

04;11;12

Динамика пятен на медном катоде в сильноточной вакуумной дуге

© А.А. Логачев, А.М. Чалый, С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия)

(Поступило в Редакцию 27 марта 1996 г.)

1. Сильноточной вакуумной дугой (СВД) будем называть дуговой разряд в вакууме с током $I \gg I_n$, т.е. разряд, в котором на катоде одновременно горит много катодных пятен (КП), $I_n \sim 10^2$ А — ток, пропускаемый одним КП. Исследования СВД кроме физического интереса стимулируются необходимостью совершенствования вакуумной коммутационной аппаратуры, которая все шире используется в технике и вытесняет масляные выключатели, воздушные дугогасительные камеры и т.д. [1].

Существенное отличие вакуумной дуги от дуги в газовой атмосфере состоит в том, что плазмообразующим веществом являются только продукты эрозии электродов. Основным источником вещества в режимах с диффузной привязкой дуги к аноду являются КП, из которых в межэлектродный промежуток истекают сверхзвуковые струи плотной сильноионизованной плазмы [2,3]. В связи с этим очевиден интерес к изучению динамики КП как в процессе развития дуги после поджига [4], так и в последующих фазах ее горения [5].

2. Известно, что после токовой тренировки (очистки поверхности) на однородных металлических катодах быстро перемещающиеся малоэрозионные КП исчезают, заменяются малоподвижными с большой эрозией. Такие КП после поджига разряда образуют на катоде кольцо, радиус которой r растет со временем. Как внутри, так и снаружи кольца могут появляться лишь случайные пятна [6,7]. Зависимость $r = r(t)$ хорошо воспроизводится от разряда к разряду и определяется формой импульса тока $I = I(t)$. Неоднократно высказывалось предположение, что расширение кольца в СВД есть ретроградное движение КП (движение в направлении, противоположном амперовой силе, действующей на ток, протекающий через пятно) в собственном магнитном поле разрядного тока, подчиняющееся тому же закону, что и движение одиночного пятна в слаботочной ($I \sim I_n$) дуге во внешнем магнитном поле, параллельном плоскости катода, а именно $V = K \cdot B$, где V — скорость ретроградного движения КП; B — индукция внешнего магнитного поля; K — коэффициент, определяемый материалом катода и не зависящий от B ($B \leq 0.12$ [8], 0.2 Тл [9]). По данным [8], K зависит не только от материала, но и от тока и межэлектродного промежутка h .

Для СВД, в которой одинаковые пятна симметрично расположены на кольце радиуса r , с учетом этого предположения получим

$$dr/dt = K \cdot B(t), \quad (1)$$

где $B(t) \approx \mu_0 I(t) 4\pi r(t)$ — индукция магнитного поля, создаваемого током, протекающим через остальные пятна в месте расположения произвольно взятого пятна.

Для импульса тока прямоугольной формы с передним фронтом длительностью t_0 из (2) следует

$$r^2(t) = \frac{K\mu_0 I}{2\pi} (t - t_0) + r_0^2. \quad (2)$$

Здесь через x_0 обозначен радиус кольца пятен при $t = t_0$. Экспериментальные исследования динамики КП в СВД ограничены, а результаты их противоречивы. Впервые зависимость радиуса кольца КП от времени тока на катодах из различных металлов была измерена в [10]. Использовался прямоугольный импульс тока длительностью 2 мс с передним фронтом ≈ 0.5 мс. Получено, что $r \sim t^\alpha \cdot I^{1/2}$. При $I < 1.5$ кА $\alpha = 1/2$ в соответствии с (2). Для медного катода из данных [10] можно получить $K \approx 50$ м/(с·Тл) независимо от тока. Однако при $I > 1.5$ кА $\alpha = 0.8-1.0$. Обнаружена слабая зависимость от h при $h < 5$ мм. Позднее в [6] были измерены мгновенная скорость расширения кольца КП $V_x(t)$ и с помощью магнитного зонда соответствующая ей индукция собственного магнитного поля $B(t)$ в СВД с медными электродами при токе $2.7 < I < 6.9$ кА, $10 \leq h \leq 30$ мм. В полном соответствии с (2) V_k оказалась прямо пропорциональной B . Вне зависимости от I и h получено $K = 700$ м/(с·Тл). Однако такая закономерность сохранялась лишь для $B < 0.02$ Тл (большие r). При $B > 0.02$ Тл пропорциональность нарушалась и, по мнению авторов, появлялась тенденция к насыщению скорости (см. рис. 3 в [6]). Такая трактовка представляется неоднозначной, так как на рис. 3 в [6] приведено слишком мало экспериментальных точек, относящихся к $B > 0.04$ Тл. Нельзя исключить, что кривая $V_k = V_k(B)$ имеет два примерно линейных участка (при $B < 0.02$ и $B > 0.04$ Тл) с сильно различающимися наклонами: $K \sim 10^2$ м/(с·Тл) при $B > 0.04$ Тл (малые r).

