

04;11;12

ИОННАЯ ЭРОЗИЯ С КАТОДА В ЭКТОННОМ МЕХАНИЗМЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

© Г.А.Месяц

Известно, что металл, покидающий катодное пятно в процессе функционирования вакуумной дуги, состоит из трех компонентов: плазмы, пара и капель. Многочисленными экспериментами показано, что плазменно-паровая фаза является преобладающей [1-3], а доля капельной фракции мала. Для многих металлов преобладающей является эрозия металла в виде ионов, поэтому ее называют ионной эрозией [2]. Для меди удельная эрозия происходит в виде нейтрального пара, а также 1, 2 и 3 зарядных ионов [4,5].

Нами показано [6,7], что одним из плодотворных подходов к изучению катодного пятна дуги (КП) является идея эктонов. Эктон — это порция электронов, которая покидает металл в результате электрического взрыва микрообъема металла. Самоподдержание эктонов происходит за счет взрыва струи жидкого металла при ее взаимодействии с плазмой. Плотность энергии при таком взрыве составляет порядка 10^4 Дж/г, длительность протекания тока электронов равна $10^{-9} - 10^{-8}$ с, а энергия, необходимая для возбуждения эктона, не превышает 10^{-8} Дж. Начало протекания электронов в эктоне обусловлено термоэлектронной эмиссией из-за высокой температуры в зоне взрыва. Окончание же эмиссии может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, охлаждением зоны взрыва из-за теплопроводности, увеличения радиуса зоны эмиссии, выброса из нее горячей плазмы и т. д. Во-вторых, окончание эмиссии может быть связано с "перехватом" тока, когда еще до окончания предыдущего микровзрыва происходит новый и катодное пятно переходит на новое место.

Вероятнее всего, что КП дуги обусловлено процессом охлаждения, а не перехвата, так как в дуговом цикле обычно наблюдаются два процесса, которые следуют друг за другом: электронный при взрыве и ионный после окончания взрыва и до появления нового взрыва.

Если длительность дугового цикла обозначить через t_c , то

$$t_c = t_e + t_i, \quad (1)$$

где t_e — длительность электронного процесса, а t_i — ионного. Для расчетов вводят величину

$$\alpha = t_i/t_e, \quad (2)$$

которая является долей времени ионного процесса в дуговом цикле. Эктонный подход естественным образом объясняет ячеистую структуру КП, обнаруженную Кесаевым [8]. Через каждую ячейку протекает ток $i = 2i_n$, если $i \gg i_n$, и $i_n \leq i \leq 2i_n$, если $i \leq 2i_n$, где i_n — пороговый ток.

Согласно эктонному механизму КП, удельная эрозия катода определяется из формулы [6]

$$\gamma_m = \frac{2}{3} \rho \left(\frac{a}{\bar{h}} \right)^{1/2} (1 - \alpha), \quad (3)$$

где ρ — удельная масса металла катода; a — коэффициент температуропроводности для жидкого металла; \bar{h} — удельное действие для жидкого металла, определяемое при взрыве проводников. Эта формула получена из предположения, что жидкометаллическая струя имеет форму конуса [6]. Используем соотношение (3) для определения γ_m медного катода, так как его параметры изучены лучше всего. Величины $\alpha \approx 0.2$; $\bar{h} \approx 3 \cdot 10^9 \text{ А} \cdot \text{с}/\text{см}^4$, $a = 0.41 \text{ см}^2/\text{с}$, $\rho = 8,9 \text{ г}/\text{см}^3$ [7]. Подставив из в (3), получим $\gamma_m \approx 55 \text{ мкг}/\text{кул}$. Все наиболее надежно измеренные величины γ_m находятся в пределах 40–100 мкг/кул. Это говорит о достаточно хорошем предсказании эктонной теорией удельной эрозии медного катода.

Кимблин [2] измерил ток положительных ионов, которые в процессе эрозии поступают на анод, т. е. двигаются против электрического поля. Для меди этот ток составил 8% от тока дуги. Мы утверждаем, что наблюдаемый в [2] ионный ток образуется в результате функционирования эктонов, т. е. постоянно повторяющихся микровзрывов и образования сгустков плазмы. В этом случае ток ионов i_i определится из формулы

$$i_i/i = \gamma_m q f e / m_a, \quad (4)$$

где i — ток дуги, q — средний заряд иона, f — степень ионизации плазмы, m_a — масса атома, e — заряд электрона. По данным [2] степень ионизации атомов меди $f = 0.55$, а средний заряд $q = 1.5$ [4] и $q = 1.85$ [5]. Примем усредненную величину $q = 1.7$. Подставляя эти данные в [4], а величину γ_m , согласно формуле (3), приравняв к 55 мкг/кул, получим

$i_c/i = 0.078$. Эта величина очень близка к той, которую получил Кимблин [2] (0.08).

Таким образом, ионная эрозия медного катода хорошо описывается эктонной теорией КП, если использовать хорошо известные экспериментальные данные по параметрам плазмы, образуемой в КП.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. М.: Наука, 1984.
- [2] *Kimblin C.W.*, // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. N 7. P. 3074.
- [3] *Daalder J.E.* // J. Phys. D. "J. Appl. Phys." 1975. V. 8. P. 1647.
- [4] *Davis W.D., Miller H.C.* // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. P. 2212.
- [5] *Плютто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т.* // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. В. 8. С. 494.
- [6] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 7. С. 514.
- [7] *Месяц Г.А.* // УФН. 1995. Т. 165. № 6. С. 601.
- [8] *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.

Поступило в Редакцию
15 апреля 1996 г.