

УДК 533.9.02

## О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМАХ ЭРОЗИИ МЕДНОГО АНОДА В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Э.К. УРБАХ

*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск*

Предложена методика измерения скорости движения анодного пятна дуги по рабочей поверхности медного цилиндрического анода линейного плазмотрона. Показано, что с ростом скорости движения пятна удельная эрозия существенно уменьшается. При этом происходят качественные изменения механизма эрозии электрода: от капельного уноса металла до его механического разрушения. Приведена оценка ресурса непрерывной работы анода.

В электродуговых плазмотронах для нагрева различных газовых сред широко используются медные цилиндрические электроды. Их высокая работоспособность обеспечивается только при быстром движении опорных пятен дуги по поверхности металла под действием аэродинамических сил или иных внешних воздействий. В данной работе представлена зависимость удельной эрозии медного трубчатого анода от скорости перемещения анодного пятна при токе дуги  $\sim 265$  А. Рабочий газ — воздух.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Анодом служил медный (М1) внутренний электрод трехкамерного плазмотрона. В задней крышке плазмотрона установлено кварцевое стекло 1, позволяющее с помощью линзы 2 проецировать изображение радиального участка дуги 3 на экран 4. В экране имеется отверстие, с обратной стороны которого установлен фотодиод 5 (ФД-3). Вращающееся световое изображение анодного участка дуги, пересекая отверстие, периодически возбуждает фотодиод. Электрический сигнал от фотодиода поступает на усилитель 6 и затем на запоминающий осциллограф (С9-8). Форма сигнала представлена на рис. 2.

Скорость перемещения пятна определяется следующим образом. На экране осциллографа фиксируется изображение импульсов; с помощью встроенного в осциллограф измерителя определяется время  $t$  и количество промежутков между импульсами, которое соответствует числу оборотов радиального участка дуги за время  $t$ . Среднее время одного оборота  $t_{\text{ср}} = t/n$ , скорость перемещения пятна  $V_{\text{п}} = \pi d/t_{\text{ср}}$ , где  $d$  — внутренний диаметр электрода ( $d = 34$  мм).

Изменение скорости перемещения пятна дуги производилось за счет изменения расхода газа  $\Sigma G = G_1 + G_2$ , поступающего в полость анода. При этом помимо вращательного движения осуществлялось также осевое перемещение дугового пятна по поверхности электрода с относительной длиной 1–1,2 калибра. Осевое сканирование опорного пятна дуги обеспечивалось перераспределением расходов  $G_1$  и  $G_2$  регулятором 8 (см. рис. 1) с частотой сканирования 7 раз в минуту (при этом  $G_1 + G_2 = \text{const}$ ).

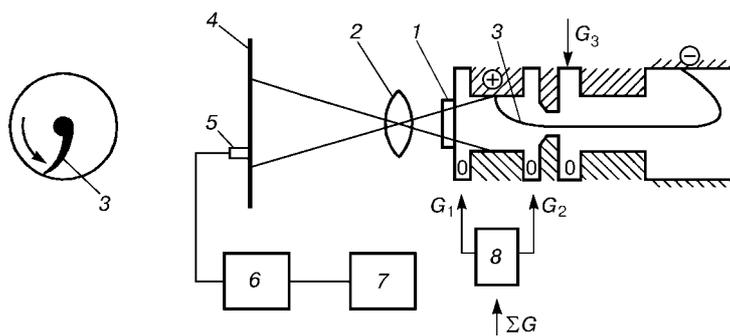


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  
Поясн. см. в тексте.

Эрозия электрода определялась его взвешиванием до и после эксперимента на весах ВЛТ-20-1 с точностью  $2 \cdot 10^{-5}$  кг. Время каждого эксперимента составляло не менее одного часа. Значение удельной эрозии рассчитывалось по формуле  $\bar{G} = \Delta m / It$ , где  $I$  — ток дуги. На рис. 3 приведена зависимость удельной эрозии анода от скорости перемещения пятна. Видно, что с ростом скорости движения анодного пятна значение  $\bar{G}$  быстро падает.

Скорость разрушения электродов под действием сильноточного дугового разряда определяется плотностью теплового потока в пятне дуги, теплофизическими свойствами материалов, условиями охлаждения, структурой опорного пятна дуги, динамикой его перемещения, составом рабочего газа, давлением в разрядной камере и рядом других факторов. Рассмотрим влияние на эрозию электро- и физико-химических процессов на поверхности и в теле электрода. Такой подход послужит хорошим дополнением к данным предыдущей работы [1].

При работе плазматрона рабочая поверхность анода подвергается переменным тепловым нагрузкам. Под их воздействием металл электрода быстро растрескивается до некоторой глубины, зависящей от скорости перемещения пятна. Чем больше значение  $V_n$ , тем меньше глубина трещин. Например, при  $V_n \approx 16$  м/с через 60 часов работы электрода средняя глубина трещин при токе дуги 265 А составила около 40 мкм.

