

УДК 537.527

## ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ

Р.М. УРУСОВ, Т.Э. УРУСОВА

*Институт физики Национальной академии наук Кыргызстана,  
Бишкек*

По результатам расчетов предполагается возможность реализации дугового разряда на коаксиальных катодах. Подобный разряд можно нагружать сравнительно большой силой тока, что позволит увеличить его тепловое воздействие на обрабатываемое изделие.

### ВВЕДЕНИЕ

В электродуговых технологиях обработки металлов одной из актуальных задач является определение условий, позволяющих достаточно глубоко плавить металл [1]. Глубина плавления зависит, главным образом, от мощности электрической дуги и, следовательно, от силы тока  $I$ . Однако большие токи обуславливают чрезмерные тепловые нагрузки на катод, что заставляет искать различные пути решения данной проблемы.

Так, в ряде конструкций плазмотронов используются катодные узлы со сквозным осесимметричным отверстием, через которое подается рабочий газ. Например, вольфрамовый катод с внутренним  $\approx 3\text{--}5$  мм и внешним  $\approx 10\text{--}12$  мм радиусами кольцевой поверхности, на которой осуществляется привязка дуги, успешно работает в диапазоне токов  $5\text{--}10$  кА [2].

Теоретические и экспериментальные исследования [3] показали, что, воздействуя на приэлектродные процессы вспомогательным потоком плазмы, можно значительно увеличить силу тока (до 3 кА в экспериментах [3]) и ресурс работы плазменных устройств.

В [4] рассматривается сильноточный ( $I > 1$  кА) многодуговой катод плазмотрона, обеспечивающий с ростом тока самопроизвольное деление и привязку дуги к термоэмиссионным вставкам (вольфрам, гафний), запрессованным по периметру внутри полой обоймы (медь).

В настоящей статье рассматриваются коаксиальные электрические дуги, которые, возможно, будут работать при достаточно больших токах и в отличие от одиночной дуги, как показывает сравнительный анализ, позволяют достичь большего теплового воздействия на обрабатываемое изделие.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В цилиндрической системе координат  $(z, r, \theta)$  рассчитываются коаксиальные электрические дуги силой тока  $I_1, I_2$  в аргоне атмосферного давления  $P_{\text{атм}}$ . Катодный узел (рис. 1) состоит из неплавящихся конусного и полого цилиндрического вольфрамовых катодов « $\leftarrow$ », разделенных непроводящей электрический ток вставкой

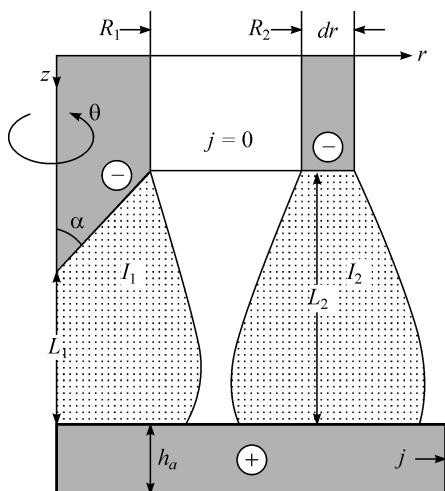


Рис. 1. Схема двух коаксиальных электрических дуг.

(индексы 1 и 2 соответствуют внутренней и внешней дуге). Привязка дуги полагается осесимметричной, рассредоточенной по конусной и торцевой поверхностям соответственно внутреннего и внешнего катодов.

Анодом «+» является горизонтальная неохлаждаемая алюминиевая пластина толщиной  $h_a = 10$  мм и боковой токосъемной поверхностью. Расположение дуги на поверхности анода определялось в процессе счета.

Первоначально проводился расчет характеристик дуги и теплового состояния электродов. Для области анода с расчетной температурой  $T_a$  выше температуры плавления алюминия  $T_{пл} = 0,93$  кК результаты интерпретировались как формирование сварочной ванны с расплавом, для которого далее проводилось совместное решение гидродинамической и тепловой задач.

