

УДК.533.924

ЭРОЗИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ВИХРЕВЫХ ПЛАЗМОТРОНАХ

Б.И. МИХАЙЛОВ

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Рассмотрены стационарные режимы работы торцевых трубчатых электродов. Дано объяснение образования катодных и анодных струй, являющихся причиной резкого повышения эрозии электродов при увеличении тока дуги.

Рассмотрены возможные пути увеличения ресурса непрерывной работы трубчатых электродов. На основании анализа теплофизического взаимодействия пятна дуги с поверхностью электрода показано, как сделать выбор оптимального металла для его изготовления.

ВВЕДЕНИЕ

Использование трубчатых электродов открывает перед разработчиками широкое поле деятельности, позволяя реализовывать самые различные компоновочные схемы плазмотронов (рис. 1). Незбирательность этих электродов к роду используемых плазмообразующих сред и роду тока, большие токовые нагрузки, малая чувствительность к повышенному давлению по сравнению с термоэмиссионными катодами и др. определяют их большую перспективность.

В отличие от плазмотронов со стержневыми термоэмиссионными (“горячими”) катодами с неподвижными дуговыми пятнами, в этих плазмотронах стационарная работа обеспечивается тем, что в них дуговые пятна должны непрерывно перемещаться по поверхности “холодных” электродов, т. е. быть нестационарными.

1. СКАЧКООБРАЗНОЕ ДВИЖЕНИЕ КАТОДНОГО ПЯТНА

Наличие вращения газа заставляет радиальный участок дуги выгибаться и растягиваться, в результате чего форма его меняется во времени. На рис. 2, *a* цифрой 1 обозначено положение радиального участка дуги в какой-то произвольный момент времени. Через малый отрезок времени Δt дуга занимает положение 2. Ее форма стала спиралевидной. Отставание прикатодной части объясняется вязкостью пограничного слоя. Из рис. 2, *a* следует вывод о существовании двух механизмов перемещения катодного пятна и, соответственно, двух механизмов его эрозии.

Первый механизм движения пятна по поверхности электрода — скачкообразный. Он обусловлен явлением микрошунтирования, т. е. электрическими пробоями между радиальной привязкой дуги и стенкой трубчатого катода. Действительно, дуга, выстилаясь по спирали [1] у поверхности электрода, прогревает газовый слой между собой и стенкой. При этом между ними возникает разность потенциалов, тем большая, чем дальше выбранное место на привязке находится от пятна дуги. В момент, когда в каком-то месте (точка 3 на рис. 2, *a*) она превысит пробойную разность потенциалов U_s ($E_\delta \Delta l \geq U_s = E_s \delta$), происходит акт шунтирования.