Визуальное изучение поверхности электрода под микроскопом показывает, что при газодинамическом сканировании анодного пятна по поверхности электрода со скоростями, близкими к 20 м/с, наблюдается незначительное ее оплавление по краям зерен (трещин). Приповерхностный слой металла имеет блочную структуру в виде столбиков, разделенных трещинами. Некоторые блоки не имеют прочной связи с остальными и легко отделяются иглой. Именно на них происходит точечное оплавление, и, как правило, они перекрывают пустоты по границам зерен металла. При удалении этих блоков под ними наблюдается структура металла, характерная для исходной поверхности. В целом поверхность электрода светлая. При  $V_n = 20$  м/с значение удельной эрозии  $\bar{G} < 10^{-10}$  кг/Кл. Разрушение электрода происходит в основном в твердой фазе за счет выкрашивания отдельных частей столбчатой структуры металла

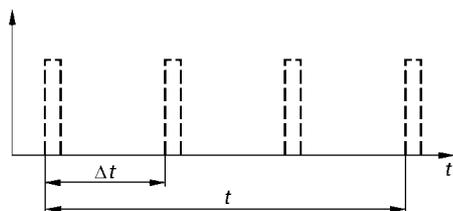


Рис. 2. Изображение импульсов.

Рис. 3. Зависимость удельной эрозии анода от скорости перемещения опорного пятна дуги.

вблизи его поверхности. Эрозия носит по существу механический характер. Окисление меди в этом режиме слабо сказывается на величине  $\bar{G}$ . Центральная часть кварцевого стекла 1 (см. рис. 1) не загрязняется мелкодисперсными частицами оксидов меди, несмотря на обратное течение газа в осевой области электрода от дуги к задней крышке плазматрона.

При уменьшении скорости перемещения пятна (см. рис. 3) удельная эрозия электрода возрастает. Трещины укрупняются, в углублениях количество оксидов меди. Поверхность анода стан-

10 м/с удельная эрозия уже составляет около  $10^{-9}$  кг/Кл, на поверхности появляются мелкие шарики оплавленной меди и ее оксидов ( $\approx 0,1$  мм), характерные следы сколов столбчатой структуры приповерхностного слоя металла исчезают. При этих скоростях наблюдаются относительно редкие останки пятна с выходом анодных струй в виде паров меди (зеленый ореол в зоне контакта дуги с металлом). В данном режиме эрозия происходит в основном за счет окисления, образования паров меди и лишь частично в твердой фазе.

С дальнейшим уменьшением скорости перемещения пятна размеры шариков оксидов меди увеличиваются (до 1 мм при  $V_{\text{п}} = 1,5 - 3$  м/с). Эродированная поверхность электрода практически полностью покрывается оксидной пленкой. Кварцевое стекло быстро загрязняется оксидами меди. Эрозия электрода происходит в основном за счет окисления меди и ее выброса из зоны пятна в виде капель расплавленного металла.

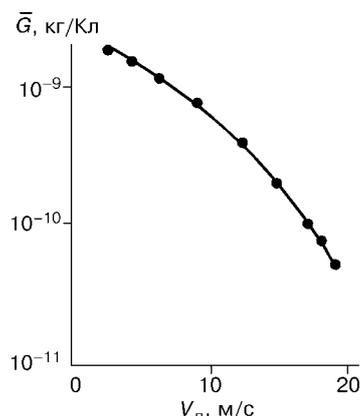
Полученные экспериментальные данные (см. рис. 3) позволяют оценить ресурс работы анода. Как уже отмечалось, анодное пятно помимо кругового движения по поверхности трубчатого электрода одновременно совершает осевое сканирование. Допустим, что выработка электрода имеет цилиндрический вид. Длина цилиндра при глубине перераспределения расходов газа  $G_1/G_2 = 1 \pm 0,1$  составляет  $\Delta z = d$  ( $d$  — диаметр электрода), глубина выработки  $\delta = (d_c - d)/2$ , где  $d_c$  — диаметр выработки (естественно, меньше наружного диаметра). Примем также, что удельная эрозия не зависит от времени [2] и при  $V_{\text{п}} \geq 18$  м/с остается на уровне  $\leq 10^{-10}$  кг/Кл. Тогда ресурс работы анода (в часах) составит

$$t = \frac{\Delta m}{I\bar{G}} = \frac{\pi(d_c^2 - d^2)\Delta z\rho}{4I\bar{G} \cdot 3,6 \cdot 10^3}.$$

При  $d = 3,4 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_c = 4,4 \cdot 10^{-2}$  м,  $\rho = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $I = 300$  А,  $\bar{G} = 10^{-10}$  кг/Кл получим ресурс медного анода  $t \geq 1800$  часов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аньшаков А.С., Тимошевский А.Н., Урбах Э.К. Влияние динамики перемещения дугового пятна на эрозию медных электродов // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы конф. Ч. 2. — Петрозаводский гос. ун-т, 1995. — С. 200 – 202.
2. Урбах Э.К., Быков А.Н. и др. Ресурсные характеристики электродов двухструйного плазматрона: Тез. докл. XI Всесоюз. конф. по генераторам низкотемп. плазмы. Ч. 2. — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1989. — С. 46 – 47.



*Статья поступила в редакцию 12 февраля 1999 г.*