

УДК 537.523

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С КОЛЬЦЕВОЙ ПРИВЯЗКОЙ НА ТОРЦЕ КАТОДА

А.Ж. ЖАЙНАКОВ, Р.М. УРУСОВ, Т.Э. УРУСОВА

*Институт физики Национальной Академии наук Кыргызстана,
Бишкек*

Представлены результаты расчета стационарной дуги с кольцевой привязкой на торце сплошного цилиндрического катода; рассматривается влияние внешних параметров разряда на характеристики дуговой плазмы и тепловое состояние анода.

ВВЕДЕНИЕ

Кольцевая привязка дуги на электродах, в частности, на катодах используется в различных конструкциях сильноточных электродуговых аппаратов. 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 довольно большими токами при умеренной эрозии материала катода.

В работе [1] описывается сильноточный (5–10 кА) плазмотрон, катод которого имеет сквозное осесимметричное отверстие и привязка дуги осуществляется на кольцевой поверхности торца катода. В [2] представлена конструкция катодного узла, обеспечивающего с ростом тока самопроизвольное деление и привязку дуги к термоэмиссионным вставкам, запрессованным по периметру внутри полой обоймы. В [3] представлены результаты экспериментальных исследований катодного узла следующей конструкции. В водоохлаждаемую медную обойму запрессована центральная гафниевая вставка диаметром 2,5 мм и три радиальных гафниевых стержня диаметром 1,6 мм, расположенные через 120°. Исследования показали, что после определенной выработки центральной вставки катодное пятно дополнительно распределяется на радиальные вставки. При этом площадь привязки опорного пятна дуги в 1,5 раза больше, чем при одной центральной вставке. Плотность электрического тока и теплового потока снижаются, уменьшаются температура рабочей поверхности вставок, и, как следствие, эрозия катодного узла.

Заметим, однако, что проблема увеличения рабочих токов при сохранении умеренной эрозии материала катода требует, как отмечается в [4], комплексного решения целого ряда задач, и оптимизация геометрической формы катода не единственный путь решения данной проблемы. Например, в [4] показано, что путем создания специальных условий можно заметно увеличить силу тока и с привязкой в виде опорного пятна, обеспечив при этом низкую эрозию материала катода.

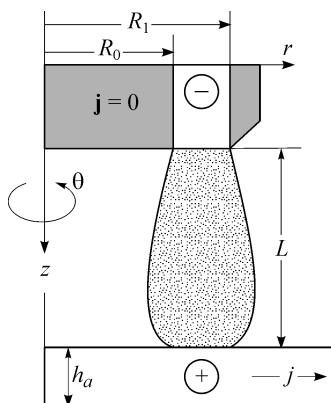


Рис. 1. Условная схема дугового разряда с кольцевой привязкой на торце катода в цилиндрической системе координат (z, r, θ) .

В настоящей статье представлены результаты расчета характеристик стационарной дуги с кольцевой привязкой на торце сплошного катода и рассмотрено тепловое состояние неохлаждаемого анода в зависимости от внешних параметров разряда — межэлектродного расстояния, силы тока и радиальных размеров кольцевой катодной привязки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках двухмерной математической модели частичного локального термодинамического равновесия (ЧЛТР) плазмы [5] рассчитывается открытая электрическая дуга силой тока I , межэлектродным расстоянием L , горящая в аргоне атмосферного давления $P_{\text{атм}}$. Вольфрамовый катод “-” представляет собой полый цилиндр внутренним R_0 и внешним R_1 радиусами (рис. 1).

Внутри цилиндра заключается непроводящая электрический ток ($\mathbf{j} = 0$) катодная вставка, снаружи цилиндра — непроводящая обойма, заточенная под конус 45° . Катодная привязка полагается осесимметричной, равномерно в азимутальном направлении θ рассредоточенной на кольцевой поверхности торца цилиндра. Анодом “+” является горизонтальная неохлаждаемая алюминиевая пластина толщиной h_a , с боковой токосъемной поверхностью. Расположение дуги на поверхности анода определялось в процессе счета.