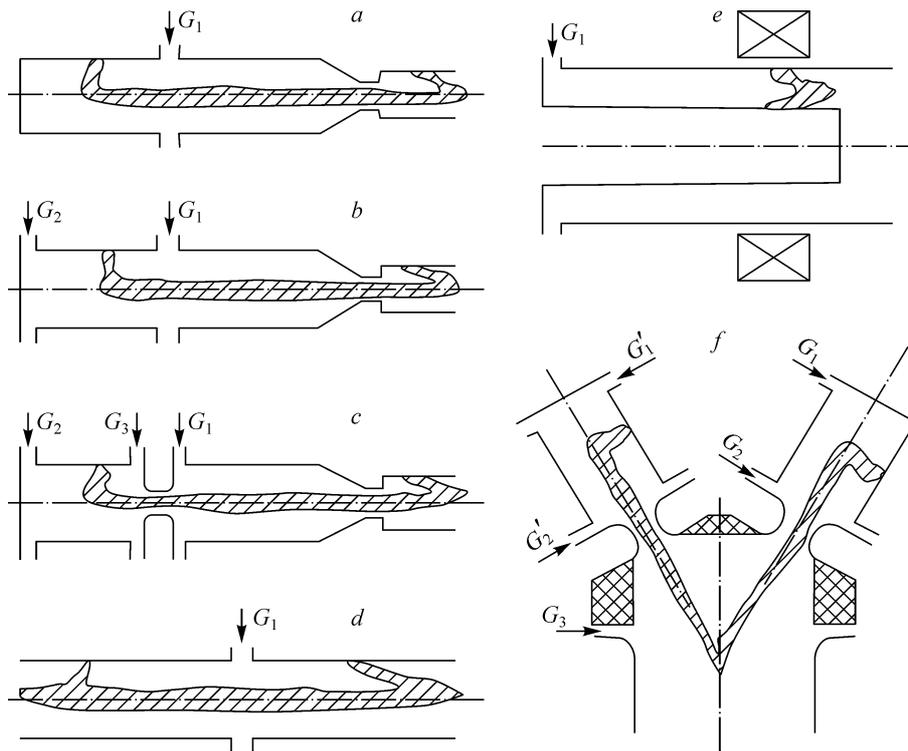


Рис. 1. Компонвочные схемы дуговых плазмотронов с трубчатыми электродами. *a* — однокамерный, *b* — двухкамерный, *c* — трехкамерный, *d* — плазмотрон с двухсторонним истечением, *e* — коаксиальный, *g* — V-образный двухструйный плазмотрон.

Здесь E_δ — напряженность электрического поля в дуге, E_s — значение пробивной напряженности в зазоре между стенкой электрода и привязкой дуги. Прежний участок 1, рис. 2, *a*, отмирает, а новый 2 — развивается, пока не созреет новая пробойная ситуация и т. д. На фото (рис. 2, *b* [2]) зафиксирован именно этот момент.

На рис. 3 изображены три различных ситуации в зоне шунтирования. Ситуация, рис. 3, *a*, характеризуется сильным прилеганием радиальной привязки к стенке электрода. Оно может быть еще более усилено с помощью наложения внешнего

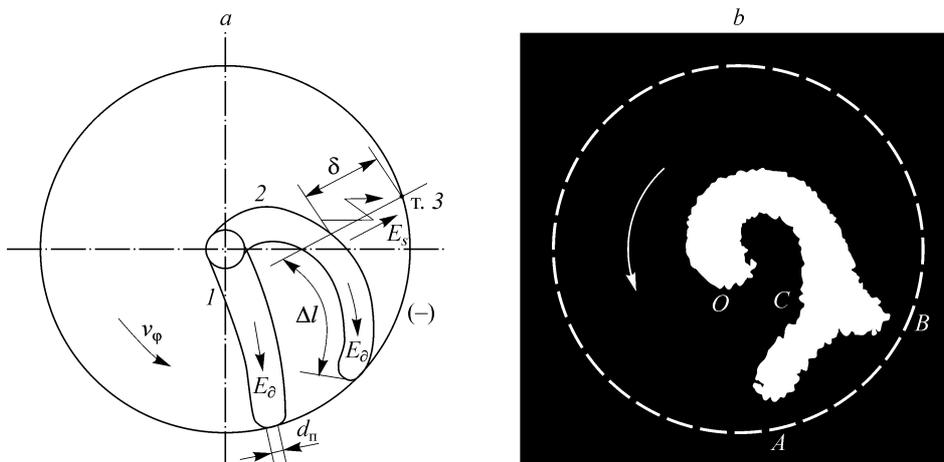


Рис. 2. Микрощунтирование радиальной привязки дуги в торцевом трубчатом электроде. *a* — схема процесса, *b* — фотография радиального участка дуги в момент шунтирования.

Таблица 1

Теплофизический параметр K эффективности рассеяния тепла от дугового пятна в тело электрода для ряда используемых материалов

i	Материал	$T_{пл},$ °C	$\rho,$ кг/м ³	$\lambda,$ Вт м · град	$c,$ Дж кг · град	$a = \frac{\lambda}{\rho c} \times$ $\times 10^{-4} \frac{м^2}{с}$	$\Delta T_{пл},$ °C	$K =$ $= \frac{(\Delta T_{пл} \cdot \lambda)^2}{a} \times$ $\times 10^{14} \frac{кг^2}{с^5}$
1.	Cu	1083	8930	389	394	1,1	1063	15,9
2.	Ag	961	10500	421,5	237	1,69	940	9,3
3.	Au	1063	19300	312	132	1,22	1043	8,68
4.	Fe	1530	7880	74,2	498,6	0,189	1510	6,6
5.	Al	660	2700	208,8	880	0,88	640	2,03
6.	1X18Н9Т	1425	7900	16,1	503	0,0405	1405	1,26
7.	Графит	3820	1600	35,6	120	1,85	3800	0,97

теплофизических свойств для ряда известных материалов и приведены результаты расчетов параметра K для них.