В недавней работе [4] показано, что на чистой поверхности ряда металлов при $h \approx 3-5$ мм, $1 < I < 10$ кА и $B \leq 0.4$ Тл соотношение (1) выполняется и, в частности, для меди $K = 220$ м/(с·Тл) независимо от тока. По мнению авторов [4], как большее значение K (при больших r), полученное в [6], так и более сильная, чем это следует из (2), зависимость r от времени, полученная в [10] при больших токах, есть результат плохой очистки периферии катода в этих работах. Однако в [4] не прослежена зависимость от межэлектродного

промежутка. Кроме того, часть анода была закрыта сеткой с достаточно высокой прозрачностью, через которую проводилось фотографирование катода.

Целью настоящей работы являлось проведение систематических экспериментальных исследований динамики КП на медном катоде в зависимости от тока и межэлектродного промежутка. Некоторые предварительные результаты работы были опубликованы ранее [11].

3. Эксперименты проводились в разборной вакуумной камере при непрерывной откачке паромасляным насосом, снабженным ловушкой, охлаждаемой жидким азотом. Остаточное давление $p < 10^{-5}$ мм рт.ст. Использовались плоские торцевые электроды диаметром $D = 2R = 30$ мм из бескислородной меди. В специальной серии экспериментов торцевой анод заменялся анодом из молибденовой сетки: проволока диаметром 0,4 мм, шаг 2,5 мм. Сетка приваривалась на торец цилиндра из нержавеющей стали с внешним диаметром 32 мм, внутренним — 28 мм. Межэлектродный промежуток $0.5 \leq h \leq 8$ мм.

В центре катодов были просверлены отверстия диаметром 2,5 мм. Разряд поджигался внутри отверстия вблизи поверхности электрода обрывом тока (≈ 10 А) во вспомогательной цепи. Разряд питался от емкости $C \approx 2$ Ф, $U \approx 120$ В, подключаемой транзисторным ключом на время $0.5 \leq \tau \leq 5$ мс. Ток регулировался в пределах $0.5 \leq I \leq 5$ кА малоиндуктивным балластным сопротивлением. Импульсы тока даже при максимальных I и τ были практически прямоугольной формы. Передний фронт при максимальном токе не превышал 150 мкс. Паразитное магнитное поле токопровода было подавлено, так что индукция внешнего магнитного поля в межэлектродном промежутке не превышала 0,5 мТл.

Ток и напряжение разряда измерялись осциллографами С9-8. Процессы на катоде фиксировались камерой для высокоскоростной фотосъемки ВФУ-1 (10–25 мкс/кадр). Камера располагалась под небольшим углом к электроду. Электроды тренировались сериями ~ 20 импульсов тока $I \approx 5$ кА, $\tau \approx 5$ мс. Непосредственно перед фотографированием давались 2–3 тренировочных импульса.

