

ОБРАЗОВАНИЕ КАПЕЛЬ НА СТЕНКАХ КРАТЕРА ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НА МЕДНОМ КАТОДЕ

В.С. Павлов

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

Предложен механизм образования капель при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде, заключающийся в том, что под действием ионов и электронов, формирующихся в разрядных ячейках на дне кратера, стенки кратера оплавляются, расплавленный металл нагревается выше температуры плавления и собирается в капли под действием потока плазмы. Образующиеся капли выбрасываются из кратера. Процесс продолжается до тех пор, пока в кратере сохраняется положительный баланс энергии. Выбрасываемый со стенок кратера металл приводит к увеличению диаметра кратера, причем на поверхности катода диаметр кратера наибольший, так как его стенки подвергаются ионно-электронному воздействию максимальное время.

При возбуждении дугового разряда на металле на его поверхности образуется катодное пятно, преобразующееся в разрядные ячейки, которые с течением времени формируют катодный кратер.

На рис. 1 приведены профилограммы катодных кратеров, снятых с помощью профилографа-профилметра (тип А, модель 252) на медном, титановом и молибденовом катодах после вакуумно-дугового разряда на них. Ток разряда на медном и титановом катодах был 50 А, на молибденовом – 75 А. Обращают на себя внимание следующие обстоятельства: стенки катодных кратеров не являются вертикальными – катодные кратеры расширяются к поверхности катода, глубина кратеров разная – она уменьшается с ростом температуры плавления металла.

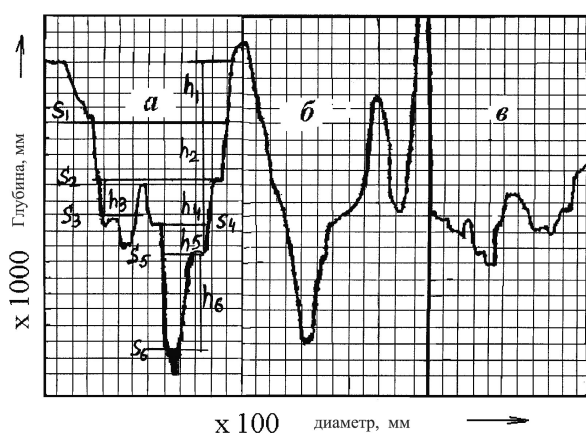


Рис.1. Профиль катодных кратеров: а – медь; б – титан; в – молибден

В работе [1] приведено уравнение для определения критического радиуса катодного пятна, когда теплопроводность на его границе еще не играет существенной роли:

$$r_{кр} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\chi_0}{\lambda \ln \frac{T_{пл}}{T_0}}} \cdot i \quad (1)$$

Здесь χ_0 – электропроводность металла при 293 К;

λ – теплопроводность металла при температуре плавления; $T_{пл}$ – температура плавления; К, T_0 – 298 К; i – ток дуги.

Для вакуумно-дугового разряда на медном катоде (при токе дуги 50 А) получаем $r_{кр} = 0,45 \cdot 10^{-2}$ см. Измеренный на профилограмме радиус в верхней части кратера (см. рис.1,а) составляет $1,2 \cdot 10^{-2}$ см. Таким образом, в процессе горения дугового разряда в катодном кратере его радиус в верхней части увеличивается на $0,75 \cdot 10^{-2}$ см. А это означает, что при дуговом разряде металл со стенок кратера выбрасывается наружу, возникает вопрос – в каком виде?

В работе [2] указывается, что в высоком вакууме при дуговом разряде на титане основная доля эрозии происходит в капельной фазе за счет частиц размером $\sim 5 \dots 15$ мкм. Нами при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде наблюдались капли диаметром до 10 мкм.

Как нами показано ранее [3], при разряде на медном катоде в разрядных ячейках могут формироваться только мелкие капли размером ~ 1 мкм. Следовательно, можно предположить, что в процессе дугового разряда под действием ионно-электронного потока стенки катодного кратера оплаваются, металл на поверхности стенок собирается в капли и выбрасывается из кратера. Причем, величина радиуса верхней части кратера тем больше, чем продолжительнее горит разряд в катодном кратере и, следовательно, больше металла выбрасывается со стенок кратера.

Для подтверждения этого положения определим баланс энергии (поступления и затрат) в катодном кратере на примере разряда на меди. Рассмотрим процесс горения дуги в его завершающей стадии – когда на дне катодного кратера завершается функционирование последнего слоя разрядных ячеек. При вакуумно-дуговом разряде на меди ток в разрядной ячейке составляет 1,6 А [4], таким образом, при токе 50 А одновременно функционирует 32 ячейки. Время жизни разрядной ячейки $1 \cdot 10^{-8}$ с [5], это будет "время жизни" последнего слоя разрядных ячеек на дне кратера.