Видно, что у меди этот коэффициент имеет максимальную величину $K_{Cu} =$

$$= 15,9 \cdot 10^{14} \text{ кг}^2/\text{с}^5. \text{ Отношение } \xi_i = \left(\frac{\Delta T_{пл, Cu} \lambda_{Cu}}{\Delta T_{пл, i} \lambda_i} \right)^2 \frac{a_i}{a_{Cu}} \text{ при } q = \text{idem} \text{ представ-$$

ляет собой отношение времени $\tau_{0, Cu}$ для меди к аналогичному времени $\tau_{0, i}$ для i -го материала, т. е. ξ_i показывает, во сколько раз i -й материал греется быстрее меди. По мере роста ξ_i все исследованные материалы выстраиваются в следующий ряд:

Cu, Ag, Au, Fe, Al, 1x18НЮТ, Графит.

Из-за легкоплавкости серебро занимает в этом ряду 2-ое место, несмотря на то, что у него самая лучшая теплопроводность. Находясь в рамках предположения о скачкообразном перемещении пятна дуги в торцевом трубчатом электроде, можно считать очевидным, что тангенциальная скорость V_ϕ движения радиального участка дуги должна быть не меньше критического значения, равного

$$V_{кр} = \frac{\Delta l}{\tau_0}, \quad (3)$$

где Δl — шаг микрошунтирования (см. рис. 2).

Если $V_\phi < V_{кр}$, то будет наблюдаться подплавление электрода под пятном, а это приведет к катастрофической его эрозии. Используя выражение (1) и (2), представим формулу (3) в виде

$$V_{кр, i} = \frac{\Delta l q^2}{K_i}. \quad (4)$$

Откуда видно, что в случае медного электрода критическое значение скорости $V_{кр, Cu}$ оказывается минимальным и отношение критических скоростей $V_{кр, i}/V_{кр, Cu}$ в зависимости от рода используемого материала при идентичных режимах работы получается равным

$$\frac{V_{кр, i}}{V_{кр, Cu}} = \frac{K_{Cu}}{K_i} \equiv \xi_i.$$

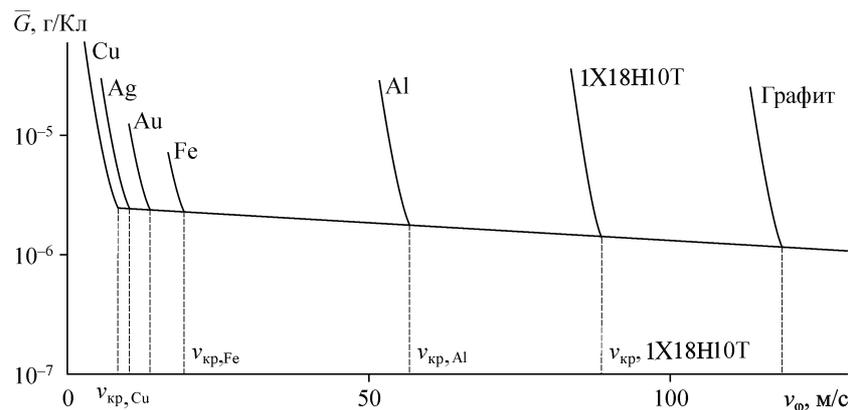


Рис. 4. Качественное влияние на удельную эрозию и критическую скорость рода металла для изготовления трубчатого электрода.

Качественные зависимости удельной эрозии от тангенциальной скорости радиальной привязки дуги и от рода материала показаны на рис. 4. Таким образом, чтобы эрозия трубчатого электрода была докритической, необходимо выполнение условия $V_\phi > V_{кр,i}$. Причем $V_{кр,i}$ соотносятся в зависимости от рода электродного материала как

$$V_{кр,Cu} < V_{кр,Ag} < V_{кр,Au} < V_{кр,Fe} < V_{кр,Al} < V_{кр,1X18H10T} < V_{кр,графит},$$

т. е. выстраиваются в тот же ряд, что и ξ_i .

Из формулы (1) видно, что критическая скорость зависит от квадрата плотности теплового потока в пятне дуги, а это означает, что для катодного и анодного пятен они соотносятся как

$$\frac{V_{кр,K}}{V_{кр,A}} = \left(\frac{U_k j_k}{U_A j_A} \right)^2.$$

Численные их значения приведены в табл. 2.

