

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗРЯДНОЙ ЯЧЕЙКИ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НА МЕДИ

В.С. Павлов

ННЦ "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина

Рассмотрена эволюция разрядной ячейки при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде от начала самостоятельного существования до ее "гибели", связанной со взрывом металла под действием собственных паров. Подъем температуры металла в поверхностном слое происходит под действием бомбардировки собственными ионами. Мелкие капли (до 1 мкм) образуются при взрыве ячейки.

Ранее было показано, что для самостоятельного существования разрядной ячейки необходим положительный баланс энергии в ней [1]. Было также показано, что катодное пятно при вакуумно-дуговом разряде на металлах нельзя отождествлять с разрядной ячейкой. Катодное пятно включает в себя множество ячеек, количество которых можно приблизительно определить, разделив ток дуги на двойное значение порогового тока для данного металла, при котором разрядная ячейка может существовать самостоятельно. Пороговые токи для различных металлов приведены в работе [2].

Рассмотрим эволюцию разрядной ячейки на примере меди, т.е. процессы, происходящие в разрядной ячейке с момента ее самостоятельного существования до гибели – прекращения разряда в этом месте.

Температуру поверхностного слоя жидкого металла в ячейке, поток испаряющихся атомов, поток ионов на поверхность и их давление, давление паров меди в поверхностных слоях и изменение этих параметров определим исходя из условия положительного баланса энергии (энергетических потерь и поступлений) в ячейке при плотности тока $1 \cdot 10^7$ и $2 \cdot 10^7$ А·см²

$$\Delta W = W_+ + W_j - W_e - W_o - W_c > 0. \quad (1)$$

Здесь W_+ – поступление энергии в разрядную ячейку в результате бомбардировки поверхности металла в ней ионами; W_j – поступление энергии в ячейку вследствие Джоулева тепла; W_e – потеря энергии разрядной ячейкой в результате теплопроводности в окружающую область металла; W_o – потеря энергии из-за испарения нейтральных атомов с поверхности жидкого металла в разрядной ячейке; W_c – потеря энергии в результате эмиссии электронов с поверхности ячейки.

Методика расчета указанных величин энергии приведена нами ранее [1].

Радиационные потери за время существования разрядной ячейки малы, и они не учитываются.

Полученные результаты приведены в таблице, из которой видно, что плотность тока $2 \cdot 10^7$ А/см² обес-

печивает положительный баланс энергии в $0,25 \cdot 10^7$ Вт·см².

Энергетические показатели в разрядной ячейке при различных плотностях тока

Параметры функционирования разрядной ячейки	j, А см ²	
	1·10 ⁷	2·10 ⁷
r _{яч} ·10 ⁴ , см	2,26	1,6
φ _о , см ² ·с ⁻¹	2,7·10 ²⁴	5,5·10 ²⁴
φ _э , см ² ·с ⁻¹	5,4·10 ²⁴	1,1·10 ²⁵
T _{яч} , К	4170	4530
W _с , Вт·см ²	4,2·10 ⁷	4,6·10 ⁷
W _о , Вт·см ²	1,3·10 ⁶	2,6·10 ⁶
W _е , Вт·см ²	2,3·10 ⁷	4,6·10 ⁷
W _и , Вт·см ²	4,76·10 ⁷	9,52·10 ⁷
W _п , Вт·см ²	4,5·10 ⁵	1,8·10 ⁶
ΔW=W ₊ +W _j +W _с +W _о +W _е	-1,8·10 ⁷	0,25·10 ⁷

Температуру поверхности расплавленного металла в разрядной ячейке найдем из уравнения [3].

$$\lg \phi = 30,61 - 0,5 \lg T - \frac{16980}{T} \quad (2)$$

Здесь φ – количество атомов, испаряющихся с поверхности ячейки.

Значение величины φ получим, учитывая тот факт, что ионный ток на поверхность разрядной ячейки составляет ~8% от плотности общего тока [4]:

$$\phi = \frac{2jf}{eg} \quad (3)$$

Здесь e – заряд электрона в кулонах; g – средний заряд иона меди, равный 1,83; j – плотность тока; f – доля ионного тока в общей плотности тока.

Полученные значения величины φ и T приведены в таблице.

Процесс функционирования разрядной ячейки с момента ее самостоятельного существования можно представить себе следующим образом. С поверхности расплавленного металла испаряется поток ней-

тральных атомов (ϕ), температура жидкого металла в поверхностных слоях ячейки равна 4530 К. Тепловая ионизация нейтральных атомов мала и ею можно пренебречь. Поток электронов и нейтральных атомов, пройдя длину свободного пробега, достигает области, где происходит ионизация нейтральных атомов. Исходя из изотропного распределения ионов, в зоне ионизации половина из них под действием прикатодного бугра потенциала ускоряется к катоду, вторая половина – к аноду [5]. Если принять среднюю ширину зоны ионизации $5 \cdot 10^{-3}$ см [5], скорость нейтральных атомов $1 \cdot 10^6$ см·с⁻¹, а скорость ионов $1,6 \cdot 10^6$ см·с⁻¹ [6], тогда время от испарения нейтральных атомов с поверхности металла в разрядной ячейке до возвращения половины из них в ионизованном состоянии на ту же поверхность будет $\sim 4 \cdot 10^{-9}$ с.

Ионы, бомбардирующие поверхность жидкой меди в ячейке, оказывают на нее давление:

$$P = Fj, \quad (4)$$

$$\text{где } F = \frac{fmv}{2eg}. \quad (5)$$

Здесь F – сила давления, приходящаяся на единицу силы тока; j – плотность тока; m – масса иона меди; v – скорость иона. Остальные величины приведены ранее.