Разрядные ячейки формируют поток ионов и электронов в катодном кратере, который и дает нам приток энергии в кратер:

$$E_1 = IVt. \quad (2)$$

Здесь: I – ток разряда (50 А), V – катодное падение напряжения (20 В [6]); t – время жизни последнего слоя разрядных ячеек, 10^{-8} с.

Эта энергия составляет $1 \cdot 10^{-5}$ Дж.

Энергетические затраты в катодном кратере в последние (10^{-8} с) секунды существования разряда идут на расплавление поверхностного слоя на стенках кратера; нагрев расплавленного слоя металла, в противном случае образование капель в этом слое не будет происходить.

Согласно литературным данным [7] температура капель меди, выбрасываемых из катодного кратера, на 250° выше температуры плавления меди. В связи с этим мы взяли температуру расплавленного слоя меди на стенках кратера $T_{\text{пл}} + 250^\circ$. Учитывая длину стенок кратера и максимальный размер капель 10 мкм, мы получим толщину расплавленного слоя меди $\sim 0,2$ мкм при условии, что на заключительной стадии разряда на поверхности кратера одновременно формируются 4 таких капли. По сравнению с приведенными выше энергетическими затратами в катодном кратере все остальные затраты (поддержание температуры стенок кратера при температуре плавления, градиент температур во внешней области кратера, выброс капель из кратера с определенной скоростью и др.) малы.

Энергетические затраты на расплавление поверхностного слоя меди на стенках кратера

$$E_2 = \lambda m. \quad (3)$$

Здесь: λ – удельная теплота плавления меди, m – масса расплавленного слоя меди.

Вычисления дают значение $3,1 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Энергетические затраты на нагрев расплавленного слоя меди на 250° равны

$$E_3 = c m \Delta T. \quad (4)$$

Здесь ΔT – нагрев расплавленного слоя меди на 250° ; c – удельная теплоемкость меди; m – масса расплавленного слоя меди.

Вычисления дают значение $2,3 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Общие энергетические затраты составляют $5,4 \cdot 10^{-6}$ Дж, что удовлетворительно согласуется с величиной энергетических поступлений в кратер ($1,0 \cdot 10^{-5}$ Дж) с учетом приближенного характера наших оценок.

Предложенный механизм образования капель на стенках кратера при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде объясняет, с одной стороны, образование крупных капель, с другой, – показывает, что за один акт разряда во всех разрядных ячейках стенок кратера теряет $0,2 \cdot 10^{-4}$ см металла.

Для того чтобы определить увеличение радиуса кратера в его верхней части, вычислим общее количество разрядов (кратное 32) за все время их существования в данном кратере. На рис. 1, а на профилограмме катодного кратера горизонтальными линиями выделены сечения (S_i), в которых монотонное изменение стенки кратера меняется скачком. В этих сечениях происходит скачкообразное изменение ра-

диуса кратера. На этой же профилограмме показаны расстояния между сечениями (h_i). Если принять, что при взрыве разрядной ячейки из нее выбрасывается количество металла, равное $2/3$ ее радиуса, тогда общее количество выбросов металла между сечениями равно:

$$K_i = \frac{3h_i}{2r_{\text{я}}} \frac{S_i}{S}. \quad (5)$$

Здесь h_i – расстояние между сечениями катодного кратера; $r_{\text{я}}$ – радиус разрядной ячейки, равный $1,6 \cdot 10^{-4}$ см [3]; S_i – площадь i -сечения, S – площадь 32 разрядных ячеек.

Тогда общее количество выбросов металла из кратера за все время существования разряда в нем

$$f = \sum_{i=1}^6 k_i, \quad (6)$$

и увеличение радиуса кратера в его верхней части составит

$$\Delta r_{\text{кр}} = f 0,210^{-4} \text{ см}. \quad (7)$$

Вычисления дали значение $1,4 \cdot 10^{-2}$ см, что удовлетворительно согласуется с приведенной ранее величиной роста радиуса кратера в процессе вакуумно-дугового разряда $0,75 \cdot 10^{-2}$ см, полученной из прямых измерений радиуса кратера в его верхней части на профилограмме.

Таким образом, предложенный механизм образования крупных капель при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде за счет оплавления стенок кратера и выброса образующихся капель за его пределы является вполне дееспособным. Причем, размеры образующихся капель увеличиваются по мере углубления кратера и роста площади его стенок.

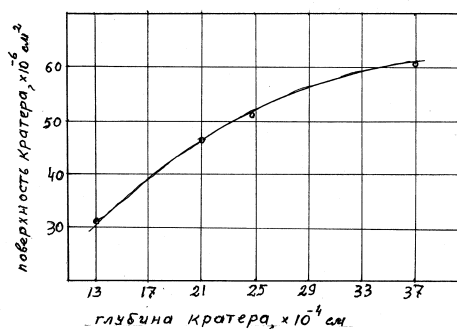


Рис. 2. Зависимость поверхности кратера от его глубины

На рис. 2 показана зависимость увеличения поверхности стенок кратера с ростом его глубины.