Расчет проводится в рамках двумерной математической модели частичного локального термодинамического равновесия плазмы [5]. Полагалось, что протекающие процессы являются стационарными, течение ламинарным, излучение объемным; приэлектродные процессы не рассматриваются. Наличие электродов и расплава в расчетной схеме учитывается методом фиктивных областей; математическая модель и методические аспекты решения задачи изложены в [6]. Теплофизические свойства материала электродов определялись по данным [7, 8] и для каждой из фаз приняты не зависящими от температуры.

На представленных далее рисунках в ряде случаев приведена не вся расчетная область, а только центральные фрагменты. Отсчет в направлении оси  $z$  для характеристик дуги ведется от вершины внутреннего конусного катода, для характеристик анода — от плоскости привязки дуги.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполнен расчет системы двух коаксиальных электрических дуг при следующих внешних параметрах разряда:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $I_1 = 0,7$  кА,  $I_2 = 1$  кА,  $R_1 = 3$  мм,  $R_2 = 5$  мм,  $dr = 0,5$  мм,  $L_1 = 3$  мм,  $L_2 = 6$  мм. Также рассчитана одиночная дуга силой тока  $I = 0,7$  кА с аналогичными коаксиальным дугам внешними параметрами ( $\alpha = 45^\circ$ ,  $R = 3$  мм,  $L = 3$  мм). Сравнение теплового воздействия на анод одиночной и коаксиальных дуг позволит оценить роль внешней дуги.

Отметим, что численные значения силы тока и геометрические размеры катодов задавались из следующих соображений: во-первых, чтобы оценка плотности электрического тока на активной поверхности катодов соответствовала параметрам дугового разряда:  $j \sim 10^7$  А/м<sup>2</sup>, во-вторых, чтобы рассчитанные значения температуры газа не превышали 25 кК, поскольку табличные данные о теплофизических свойствах плазмы являются функциями температуры, ограниченной сверху значением  $T = 25$  кК. Разумеется, ограниченная входная информация для проведения расчетов не накладывает ограничений на параметры дугового разряда в реальных условиях.

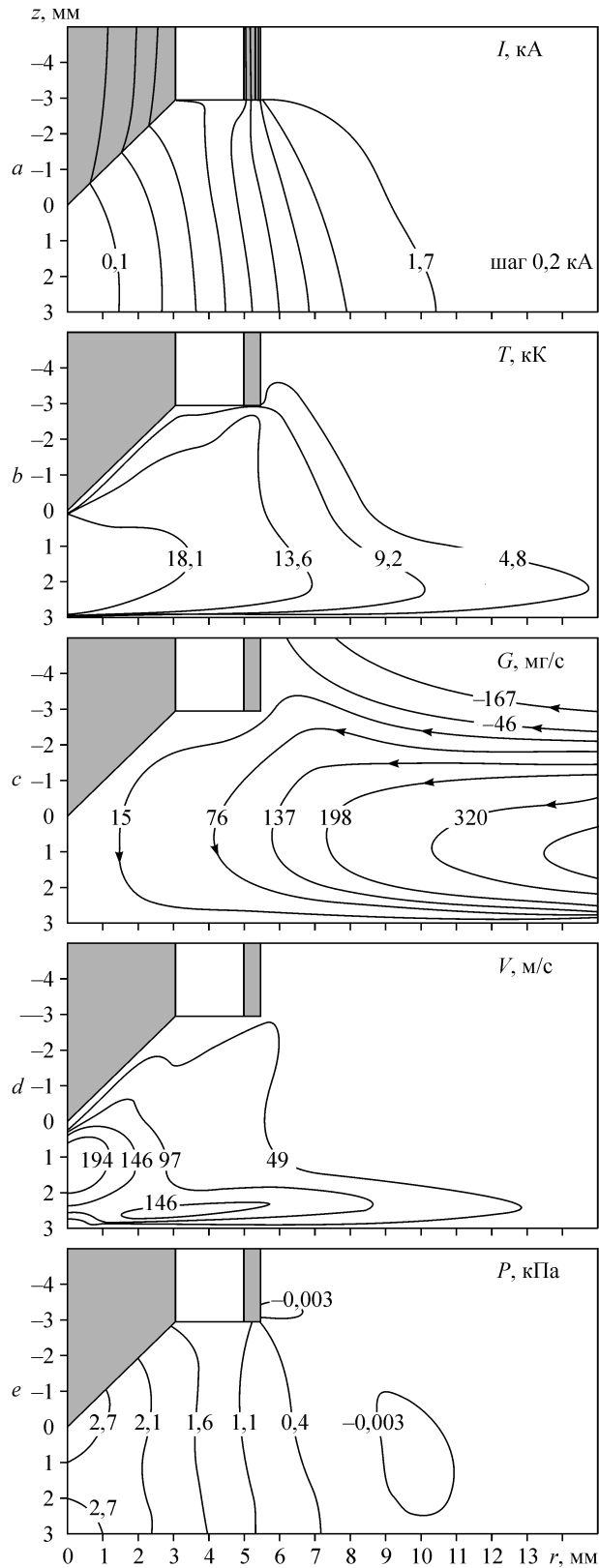
На рис. 2 представлены распределения характеристик системы двух коаксиальных дуг (соответствующие распределения одиночной дуги имеют традиционный вид и поэтому не приводятся).