Известно, что в результате взаимодействия тока дуги с собственным магнитным полем в дуге возникает повышенное гидродинамическое давление. Это явление известно под названием “пинч-эффекта” [7]. Ввиду больших плотностей тока

Таблица 2

Критические скорости движения радиальной привязки дуги в торцевых трубчатых катоде и аноде для ряда используемых материалов

i	Материал	$\xi_i = \frac{K_{Cu}}{K_i}$	$\frac{V_{кр,i}}{V_{кр,Cu}} = \xi_i$	$V_{кр,i}^{(-)} = \frac{4\Delta l \cdot q_{(-)}^2}{\pi \cdot K_i} \text{ м/с}$	$V_{кр,i}^{(+)} = V_{кр,i}^{(-)} \left(\frac{q_{(+)}}{q_{(-)}} \right)^2 \text{ м/с}$
1	Cu	1,0	1,0	7,3	0,13
2	Ag	1,67	1,67	12,5	0,23
3	Au	1,79	1,79	13,3	0,25
4	Fe	2,3	2,3	17,5	0,32
5	Al	7,7	7,7	57,0	1,06
6	1X18H10T	12,3	12,3	91,4	1,70
7	Графит	15,1	15,1	119,1	2,21

в приэлектродных областях [1] это давление может быть значительным. Для его оценки выделим, предположив для упрощения дуговой канал цилиндрическим, на расстоянии r от оси, рис. 5, элемент кольцевого слоя единичной длины и толщиной dr . При плотности тока j пондеромоторная сила $dF = [d\vec{l} \times \vec{B}(r)]$, действующая на объем $rd\varphi \cdot dr$, равна

$$dF = r d\varphi dr j B(r). \quad (5)$$

По закону полного тока [6] следует, что

$$2\pi rH = \pi r^2 j.$$

Откуда, с использованием известного соотношения для магнитной индукции $B(r) = \mu_0 H(r)$, следует

$$B(r) = \mu_0 \frac{rj}{2}.$$

Подстановка этого выражения в (5) дает для элемента силы

$$dF = \mu_0 \pi r^2 j^2 dr d\varphi.$$

Кроме пондеромоторной силы dF на выделенный объем действуют силы давления со стороны оси $Prd\varphi$, а извне — $(P+dP)rd\varphi$. Под действием этих сил выделенный объем находится в равновесии

$$\mu_0 \pi r^2 j^2 dr d\varphi = -dpr d\varphi,$$

откуда $dp = \frac{1}{2} \mu_0 j^2 dr$. Интегрирование по всему сечению дает

$$P_0 = P + \frac{\mu_0}{4\pi} jI. \quad (6)$$

Полагая для оценки $P = 10^5$ Н/м², $j_k = 10^9$ А/м² [7], $I = 500$ А, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, получаем величину давления в центре катодного пятна, равную

$$P_0 = 10^5 + \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{10} \cdot 500}{4\pi} = 6 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 = 6 \text{ ата}.$$

Импульсное периодическое воздействие на подогретую поверхность катода

приводит к его эрозии. Это напоминает процесс разрушения стальных лопастей гребных винтов при кавитации. Там тоже [8] в момент смыкания при конденсации паровых каверн (пузырей), прилегающих к поверхности лопасти, происходит за счет сил инерции резкое

увеличение давления. От многократного импульсного воздействия на поверхности появляются углубления и бороздки, которые постепенно углубляются и разрастаются вплоть до того, что начинают выпадать отдельные кусочки металла, придавая поверхности губчатое строение.

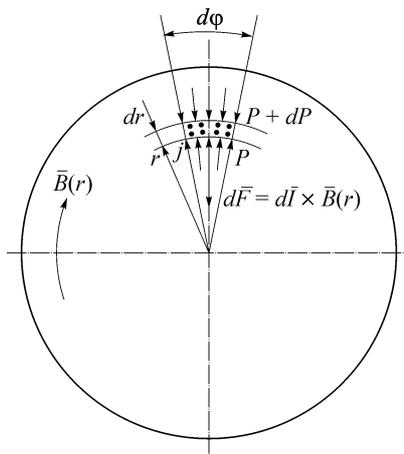


Рис. 5. Расчетная схема.