Полагалось, что протекающие процессы являются стационарными, течение ламинарным, излучение объемным; приэлектродные процессы не рассматривались. Наличие электродов и расплава анода учитывается методом фиктивных областей; математическая модель и методические аспекты решения задачи изложены в [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Влияние межэлектродного расстояния на характеристики дуги и тепловое состояние анода рассмотрено на примере дуги силой тока $I = 2$ кА в диапазоне значений L , равных 3–35 мм. Геометрические размеры катода составляют $R_0 = 10$ мм и $R_1 = 10,5$ мм, толщина алюминиевого анода принята равной $h_a = 10$ мм, поскольку при меньшем ее значении $h_a = 8$ мм наблюдалось сквозное плавление. В целом, как показал сравнительный анализ, для различных значений L характер протекающих процессов и распределения характеристик дуги близки между собой. На рис. 2 представлены расчетные распределения кольцевой дуги при $L = 5$ мм.

Течение электрического тока (рис. 2, а) обуславливает джоулев нагрев: наиболее сильно плазма прогревается в центральной ($r \approx 10$ мм) области кольцевого разряда вблизи катода (рис. 2, б). В то же время приосевая область зазора при $r < 5$ мм остается практически непроводящей электрический ток и сравнительно холодной. Окружающий газ (рис. 2, с) вовлекается в дуговой разряд, прогревается и движется в аксиальном направлении, растекаясь по поверхности анода. В межэлектродном зазоре формируется тороидальный вихрь, препятствующий проникновению окружающего газа вглубь зазора. Наибольшие значения скорости

$V = \sqrt{u^2 + v^2}$ (u, v — аксиальная и радиальная компоненты вектора скорости) наблюдаются в центральной области (рис. 2, *d*). Давление газа (рис. 2, *e*) в центральной области повышенное $P > P_{\text{атм}}$ (пинч-эффект), а на периферии разряда вблизи катода — пониженное $P < P_{\text{атм}}$ (эффект Бернулли).

Удельный тепловой поток q на поверхность анода имеет немонокотное распределение и достигает максимального значения в центральной $r \approx 10$ мм области кольцевой поверхности (рис. 2, *f*).

Несмотря на достаточно большую силу тока $I = 2$ кА наблюдаются сравнительно низкие значения температуры $T \approx 20$ кК и скорости $V \approx 50$ м/с плазмы, что обусловлено осесимметричным пространственным рассредоточением электродуговой плазмы.

В зоне привязки дуги температура анода превышает температуру плавления (930 К) и образуется сварочная ванна глубиной $l_{\text{пл}} = 4$ мм и радиусом $r_{\text{пл}} = 13,6$ мм (рис. 3, *a*). Гидродинамика расплава (рис. 3, *b*) формируется, главным образом, в результате вязкого взаимодействия радиального потока плазмы с поверхностью расплава и, в меньшей степени, — в результате воздействия электромагнитных сил: в сварочной ванне наблюдаются два тороидальных вихря. Скорость течения жидкого металла на поверхности правого вихря достигает значений $V_a \approx 0,3$ м/с, тогда как на поверхности левого вихря соответствующее значение $\approx 0,03$ м/с заметно ниже. Это обусловлено разной величиной скорости радиального потока газа вблизи поверхности сварочной ванны (см. рис. 2, *d*), и, следовательно, различной величиной вязкого трения газа с жидким металлом.

Максимальное значение удельного теплового потока приходится на периферию сварочной ванны и эта область является наиболее прогретой, однако наибольшая глубина плавления наблюдается в приосевой области $0 < r < 2$ мм, что обусловлено конвективным переносом тепла из горячей периферии внутрь сварочной ванны.