Видно, что этот рост не является прямолинейным – на конечных стадиях горения дуги в кратере прирост площади стенок становится меньше, и, следовательно, замедляется рост диаметра формируемых капель. Это может быть связано с тем, что на начальных стадиях горения дуги разрядные ячейки занимают на дне кратера большую площадь по сравнению с минимально возможной. По мере углубления кратера увеличивается расход энергии на процессы оплавления стенок кратера большей площади и на перегрев расплавленного металла. Для сохранения баланса энергии в кратере поверхность, занимаемая разрядными ячейками, уменьшается, что при-

водит к сужению конуса кратера, и прирост поверхности стенок также уменьшается.

Можно заключить, что на завершающих стадиях горения дуги в кратере на медном катоде хотя рост диаметра капель и будет продолжаться, однако относительная доля крупных капель останется, практически, неизменной.

Как видно из рис.1 профилограммы катодных кратеров меди и титана аналогичны. В связи с этим можно ожидать, что процессы формирования капель будут также схожи как по размерам, так и по количеству. В работе [8] показано, что относительная доля крупных капель остается практически неизменной, хотя рост размеров капель наблюдается. И эта закономерность сохраняется независимо от тока дуги разряда.

К сожалению, необходимые данные по дуговому разряду на молибденовом катоде отсутствуют. Однако можно предположить, что в связи с более высокой упругостью пара и температурой плавления молибдена (по сравнению с медью) энергетические затраты для поддержания дугового разряда в катодном кратере на молибдене выше, и разряд прекращается при меньшей глубине кратера, что приводит к выбросу капель меньшего размера, и диаметр кратера в верхней части также существенно меньше.

ВЫВОДЫ

1. Предложен механизм образования капель на стенках кратера при вакуумно-дуговом разряде на медном катоде, причем размер капель увеличивается при росте глубины кратера.

2. Показано, что за счет выброса металла со стенок кратера увеличивается его диаметр.

Профили катодных кратеров измерял А.Н.-Григорьев.

УТВОРЕННЯ КРАПЕЛЬ НА СТІНКАХ КРАТЕРА ПРИ ВАКУУМНО-ДУГОВОМУ РОЗРЯДІ НА МІДНОМУ КАТОДІ

В.С. Павлов

Запропоновано механізм утворення крапель при вакуумно-дуговому розряді на мідному катоді, який полягає в тому, що під дією іонів і електронів, які формуються в розрядних комірках на дні кратера, стінки кратера оплавляються, розплавлений метал нагрівається вище температури плавлення і збирається в краплі під дією потоку плазми. Краплі, що утворюються, викидаються з кратера. Процес продовжується доти, поки в кратері зберігається позитивний баланс енергії. Метал, який викидається зі стінок кратера, приводить до збільшення діаметра кратера, причому на поверхні катода діаметр кратера найбільший, тому що його стінки піддаються іонно-електронному впливу максимальний час.

FORMATION OF DROPS ON CRATER WALLS AT VACUUM-ARC DISCHARGE ON COPPER CATHODE

V.S. Pavlov

Mechanism of drops formation at vacuum-arc discharge on copper cathode is proposed; such mechanism means that under the influence of ions and electrons forming in discharge cells on the crater bottom. the crater walls burn-off, the melted metal heats to the temperature higher the melting point and assembles into the drops under the influence of plasma flow. The produced drops are ejected from crater. This process continues until the positive energy balance conserves in the crater. Metal ejected from crater walls causes the increase of crater diameter, this diameter being the highest on the cathode surface, because its walls are under the ion-electron influence the maximum time.

ЛИТЕРАТУРА

1.В.А Литвинов, Г.А.Месяц, Д.И. Проскуровский. Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах // УФН. 1983, т.139, в.2, с.293.

2. И.И.Аксенов, Е.Е.Кудрявцева и др. *Исследования влияния давления газа в объеме на параметры капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги*: Препринт ХФТИ. М.: ЦНИИатоминформ. 1984, с.17.

3. В.С.Павлов. Эволюция разрядной ячейки при вакуумно-дуговом разряде на меди // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2004, №3, с.125.

4. И.Г.Кисаев. *Катодные процессы электрической дуги*. М.: "Наука", 1968, с.116.

5. G.W.McClure, Plasma expansion as a cause of metal displacement in Vacuum-arc cathode Spots // *J.Appl. Phys.* 1971, v. 45, p. 2078.

6.Л.Харрис. *Катодные процессы*: Вакуумные дуги. М.: "Мир", 1982, с.192.

7. Х. Хамидова, З.Л. Искандерова, Оценка температуры перегрева капель меди в стационарной вакуумной дуге // *Материалы 7-й всесоюзной конференции, Взаимодействие атомных частиц с твердым телом*. Минск, 1984, с.299.

8. В.Д.Егоров, В.В.Клубович, А.А. Литвинов. Фазовый состав плазмы, генерируемой стационарной вакуумной дугой // *Физика и химия обработки материалов*. 1992, №6, с. 69.