $I = 500\text{A}$, $L = 15\text{мм}$.

Радиальное распределение удельного теплового потока на поверхность анода представлено на рис. 2в. В численных расчетах величина теплового потока определяется тремя компонентами. Во-первых, энергией электронов составляющих ток дуги; во-вторых, потоком тепла, связанным с работой выхода электронов, и, в-третьих, кондуктивной теплопередачей газа. Вклад энергии электронов, приобретенной в области анодного падения потенциала, не учитывался из-за отсутствия данных о величине U_a . Также не учитывался вклад излучения из столба дуги на поверхность анода ввиду его малости [8]. Из рис. 2в видно, что большая часть теплового потока на поверхность анода распределяется по кольцу шириной ~ 5 мм и радиусом ~ 6 мм.

Уменьшение величины межэлектродного расстояния L от 15 до 10 и 5 мм не приводит к качественной перестройке характеристик

разряда, за исключением того, что трубчатая форма столба дуги все более трансформируется в кольцевую форму (рис. 3).

Отметим, что при рассмотренных выше значениях радиуса катода R и силы тока I изменение величины L в диапазоне $5 \div 15$ мм практически не повлияло на величину удельного теплового потока на поверхность анода: он оставался на уровне ~ 30 МВт/м².

Представляет интерес моделирование режимов с высокими значениями удельного теплового потока на обрабатываемое изделие, а именно: при больших значениях радиуса катода R , тока I и малых межэлектродных расстояний L .

На рис. 4 а, б представлены "центральные" фрагменты течения тока I и температуры T плазмы при $I = 1$ кА, $L = 1$ мм, $R = 10$ мм и $dR = 0.3$ мм. Распределение Q для различных значений токов $I = 1, 2, 3$ кА приведено на рис. 4в.

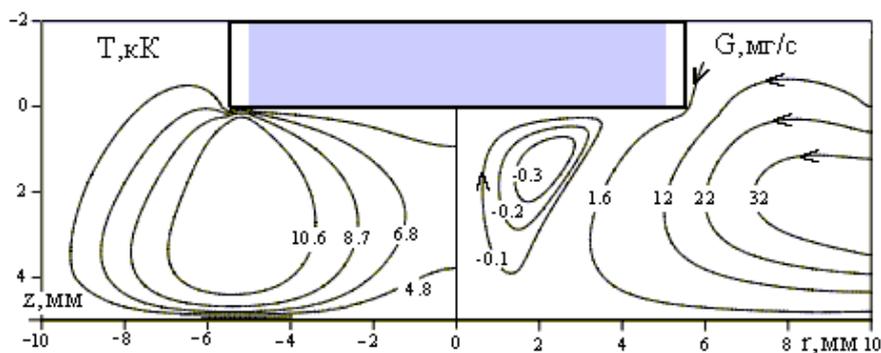


Рис. 3. Поля температуры T и течения газа G . $I = 500$ А, $L = 5$ мм.

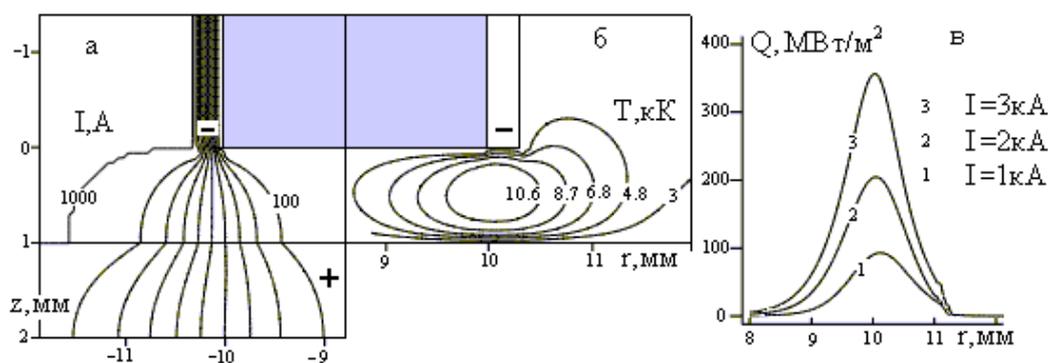


Рис. 4. Поля течения: а – тока I (шаг 100 А), б – температуры T при $I = 1$ кА, $L = 1$ мм. в – радиальное распределение удельного теплового потока на анод в зависимости от силы тока I . $L = 1$ мм.

Выводы. Анализ расчета позволяет предположить возможность реализации электрической дуги с кольцевой привязкой на торце катода. Отличительной особенностью разряда является его кольцевая (при $R>L$) либо трубчатая (при $R<L$) пространственная форма и распределенное по кольцу тепловое воздействие столба дуги на поверхность обрабатываемого изделия (анода).

Литература

1. Гвоздецкий В.С., Мечев В.С. Исследование вращающейся в магнитном поле сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1963. – № 12.
2. Леваков В.С., Любавский К.В. Влияние продольного магнитного поля на электрическую дугу с неплавящимся вольфрамовым катодом // Сварочное производство. – 1965. – № 10. – С. 9.
3. Леваков В.С., Любавский К.В. Сварка трубок с трубными решетками конусной дугой // Сварочное производство. – 1965. – № 11. – С. 34.
4. Исаков А.И., Новиков О.Я., Путько В.Ф. Реализация и исследование трубчатого электродугового разряда // Генераторы низкотемпературной плазмы. X Всесоюз. конф. – Минск: Ин-т тепломассообмена им. А.В. Лыкова, 1986. – Ч. 1. – С. 42.
5. Семенов В.Ф., Энгельшт В.С. Расчет кольцевого двухтемпературного потока плазмы с аксиальным вдувом холодного газа // VII Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. – Ташкент, 1987. – Ч. II. – С. 240.
6. Лелевкин В.М., Семенов В.Ф., Энгельшт В.С. Расчет характеристик электрической дуги с трубчатым электродом // XI Всесоюз. конф. Генераторы низкотемпературной плазмы. – Новосибирск, 1989. – Ч. I. – С. 165.
7. Урусов Р.М., Урусова Т.Э. Применение метода фиктивных областей для расчета характеристик электрической дуги // ТВТ. – 2004. – Т. 42. – № 3. – С. 374.
8. Шоек П. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. – М.: Энергия, 1966. – С. 10.