

12

Средний ток, пропускаемый катодным пятном вакуумной дуги, и скорость движения пятна в магнитном поле на нанокompозитном материале CuCr50/50

© К.К. Забелло¹, И.Н. Полуянова², В.В. Яковлев³,
С.М. Школьник¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² ПГ „Таврида Электрик“, Москва

³ Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: Zabellok@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2017 г.

Показано, что такие характеристики катодного пятна, как средний ток, пропускаемый пятном, и его зависимость от индукции тангенциального магнитного поля B_t , а также скорость движения пятна и ее зависимость от B_t , для двух существенно различающихся по структуре образцов CuCr50/50 (нанокompозиция и „solid-state sintered“ compoзиция) практически совпадают, если перед измерениями в процессе кондиционирования был осуществлен сплошной переплав поверхности контактов с помощью дуговых воздействий умеренными токами.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45256.16866

Выбор контактного материала исключительно важен для обеспечения эксплуатационных характеристик вакуумного коммутационного аппарата. Исследования ведутся уже десятки лет. Сложность состоит в том, что к контактным материалам предъявляется множество различных требований, некоторые из которых являются взаимоисключающими [1]. Максимально удовлетворить эти требования удастся, используя сплавы и композиции, среди которых наибольший интерес вызывает композиция CuCr. Существует четыре основных метода производства композиции из порошков меди и хрома, при которых размер гранул Cr варьируется в пределах от 10 до $\sim 10^2 \mu\text{m}$ [2]. Физические и химические свойства композиции зависят от процентного содержания

компонентов и морфологии композиции и тем самым зависят от метода изготовления. Исследования позволили сделать выбор оптимального для различных вакуумных аппаратов состава композиции и метода производства (см. работу [2] и ссылки в ней).

Наряду с традиционными композициями начали создаваться и исследоваться нанокomпозиции, в которых размер гранул составляет десятки нанометров [3]. В работе [4] описаны способ создания нанокomпозита CuCr с размером Cr-зерен ~ 100 nm и результаты измерения его электро- и теплопроводности. Обнаружено, что эти характеристики для нанокomпозитов отличаются от характеристик традиционных композитов несильно: возрастают на $\sim 10\%$. Авторы [4] полагают, что новые материалы перспективны для использования в качестве контактных материалов.

В работе [5] исследованы результаты дуговых воздействий в вакууме на катод, изготовленный из нанокomпозита CuCr50/50. Воздействия производились импульсами с током 600 А длительностью 200 ns. Исследовалось состояние поверхности катода после первого пробоя вакуума. По мнению авторов, явления на катоде из нанокomпозитных материалов не могут быть объяснены в рамках старых представлений (т. е. влиянием оксидных слоев и других диэлектрических включений на поверхности свежих электродов) и обусловлены микроструктурой катодного материала. Область, охватываемая дугой на катоде из ультрамелкой структуры, сильно возрастает. Скорость катодного пятна (КП) может возрастать на два порядка величины, если размер микроструктуры меньше размеров фрагментов КП.

Между тем вакуумные аппараты до начала работы подвергаются „тренировке“ (кондиционирование электродов). Далее в процессе работы дуговые воздействия продолжают модифицировать поверхность катода, вызывая сплошной поверхностный переплав горящими на ней КП. Поэтому интерес представляет динамика КП не только на „свежей“ поверхности, но и в большей степени на поверхности, подвергшейся переплаву при дуговом воздействии. Характеристики КП на поверхностях нанокomпозитов, подвергшихся поверхностному переплаву, до сих пор не были изучены. Такие исследования являются целью настоящей работы. Нами выполнены измерения и сравнение характеристик КП (среднего тока, пропускаемого КП, I_s и скорости движения КП V_s в тангенциальном магнитном поле в зависимости от индукции поля B_t) на нанокomпозитном материале CuCr50/50(1)

и на материале CuCr50/50(2), изготовленном одним из традиционных способов — „solid-state sintered“ (SSS).