С увеличением L высокотемпературная область дуги все глубже проникает в межэлектродный зазор, где температура газа возрастает от ≈ 3 кК ($L = 3$ мм) до ≈ 10 – 12 кК при $L > 10$ мм. Однако течение электрического тока в приосевой области зазора при $r < 5$ мм по-прежнему отсутствует, и токоведущая область дуги сохраняет кольцевую пространственную форму (при соотношении $L/R_0 > 1$ уместнее говорить о трубчатой форме дуги). Расчетные данные (максимальные значения) для различных L представлены в табл. 1 (в табл. 1–3 символы “–” и “+” обозначают отсутствие плавления или сквозное плавление анода соответственно). Сравнение показывает, что во всем диапазоне L температура плазмы остается практически неизменной $T \approx 20$ кК; с увеличением межэлектродного расстояния от 3 до 20 мм скорость газа V возрастает от ≈ 30 до 80 м/с, и далее при $L > 20$ мм выходит на асимптотику, приблизительно равную 100 м/с. Из-за пространственного рассредоточения столба дуги значения удельного теплового потока q и температуры поверхности анода T_a монотонно уменьшаются. В то же время глубина плавления анода $l_{\text{пл}}$ и площадь поверхности расплава $S_{\text{пл}}$ сначала возрастают, а затем уменьшаются вплоть до отсутствия плавления. Значение $L = 10$ мм в данном случае является близким к оптимальному, обеспечивающему наибольшую глубину плавления.

С ростом L , несмотря на заметное изменение значения q , величина интегрального теплового потока $Q = 2\pi \int_0^R q r dr$ на поверхность анода меняется весьма незначительно. Слабые изменения Q объясняются тем, что с уменьшением максимума q его значения на внешней и внутренней периферии кольцевой поверхности возрастают.