4. Результаты экспериментов обрабатывались следующим образом. Строились кривые $r^2(t)$, которые имеют, как видно из рис. 1, а, два характерных участка. Первый — нелинейный, наиболее отчетливо выраженный при большом токе. Его длительность коррелирует с длительностью переднего фронта импульса тока, определяемой по осциллограммам. Второй (при $I \approx \text{const}$) хорошо аппроксимируется линейной зависимостью $r^2(t) = P_1 \cdot t + P_2$. В некоторых случаях при $r \sim R$ линейность нарушалась. Это объясняется недостаточной очисткой периферии катода. Такие результаты браковались и катод дополнительно тренировался. Параметры P_1 и P_2 определялись по методу наименьших квадратов. Попытки определить нелинейные члены (степеней 2, 3, 4) дали значения неотличимые от нуля (оценка погрешности этих членов в несколько раз больше их величины).

Это показывает, что предположение относительно динамики КП в СВД, при которых получено выражение (2), дающее линейную зависимость квадрата радиуса кольца КП от времени на плато импульса тока, действительно справедливо.

Коэффициент K определялся для каждого режима в результате усреднения по 6–8 измерениям (рис. 1, б). Погрешность определялась из разброса экспериментальных результатов.

5. Результаты обработки измерений приведены на рис. 2. Видно, что коэффициент K зависит от межэлектродного промежутка (рис. 2, а). Зависимость $K = K(h)$ в СВД ранее исследовалась в [10], однако приведенные в этой работе данные недостаточны, чтобы провести количественное сравнение. Результаты настоящих измерений можно сопоставить с измерениями в слаботочных дугах, например [8]. Сопоставление представляется разумным, так как в [8] исследования проводились во внешнем поле $B \leq 0.12$ Тл. В наших экспериментах индукция собственного магнитного поля тока уменьшается до такого значения практически сразу после прохождения переднего фронта импульса тока. Сравнение результатов, приведенных на рис. 2, а и на рис. 5 работы [8], показывает сходный характер зависимости $K = K(h)$ при $h \leq 3$ мм. Однако в слаботочной дуге при $h > 3$ мм $K \approx \text{const}$, а в СВД кривая $K = K(h)$ удовлетворительно аппроксимируется логарифмической зависимостью.

Как следует из рис. 2, б, при $h \geq 1$ мм коэффициент K слабо растет с ростом разрядного тока. Это противоречит результатам, полученным ранее в СВД [4, 6, 10]. Причиной расхождения с [10] является некорректная процедура обработки, использованная в этой работе, не учитывающая достаточно длинный передний фронт импульса. Действительно, как показали сделанные нами вычисления, если кривые $r^2(t)$ аппроксимировать прямой, включая начальный участок, то результаты будут зависеть от длины обрабатываемого участка, и если длительности линейного ($I = \text{const}$) и нелинейного (на фронте тока) участков сравнимы по величине, то значение K получается заниженным, а зависимость от тока пропадает. Естественно, такая обработка некорректна как с математической (значение критерия χ^2 в несколько раз больше, чем при обработке только линейного участка), так и с физической точки зрения. Что касается работы [6], то вопреки утверждению ее авторов полученные результаты (см. рис. 3 в [6]) фактически не позволяют проследить зависимость $K = K(I)$. Причины расхождения с результатами работы [4] неясны. Так, в ней использован импульс с коротким передним фронтом 20 мкс. В слаботочной дуге наблюдалась зависимость K от тока, причем более сильная, чем в настоящем эксперименте. При $h = 15$ мм изменение тока от 30 до 60 А приводило к увеличению K в 2,5 раза [8].

На рис. 2, б приведены также результаты, полученные в СВД с анодом из Мо сетки (материал, из которого изготовлена сетка, не будет влиять на динамику КП, так как еще в процессе токовой тренировки сетка запяляется