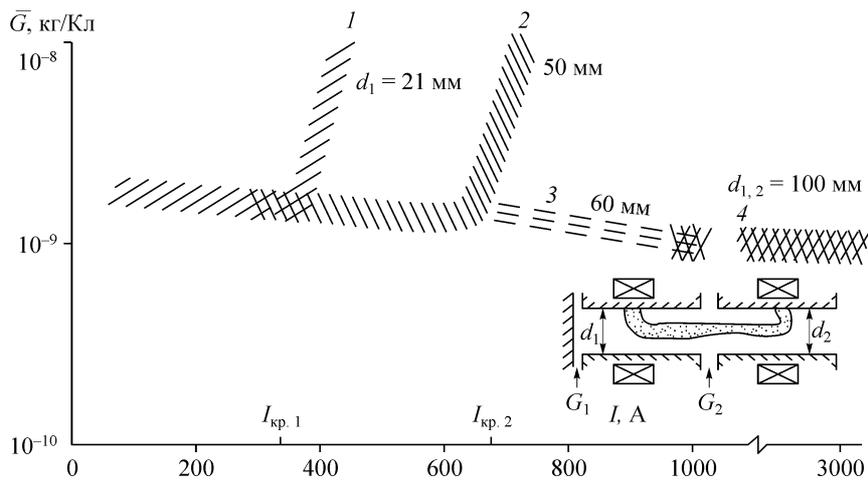


Рис. 6. Зависимость удельной эрозии медных трубчатых катодов от тока.

В случае эрозии электродов процесс усугубляется еще повышенной температурой металла под пятном дуги, поскольку с увеличением температуры прочность всех металлов уменьшается [9]. Кроме того, в обоих случаях из-за периодического повторения воздействия имеет место еще и усталостный тип разрушения металла [13], усугубляющий процесс эрозии. Важным фактором для эрозии трубчатых электродов являются еще и тепловые удары со стороны непрерывнодвигающегося по поверхности электрода дугового пятна [10, 11].

Из формулы (6) видно, что с увеличением силы тока I давление от пинч-эффекта растет. Экспериментально установлено [12], что удельная эрозия, практически не изменяющаяся с током дуги, рис. 6, после достижения им некоторого критического значения начинает катастрофически расти. Совершенно очевидно, что здесь режим работы привязки дуги претерпевает какие-то сбои. Появляются новые эффекты, обусловленные увеличением тока дуги. Естественно предположить, что это связано с появлением в пятне дуги катодных струй. На рис. 7 [13] приведена кинограмма процесса формирования катодно-струйного режима работы трубчатого катода. Такой режим имеет место при увеличении тока (500 А и более). Скорость съемки 2000 кадров в секунду, время экспозиции 10^{-4} с [13]. На первом кадре катодная струя достигла противоположной стенки, где образуется новая привязка дуги, старая же отмирает. Новая привязка существует в течение трех промежутков длительностью по $0,5 \cdot 10^{-3}$ секунды каждая, т. е. она неподвижна $1,5 \cdot 10^{-3}$ секунды. На четвертом кадре видно начало образования новой катодной струи, на пятом — создание новой неподвижной радиальной привязки и т. д.

Время жизни такой дуговой привязки составляет более 10^{-3} с. Это очень много. Пятно дуги неподвижно, металл нагревается, согласно формуле (1), выше температуры плавления и разбрызгивается, эрозия становится катастрофически большой, что и наблюдается экспериментально (см. рис. 6 [12]). Подобные режимы являются нерасчетными и не должны допускаться.

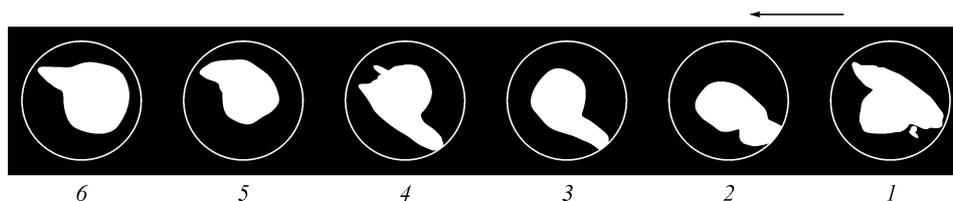


Рис. 7. Кинограмма струйно-блокировочного режима работы трубчатого катода.

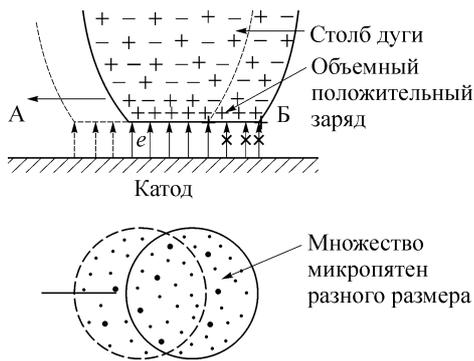


Рис. 8. Схема движения катодного пятна, состоящего из множества микропятен.