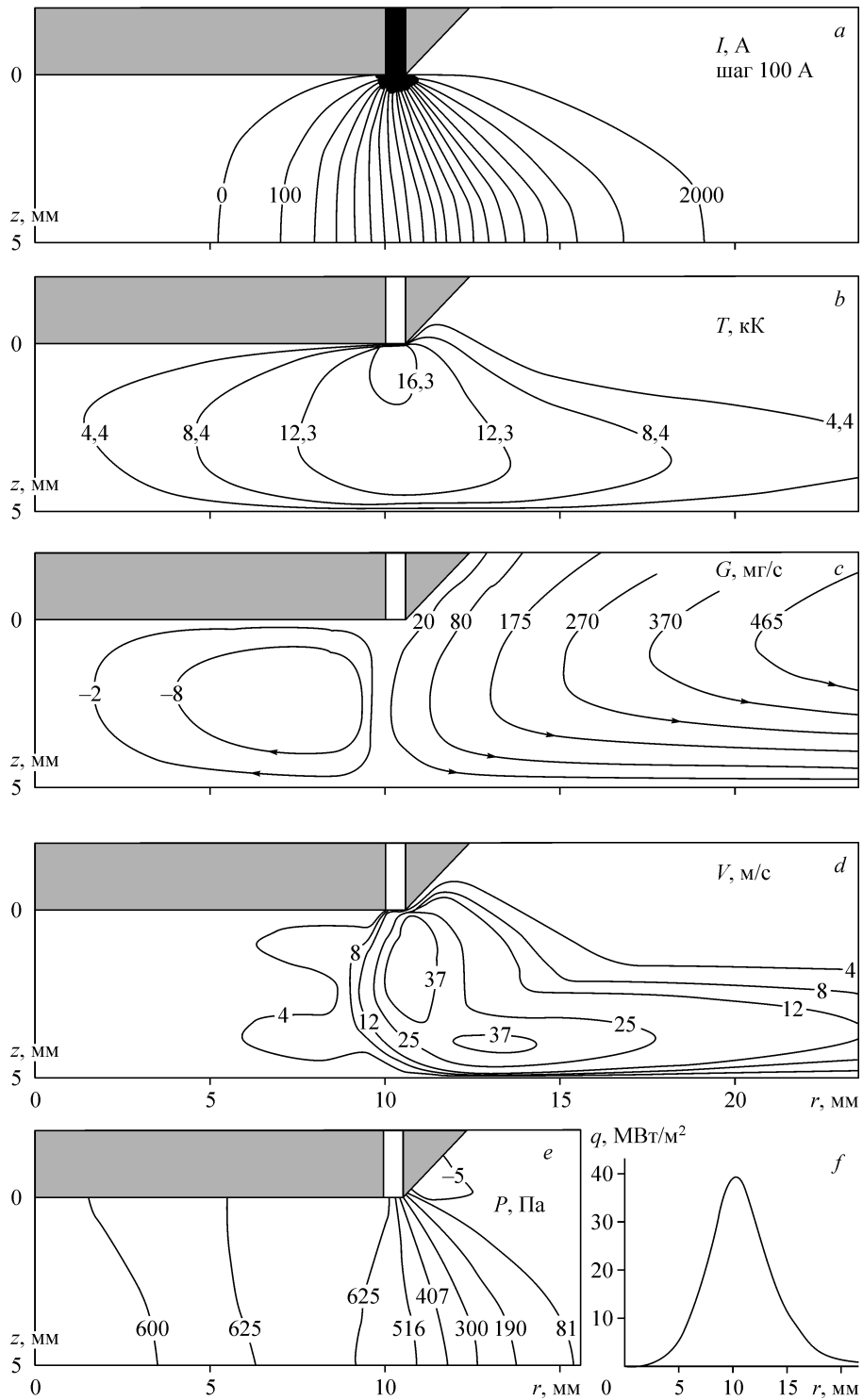


Рис. 2. Распределения характеристик дуги: изолинии электрического тока I (a), температуры T (b), расхода G (c), скорости V (d), давления P (e), удельный тепловой поток q на поверхность анода (f). $I = 2$ кА, $L = 5$ мм.

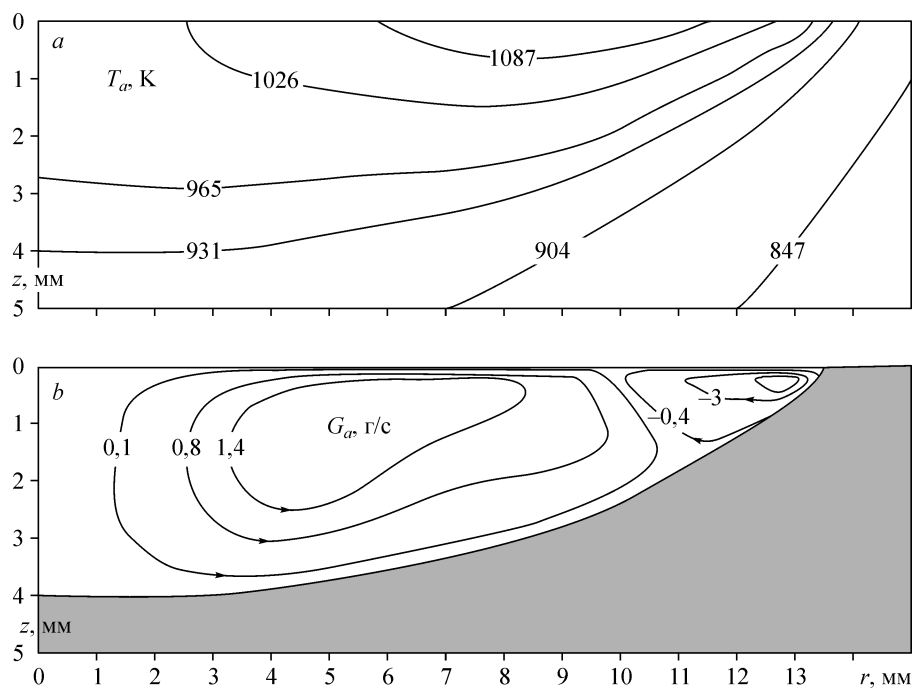


Рис. 3. Изолинии температуры T_a (a) и расхода расплава G_a (b) в сварочной ванне анода.
 $I = 2$ кА, $L = 5$ мм.

Таким образом, глубина плавления зависит не только от величины интегрального Q и удельного теплового потока q , но и от характера (профиля) распределения $q(r)$ на поверхности анода. Например, для варианта $L = 3$ мм расчетные значения температуры T_a поверхности анода и удельного теплового q потока наибольшие, но глубина плавления анода примерно в 2,5 раза меньше по сравнению с вариантом $L = 10$ мм (см. табл. 1).

Расчетная немонотонная зависимость $l_{пл}$ от L качественно соответствует результатам опытных данных [7] для дуги со стержневым катодом.