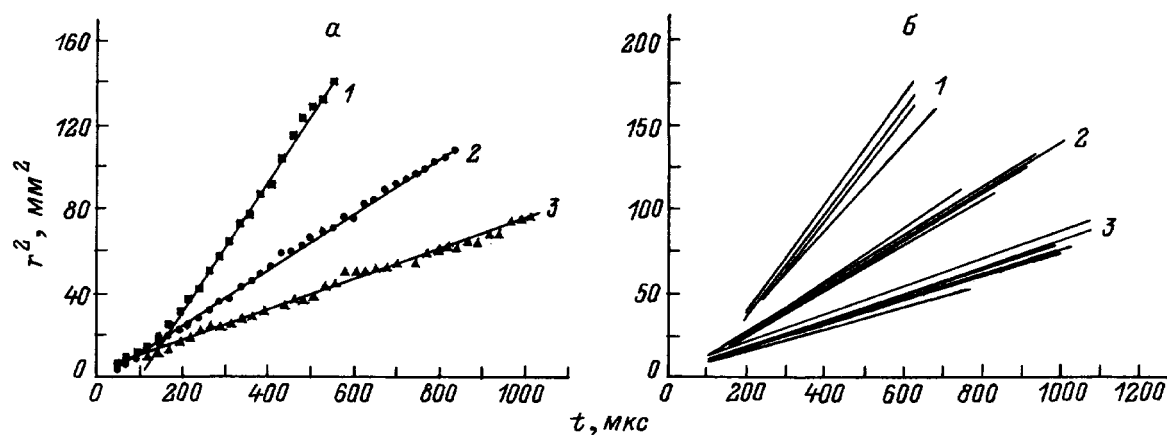


Рис. 1. Зависимости квадрата радиуса кольца катодных пятен от времени. *a* — измеренные зависимости $r^2 = r^2(t)$ и аппроксимации линейного участка, *б* — семейства аппроксимирующих прямых; $h = 4$ мм; $I \approx 4.6$ (1), 2.8 (2), 1.6 кА (3).

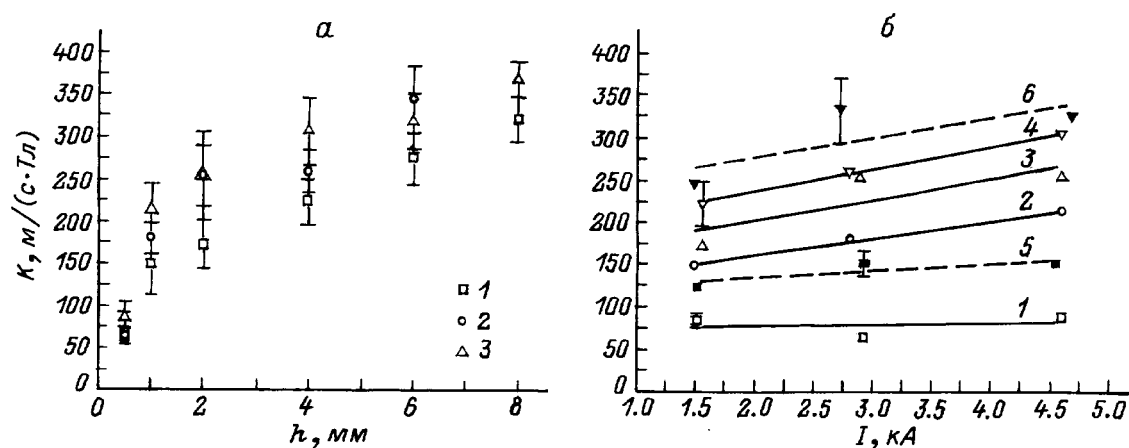


Рис. 2. *a* — зависимость K от межэлектродного промежутка: $I = 1.5$ (1), 2.8 (2), 4.6 кА (3); *б* — от тока разряда: сплошной анод — светлые значки 1 — $h = 0.5$, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 4 мм; анод из молибденовой сетки — темные значки 5 — $h = 0.5$, 6 — 4 мм.

продуктами эрозии катода). Видно, что при одинаковых h замена сплошного анода сетчатым приводит к увеличению K , т.е. скорость движения КП в СВД с сетчатым анодом соответствует скорости, наблюдаемой в разряде со сплошным анодом, но при большем межэлектродном промежутке. Использование сетчатого анода практически не изменяло напряжения на дуге $\Delta U \leq 1$ В.

