

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВИЛЬНОГО ПЛАЗМАТРОНА С КАТОДОМ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ

Институт физики Национальной Академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

Многие технологические процессы электродуговой обработки металлов сопровождаются формированием сварочной ванны с расплавом, характер течения которого может существенно влиять на тепловое состояние анода и процессы в сварочной ванне. Экспериментальные исследования тепломассообмена в сварочной ванне анода сопряжены с немалыми трудностями и в связи с этим возрастает роль теоретических исследований, в частности, численного моделирования.

В технологических процессах широко используются цилиндрические неплавящиеся катоды, заточенные под конус, и расчету дуги с катодами конусной формы посвящено достаточное количество исследований (см., например, [1 - 5]).

Вместе с тем, также находят широкое применение цилиндрические трубчатые катоды, имеющие сквозное осесимметричное отверстие, через которое подается рабочий газ (возможно, с каким-либо реагентом); в этом случае привязка дуги осуществляется на кольцевой поверхности торца трубчатого катода. В отличие от классической дуги со стержневым катодом и привязкой в виде опорного пятна, особенностью кольцевой привязки является рассредоточение дуги на большей площади токоведущей поверхности, что позволяет работать с большими токами при сохранении умеренной эрозии материала катода (см., например, [6]).

В настоящей статье представлены результаты численного расчета стационарной электрической дуги с трубчатым катодом, имеющим сквозное осесимметричное отверстие. Привязка дуги полагается осесимметричной, равномерно в направлении  $\theta$  рассредоточенной на торцевой поверхности катода радиусом  $R$  и  $R_1$  (рис. 1); снаружи катода имеется насадок радиусом  $R_2$ ; через сквозное отверстие и кольцевой зазор между катодом и насадком подается холодный (300 K) газ расходом соответственно  $G$  и  $G_0$ . Отметим, что используемая в расчетах схема катода является несколько упрощенной, и детальное описание реальной конструкции представлено в [6].

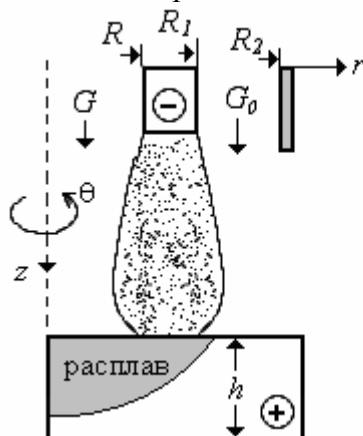


Рис. 1. Схема дуги с трубчатым катодом «-» и плавящимся анодом «+» в цилиндрической системе координат  $r, z, \theta$ .

Анодом «+» является горизонтальная неохлаждаемая алюминиевая пластина толщиной  $h$  и боковой токосъемной поверхностью; форма и размеры анодной привязки дуги определяются в процессе численного расчета.

Толщина анода  $h$  подбиралась из предварительных расчетов таким образом, что бы при заданных внешних параметрах разряда исключить его сквозное плавление.

Для области анода с расчетной температурой  $T$  выше температуры плавления алюминия  $T_{пл} = 930$  K результаты интерпретировались как формирование сварочной ванны с расплавом, для которого далее проводилось совместное решение тепловой и

гидродинамической задач. Свободная граница «расплав – твердая фаза» определяется в процессе расчета по изотерме  $T_{пл}$ . Индукционными токами в расплаве, деформацией его поверхности в результате динамического воздействия потока дуговой плазмы, а также конвекцией Марангони пренебрегалось, и учитывались только два фактора, формирующие гидродинамику расплава: вязкое взаимодействие  $F_{vis}$  с потоком плазмы, натекающей на поверхность расплава и воздействие электромагнитных сил  $F_{mag}$ .

Расчеты выполнены в рамках двухмерной математической модели частичного локального термодинамического равновесия плазмы. Полагалось, что дуговой разряд обладает осевой симметрией, протекающие процессы являются стационарными, течение ламинарным, излучение объемным; приэлектродные процессы не рассматриваются. Наличие электродов и расплава в расчетной схеме учитывается методом фиктивных областей [7, 8]; математическая модель и методические аспекты решения задачи изложены в [8]. Дискретизация дифференциальных уравнений и итерационное решение разностного аналога проводятся в соответствии с методикой [9]; динамические характеристики рассчитываются по алгоритму SIMPLE'R [9].

Теплофизические свойства материала электродов определялись по данным работ [10, 11] и для каждой из фаз приняты независимыми от температуры. Для алюминиевого анода использованы следующие средние значения констант (твердая фаза / расплав): плотность  $\rho = (2,5 / 2,3) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = (220 / 90)$  Вт/(м·К), теплоемкость  $c_p = (890 / 1095)$  Дж/(кг·К), электропроводность  $\sigma = 10^7$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, вязкость расплава  $\mu = 3 \cdot 10^{-3}$  кг/(м·с).