Измерения проводились в разборной вакуумной камере, снабженной смотровыми окнами, при непрерывной откачке ($p \sim 10^{-4}$ Па). Использовалась пара катушек Гельмгольца, создававшая в области, где расположены электроды, однородное тангенциальное по отношению к их поверхности магнитное поле B_t ($0 < B_t < 0.15$ Т). Использовались торцевые цилиндрические электроды диаметром 30 мм с накладками из материала CuCr50(1) и CuCr50(2). Межэлектродное расстояние 6 мм. Разряд поджигался на заземленном катоде с помощью молибденовой иглы. Для питания разряда использовался источник, генерирующий импульс тока ($0 < I < 350$ А) длительностью до нескольких миллисекунд, по форме близкий к прямоугольному. Перед началом измерений поверхность электродов тренировалась импульсами тока амплитудой ≤ 1 кА и длительностью ~ 2 мс от другого источника. Необходимое количество тренировочных импульсов ($\sim 10^2$) определялось видом осциллограммы напряжения (исчезновение бросков, снижение уровня шума), а также с помощью визуальных наблюдений за состоянием поверхности катода (отслеживалось, чтобы переплав торцевой поверхности электрода катодными пятнами стал сплошным). Для электрических измерений использовался осциллограф TDS 3014В.

Дуга фотографировалась с помощью цифровой видеокамеры Phantom Micro M310, оснащенной объективом Carl Zeiss 100/2. Экспозиция кадра $1 \mu\text{s}$. Скорость съемки 35 000 fps. Съемка велась под углом $\sim 8^\circ$ к поверхности катода. Результаты съемки фиксировались в компьютере и обрабатывались с помощью специальной программы, которая позволяла определить положения КП на катоде в каждом кадре и скорость КП. Работа установки синхронизировалась с помощью блока управления. Подробно экспериментальная установка описана в [6].

После завершения тренировки последовательно проводились аналогичные измерения с электродами типа (1) и типа (2). На первом этапе работы при определении среднего тока, переносимого КП, I_s и его зависимости от магнитного поля $I_s(B_t)$ ток дуги I_a выбирался так, чтобы на катоде одновременно существовало несколько КП. Измерения проводились при различных значениях B_t . При $B_t = 0$ ток дуги $I_a \sim 100$ А. С ростом B_t средний ток, пропускаемый КП, I_s возрастал, поэтому при увеличении B_t приходилось увеличивать ток дуги до $I_a \sim 300$ А. В каждом режиме было выполнено не менее пяти

съемок поверхности катода, при каждой из которых было зафиксировано несколько десятков кадров прежде, чем какое-либо из КП смещалось на край электрода.

На рис. 1, *a* в качестве примера приведены результаты, полученные для свободногорящей дуги ($B_t = 0$). Как видно, распределение количества КП при фиксированном токе хорошо аппроксимируется нормальным распределением (линии) для обоих исследуемых материалов:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \frac{-(n - n_c)^2}{2\sigma^2}.$$

Здесь n — количество пятен, $p(n)$ — доля наблюдений с n пятнами, n_c, σ — параметры распределения (положение центра распределения и корень квадратный из дисперсии соответственно). Значения n_c и σ для каждого из режимов были получены по методу наименьших квадратов. Параметры распределений разных материалов различаются, но это различие невелико. Не исключено, что различие связано с ограниченным размером выборки. Используя распределения количества КП n , можно получить распределения тока, пропускаемого КП: $I_s = I/n$. Они приведены на рис. 1, *b*. Из этих данных можно найти среднее по распределению значение I_s . Полученные при различных значениях B_t величины I_s для исследованных материалов приведены на рис. 2. Как видно, для обоих материалов они близки.

На втором этапе работы для определения скорости движения КП в тангенциальном магнитном поле B_t были выполнены измерения при токах 18, 30, 60 и 90 А. Результаты приведены на рис. 3. Видно, что в пределах среднеквадратичного разброса результаты для обоих материалов совпадают. Необходимо отметить, что при каждом токе измерения начинались с тех значений B_t , при которых на большинстве кадров наблюдалось только одно КП, т.е. измерения при некотором токе I_a начинались при $B_t \geq B_t^*$. Значение B_t^* определялось исходя из рис. 2 с учетом условия $I_s(B_t^*) = I_a$. Дело в том, что при меньших значениях магнитного поля КП может разделиться. В таком случае ток, протекающий через одно из КП, своим магнитным полем будет влиять на движение второго КП. В какой пропорции разделится ток между КП, точно установить невозможно. Поэтому остается неизвестным, какова величина результирующего магнитного поля (созданного катушками и соседним КП), определяющего движение другого КП.

