

О ДАВЛЕНИИ ПЛАЗМЫ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НА МЕТАЛЛАХ

В.С. Павлов

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина*

Показано, что капли выбрасываемые из разрядной ячейки при ее вскипании (взрыве), обеспечивают однородное распределение ионов в прикатодном пространстве и тем самым способствуют организации давления плазмы на поверхность разрядной ячейки.

В работах, посвященных самостоятельному дуговому разряду на металлах, указывается, что на поверхность металла в разрядной ячейке оказывается давление плазмы значительной величины (для меди $\sim 10^5$ Торр [1,2]).

По мнению автора работы [1], давление плазмы обусловлено ионами, бомбардирующими поверхность металла в разрядной ячейке, изначально изотропно распределенными в зоне разряда. Однако, каким образом осуществляется это изотропное распределение, – автор не указывает.

Согласно представлениям, изложенным в работе [3], давление плазмы осуществляется ионами, ускоренными из области катодных пятен электронным ветром, обусловленным "существованием" бугра потенциала 20...30 В в

прикатодной области. Каким образом в прикатодной области возникает градиент электронов, создающий эту разность потенциалов, автор не указывает.

В данной работе сделана попытка показать процесс организации давления плазмы на поверхность металла в разрядной ячейке на примере разряда на медном катоде.

Нами ранее рассматривалась эволюция самостоятельного дугового разряда на медном катоде [2]. Параметры разряда при условии соблюдения минимального положительного баланса энергии в разрядной ячейке приведены в таблице. Время функционирования разрядной ячейки взято $1 \cdot 10^{-8}$ с [1].

Параметры самостоятельного дугового разряда на медном катоде (в разрядной ячейке)

Плотность тока, А·см ⁻²	$2 \cdot 10^7$
Радиус разрядной ячейки, 10 ⁴ см	1,6
Температура меди в ячейке, К	4530
Плотность потока испаряющихся атомов, см ² ·с ⁻¹	$1,1 \cdot 10^{25}$
Толщина граничного слоя между ячейкой и твердой медью, см	$1 \cdot 10^{-4}$

Под действием бомбардирующих ионов температура в поверхностном слое металла в разрядной ячейке повышается и наступает выравнивание давления бомбардирующих ионов ($3,3 \cdot 10^5$ Торр) и давление пара меди в поверхностном слое ($3,5 \cdot 10^5$ Торр) [2]. Металл в поверхностном слое вскипает, стационарность разряда резко падает и, как следствие этого, давление ионов тоже уменьшается. Металл в разрядной ячейке под действием собственных паров бурно вскипает ("взрывается"), выбрасывая несколько жидких капель. Скорость выброса капель составляет $\sim 0,7 \cdot 10^4$ см·с⁻¹ [2]. Если предположить, что время выброса капель составляет $1 \cdot 10^{-8}$ с, тогда капли диаметром 0,6 мкм, выброшенные из верхних слоев меди в разрядной ячейке, окажутся над поверхностью металла в разрядной ячейке на расстоянии 0,1 мкм. В момент выброса капля разряд прекращается. Возникает вопрос, сколько капель диаметром 0,6 мкм может быть выброшено из разрядной ячейки? Так как мы рассматриваем самостоятельный дуговой разряд, то все процессы, происходящие после "взрыва" разрядной ячейки, должны восстановить параметры ее функционирования. В процессе

выброса капель из разрядной ячейки в нее поступает металл из переходной зоны по массе, равной массе выброшенных капель. Температуру металла в переходной зоне возьмем как среднее ее значений на границе с твердой медью, т.е. 1357 К, и на границе с разрядной ячейкой (4530 К), т.е. 2944 К. В переходную зону такое же количество металла поступает из твердого окружения переходной зоны. Энергию, необходимую для осуществления всех этих процессов, дает джоулево тепло после восстановления разряда через ячейку. Итак, для определения количества выброшенных капель воспользуемся уравнением теплового баланса:

$$I^2 R t = \lambda m + c m (2944 - 1357) + c m (4530 - 2944). \quad (1)$$

Здесь I – ток через разрядную ячейку, 1,6 А; R – сопротивление меди в ячейке, 40 Ом см при 4530 К; t – время существования ячейки, $1 \cdot 10^{-8}$ с; m – масса выброшенных капель; c – удельная теплоемкость меди 5,65 кал·моль⁻¹; λ – удельная теплота плавления, 3120 кал·моль⁻¹;

Количество выброшенных капель находим из уравнения

$$m = V \cdot \rho \cdot n. \quad (2)$$

Здесь m - масса выброшенных капель; V - объем одной капли радиусом $0,3 \cdot 10^{-4}$ см; ρ - плотность меди; n - количество капель.