На рис.2 приведены распределения расчетных характеристик, полученные при следующих внешних параметрах дугового разряда:  $I = 5$  кА,  $R = 5$  мм,  $R_1 = 13$  мм,  $R_2 = 18$  мм,  $L = 40$  мм,  $h = 40$  мм,  $G = 0,6$  г/с,  $G_0 = 3,6$  г/с.

Из результатов расчета следует, что токоведущая область дугового разряда имеет трубчатую пространственную форму (рис. 2, а). Течение электрического тока обуславливает джоулево тепловыделение: наиболее сильно плазма прогревается в области, также имеющей на протяжении нескольких калибров трубчатую пространственную форму (рис. 2, б). По мере приближения к поверхности анода наблюдается трансформация трубчатой формы теплового поля в сплошной цилиндр.

Протяженность трубчатой структуры теплового поля в значительной степени зависит от величины расхода  $G$  газа, подаваемого через сквозное отверстие в катоде: с уменьшением  $G$ , как показывают результаты расчетов, протяженность трубчатой структуры теплового поля уменьшается, и наоборот.

В результате принудительной подачи газа и воздействия электромагнитных сил газ движется в аксиальном направлении и растекается по поверхности анода (рис. 2,г).

Наибольшие значения скорости потока плазмы  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$  ( $u, v$  – аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости) наблюдаются в высокотемпературной области, а также вблизи поверхности анода (рис. 2, в).

Воздействие потока дуговой плазмы обуславливает плавление материала анода и в аноде образуется сварочная ванна глубиной  $l_{пл} \approx 30$  мм и радиусом  $r_{пл} \approx 50$  мм. К сожалению, в данном случае рассчитать гидродинамику расплава не удалось: в итерационном процессе решения до определенного момента наблюдалась относительно устойчивая картина течения расплава (рис. 3), но затем во внутренней области ванны началось хаотичное формирование и разрушение вихревых структур.

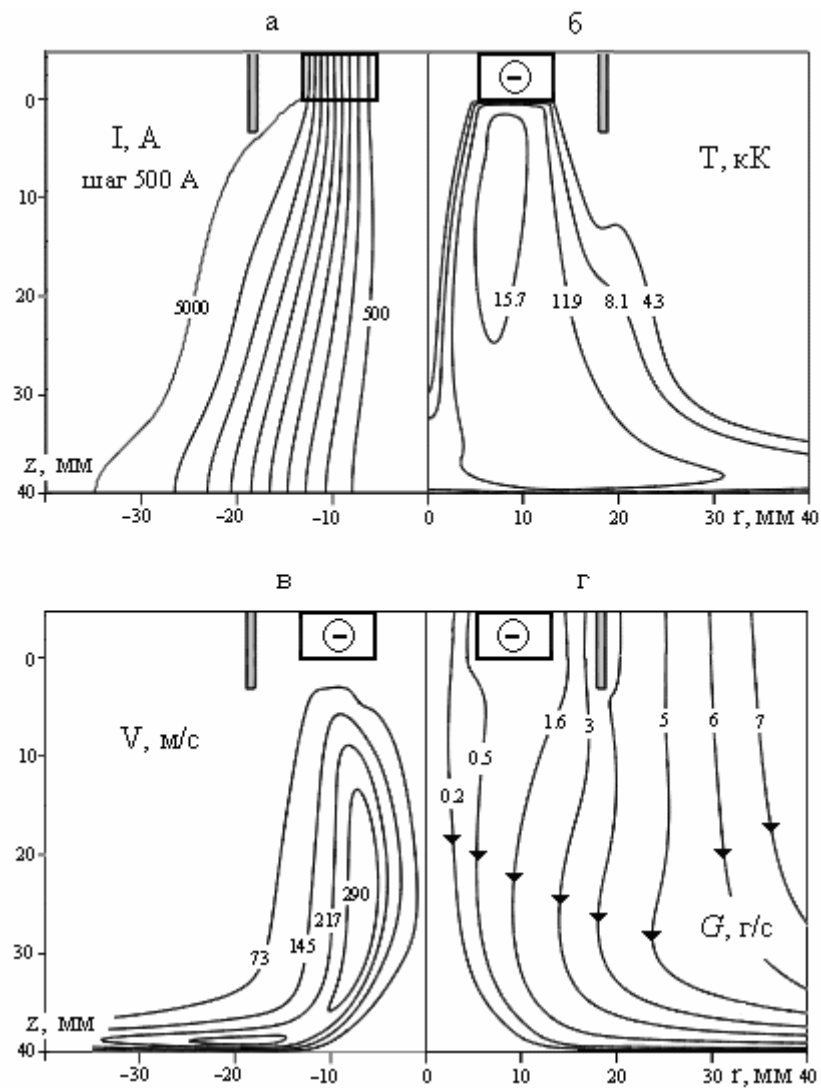


Рис. 2. Расчетные распределения характеристик: изолинии электрического тока  $I$  (а), температуры газа  $T$  (б), скорости  $V$  (в) и расхода газа  $G$  (г).  $I = 5$  кА,  $L = 40$  мм.