Рис. 2. Расчетные распределения характеристик двух коаксиальных дуг: изолинии электрического тока  $I$  (a), температуры газа  $T$  (b), расхода газа  $G$  (c), скорости (d), давления  $P$  (e).

Течение электрического тока (рис. 2, a) обуславливает джоулево тепловыделение: наиболее сильно плазма прогревается в приосевой области разряда (рис. 2, b). В результате воздействия электромагнитных сил окружающий газ вовлекается в дуговой разряд, движется в аксиальном направлении и растекается по поверхности анода (рис. 2, c). Наибольшие значения скорости  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$  ( $u, v$  — аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости) наблюдаются в приосевой области и вблизи поверхности анода (рис. 2, d). Давление газа (рис. 2, e) в приосевой области повышенное,  $P > P_{\text{атм}}$  (пинч-эффект), а на периферии разряда — пониженное,  $P < P_{\text{атм}}$  (эффект Бернулли).

В целом, как показал сравнительный анализ, распределения характеристик коаксиальных дуг качественно соответствуют распределениям одиночной дуги.

В обоих вариантах по результатам решения тепловой задачи в аноде формировалась область с температурой  $T_a > T_{\text{пл}}$  — сварочная ванна, но рассчитать гидродинамику расплава не удалось. В начале



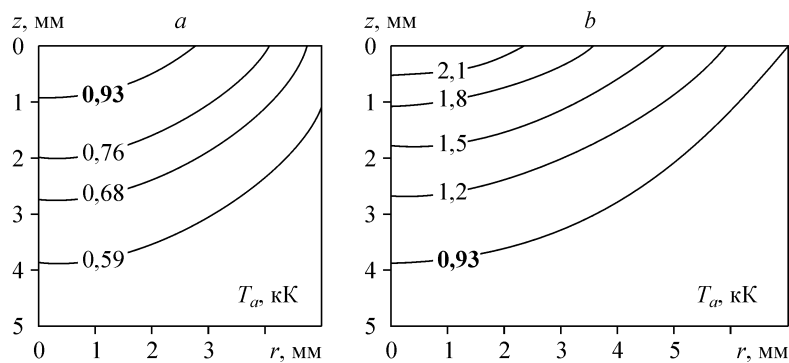
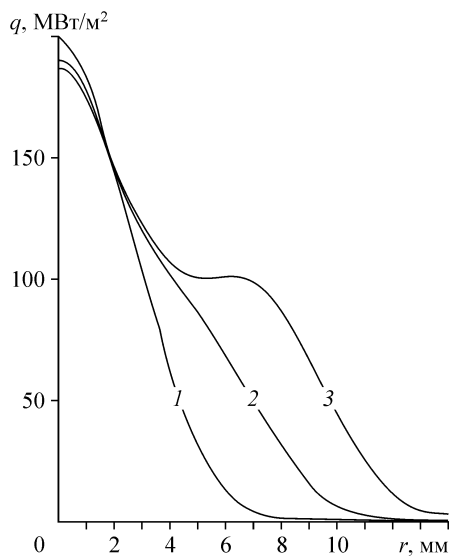


