

04;12

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА МЕДЬХРОМОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В КОРОТКОЙ СИЛЬНОТОЧНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГЕ

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

1. Исследовалась сильноточная вакуумная дуга (СВД) в разборной камере при непрерывной откачке ( $p < 10^{-5}$  Тор) между плоскими торцевыми электродами диаметром  $D = 2R = 30$  мм, изготовленными из композиции  $\text{CuCr50W3}$ . Межэлектродный промежуток  $0.5 \leq h \leq 8$  мм. В контрольных экспериментах использовались электроды из бескислородной меди, нержавеющей стали X18H9T и композиции  $\text{CuW70}$ , а также анод из Мо сетки  $\varnothing 0.4$  мм, шаг 2.5 мм, приваренной к торцу цилиндра с внутренним диаметром 28 мм, наружным — 32 мм.

Разряд поджигался в центре катода и питался от емкости  $C \approx 2$  Ф,  $U \approx 120$  В, подключаемой транзисторным ключом на время  $\tau = 5$  мс. Ток прямоугольной формы регулировался в пределах ( $0.5 \leq I \leq 5$ ) кА малоиндуктивным сопротивлением. Длительность фронта импульса тока при короткозамкнутом разряднике не превышала 20 мкс. Принятые для экранирования и компенсации магнитного поля токоподвода меры обеспечивали отсутствие внешних магнитных полей в межэлектродном промежутке с точностью не хуже 0.5 мТл. В ряде экспериментов накладывалось внешнее поперечное магнитное поле ( $1 \leq B_t \leq 15$ ) мТл. Ток и напряжение измерялись осциллографами С9-8. Процессы на катоде фиксировались камерой ВФУ-1 (10–25 мкс/кадр).

2. Известно, что после токовой тренировки (очистки поверхности) на однородных металлических катодах быстроперемещающиеся малоэрозионные катодные пятна (КП) исчезают, заменяются малоподвижными с большой эрозией. Такие КП после поджига СВД образуют на катоде кольцевую структуру, радиус которой  $r$  растет со временем. Как внутри, так и снаружи кольца могут появляться лишь случайные КП [1,2]. Зависимость  $r = r(t)$  хорошо воспроизводится от разряда к разряду и определяется формой импульса тока  $I = I(t)$ . Расширение кольца есть ретроградное движение КП в собственном магнитном поле разрядного тока [3]. Проведенные нами эксперименты показали, что для

очистки свежей поверхности медного катода  $D = 30$  мм достаточно  $N \geq 20$  импульсов тока  $I = (4-5)$  кА;  $\tau \approx 5$  мс.

Не так в разрядах с катодами из композиционных материалов. Вначале опишем результаты экспериментов при  $h = (6-8)$  мм. После токовой тренировки примерно в том же объеме, что и для катода из однородного металла, например меди, на катоде из композиции, например CuCr, также исчезают быстрые КП. Однако медленные КП не образуют кольцо. Область, занятая КП, на катоде имеет не вполне симметричную форму. КП располагаются не только на границе области, но и внутри. Если, несмотря на несимметричность, размер области, занятой пятнами в направлении, перпендикулярном к направлению наблюдения, обозначить как  $d = 2r$ , то зависимость  $r = r(t)$ , удовлетворительно воспроизводящаяся от импульса к импульсу при  $r \ll R$ , с ростом  $r$  ( $r \sim R$ ) воспроизводится хуже, разброс значений  $r$  при некотором фиксированном  $t$  растет. При увеличении числа импульсов наблюдается тенденция к симметризации области, занятой КП на электроде, разброс зависимостей  $r = r(t)$  уменьшается.