При других значениях внешних параметров, либо других условиях горения дуги оптимальные значения межэлектродного расстояния могут быть иными. Также отметим, что представленные результаты расчета имеют характер лишь качественных оценок, поскольку ограниченные возможности используемой математической

Таблица 1
 Расчетные данные для различных значений L при $I = 2$ кА, $h_a = 10$ мм

| L , мм | T , кК | V , м/с | T_a , К | q , МВт/м ² | Q , кВт | $l_{пл}$, мм | $S_{пл}$, мм ² | V_a , м/с |
|----------|----------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|---------------|----------------------------|-------------|
| 3 | 19,4 | 31 | 1200 | 62 | 18,7 | 2,5 | 480 | 0,23 |
| 5 | 19,7 | 47 | 1148 | 40 | 19,0 | 4,0 | 581 | 0,33 |
| 8 | 19,7 | 62 | 1095 | 29 | 19,3 | 6,3 | 616 | 0,37 |
| 10 | 19,8 | 67 | 1092 | 27 | 19,4 | 6,9 | 616 | 0,41 |
| 12 | 19,8 | 72 | 1078 | 25 | 19,5 | 5,8 | 607 | 0,42 |
| 15 | 19,8 | 73 | 1026 | 22 | 19,7 | 3,3 | 556 | 0,52 |
| 20 | 19,8 | 83 | 1006 | 21 | 20,1 | 3,0 | 547 | 0,61 |
| 25 | 19,8 | 87 | 1004 | 20 | 20,1 | 2,8 | 507 | 0,63 |
| 30 | 19,9 | 96 | 943 | 17 | 20,1 | – | – | – |
| 35 | 19,9 | 99 | 926 | 17 | 20,1 | – | – | – |

модели не позволяют учесть ряд факторов, наблюдаемых в реальных условиях. Например, в [1] указывается, что при расстоянии менее 100 мм от сопла плазматрона до расплавляемого металла есть опасность возникновения двойной дуги, разрушающей сопло. В работе [8] в ходе обсуждения режимов резки металлов дуговым плазматроном отмечается, что при расстояниях менее 10–15 мм между плоскостью разрезаемого листа и соплом плазматрона происходит замыкание плазматрона на изделие из-за разбрызгивания металла и образования перемычки.

Таким образом, в технологических процессах обработки металлов оптимальная длина дуги определяется не только требуемым тепловым воздействием на обрабатываемое изделие, но и диктуется особенностями самого процесса.

Влияние силы тока на характеристики плазмы и тепловое состояние анода рассмотрено на примере дуги с межэлектродным расстоянием $L = 10$ мм в диапазоне изменений тока $I = 1,8–2,1$ кА; геометрические размеры катода и толщина анода остались неизменными.

Расчетные значения для различных токов приведены в табл. 2. С ростом I возрастают температура и скорость потока плазмы, мощность электрической дуги $\sim I$ и, следовательно, тепловое воздействие на поверхность анода. При значении $I = 1,8$ кА температура анода еще не превышает температуру плавления материала и сварочной ванны не образуется. Дальнейший рост силы тока приводит к увеличению мощности дуги и ее теплового воздействия на анод: глубина плавления анода возрастает и уже при значении $I = 2,1$ кА происходит его сквозное плавление.

Обращает на себя внимание высокая чувствительность теплового состояния анода к изменению силы тока: различие значений 1,8 и 2,1 кА невелико и составляет около 15 %, но если в первом случае анод вообще не плавится, то в последнем — происходит его сквозное плавление.

Влияние радиальных размеров кольцевой катодной привязки рассмотрено на примере дуги силой тока $I = 2$ кА, межэлектродным расстоянием $L = 10$ мм и геометрическими размерами R_0, R_1 , указанными в табл. 3. Поскольку изменение площади S_c катодной привязки дуги при прочих неизменных параметрах влечет за собой существенное изменение характеристик потока плазмы, то для более корректного сравнения результатов расчета значения R_0 и R_1 задавались из условия равенства площадей катодной привязки S_c во всех рассматриваемых вариантах. Расчетные значения U являются приближенными из-за неучета падения напряженности в приэлектродных областях.

Толщина анода принята равной $h_a = 15$ мм, поскольку при меньшем значении — 10 мм — для большинства вариантов наблюдалось сквозное плавление.

