

04;11;12

Формирование катодного кратера в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом

© М.К. Марахтанов, А.М. Марахтанов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Поступило в Редакцию 7 октября 1997 г.

Катодный кратер имеет плоскую форму в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом. Площадь кратера и плотность тока, протекающего через него, зависят от тепловых и электрических свойств металла катода.

Экспериментально установлены размеры и форма кратеров, которые оставляет низковольтная вакуумная дуга на холодном катоде. Определена плотность тока, протекающего через кратер. Исследованы катоды из Zn, Al, Cu, Fe, Ti и Cr. В зависимости от материала катода напряжение и ток дуги составляли $16.7 \div 36$ В и $42 \div 121$ А. Эксперименты проводились в промышленной установке вакуумно-дугового испарения "Булат-6" при давлении аргона в вакуумной камере 0.04 Pa. Катоды имели форму усеченного конуса с диаметром оснований 56 и 60 mm и высотой 40 mm. Дуга горит на поверхности меньшего основания, по которой перемещается катодное пятно и происходит распыление катода. Вода охлаждает противоположное основание катода. Анодом разряда служит внутренняя стенка вакуумной камеры.

У отработанного катода вся поверхность распыления покрыта кратерами. Контур кратера ограничен складками застывшего металла. Ясно различимы две группы кратеров, размеры которых отличаются в десять раз. Крупные катодные кратеры 1 располагаются довольно редко. Малые катодные лунки 2 покрывают сплошь поверхность распыления (рис. 1). Для измерения использовались микроскопы: NEOPHOT 21, CARL ZEISS, JENA (глубина кратеров и их фотографии $\times 180$); металлургический МИМ-7 (глубина и поперечник кратеров); лабораторный МБС-9 (поперечник и расстояние между кратерами). Каждый размер, приведенный в настоящей работе, есть средняя величина 25–50 измерений.

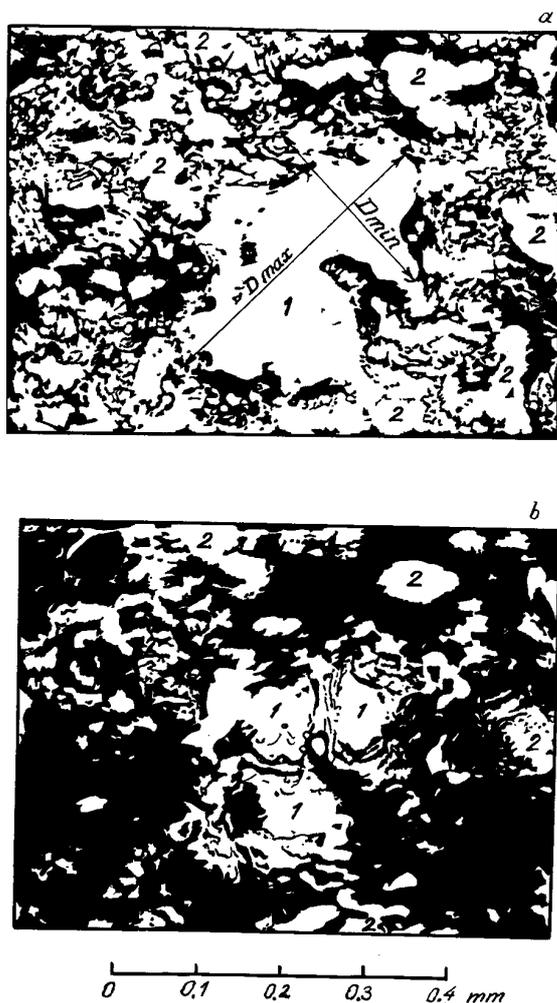


Рис. 1. Микрофотографии поверхности алюминиевого катода, напряжение и ток дуги 36 В и 52 А; 1 — катодный кратер; 2 — катодная лунка: объектив сфокусирован на вершины складок металла, окружающих кратер 1 (а); объектив сфокусирован на дно катодного кратера 1 (б); черные пятна на фотографиях соответствуют выступам на поверхности катода или ее несфокусированному изображению; белые пятна — впадины или дно кратера и лунок.