Стабилизация (в указанном выше смысле) картины развития СВД на катоде из CuCr,  $D = 30$  мм, происходит лишь при  $N > 10^2$  имп,  $I \approx 5$  кА и проходит в два этапа. Первый этап связан с очисткой поверхности, второй, по-видимому, со сплошным поверхностным переплавом всего торца катода. Действительно, осмотр поверхности катодов с помощью оптического микроскопа показывает, что объем токовой тренировки, необходимый для стабилизации картины развития СВД, практически совпадает с объемом, необходимым для сплошного переплава поверхности. Хорошая воспроизводимость кривых  $r = r(t)$  при  $r/R \ll 1$  уже на ранних этапах тренировки естественно объясняется высокой плотностью КП на единицу площади катода вблизи центра (поджига) и соответственно сплошным переплавом этой части поверхности малым числом импульсов. Отметим, что изменения в динамике пятен на CuCr катоде по мере увеличения времени воздействия дуги в слаботочных разрядах наблюдалось в [4].

Вид зависимостей  $r = r(t)$  для различных амплитудных значений тока  $I$  и межэлектродного промежутка  $h$  для СВД с торцевыми электродами из CuCr и сравнение с аналогичными зависимостями для СВД с электродами из бескислородной меди приведены в [5].

3. При уменьшении межэлектродного промежутка до  $h \approx 4$  мм начинают проявляться, а при  $h = 2$  становятся резко выраженными особенности, присущие коротким СВД с CuCr электродами. Если при  $h = (6-8)$  мм расширение области, занятой КП, заканчивается тем, что вся торцевая

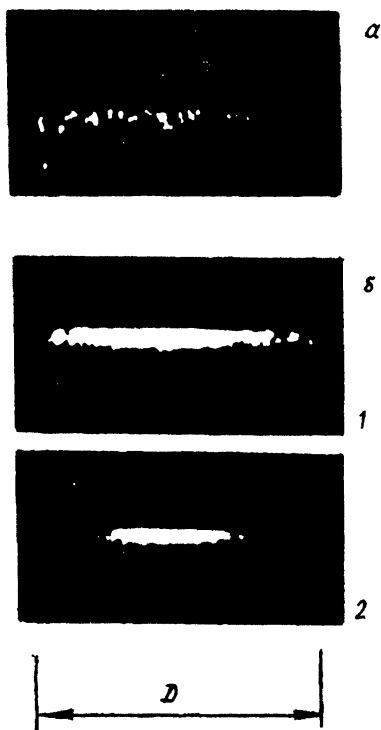
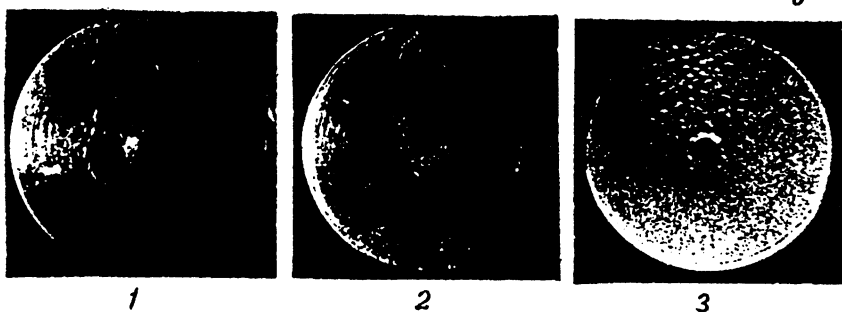
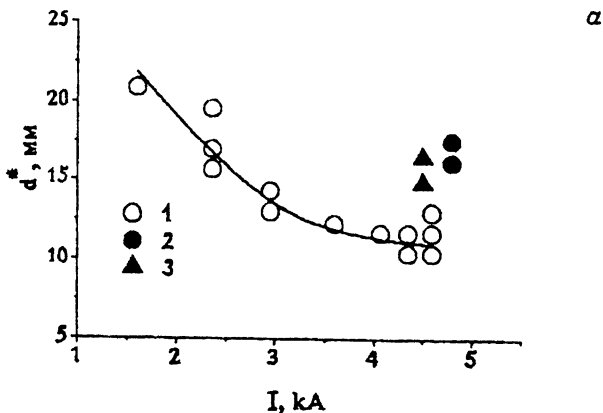


Рис. 1. Фотографии СВД с электродами  $\text{CuCr50W3}$ . Катод — внизу; время экспозиции 24 мкс; камера под углом  $\approx 10^\circ$  к электроду. *a* —  $I = 4.5 \text{ кА}$ ,  $h = 6 \text{ мм}$ ,  $t = 4500 \text{ мкс}$ ; *б* —  $I = 4.6 \text{ кА}$ ,  $h = 2 \text{ мм}$ ; *1* —  $t = 500 \text{ мкс}$ , *2* —  $t = 1050 \text{ мкс}$ .