2. СКОЛЬЗЯЩИЙ РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ КАТОДНОГО ПЯТНА

Обратимся снова к рис. 3, с, на котором радиальная привязка дуги перпендикулярна к поверхности трубчатого катода. Такую ситуацию можно создать, если наряду с вихревым газовым потоком воздействовать на радиальную привязку магнитным полем с резко убывающей [3] от периферии к центру индукцией (см. рис. 3, с). В этом случае максимальная пондеромоторная сила прикладывается к прикатодной части дуги. Привязка дуги принимает форму радиальной спицы и начинает двигаться по закону твердого тела. Это неотвратимо ломает механизм шунтирования и переводит режим движения катодного пятна к совершенно иной — скользящей — форме движения без шунтирования.

Ряд исследователей [14, 15] и др. на основании микроскопических наблюдений поверхности катода нашли, что катодное пятно представляет собой сложное образование, состоящее из большого числа микропятен, каждое из которых связано со столбом дуги отдельным дуговым каналом (см. рис. 4). Однако из-за действия пондеромоторных сил некоторые из соседних каналов сливаются друг с другом, образуя более крупные микропятна. В результате в катодном пятне находится множество микропятен различного размера.

Радиальная спица под действием аэродинамических и магнитных сил движется как твердое тело, например в направлении “А” (рис. 8). При этом со стороны “А” между катодом и надвигающимся краем столба дуги возникают новые дуговые каналы, а на поверхности катода — новые микропятна. На стороне “Б”, после ухода столба дуги, бывшие там дуговые каналы и микропятна отмирают. В результате происходит непрерывное скольжение дуги по поверхности катода. Такой режим характеризуется минимальной эрозией трубчатого катода.

Интересно сопоставить значения критических скоростей в двух режимах движения катодного пятна дуги: режиме мелкомасштабного шунтирования и режиме скольжения. В первом случае $V_{кр,1} = \Delta l / \tau_0$, а во втором $V_{кр,2} = d_n / \tau_0$. Поскольку $\Delta l \gg d_n$, то значение критической скорости во втором случае много меньше, чем в первом. То есть, при прочих равных условиях, второй режим протекает при значительно меньших температурах электрода. Поэтому он характеризуется меньшей удельной эрозией.

3. К ВОПРОСУ О СНИЖЕНИИ ЭРОЗИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Таким образом, существует три режима работы торцевого трубчатого электрода:

I. Режим тангенциального мелкомасштабного шунтирования (см. рис. 3), характерный для докритических токов дуги с удельной эрозией при работе на воздухе порядка 10^{-6} г/Кл;

II. Струйный режим (см. рис. 7). Он наступает при превышении током дуги критических значений. Увеличение диаметра дуговой камеры смещает струйный режим в область больших токов (см. рис. 6);

III. Режим скольжения катодного пятна по электроду.

Эрозию трубчатых электродов можно представить как результат действия следующих процессов:

- испарения металла из-под пятна дуги,
- разбрызгивания дуговой ванночки в месте пятна электромагнитными силами,
- электростатического отсоса ионов металла из анодного пятна дуги,
- явления рециклинга ионов металла в прикатодной области,
- искрового разрушения поверхности электродов во время актов микромасштабного шунтирования,
- усталостного разрушения металла из-за непрерывно следующих механических и тепловых ударов,
- химического взаимодействия плазмообразующей среды с поверхностью электрода.

Хорошим охлаждением электрода и быстрым перемещением радиальной привязки дуги со скоростью, большей критической, первые четыре процесса можно практически полностью подавить. Тогда из видимых причин, приводящих к эрозии электродов остаются следующие.

1. Электроискровой тип эрозии. Он на наш взгляд родственен процессам эрозии, имеющим место при электроискровой обработке металлов (ЭИОМ) [16]. Только в случае ЭИОМ – это полезный процесс, а в нашем случае – вредный, и с ним следует бороться. Этот процесс энергетически обеспечивается энергией, запасенной в электромагнитном контуре [14, 16] в количестве $CU^2/2$, где C — электрическая емкость контура, U — пробивное напряжение. В нашем случае U — это также пробивное напряжение, а C — емкость системы электрод–радиальная привязка дуги.