Получается, что для восстановления исходных параметров функционирования разрядной ячейки из нее может быть выброшено не более 5 капель диаметром $0,6 \cdot 10^{-4}$ см. После выброса капель из разрядной ячейки и поступления в нее металла из переходной зоны в разрядной ячейке устанавливается температура 4438 К. При этой температуре давление пара будет $\sim 1,39 \cdot 10^5$ Торр. Так как выброшенные капли имеют температуру 4530 К, то давление пара меди будет соответственно $\sim 1,59 \cdot 10^5$ Торр. Как следствие этой разницы, кипение меди в разрядной ячейке прекратится. Поток атомов, испаряющихся с поверхности капель, обращенной к разрядной ячейке, и поток капель с поверхности металла в разрядной ячейке направлены навстречу друг другу. Их взаимодействие приводит, с одной стороны, к гомогенному распределению направлений движения атомов, с другой, - к их ионизации. Причем, половина - образовавшихся ионов будет направлена к катоду, половина в противоположную сторону. Направленный к катоду поток ионов и образует давление плазмы на поверхность металла в разрядной ячейке. Существенное значение при этом, по-видимому, будет иметь увлечение ионов потоком электронов при их движении от катода.

Сразу после выброса капель из разрядной ячейки и подавления процесса кипения металла в ней происходит восстановление разряда во вновь сформированной разрядной ячейке [4,5].

Вновь организованная разрядная ячейка смещается в ту сторону, где более энергетически выгоден забор металла из твердой фазы для пополнения переходной зоны. Под действием джоулева тепла происходит нагрев металла в разрядной ячейке от температуры 4438 до 4530 К за $1 \cdot 10^{-8}$ с (время существования разрядной ячейки). За

это же время поверхностный слой металла в разрядной ячейке под действием бомбардировки потока ионов (давление плазмы $3,3 \cdot 10^5$ Торр) нагревается дополнительно до температуры 4985 К. Давление паров меди при этой температуре составляет $1,39 \cdot 10^5$ Торр. Происходит разрушение стационарного разряда и взрыв металла в разрядной ячейке.

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель организации гомогенного распределения ионов в прикатодной области вследствие встречного взаимодействия потоков атомов, испаряющихся с поверхности металла в разрядной ячейке и с поверхности капель, выброшенных из разрядной ячейки.

2. В рамках предложенной модели показано, что капли, выброшенные из разрядной ячейки, играют определяющую роль в организации давления плазмы на поверхность жидкого металла в разрядной ячейке.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.W. VcClure. Plasma expansions a cause of metal displacement in Vacuum-arc cathode Spots // *J. Appl. Phys.* 1971, v.45, p.2078.
2. В.С. Павлов. Эволюция разрядной ячейки при вакуумно-дуговом разряде на металлах // *ВАИТ, Серия ФРП и РМ.* 2004, № 3, с 125.
3. А.А. Плутто, В.М. Рыжков, А.Т. Камин. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг // *ЖЭТФ.* 1964, т.47, №8, с.494.
4. В.С. Павлов. О механизмах перемещения разрядной ячейки и катодного пятна при вакуумно-дуговом разряде // *Труды XVII Международной конференции по ФРП и РМ,* Алушта, Крым, 2006, с. 274.
5. S.S. Moskeown, The Cathode drop in an electric arc // *Phys. Rev.* 1929, v. 34, p. 611.

Статья поступила в редакцию 26.03.2009 г.

ПРО ТИСК ПЛАЗМИ ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ НА МЕТАЛАХ

В.С. Павлов

Показано про краплі, які викидаються з розрядної комірки при її википанні ("вибухові"), забезпечують гомогенний розподіл іонів у при катодній частині та тим самим сприяють організації тиску плазми на поверхню метала у розрядній комірці.

ON PLASMA PRESSURE OF VACUUM-ARC DISCHARGE ON METAL

V.S. Pavlov

At is demonstrated that the droplets ejected from the dischrge cell during its ebullition provide a homogeneous ion distribution in the cathode theceby serving to organizette plasma pressure on the metal surface in the discharge cell.