Для плотности тока $2 \cdot 10^7$ А·см⁻² мы имеем давление ионного тока над поверхностью жидкой меди в разрядной ячейке $3,3 \cdot 10^5$ тор.

Давление пара меди при температуре 4530 К можно определить из уравнения [3]:

$$\lg P_{\text{тор}} = 8,96 - \frac{16980}{T} \quad (6)$$

Мы имеем давление пара меди $1,59 \cdot 10^5$ тор. Таким образом, давление пара меди меньше давления бомбардирующих ионов, поэтому металл в разрядной ячейке не закипает. Однако под воздействием бомбардирующих ионов в пределах положительного баланса энергии происходит нагрев поверхностного слоя металла в разрядной ячейке.

Определим из уравнения (6) температуру поверхностного слоя меди в разрядной ячейке, давление пара в котором было бы $\geq 3,3 \cdot 10^5$ тор. Получаем, что при температуре 4985 К давление пара меди будет $3,5 \cdot 10^5$ тор.

Как уже отмечалось ранее, для устойчивого существования разрядной ячейки на медном катоде необходим пороговый ток, т.е. 1,6 А. Учитывая величину плотности тока ($2 \cdot 10^7$ А·см⁻²), необходимую для создания положительного баланса энергии в разрядной ячейке, мы получаем ее радиус $1,6 \cdot 10^{-4}$ см. Если принять время существования разрядной ячейки за $1 \cdot 10^{-8}$ с [6], тогда взаимодействие ионов с по-

верхностью металла будет осуществляться в течение $6 \cdot 10^{-9}$ с. С помощью

$$\Delta W = C \cdot m \cdot \Delta T \quad (7)$$

найдем толщину нагреваемого поверхностного слоя меди в разрядной ячейке. Здесь ΔW – положительный баланс энергии, приходящийся на поверхность ячейки за время $6 \cdot 10^{-9}$ с; C – удельная теплоемкость меди; m – масса нагреваемого приповерхностного слоя меди; ΔT – разница температур в слое после ионной бомбардировки и до нее.

Вычисления показывают, что положительного баланса энергии ($0,25 \cdot 10^7$ вт·см⁻²·с⁻¹) хватает для нагрева поверхностного слоя меди в разрядной ячейке до температуры 4985 К и этот слой имеет толщину $1 \cdot 10^{-5}$ см.

Таким образом, после нагрева давление пара меди в поверхностном слое и давление потока ионов на поверхность разрядной ячейки выравниваются, и медь в поверхностном слое вскипает.

При этом на поверхности жидкого металла появляются всплески, которые могут вполне ассоциироваться с эктонами, которые дают высокую плотность электронов [7]. Разряд в этом месте катода прекращается.

В этом случае направленное испарение меди прекращается, и, следовательно, резко падает давление ионного потока. В таком случае уже весь объем разрядной ячейки в результате давления собственных паров "взрывается". Поэтому можно предположить, что металл в разрядной ячейке разбрызгивается под давлением $\sim 1,59 \cdot 10^5$ тор. Скорость выбрасывания образующихся мелких капель ($< 1 \cdot 10^{-4}$ см) можно оценить из уравнения [6]

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}. \quad (8)$$

Здесь P – давление пара меди; ρ – плотность меди.

Получаемое значение скорости $\sim 0,7 \cdot 10^4$ см·с⁻¹ удовлетворительно согласуются с литературными данными [6].

Таким образом, разрядные ячейки при вакуумно-дуговом распылении металлов могут формировать только мелкие капли. Проблема образования крупных капель и причина их выброса из катодного пятна преимущественно под углом $\sim 30^\circ$ к поверхности катода требует дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

Предложен механизм образования мелких капель в разрядной ячейке при вакуумно-дуговом распылении металлов, заключающихся во взрыве жидкого металла в ячейке под действием собственных паров.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Павлов. О механизме образования крупных капель при вакуумно-дуговом распылении металлов // *Труды XV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. Алушта, Крым*. 2002, с. 314.
2. И.Г. Кесаев. *Катодные процессы электрической дуги*. М.: «Наука», 1968, с. 116.
3. С. Дешман. *Научные основы вакуумной техники*. М.: «Мир», 1964.
4. Л. Харрис. Катодные процессы // Сб. *Вакуумные дуги (теория и приложения)*. М.: «Мир», 1982, с. 153.
5. А.А. Плютто, В.М. Рыжков, А.Т. Каним. Высоко-скоростные потоки плазмы вакуумных дуг // *ЖЭТФ*. 1964, т. 47, № 8, с. 494.
6. G. W. Mc Clure. Plasma expansion as a cause of metal displacement in Vacuum-arc cathode Safs // *J. Appl. Phys.* 1974, v. 45, N 5, p. 2078.
7. Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы // *УФН*. 1983, т. 139, № 2, с. 265.

ЕВОЛЮЦІЯ РОЗРЯДНОГО ОСЕРЕДКУ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ НА МІДІ

В.С. Павлов

Розглянута еволюція розрядного осередку при вакуумно-дуговому розряді на мідному катоді від початку самостійного існування до "загибелі" осередку, зв'язаної з вибухом металу в осередку під дією власного пару. Ріст температури металу в поверхневому шарі осередку відбувається під дією бомбардування власними іонами. Дрібні краплі (до 1 мкм) створюються при загибелі осередку.

THE EVOLUTION OF THE DISCHARGE CELL OF A VACUUM-ARC DISCHARGE ON COPPER

V.S. Pavlov

In the article examined the evolution of the discharge cell at a vacuum arc discharge on the copper cathode from a beginning of self-maintained existence before "destruction" of a cell, bound with explosion metal in it under on operation proprietary vapours. The temperature climb of metal in surface layer of a cell happens under on operation of bombardment by proprietary ions. The small drops (to 1 mcm) forming under in the "destruction" of a cell.