Рис. 3. Распределения температур анода  $T_a$  (решение тепловой задачи).

Дуги: одиночная (а), две коаксиальные (б).

итерационного процесса решения задачи наблюдалось упорядоченное течение расплава, однако затем началось хаотичное формирование и распад вихревых структур в сварочной ванне, радиус и глубина которой менялись в пределах 5–6,5 мм (вариант коаксиальных дуг). Качественный анализ результатов показал, что неустойчивый в данном случае характер течения расплава обусловлен двумя факторами. Во-первых, чрезмерно большой радиальной скоростью плазмы вблизи поверхности расплава и, следовательно, увеличением передачи импульса в результате вязкого взаимодействия; во-вторых, достаточно сильным воздействием на расплав электромагнитных сил. Это приводит, вероятно, к реализации турбулентного режима течения ( $Re \approx 10^4$ ), что выходит за границы применения используемой математической модели.

Несмотря на это, сравнительную оценку размеров сварочной ванны коаксиальных и одиночной дуг можно провести по результатам решения тепловой задачи в аноде. Сравнение показывает, что для одиночной дуги глубина плавления анода  $\approx 0,9$  мм (рис. 3, а) примерно в 4 раза меньше соответствующего значения  $\approx 3,8$  мм для двух коаксиальных дуг (рис. 3, б). Это обусловлено тем, что в системе коаксиальных дуг внешняя дуга способствует дополнительному нагреву металла вокруг пятна привязки внутренней дуги. Для одиночной дуги величина удельного теплового потока  $q$  на поверхность анода при  $r > 6$  мм практически равна нулю (рис. 4, линия 1), в то время как для двух коаксиальных дуг величина  $q$  достаточно высока (см. рис. 4, линия 2).



Следует отметить возможность такой ситуации: глубина плавления анода одиночной дугой силой тока  $I = I_1 + I_2 = 1,7$  кА может оказаться примерно такой же, что и коаксиальными дугами  $I_1 = 0,7$  кА,  $I_2 = 1$  кА (при прочих одинаковых внешних параметрах). В этом случае придется признать, что коаксиальные

Рис. 4. Распределение удельного теплового потока  $q$  на поверхность анода.

Дуги: одиночная (1), две коаксиальные (2), три коаксиальные (3).

дуги не имеют заметного преимущества перед одиночной дугой. Однако проверить указанную ситуацию при данных внешних параметрах разряда не представляется возможным: при расчете одиночной дуги  $I = 1,7$  кА максимальные значения температуры газа достигают значений  $\approx 30$  кК, что выходит за верхнюю границу 25 кК табличных данных о теплофизических свойствах плазмы (см. выше).

Если произвольно принять значения теплофизических свойств в диапазоне температур 25–30 кК равными таковым при  $T = 25$  кК, то расчет одиночной дуги показывает глубину плавления анода  $\approx 2$  мм, что примерно в два раза меньше соответствующего значения  $\approx 3,8$  мм для коаксиальных дуг. Сравнение оказывается в пользу коаксиальных дуг: простое повышение силы тока в одиночной дуге с целью увеличения глубины плавления оказывается менее эффективным. Однако окончательный вывод делать преждевременно: вследствие упомянутого произвольного допущения необходимы более корректные расчеты.

