

УДК 537.52

Д. В. К и р и л л о в

ФОРМИРОВАНИЕ КРАТЕРОВ НА МЕДНОМ АНОДЕ АТМОСФЕРНОЙ ДУГИ

Рассмотрен опыт по получению пятен атмосферной дуги на медном аноде. Приведены средние размеры и фотографии образовавшихся кратеров, рассмотрены осциллограммы тока дуги. Вычисленная плотность тока дуги соизмерима с плотностью тока вакуумной дуги и близка к плотности тока, вызывающей взрыв холодной меди.

Известно, что сильноточная вакуумная дуга периодически гаснет, отмечая места своего горения кратерами на катоде [1]. Диаметры кратеров варьируются в среднем от 0,498 мм (для цинка) до 0,087 мм (для хрома) и уменьшаются с уменьшением тока дуги. Плотность тока в кратере достигает $(0,19 \dots 12,29) \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ в момент гашения дуги на катодах, охлаждаемых водой. Холодная медная пленка взрывается, если плотность тока в ней достигает значения $7,29 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ [2]. В настоящей работе показано, что атмосферная электрическая дуга оставляет на аноде такие же по форме и размерам кратеры, как вакуумная дуга на катоде, а также показано, что плотность тока в анодных кратерах совпадает с плотностью тока, вызывающей холодный электрический взрыв металла (меди).

В описанном далее эксперименте были получены анодные кратеры в дуге атмосферного давления, аналогичные катодным кратерам в вакуумной дуге (рис. 1). На катоде при этом наблюдались пятна совершенно другой структуры и размеров.

Два плоских медных провода (в дальнейшем будем их называть рельсами) сечением $2 \times 3,6 \text{ мм}$ располагались на стеклянной пластине 4 толщиной 3,8 мм, лежащей на постоянном магните КС-37 2 (см. рис. 1). Стекло служило электрическим изолятором между рельсами 1. По рельсам свободно двигалась тонкая медная проволочка 3 диаметром $d = 1,2 \text{ мм}$ и длиной $l = 95 \text{ мм}$. Таким образом, подвижная проволочка формировала два контакта, которые автоматически размыкались при ее движении по пути $A \dots F$. Магнитное поле B ($0,018 \dots 0,024 \text{ Тл}$) в области движения проволочки неоднородно (см. рис. 1, б). Ток в проволочке составлял 18 А, в то время как источник постоянного тока мог обеспечивать ток короткого замыкания 145 А.

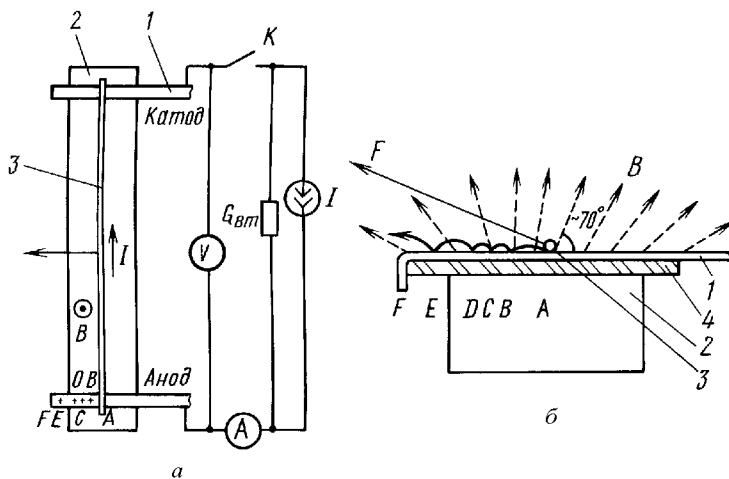


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

a — вид установки сверху и схема электрической цепи; *б* — вид установки с торца магнита (увеличено) (ширина рельсов — 3,6 мм; длина пробега проволоки $A \dots F$ — 25 мм; среднее значение $B = 0,020$ Тл; проводимость источника тока: $G_{вт} = 1/R_{вт} = 1/2,22 = 0,45 \text{ Ом}^{-1}$)

После замыкания ключа K проволочка двигалась под действием силы Ампера. При этом она двигалась не строго параллельно плоскости рельсов, а периодически подпрыгивала над их поверхностью как из-за наклона вектора B -поля к плоскости рельсов (см. рис. 1, *б*), так и вследствие неровностей рельсов. В местах касания и дальнейшего размыкания контакта “проволочка–рельс” (точки $A \dots E$), возникала электрическая дуга. По окончании опыта в месте горения дуги можно было наблюдать невооруженным глазом темные пятна на медном рельсе-аноде. Рассматривая такое пятно под микроскопом, выявили, что оно состоит из нескольких крупных кратеров — областей 1 (один кратер), 2 (три кратера), 3 (один кратер) (рис. 2) и большого числа мелких кратеров — области 4...7. Кратером будем называть резко ограниченную лунку, возникшую на металле в месте горения дуги; пятном — совокупность кратеров, хорошо различимую невооруженным глазом.