6. Наблюдаемые зависимости $K = K(h)$ и $K = K(I)$, по нашему мнению, имеют единую природу и могут быть объяснены исходя из хорошо известного факта замедления движения КП при увеличении давления (см., например, [12]). Действительно, ранее нами было показано, что анод является эффективным источником вторичных атомов, образующихся под действием потока быстрых ионов из КП [13,14]. Концентрация вторичных атомов вблизи поверхности анода может в несколько раз превышать концентрацию первичной (образованной катодными струями) плазмы, так как скорость атомов $\approx 10^5$ см/с, а катодных ионов $\geq 10^6$ см/с, и достигать

при токах в несколько кА величины $N_a \geq 10^{16}$ см $^{-3}$. По мере проникновения в межэлектродный промежуток эти атомы ионизируются, образуя вторичную плазму [15]. Уменьшение b приводит к повышению концентрации вторичных частиц у поверхности катода и соответственно к снижению скорости движения КП. С ростом плотности тока растет импульс, передаваемый от катодных струй к вторичным частицам, поток вторичных частиц как бы прижимается к аноду [16]. Этим, по-видимому, можно объяснить увеличение K с ростом тока при фиксированном h .

Предложенное объяснение наблюдаемых зависимостей является сугубо качественным. Подтвердить его расчетом трудно, хотя бы потому, что в настоящее время не существует последовательной общепринятой теории, описывающей сам феномен ретроградного движения и влияние давления на его скорость. Поэтому представляют интерес эксперименты с сетчатым анодом. Полученные результаты (рис. 2, б) находят удовлетворительное

объяснение в рамках предложенной модели. Действительно, использование сетки уменьшило поверхность анода, взаимодействующую с катодной струей, сквозь сетку вторичная плазма могла вытекать за пределы межэлектродного промежутка, давление вблизи катода уменьшилось соответственно тому, что получается в разряде со сплошным анодом при большем h (ср. 1 и 5, 4 и 6 на рис. 2, б).

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда и Российского правительства (грант № R5D000 R5D300) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 93-02-17416).

Список литературы

- [1] Kaneko E., Chshima I. // Proc. XV ISDEIV. 1992. Darmstadt (Germany). P. 747–755.
- [2] Плотто А.М., Рыжов В.Н., Капин А.Г. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. Вып. 2. С. 494–507.
- [3] Афанасьев В.П., Дюжев Г.А., Школьник С.М. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 11. С. 80–82. Там же. 1993. Т. 63. Вып. 3. С. 34–50.
- [4] Перский Н.Е., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. // ТВТ. 1989. Т. 27. Вып. 6. С. 1060–1067.
- [5] Логачев А.А., Чалый А.М., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 11. С. 26–30.
- [6] Sherman J.C., Webster R., Jenkins J.E., Holmes R.J. // Phys. D. 1975. Vol. 8. N 6. P. 696–702.
- [7] Мицкевич М.К., Бушик А.И., Бакуто И.А. и др. Электроэрозионная обработка металлов / Под ред. И.Г.Некрасевича. Минск: Наука и техника, 1988. 216 с.
- [8] Fang D.Y. // J. Phys. D. 1982. Vol. 15. P. 835–844.
- [9] Fu Y.H. // Thesis. Tech. Univ. Eindhoven (Netherlands), 1990. P. 22–42.
- [10] Gundlach H.C.W. // V ISDEIV. Poznan, 1972. P. 243–252.
- [11] Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M. // XVI ISDEIV. Proc. SPIE 2259. 1994. P. 105–108.
- [12] Gallagher C.J. // J. Appl. Phys. 1950. Vol. 21. N 7. P. 768–771.
- [13] Логачев А.А., Митрофанов Н.К., Циркель Б.И., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 9. С. 78–82.
- [14] Логачев А.А., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 4. С. 75–78.
- [15] Logatchev A.A., Shkol'nik S.M. // Proc. 17th ICEC. Nagoya (Japan), 1994. P. 907–914.
- [16] Boxman R.L., Goldsmith S. // IEEE Trans. Plas. Sci. 1990. Vol. 18. N 2. P. 231–236.