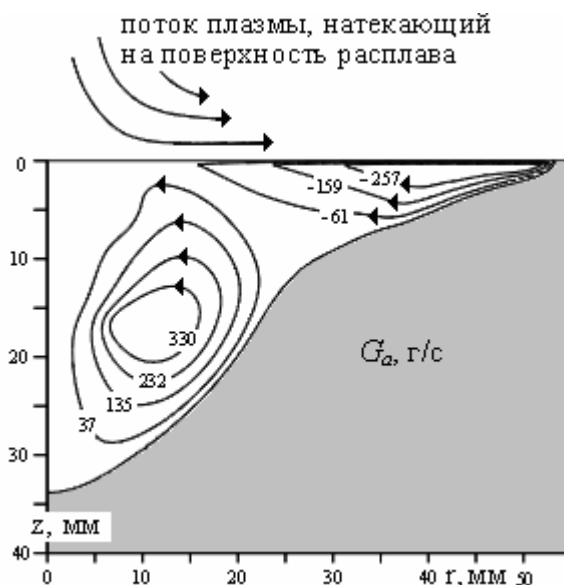


Рис. 3. Промежуточные (в итерациях) распределения изолиний расхода расплава  $G_2$  незадолго до разрушения внутренней вихревой структуры,  $I = 5$  кА,  $L = 40$  мм,  $h = 40$  мм.

При этом течение расплава в периферийной верхней области ванны – правовинтовой вихрь, обусловленный  $F_{wis}$ , в целом оставался стабильным, а глубина ванны практически неизменной. Анализ результатов показал, что неустойчивое течение

расплава обусловлено в данном случае чрезмерным воздействием электромагнитных сил, формирующих во внутренней области ванны, по-видимому, турбулентный режим течения ( $Re \approx 10^5$ ), что выходит за границы применения математической модели.

Действительно, при отключении в компьютерной программе электромагнитных сил проблем с получением численного решения не возникает: вязкое взаимодействие «плазма – расплав» формирует в сварочной ванне устойчивый вихрь правовинтового направления вращения. Либо уменьшение в компьютерной программе значений  $F_{mag}$  в 10 раз также позволяет получить устойчивую картину течения расплава в сварочной ванне расчетной глубиной 33,6 мм (рис. 4).

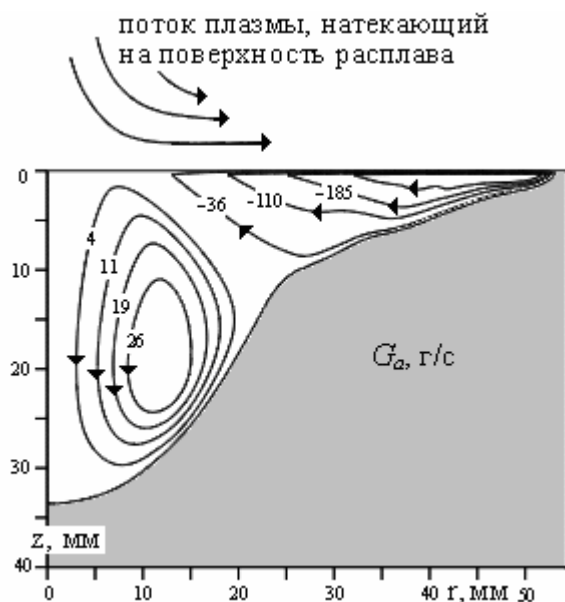


Рис. 4. Распределения изолиний расхода расплава  $G_a$  при уменьшении в расплаве  $F_{mag}$  в 10 раз.  $I = 5$  кА,  $L = 40$  мм,  $h = 40$  мм.

Несмотря на произвол с уменьшением  $F_{mag}$ , полученные предварительные оценки, по-видимому, вполне пригодны для качественного анализа и в целом позволяют заключить, что в периферийной верхней области ванны движение расплава обусловлено вязким взаимодействием с потоком плазмы, а в глубинной внутренней области ванны – воздействием электромагнитных сил.

В работе [12] предложена экспериментальная модель, имитирующая гидродинамическую обстановку в ванне при плазменно-дуговом переплаве. Модель ванны изготовлена из стальной заготовки диаметром 100 мм, профиль ванны соответствовал квадратичной параболе глубиной на оси 40 – 50 мм. В качестве модельного расплава использовался расплав галлия при температуре  $\approx 300$  К. Скоростной напор плазменно-дугового столба имитировался струей сжатого воздуха, соответствующего скоростному напору газового потока дуги силой тока 550 А. Плазменно-дуговой столб имитировался медным стержнем диаметром 20 мм, по которому проходил ток в диапазоне значений 550 – 700 А, а стержень опускался в центр ванны на глубину 2 – 4 мм.