поверхность катода примерно однородно заполняется пятнами, а некоторое количество КП перемещается на боковую поверхность катода, дуга становится сильношумящей и такая картина горения сохраняется в течение всего импульса (рис. 1, *a*), то при  $h \leq 4 \text{ мм}$  на боковой поверхности видно значительно меньше КП, а при  $h \leq 2 \text{ мм}$  пятна не уходят с торца, дуга до конца импульса остается малошумящей. После поджига короткой СВД расширение области, занятой КП, через несколько сотен микросекунд сменяется “группированием” пятен (не следует путать с групповым КП) — уменьшением части площади катода, занятой пятнами. Формирование группы занимает еще несколько сотен микросекунд (рис. 1, *б*). Граница группы достаточно выраженная, но нерезкая. Конечный диаметр группы  $d^*$  зависит от тока и межэлектродного промежутка (рис. 2, *a*). Таким образом, через время  $\tau \approx 1 \text{ мс}$  формируется группа КП, центр которой в течение всего импульса практически не меняет своего положения на катоде. Группирование КП происходит при



**Рис. 2.** Характерный размер группы пятен  $d^*$  на катоде и эрозионные поражения электродов после серии импульсов. а — катод CuCr50W3: 1 — анод CuCr50W3,  $h = 2$  мм; 2 — анод CuCr50W3,  $h = 4$  мм; 3 — анод Mo — сетка,  $h = 2$  мм; б — электроды CuCr50W3;  $I = 4.6$  кА,  $h = 2$  мм; 1 — анод  $B_t \leq 0.5$  мТл; 2 — анод  $B_t \approx 5$  мТл; 3 — катод  $B_t \approx 5$  мТл (в центре — отверстие для поджига разряда).

практически неизменном напряжении на дуге и не сопровождается увеличением уровня шума.

4. При компенсации магнитного поля токоподвода внутри вакуумной камеры и экранировке магнитного поля внешнего токоподвода центр группы с точностью до 2–3 мм совпадал с центром электрода. Наложение даже слабого  $B_t \approx (3 - 5)$  мТл магнитного поля меняло место формирования группы, не меняя ее характерного размера, так что центр группы оказывался отчетливо смещенным в амперовом направлении относительно центра электродов. Сдвиг центра группы проявлялся на самых ранних стадиях ее формирования (как только на кадрах СФР было возможно заметить неоднородность в распределении КП — зародыш группы). Другими словами, группа с самого начала формирова-

лась вокруг смещенного в амперовом направлении центра. От такой смещенной группы периодически отрывались несколько КП, которые перемещались к диаметрально противоположному краю электрода и там отмирали. Сразу после этого несколько пятен опять отрывались от группы и процесс повторялся. Наложение поля  $B_t \geq 10$  мТл приводило к смещению группы на край электрода.

5. Формирование группы находит отражение в характере эрозионных поражений электродов. На части катода, занятой группой, поражения более выражены. На аноде наблюдается расплав приблизительно круговой формы, центр которого практически совпадает с центром группы КП на катоде (рис. 2, б). При  $h = (6-8)$  мм при тех же значениях  $I$  и  $t$  оплавления анода не наблюдалось. Эрозионные поражения анода в короткой СВД с электродами из медьхромовой композиции напоминают автограф анодного пятна (АП). Однако образованию АП предшествует возрастание напряжения на дуге и появление сильных шумов [6]. В описываемых экспериментах, как уже отмечалось, появление локального расплава на аноде происходит при неизменном напряжении и низком уровне шумов. По-видимому, в отличие от АП, которое образуется из-за изменения знака анодного падения потенциала, формирования положительного анодного падения [7], наблюдающиеся в настоящей работе эрозионные поражения анода происходят при отрицательном анодном падении из-за концентрации тока (и теплового потока) на небольшую часть поверхности анода вследствие группирования пятен на катоде.