Поперечник D катодного кратера принят равным $0.5 \cdot (D_{\max} + D_{\min})$. Для определения глубины h кратера объектив микроскопа фокусировался вначале на пограничные вершины складок (рис. 1, *a*), а затем — на дно кратера (рис. 1, *b*). Глубина кратера считалась равной разности показаний микрометра, перемещающего объектив. Точность измерения h равна ± 0.0025 mm. Истинная глубина кратера меньше, чем h , поскольку последняя отсчитывалась от уровня вершин складок, которые сами возвышаются над поверхностью катода. Средние размеры кратера $D = 0.498 \div 0.264 \div 0.173 \div 0.183 \div 0.169 \div 0.087$ mm и $h = 0.043 \div 0.017 \div 0.0185 \div 0.0157 \div 0.0082 \div 0.0059$ mm для Zn, Al, Cu, Fe, Ti и Cr катодов соответственно. Средний катодный кратер имеет плоскую форму, поскольку отношение $h/D = 0.048 \div 0.107$ у данных металлов.

Известно [1], что дуга перемещается по катоду вследствие замены исчезающих кратеров новыми, причем среднее время существования кратера конечно и равно $T = 10^{-6} \div 10^{-3}$ s. Известно также [2], что через кратер катодного пятна протекает весь ток дуги. Количество металла, уносимого дугой, зависит от электрического заряда, прошедшего через кратер. Следовательно, объем плоского кратера должен увеличиваться за время T и в основном за счет роста его площади $\sim D^2$. Мы измеряем поперечник D , оставленный дугой в конце периода T . Поэтому отношение $j = I/D^2$ равно минимальной плотности тока в катодном кратере, если пренебречь изменением во времени тока дуги I .

Значение плотности тока j , при которой кратер еще может существовать, равны $(0.19 \div 0.75 \div 3.51 \div 3.61 \div 3.33 \div 12.29) \cdot 10^9$ A/m² в последовательности металлов, указанной выше. Эти величины совпадают с плотностью тока $(3.4 \div 3.2 \div 1.5) \cdot 10^9$ A/m², которая наблюдалась в экспериментах соответственно с Ag, Cu и Mo взрывающимися проволочками [3].

Максимальная температура катодного кратера вряд ли превышает температуру T_b кипения его металла. Если считать, что плотность тока термоэлектронной эмиссии из кипящего кратера равна $j_e = 1.2 \cdot 10^6 \cdot T_b^2 \cdot \exp\{-e\varphi/kT_b\}$, то $j_e = 1.3 \cdot 10^{-6}$ A/m² для Zn катода и $j_e = 3.9 \cdot 10^7$ A/m² для Ti катода. Здесь $T_b = 1179$ K и работа выхода $\varphi = 4.24$ V для Zn и $T_b = 3560$ K и $\varphi = 3.95$ V для Ti. В силу явного неравенства $j_e \ll j$ вкладом в ток дуги термоэлектронной эмиссии из катода следует пренебречь для всех рассмотренных металлов.