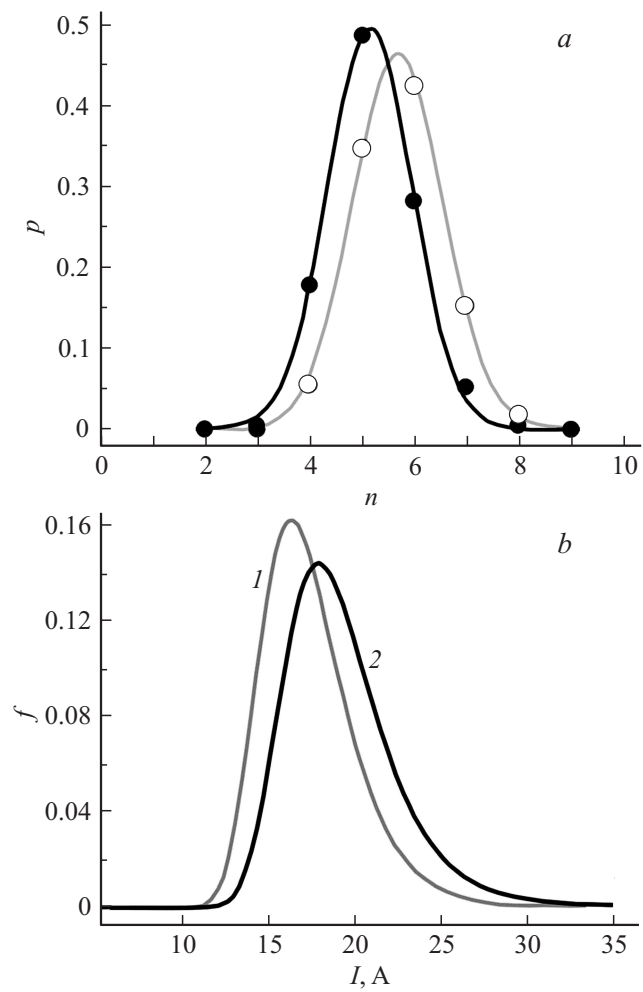


Рис. 1. Свободногорящая дуга ($B_t = 0$) с током $I_a = 96$ А. *a* — распределение количества КП: светлые кружки — образец CuCr50/50 (1), темные — CuCr50/50 (2); *b* — распределение тока, пропускаемого КП: кривая 1 — образец CuCr50/50 (1), кривая 2 — CuCr50/50 (2).

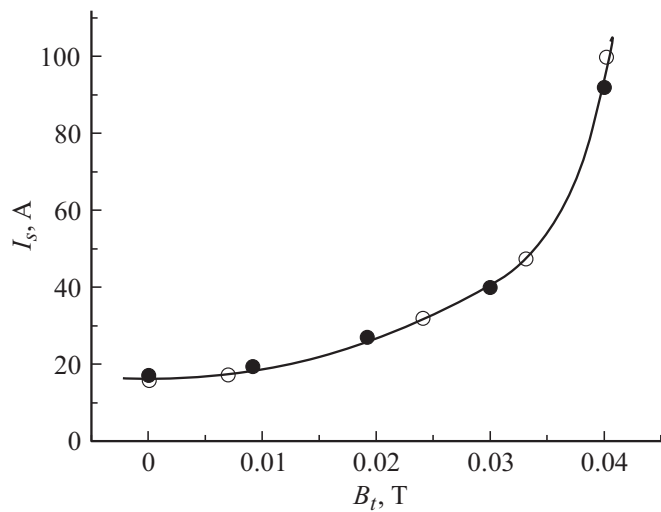


Рис. 2. Зависимость тока, пропускаемого КП, от тангенциального магнитного поля. Светлые кружки — образец CuCr50/50(1), темные — CuCr50/50(2).