Из сказанного выше следует, что эрозийная катастрофа начинается с появления струйного режима работы радиальной привязки дуги при увеличении силы тока. Нельзя допускать образования катодных (анодных) струй, т. е. нельзя с увеличением тока допускать перегрева металла в пятне дуги. Для этого, как следует из формулы (1) $\Delta T = (2q/\lambda)\sqrt{a\tau_k}$, необходимо уменьшать время контакта τ_k пятна с электродом путем ускорения движения радиальной привязки дуги переходом на режим супермелкомасштабного шунтирования посредством мощного внешнего магнитного поля.

Повышение ресурса торцевых трубчатых электродов, безусловно, связано с использованием сканирования пятна дуги по рабочей поверхности электрода. Известно три их разновидности:

1. Аэродинамическое [4], при котором периодически по заданному закону изменяются расходы рабочего газа через переднюю и заднюю вихревые камеры при сохранении постоянной их суммы [17]. В результате привязка дуги возвратно-поступательно перемещается вдоль оси электрода одновременно вращаясь с вихревым потоком газа, что и приводит к сканированию пятна дуги по рабочей поверхности трубчатого электрода. Это на порядок увеличивает рабочую зону электрода и на столько же ресурс непрерывной его работы;

2. Аэромагнитное сканирование [18];

3. Магнитное сканирование [19].

Двум последним способам будет посвящена отдельная статья.

Металловедческая сторона дела также представляет значительный интерес. Речь идет об использовании электродов из монокристаллической или супермелкозернистой меди [13], полученной методом порошкового ультрадиспергирования при кристаллизации. Оба пути значительно улучшают стойкость электродов при тепловых и механических ударах [4, 13]. Но второе направление, по-видимому, перспективнее из-за его большей технологичности. В любом случае важна и чистота, т. е. отсутствие в электродном материале вредных примесей, ухудшающих как его прочность, и особенно усталостную прочность, так и теплопроводность.

В настоящее время просматривается еще один путь снижения эрозии медных трубчатых электродов. При работе на воздухе удельная эрозия медного трубчатого анода порядка 10^{-6} г/Кл, в то время как при работе на водяном паре и токе дуги 330 А [20] в идентичном режиме она составляет $3 \cdot 10^{-7}$ г/Кл, т. е. втрое меньше. А все потому, что в последнем случае рабочая поверхность медного анода не окисляется и остается светлой, а после работы на воздухе вся она покрыта черной закисью меди CuO. При работе плазмотрона на азоте [21] окисление поверхности также исключено и при токе 300 А удельная эрозия составляет $4 \cdot 10^{-7}$ г/Кл, т. е. как на паре.

При работе на Ag или на смеси Ag + He и токе (1,9 – 2,3) кА удельная эрозия равна $(1,9 – 2,5) \cdot 10^{-8}$ г/Кл [22].

Создание в выходном трубчатом медном аноде за уступом аргоновой или Ag + He завесы при плазмообразующем газе — воздухе — позволит также исключить из процесса эрозии химическую составляющую от окисления меди кислородом, содержащемся в воздухе. Удельная эрозия при этом будет примерно такой же, как при работе на аргоне.

Использование вместо аргона пропан-бутана или метана дает еще более впечатляющий результат: удельную эрозию удастся снизить до $8,9 \cdot 10^{-9}$ г/Кл*. При этом расход, пропан (C₃H₈) + бутан C₄H₁₀, на создание прианодной газовой завесы составлял 4 % от массы основного воздуха, равного 2,5 г/с, и токе дуги в плазмотроне 300 А.

Попробуем объяснить полученный результат следующим образом. Попав в дуговую камеру, углеводородный газ под действием высокой температуры диссоциирует на H₂ и конденсированный углерод С в виде мелкодисперсного графитового порошка.

В центробежном поле вихря происходит сепарация: легкий водород уходит в приосевую область, а графитовый порошок остается на периферии, образуя у поверхности трубчатого анода сплошной слой. Далее можно предположить, что графит начинает химически взаимодействовать с основным потоком воздуха. В результате у стенки анода образуется слой СО или СО₂, что должно влиять на прианодные процессы.

Таким образом, небольшая, порядка 4 % от расхода основного газа, добавка в прианодную область воздушного плазмотрона углеводородного газа полностью снимает опасность окисления меди и существенно изменяет физические условия формирования радиальной привязки анодного конца электрической дуги.