Анализ результатов показал, что при относительно больших размерах кольцевой привязки $R_0 = 10$ мм и $R_1 = 10,5$ мм дуговой разряд в большей степени рассредоточен, температура и скорость потока плазмы сравнительно невысокие,

Таблица 2

Расчетные данные для различных токов I при $L = 10$ мм, $h_a = 10$ мм

| I , кА | T , кК | V , м/с | T_a , К | q , МВт/м ² | Q , кВт | $l_{пр}$, мм |
|----------|----------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|---------------|
| 1,8 | 14,9 | 49 | 922 | 23 | 17,2 | – |
| 1,9 | 15,3 | 55 | 1002 | 25 | 18,3 | 1,3 |
| 2,0 | 19,8 | 67 | 1095 | 27 | 19,4 | 6,9 |
| 2,1 | 20,9 | 74 | 1197 | 29 | 20,6 | + |

Таблица 3

Расчетные данные для различных значений R_0, R_1 кольцевой привязки при $I = 2$ кА, $L = 10$ мм,
 $S_c \approx 33$ мм², $h_a = 15$ мм

| № варианта | $R_0 - R_1$, мм | T , кК | V , м/с | T_a , К | q , МВт/м ² | Q , кВт | U , В | $l_{пл}$, мм |
|------------|------------------|----------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|---------|---------------|
| 1 | 10 – 10,5 | 19,8 | 67 | 860 | 27 | 19,4 | 8,6 | – |
| 2 | 8,4 – 9 | 22,3 | 100 | 1060 | 36 | 20,1 | 8,9 | 1,7 |
| 3 | 7,3 – 8 | 23,7 | 121 | 1196 | 43 | 20,7 | 9,2 | 5,7 |
| 4 | 5,0 – 6 | 24,9 | 192 | 1780 | 62 | 22,6 | 10,5 | 11,2 |

тепловое воздействие дуги на анод незначительно и плавления последнего не происходит (вариант 1, табл. 3). Уменьшение радиальных размеров кольцевой привязки приводит к пространственной локализации дугового разряда, увеличению температуры и скорости потока плазмы, а также теплового воздействия на анод и формированию расплава (варианты 2–4, табл. 3).

При еще меньших значениях $R_0 = 3,8$ мм и $R_1 = 5$ мм провести численный расчет не представляется возможным: расчетная температура плазмы превышает 25 кК, что выходит за границы применения математической модели (используемые табличные данные о теплофизических свойствах плазмы являются функциями температуры, ограниченной сверху значением $T = 25$ кК).

Интересно, что с уменьшением радиальных размеров кольцевой привязки напряжение U в столбе дуги и, следовательно, мощность дуги $\sim IU$ меняются весьма незначительно. Например, с уменьшением R_0 в два раза мощность дуги возрастает приблизительно в 1,2 раза (см. варианты 1, 4, табл. 3); казалось бы, и тепловое воздействие на анод также должно меняться незначительно. Однако если в первом случае плавления анода вообще не происходит, то во втором случае наблюдается плавление анода на глубину 11,2 мм. Таким образом, пространственная локализация, либо рассредоточение дуги (при прочих неизменных внешних параметрах L, I, S_c) влекут за собой изменение профиля распределения $q(r)$ и теплового воздействия на анод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренном диапазоне внешних параметров характер протекающих процессов и распределения характеристик дуги с кольцевой катодной привязкой качественно близки между собой. По отношению к дуге со стержневым катодом отличительными особенностями разряда с кольцевой катодной привязкой являются его кольцевая пространственная форма и распределенное по кольцу тепловое воздействие на поверхность анода. Изменение межэлектродного расстояния и (или) радиальных размеров кольцевой катодной привязки обуславливает пространственную локализацию, либо рассредоточение дуги; это влечет за собой изменение профиля распределения теплового потока и оказывает заметное влияние на тепловое состояние анода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарнасов Г.А., Фридман А.Г., Каринский В.Н. Плазменная плавка. — М: Металлургия, 1968. — 180 с.
2. Новиков О.Я., Тамкиви П.И., Тимошевский А.Н. и др. Многодуговые системы. — Новосибирск: Наука, 1988. — 133 с.
3. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А. Исследование термохимических катодов в дуговых плазматронах // Теплофизика и аэромеханика. — 2005. — Т. 12, № 4. — С. 685–691.

4. 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.
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. Ерохин А. Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
8. Быховский Д.Г. Плазменная резка. — Л: Машиностроение, 1972. — 168 с.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2006 г.