Результаты экспериментального исследования характера течения расплава в сварочной ванне приведены на рис. 5. Сравнение расчетных (см. рис.4) и опытных данных по гидродинамике расплава показывает в целом их качественное согласие.

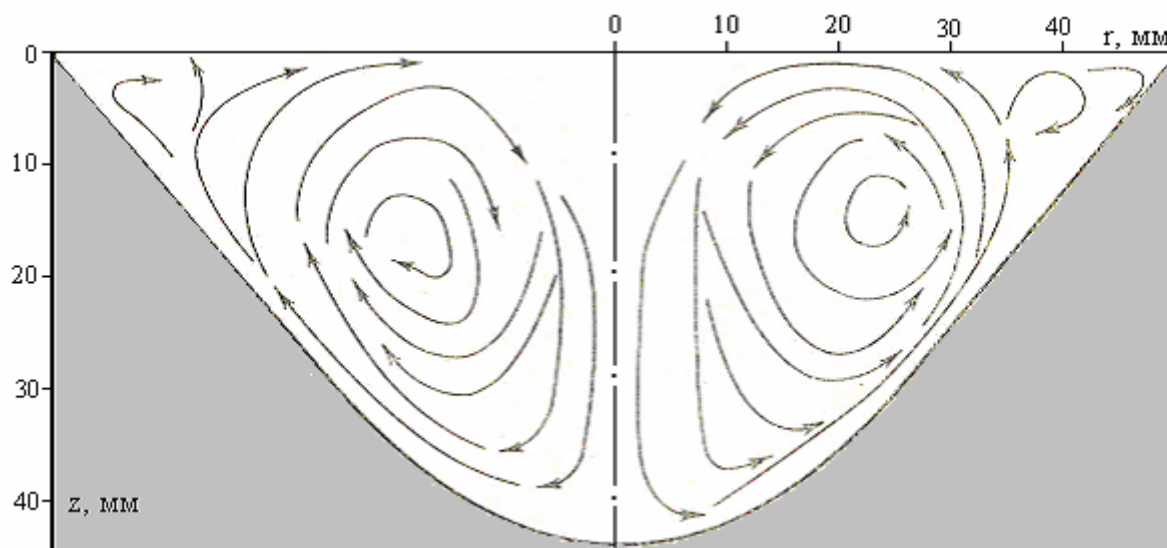


Рис. 5. Характер потоков расплава в модельной ванне; эксперимент [12].

### Литература

1. Hsu K.C., Pfender E. Two-Temperature Modeling of the Free-Burning, High-Intensity Arcs // *J. Appl. Phys.* 1983. V.54. № 8. p. 4359.
2. Низкотемпературная плазма. Т. 1. Теория столба электрической дуги / Под ред. Энгельшта В.С., Урюкова Б.А. – Новосибирск: Наука, 1990. – 374 с.
3. Tanaka M., Terasaki H., Ushio M., Lowke J.J. Numerical Study of Free-burning Argon arc with anode Melting // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, v. 23, №. 3, 2003, p. 585 - 606.
4. А. Жайнаков, Р.М. Урусов, Т.Э. Урусова К расчету течения плазмы вблизи профилированной поверхности катода электрической дуги // *ТВТ.* 2005, т. 43, № 2, с. 175-180.
5. Р.М. Урусов, Т.Э. Урусова Численное исследование влияния формы катода на характеристики электрической дуги // *ТВТ.* т.43, № 3, 2005, с. 359-366.
6. Фарнасов Г.А., Фридман А.Г., Каринский В.Н. Плазменная плавка. – М: Metallurgy, – 1968. – 180 с.
7. Смагулов Ш., Сироченко В.П., Орунханов М.К. Численное исследование течений жидкости в нерегулярных областях. – Алматы. 2001. – 276 с.
8. Жайнаков А., Урусов Р.М., Урусова Т.Э. Расчет электрической дуги в многосвязной области методом фиктивных областей // *Вычислительные технологии.* 2003, т. 8, ч.2, с. 12-21.
9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 146 с.
10. Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Сквородько С.Н., Сокол Г.Ф. Исследование вязкости жидких металлов. – М: Наука, – 1983. – 243 с.
11. Зиновьев В.Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах. – М.: Metallurgy, – 1984. – 200 с.
12. Рыкалин Н.Н, Кубланов В.Я., Жеребович А.С. и др. Исследование гидродинамических потоков в модели ванны применительно к плазменно-дуговому переплаву // *Физика и химия обработки материалов* – 1974. – № 6. – с. 33 – 37.