После каждого опыта дуга оставляла на аноде в среднем по шесть-семь пятен, в каждом из которых было по два-три больших кратера. Схематически положение пятен показано на рис. 1, *a* точками $A \dots E$, а движение катодного конца проволочки — на рис. 1, *б* толстой линией.

На основании измерения порядка ста кратеров определен средний размер кратера $R_{ср} = 62,14 \text{ мкм}$ (рис. 3). Форма границ кратеров либо близка к окружности, либо имеет вид сильно вытянутого эллипса, состоящего из двух-трех кратеров. Приведем данные измерения кратеров шести рельсов после проведения по одному опыту с каждым.

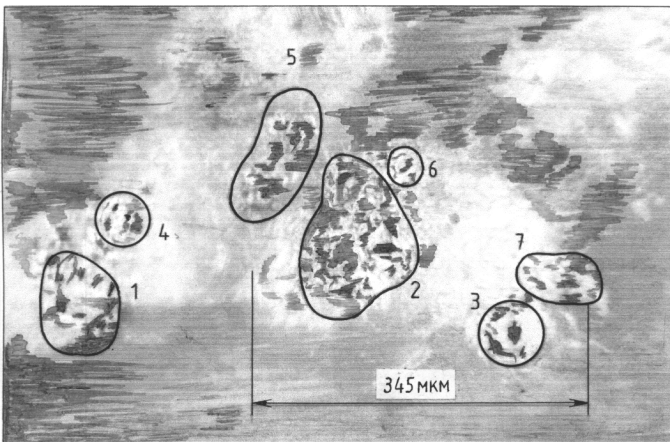


Рис. 2. Группа анодных пятен (1...7):

1 — большой кратер ($R = 65$ мкм); темный фон — медь, светлым участкам соответствует оплавленный металл (показана большая часть пятна); 2...7 — объяснены в тексте

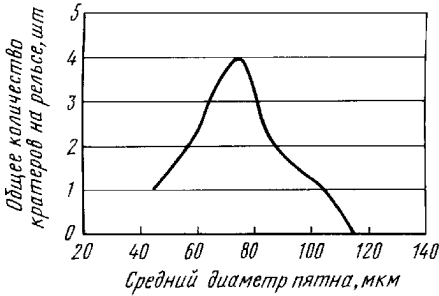


Рис. 3. Статистическая кривая распределения по диаметрам кратеров на шести рельсах после проведения по одному опыту с каждым больше среднего.

Круглый кратер образуется в результате “длительного” горения одной дуги на одном месте. Вытянутые кратеры состоят, как правило, из нескольких кратеров и являются результатом совместного или поочередного горения нескольких дуг на небольшой площадке. Возникновение множества мелких кратеров было рассмотрено в работе [1].

О процессе образования кратеров и пятен можно судить по осциллограммам тока, текущего через проволочку. Для снятия осциллограмм в цепь питания дуги было включено шунтирующее сопротивление $R = 7,5 \cdot 10^{-3}$ Ом. Падение напряжения на нем подавалось на вход запоминающего осциллографа марки С8-17. Осциллограммы наиболее типичных случаев приведены на рис. 4, из которых видно, что ток дуги колеблется в диапазоне от 0 до 18,7 А. Ток становится равным нулю,

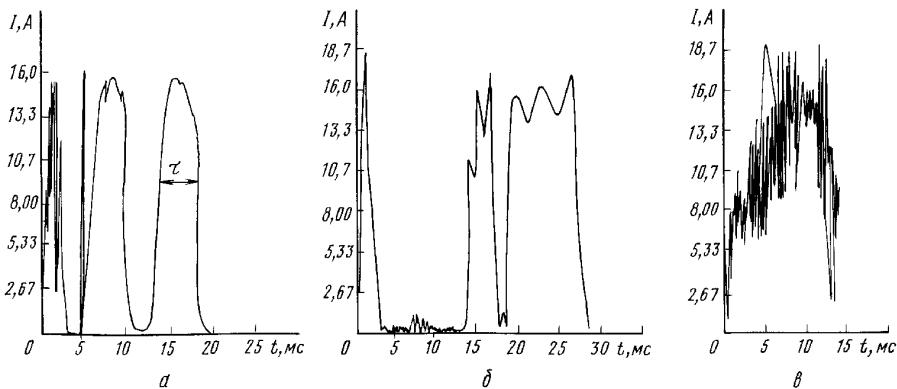


Рис. 4. Осциллограммы тока электрической дуги (t — время горения дуги на одном анодном кратере)