Исследования показали, что такие характеристики КП, как средний ток, пропускаемый КП, I_s и его зависимость от индукции тангенциального магнитного поля B_t , а также скорость движения КП V_s и ее зависимость от B_t , для двух существенно различающихся по структуре образцов CuCr50/50 (наноконпозиция и SSS-конпозиция) практически совпадают, если перед измерениями был осуществлен сплошной переплав поверхности контактов с помощью дуговых воздействий умеренными (~ 1 кА) токами. Подчеркнем, что с практической точки зрения интересно именно такое состояние поверхности контактов вакуумных аппаратов, так как аппараты перед началом эксплуатации подвергаются кондиционированию, а в процессе работы аппарата дуговые воздействия поддерживают это состояние.

Полученный в настоящей работе результат, по нашему мнению, указывает на то, что в результате сплошного переплава рабочей поверхности электрода катодными пятнами структура приповерхностных слоев меняется. Эти изменения происходят в слое, толщина которого составляет величину порядка глубины кратера КП ($\sim 10 \mu\text{m}$) [7].

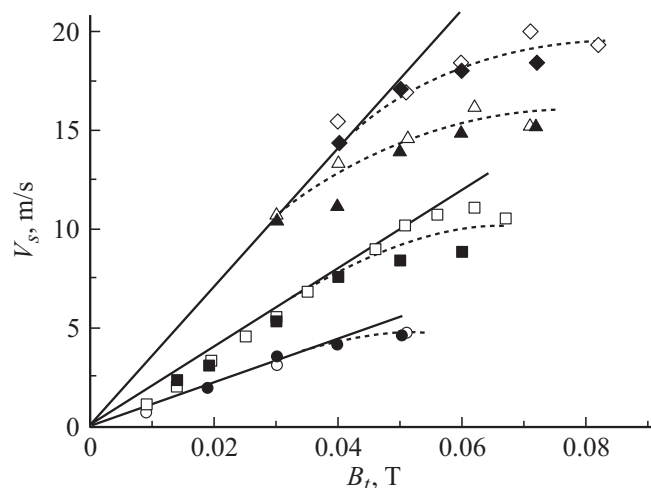


Рис. 3. Зависимость скорости КП в тангенциальном магнитном поле от его индукции при различных токах. Светлые символы — образец CuCr50/50(1), темные — CuCr50/50(2). Ток дуги $I_a = 18$ (кружки), 30 (квадраты), 60 (треугольники), 90 А (ромбы).

Свойства поверхности, сплошь покрытой кратерами КП, в которых достигалась температура, превосходящая температуру плавления S_t , определяются в процессе застывания расплава и несильно зависят от структуры исходной поверхности.

В последние годы выполнены исследования, подтверждающие это предположение. Например, в [8] исследовано изменение приповерхностного слоя на контактах из композиции SSS CuCr при воздействии вакуумной дугой и при электронно-лучевой наплавке. Показано, что плавление и кристаллизация контакта под воздействием КП вакуумной дуги в результате электронно-лучевой наплавки аналогичны в физическом плане. В обоих случаях происходит плавление хромовой фазы, растворение хрома в медной матрице и выделение мелкодисперсной фазы хрома при остывании и кристаллизации сильно пересыщенного раствора. По мнению авторов [8], под воздействием вакуумной дуги происходит самоорганизация структуры медь-хромового композита и

результат этого процесса сходен с самоорганизацией структуры контактного материала под действием электронного луча.

Список литературы

- [1] *Heitzinger F., Kippenberg H.* et al. // Proc. XV ISDEIV. Darmstadt, Germany. 1992. P. 273–278.
- [2] *Gentsch D.* // Proc. XXII ISDEIV, Matsue, Japan, 2006. V. 2. P. 437–442.
- [3] *Wang Y.P., Ding B.J.* // IEEE Trans. CPT. // 1999. V. 22. P. 467–472.
- [4] *Рогачев А.С., Кусков К.В., Московских Д.О.* и др. // ДАН. 2016. Т. 468. № 5. С. 508–511.
- [5] *Wang Y., Zhang C., Zhang H.* et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 2649–2654.
- [6] *Забелло К.К., Логачёв А.А., Чалый А.М., Школьник С.М.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 6. С. 58–66.
- [7] *Гашков М.А., Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Уйманов И.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 16. С. 48–55.
- [8] *Дураков В.Г., Гнюсов С.Ф., Дампилов Б.В., Зиновьева С.З.* // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2014. Т. 324. № 2. С. 96–100.