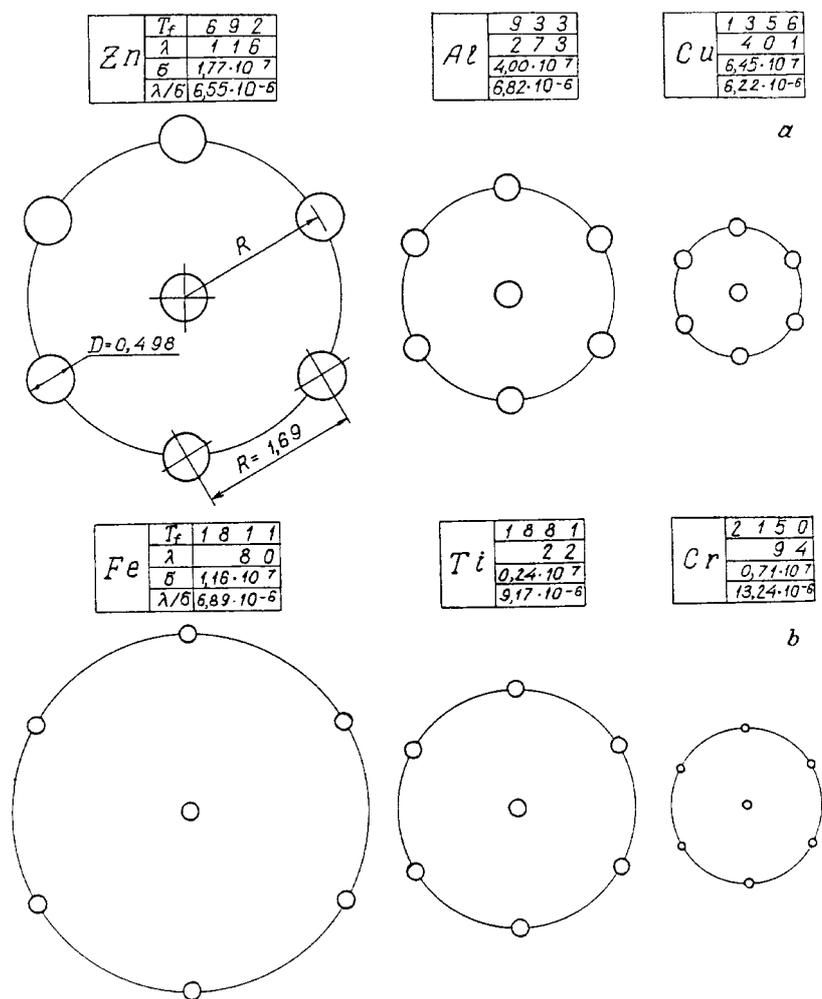


Рис. 2. Схема "коммутационно-теплого круга" для холодных катодов из металлов: с высокой теплопроводностью, $\lambda > 100$ (a); с низкой теплопроводностью, $\lambda < 100$ (b); поперечник D катодного кратера и расстояние R между соседними кратерами изменяются, подчиняясь явной закономерности, связанной с тепловыми и электрическими характеристиками металла катода.

Среднее расстояние между кратерами равно $R = 1.69 \div 1.13 \div 0.69 \div 1.90 \div 1.27 \div 0.84 \text{ mm}$ в последовательности указанных металлов. Отношение этого расстояния к поперечнику кратера равно $R/D = 3.4 \div 10.4$ для $Zn \div Fe$ соответственно. Если кратеры расположить условно на одинаковом расстоянии R друг от друга, то получим схему "коммутационно-теплового круга" (рис. 2). Здесь катодные кратеры изображены в виде малых окружностей диаметром D . Мы полагаем, что после гашения дуги в горячем месте исчезнувшего кратера она вступает в коммутационную часть периода T . За время коммутации дуга последовательно возникает и гаснет в нескольких катодных лунках, расположение которых ступенчато перемещается от горячей точки исчезнувшего кратера к холодной границе круга R . Здесь, на холодной поверхности катода, кратер снова принимает нормальный размер D .

Перемещение кратера по катоду связано с тепловыми и электрическими свойствами последнего. В группе металлов Zn , Al и Cu , у которых $\lambda > 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, размеры D и R уменьшаются с ростом как температуры плавления катода T_f , K , так и коэффициента теплопроводности λ (рис. 2, *a*). У металлов Fe , Ti и Cr $\lambda < 100$ и размеры D и R уменьшаются по мере увеличения отношения коэффициентов тепло- и электропроводности λ/σ , $\text{W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-1}$ (рис. 2, *b*).

Возможно, что почти вся масса катода истекает в дугу через малочисленные, но крупные катодные кратеры. Например, средний кратер на Ti имеет массу $M = \rho \cdot D^2 \cdot h = 4540 \cdot (0.169 \times 10^{-3})^2 \cdot 0.0082 \cdot 10^{-3} = 0.11 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$, где $\rho = 4540 \text{ kg/m}^3$ — плотность Ti . В работе определена средняя скорость распыления титана в дуге $S = 4.42 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$. Если скорость S постоянна во времени, то масса M покинет средний кратер за время $t = M/S = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, что примерно равно времени T существования кратера, см. выше.

Физические величины, использованные в настоящей работе, взяты из справочника [3].

Итак, в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом катодный кратер имеет плоскую форму, $h/D \lesssim 0.1$. Кратер исчезает в тот момент, когда плотность тока, протекающего через его сечение, принимает величину $(0.2 \div 12) \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$ ($Zn \div Cr$). Средние поперечник кратера и расстояние между соседними кратерами зависят от температуры плавления, а также от коэффициентов тепло- и электропроводности металла катода.

Список литературы

- [1] *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука. С. 6, 144.
- [2] *Webb F.H., Hilton H.H., Levine P.H., Tollestrup A.V.* // *Exploding Wires*. V. 2 / Ed. by W.G. Chace and H.K. Moore. Plenum Press, New York, 1962. P. 37–77.
- [3] *Физические величины: Справочник* / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.