Группирование КП наблюдалось только в коротких СВД с электродами CuCr50W3. В дугах с электродами из меди, нержавеющей стали, композиции CuW70 во всем исследованном диапазоне  $I$  и  $h$  группирование не наблюдалось. Были проведены эксперименты с заменой одного из CuCr электродов медным. Если заменялся катод, группа не образовывалась. Если заменялся анод, то на CuCr катоде группа КП формировалась, а сам медный анод подвергался локальному расплаву, в то время как при использовании пары медных электродов при тех же параметрах разряда оплавления анода не происходило.

6. Проведенные исследования показали, что феномен группирования связан с особенностями катодных процессов на композиции CuCr. Роль анода, по-видимому, состоит в том, что он является источником вторичных атомов, образующихся при воздействии на анод потоков быстрых ионов из КП [8,9]. По мере проникновения в межэлектродный промежуток эти атомы ионизируются, образуя вторичную плазму [10]. Уменьшение межэлектродного промежутка приводит к

повышению концентрации вторичных частиц вблизи поверхности катода, что может быть причиной снижения (или даже инверсии) скорости движения КП в магнитном поле [11]. Это предположение подтверждается экспериментом с сетчатым анодом (рис. 2, а). 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, но при большем  $h$ . Напряжение на дуге с сетчатым анодом возрастало в пределах не более одного вольта. Отмеченное выше отсутствие влияния материала анода объясняется запылением поверхности анода еще в процессе тренировки продуктами эрозии катода.

В заключение отметим, что описанное в [12] изменение формы существования СВД с размыкающимися контактами из  $\text{CuCr25}$  — быстрый переход от диффузной дуги к заметно контрагированной при малых межэлектродных промежутках, — по-видимому, определяется обнаруженными нами особенностями в динамике КП. По нашему мнению, именно эти особенности — группирование КП — являются основной причиной отказа вакуумных выключателей с торцевыми контактами из медьхромовой композиции при зазорах менее 6 мм.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда и российского правительства (грант R5D000, R5D300) и Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-17416).

### Список литературы

- [1] Sherman J.C., Webster R., Jenkins J.E., Holmes R.J. // Phys. D.: Appl. Phys. 1975. V. 8. N 6. P. 696-702.
- [2] Мицкевич М.Е., Бушик А.И., Бакуто И.А. и др. Электроэрозионная обработка металлов / Под ред. И.Г. Некрашевича. Минск: Наука и техника, 1988. 216 с.
- [3] Перский Н.Е., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. // ТВТ. 1989. Т. 27. В. 6. С. 1060-1067.
- [4] Fu Y.H. Thesis Tech. Univ. Eindhoven. Netherlands, 1990. P. 22-42.
- [5] Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M. // XVI ISDEIV. Gennady A. Mesyats, Editor. Proc. SPIE 2259. 1994. P. 105-108.
- [6] Rich J.A., Prescott L.E., Cobine J.D. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 2. P. 587-601.
- [7] Dyuzhev G.A., Lyubimov G.A., Shkol'nik S.M. // IEEE Trans. Plas. Sci. 1983. V. PS-11. N 1. P. 36-45.
- [8] Логачев А.А., Митрофанов Н.К., Циркель Б.И., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. С. 78-82.
- [9] Логачев А.А., Школьник С.М. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 4. С. 75-78.

- [10] *Logatchev A.A., Shkol'nik S.M.* // Proc. 17th ICEC. 1994. Nagoya, Japan. P. 907-914.
- [11] *Galagher C.J.* // J. Appl. Phys. 1950. V. 21. N 7. P. 768-772.
- [12] *Shulman M.B., Slade P.G.* // Proc. 17 ICEC. Nagoya, Japan. 1994. P. 929-935.

Поступило в Редакцию  
25 марта 1996 г.

---