ВЫВОДЫ

Существует ряд перспективных направлений увеличения ресурса трубчатых электродов. К ним относятся:

- реализация скользящего режима движения катодного пятна по поверхности трубчатых катодов,
- использование методов аэродинамического и магнитного сканирования катодного пятна дуги по рабочей поверхности трубчатого электрода. Это увеличивает ресурс его работы на порядок и более,
- использование для изготовления трубчатых электродов новых материалов с повышенной усталостной прочностью при импульсных тепловых и механических нагрузках,
- использование прианодных газовых завес, позволяющих снизить удельную эрозию электродов.

* Этот результат получен В.И. Кузьминым в ИТПМ СО РАН в 2002 г.

Автор благодарит доктора технических наук Э.К. Урбаха за полезные советы и замечания при обсуждении материала настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. — Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1975. — 179 с.
2. Колонина Л.И., Смоляков В.Я. Вращательное движение приэлектронных участков и особенностей расположения столба дуги в плазмотроне с вихревой газовой стабилизацией // ПМТФ. — 1965. — № 3. — С. 80–84.
3. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Михайлов Б.И. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. — Новосибирск: Наука. Сиб. предпр. РАН, 1999. — 712 с. — (Низкотемпературная плазма. Т. 17).
4. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмтроны). — М.: Наука. 1973. — 233 с.
5. Карелю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука. 1964. — 488 с.
6. Калашников С.Г. Электричество. — М.: Наука. 1964. — 667 с.
7. Роуз Д.Дж., Кларк М. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. — М.: Госатомиздат. 1963. — 488 с.
8. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. — М., Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”. — 2000. — 576 с.
9. Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. — М.: Металлургия. 1964. — С. 315.
10. Михайлов Б.И. Нестационарное воздействие перемещающегося пятна дуги на температуру электрода // Теплофизика высоких температур. — 1985. — Т. 23, № 5. — С. 1000–1003.
11. Басин А.С., Игнатьева О.С., Попов В.Н. Моделирование температурных полей в трубчатом электроде плазмотрона от нестационарного воздействия пятна дуги // Теплофизика и аэромеханика. — 1998. — Т. 5, № 4. — С. 583–592.
12. Аньшаков А.С., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Эрозия медного цилиндрического катода в воздушной среде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1988. — Вып. 2, № 7. — С. 65–68.
13. Жуков М.Ф., Тимошевский А.Н., Михайлов Б.И. и др. Плазмтроны. Исследования. Проблемы.— Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. — 204 с.
14. Болановский Б. Некоторые вопросы импульсной модели прикатодной зоны электрической дуги // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1979. — Вып. 2, № 8. — С. 25–30.
15. Раховский В.И. Эрозия электродов в контрагированном разряде // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1975. — Вып. 1, № 3. — С. 11–27.
16. Золотых Б.Н. Физические основы электродуговой обработки металлов. — М.: ГИТТЛ. — 1953. — 108 с.
17. Аньшаков А.С., Урбах Э.К., Урбах А.Э., Фалеев В.А., Чердиченко М.В., Шелест М.А. Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плазмотрона // Теплофизика и аэромеханика. — 2006. — Т. 13, № 3. — С. 493–500.
18. Пат. РФ № 1641179. Способ управления перемещением пятна дуги на внутренней поверхности цилиндрического электрода электродугового плазмотрона. Михайлов Б.И., Иохимович Я.Б., Балудин А.В. // Оpubл. в БИ, 1995, № 36.
19. Пат. РФ № 1503673. МКИ Н 01 С 10/02 Установка для электродугового подогрева газа / Михайлов Б.И., Иохимович Я.Б., Балудин А.В. // БИ, 1995, № 36.
20. Иохимович Я.Б., Михайлов Б.И. Эрозия электродов в водяной плазме // X Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы: Тез. докл. Ч. 1. — Минск, 1986. — С. 111–112.
21. Дандарон Г.-Н.Б., Урбах Э.К., Мишне И.И. Эрозия анода в плазмтронах с осевой подачей газа // Тезисы докл. IX Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. — Фрунзе: Илим, 1983. — С. 180–181.
22. Каринский В.Н., Куцын В.И. Сильноточный генератор плазмы инертных газов. // Тезисы XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. Ч. 1. — Новосибирск, 1989. — С. 26–27.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2007 г.