когда проволочка поднимается на высоту больше h (рис. 5), и дуга гаснет. Максимальное значение тока соответствует горению дуги на одном из кратеров. С увеличением длины дуги ток незначительно уменьшается. Крупные кратеры образуются в момент, соответствующий пику кривой, как например на рис. 4, б, где в промежуток времени 18...28 с образовалось 3 больших кратера. В промежутках между пиками дуга горит на множестве мелких кратеров. Среднее время горения дуги на крупных и мелких кратерах примем равным времени $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с горения дуги на всем анодном пятне (рис. 4, а).

Оценим величину h подъема проволочки. На проволочку действует сила Ампера F , максимальная величина и направление которой определяются уравнением

$$\bar{F} = (\bar{j} \times \bar{B}) \cdot V = (\bar{I} \times \bar{B}) \cdot \frac{V}{S} = (\bar{I} \times \bar{B}) \cdot l, \quad (1)$$

где V, S, l — соответственно объем, площадь и длина проволочки; j — плотность тока, протекающего через проволочку; B — магнитная индукция. Раскрывая векторное произведение и принимая прямым угол между j и B найдем силу F

$$F = I \cdot B \cdot \sin 90^\circ \cdot l = 18 \cdot 0,02 \cdot 1 \cdot 0,095 = 0,034 \text{ (Н)}.$$

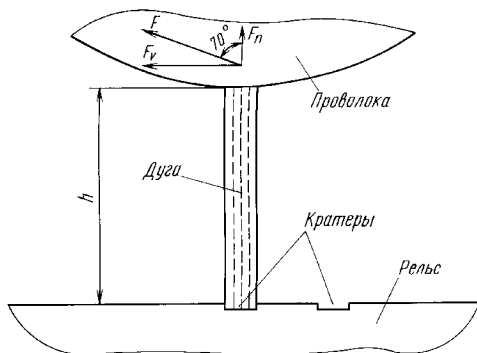


Рис. 5. Схема движения проволочки под действием силы F

Пренебрежем ЭДС самоиндукции, возникающей в движущейся проволочке; ее величина примерно равна $3 \cdot 10^{-4}$ В, что не оказывает влияния на протекающий ток.

Как показывает опыт, в том месте, где проволочка начинает движение, силовые линии B -поля направлены под углом $\alpha \approx 70^\circ$ к горизонтальной плоскости стекла. Тогда из треугольника сил (см. рис. 5) можно получить соотношение между силой F_h , поднимающей проволочку, и силой F : $F_h = F \cdot \cos \alpha$. Записав второе уравнение Ньютона для проволочки и приняв во внимание равенство (1), получим

$$ma = F_h - mg; \quad (2)$$

$$a = \frac{2h}{\tau^2}; \quad (3)$$

$$m = V\rho = \frac{1}{4}\pi d^2 l \rho = \frac{1}{4}\pi (1,2 \cdot 10^{-3})^2 0,095 \cdot 8,93 \cdot 10^3 = 9,159 \cdot 10^{-4} \text{ (кг)}. \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (2)–(4), высоту h оценим как

$$h = \frac{F \cos(\alpha) - mg}{2m} \tau^2 = \frac{2 \cdot 0,034 \cdot 0,342 - 9,59 \cdot 10^{-4} \cdot 9,8}{2 \cdot 9,59 \cdot 10^{-4}} \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}. \quad (5)$$

Здесь время $\tau = 5 \cdot 10^{-3}$ с действия силы F приблизительно определено по осциллограмме тока как время горения дуги на пятне (см. ранее). Плотность меди $\rho = 8,93 \cdot 10^3$ кг/м³. Допустим, что ускорение a постоянно, хотя, как видно по осциллограмме, оно переменной величины вследствие непостоянства тока в проволочке.

Из векторной записи закона Ампера следует, что горизонтальная составляющая B -поля в центре магнита будет поднимать проволочку, а после точки C (см. рис. 1, б) — прижимать проволочку к рельсу. В результате совместного действия этих сил, а также упругого соударения проволочки с рельсом мы наблюдаем картину пятен, приведенную на рис. 6.

Другим фактором, определяющим гашение дуги, является эффект термоэлектронного вентиля [3]. Благодаря этому эффекту дуга загорается вблизи погасшего кратера, образуя совокупность мелких кратеров, составляющих пятно на аноде.