Тем не менее, по результатам расчетов можно предположить, что система коаксиальных катодов, во-первых, позволяет нагружать дугу сравнительно большими токами и, во-вторых, обеспечивает рассредоточение теплового потока на большей поверхности анода. Нагрев металла на большей поверхности приводит к уменьшению градиента температуры в радиальном направлении и, следовательно, величины теплового потока в указанном направлении. В таких условиях тепловой поток внутренней дуги возрастет в аксиальном направлении, что и обуславливает увеличение глубины плавления металла.

Приведенные результаты расчетов качественно согласуются с опытными наблюдениями: чем концентрированнее источник, тем меньше (уже) будет зона нагрева и плавления [1].

Глубина плавления анода еще больше увеличивается для системы трех коаксиальных дуг, рассчитанной при следующих внешних параметрах:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $I_1 = 0,7$  кА,  $I_2 = 1$  кА,  $I_3 = 1,5$  кА,  $R_1 = 3$  мм,  $R_2 = 5$  мм,  $R_3 = 7,5$  мм,  $dr = 0,5$  мм,  $L_1 = 3$  мм,  $L_2 = 6$  мм,  $L_3 = 6,5$  мм.

Сравнение с системой двух коаксиальных дуг показывает, что в целом распределения характеристик качественно и количественно (в приосевой области) близки между собой. Исключение составляет тепловое воздействие на анод: если для двух коаксиальных дуг по результатам решения тепловой задачи глубина плавления анода составляла  $\approx 3,8$  мм, то для трех коаксиальных соответствующее значение равно  $\approx 7,2$  мм.

Объяснение этому аналогично изложенному выше: тепловые потоки средней и внешней дуг прогревают металл на большей поверхности (см. рис. 4, линия 3), и тепловой поток внутренней дуги обеспечивает более глубокое плавление анода.

В представленных примерах рассматривалась система коаксиальных катодов на примере взаимодействия короткого открытого дугового разряда с поверхностью анода. По-видимому, указанная система также может использоваться в конструкциях сильноточных плазматронов.

Следует отметить, что по сравнению с одиночной дугой система двух и трех коаксиальных дуг характеризуется соответственно вдвое и втрое большим числом внешних параметров ( $I$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $dr$ ), каждый из которых влияет на поведение характеристик разряда. Вероятно, в реальных условиях реализация и управление системой коаксиальных дуг потребует определенных усилий. Во всяком случае, вычислительный эксперимент сопровождался большим числом пробных расчетов по выбору соотношения между внешними параметрами для получения устойчивых решений разностной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ расчетных данных позволяет предположить возможность реализации системы коаксиальных электрических дуг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ерохин А.А.** Основы сварки плавлением. — М: Машиностроение, 1973. — 448 с.
2. **Фарнасов Г.А., Фридман А.Г., Каринский В.Н.** Плазменная плавка. — М: Metallургия, 1968. — 180 с.
3. **Жуков М.Ф., Аньшаков А.С., Дандарон Г.-Н.Б.** Эрозия термокатодов плазменных устройств // Изв. СО АН СССР, Сер. техн. наук. — 1980. — Вып. 3, № 13. — С. 86–91.
4. **Жуков М.Ф., Пустогаров А.В., Дандарон Г.-Н.Б., Тимошевский А.Н.** Термохимические катоды. — Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1985. — 129 с.
5. **Низкотемпературная плазма.** Т. 1. Теория столба электрической дуги / Под ред. Энгельшта В.С., Урюкова Б.А. — Новосибирск: Наука, 1990. — 374 с.
6. **Урусов Р.М., Урусова Т.Э.** Расчет электрической дуги с кольцевой привязкой на внешней боковой поверхности катода // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 3. — С. 501–511.
7. **Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Сквородько С.Н., Сокол Г.Ф.** Исследование вязкости жидких металлов. — М: Наука, 1983. — 243 с.
8. **Зиновьев В.Е.** Кинетические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Metallургия, 1984. — 200 с.

*Статья поступила в редакцию 14 сентября 2005 г.*