Средняя плотность тока в кратере составляет

$$j = \frac{I}{s} = \frac{18}{1,81 \cdot 10^{-9}} = 9,94 \cdot 10^9 \text{ (А/м}^2\text{)}.$$

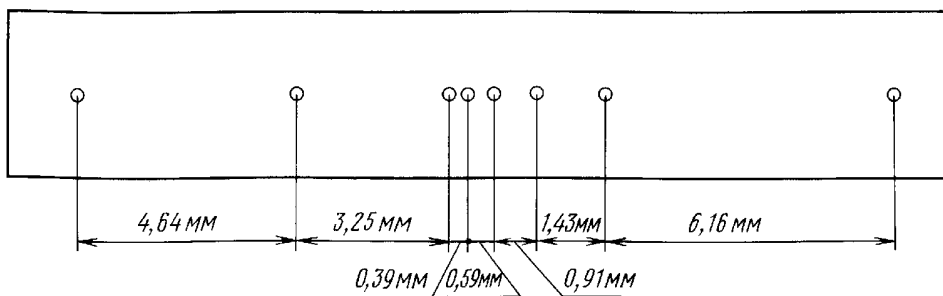


Рис. 6. Расположение пятен на аноде (пятна схематически обозначены кружками, расстояния даны в миллиметрах; проволочка начинает движение слева)

Здесь площадь s вычисляли как

$$s = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (48 \cdot 10^{-6})^2}{4} = 1,81 \cdot 10^{-9} \text{ (м}^2\text{)},$$

где $d = 48 \cdot 10^{-6}$ (м) — средний диаметр больших кратеров (см. выше). Сила тока I равна 18 А.

Таким образом, плотность тока $j = 9,94 \cdot 10^9$ А/м², полученная в настоящей работе для медного анодного кратера атмосферной дуги, соизмерима с плотностью тока $j = 3,5 \cdot 10^9$ А/м², полученной в работе [1] для медного катода вакуумной дуги. Вместе с тем, электронная плотность близка к плотности $j = 7,3 \cdot 10^9$ А/м², которая вызывает электрический взрыв холодной меди [2]. Это позволяет предположить, что во всех указанных случаях металл взрывается под действием электрического тока независимо от того, какой знак электрического потенциала имеет наблюдаемый электрод. В пользу предположения о взрыве говорит и факт разбрызгивания металла вокруг анодных кратеров (рис. 7).

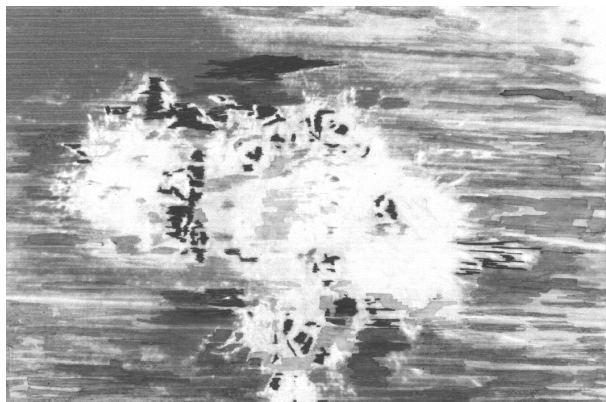


Рис. 7. Эффект разбрызгивания металла вокруг больших лунок: темные участки — медь, светлые — пятно и разбрызгавшийся металл

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ф о р м и р о в а н и е катодного кратера в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом / М.К. Марахтанов, А.М. Марахтанов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 13.
2. M a r a k h t a n o v M. K., M a r a k h t a n o v A. M. Electrical explosion of cold thin metal films. Thin Solid Films 359 (2000), 127–135.
3. Э ф ф е к т термоэлектронного вентиля и ритм катодного кратера в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом / М.К. Марахтанов, А.М. Марахтанов // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 24.

Статья поступила в редакцию 23.09.2002

Даниил Вячеславович Кириллов родился в 1982 г., студент пятого курса МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области физического моделирования процессов в газоразрядных устройствах, физики твердого тела.

D.V. Kirillov (b. 1982) is a 5-year student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of physical simulation of processes in gas-discharging devices, solid-state physics.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
выходит из печати книга**

Пузряков А.Ф.

Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учебное пособие по курсу «Технология конструкций из металлоком-позитов». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.: ил.

ISBN 5-7038-1958-X

Изложены теоретические основы и практика использования одного из перспективнейших технологических методов защиты изделий от воздействия внешней среды — плазменного напыления. Описаны методы нанесения, оборудование и материалы для покрытий различного функционального назначения. Обобщены экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов отечественных и зарубежных исследователей. Рассмотрены различные методы испытаний и свойства напыленных покрытий, приведены области эффективного использования покрытий.

Книга предназначена для студентов вузов, аспирантов, а также инженерно-технических работников машиностроительной, энергетической, металлургической и других отраслей промышленности.