

УДК 621.793.794.357.7

САМООРГАНИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ CuCr КОНТАКТНОГО МАТЕРИАЛА ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Дураков Василий Григорьевич,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: electron@ispms.tsc.ru

Гнюсов Сергей Федорович,

д-р техн. наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» Института неразрушающего контроля ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: gnusov@rambler.ru

Дампилон Баир Вячеславович,

канд. техн. наук, науч. сотр. Института физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: dampilon@ispms.tsc.ru

Дехонова Светлана Зиновьевна,

рук. отдела Института оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: dana0863@mail.ru

Электронно-лучевую наплавку в вакууме проводили по спирали Архимеда на медные заготовки диаметром 80 мм и толщиной 10 мм. Для электронно-лучевой наплавки использовали смесь порошков меди и хрома с содержанием хрома от 20 до 50 вес. %. Дисперсность порошков меди и хрома находилась в диапазоне от 90 до 125 мкм. Проведен сравнительный анализ микроструктур, образующихся при дуговом оплавлении контактного материала и в процессе электронно-лучевой наплавки контактного сплава вакуумных дугогасительных камер. Анализ микроструктур проводили с помощью растрового электронного микроскопа Leo Evo 50, снабженного микроанализатором, в отраженных и обратно рассеянных электронах. Выявлены преимущественные участки горения катодных пятен на поверхности спеченного контактного материала. Показано, что в процессе оплавления контактного материала вакуумной дугой происходит преимущественное испарение медной составляющей и обогащение поверхностного слоя хромовой фазой. Зона оплавления имеет неравномерную глубину на поверхности контакта. Переплавленные участки контактного материала чередуются с участками, имеющими исходную структуру. В переплавленных зонах формируется бимодальная структура, состоящая из первичных и вторичных выделений хрома, микронного и субмикронного размеров, соответственно. Наплавленные CuCr покрытия имеют бимодальную структуру аналогичную структуре поверхностного слоя контактов вакуумных выключателей, оплавленных в режиме токов короткого замыкания. Таким образом, при электронно-лучевой наплавке происходит самоорганизация структуры контактного материала аналогично структуре поверхностного слоя контактов вакуумных выключателей, образующейся в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова:

CuCr покрытие, электронно-лучевая наплавка, микроструктура, контактный сплав, бимодальная структура.

Введение

Меднохромовые сплавы являются общепризнанным контактным материалом, который используется в вакуумных выключателях, благодаря отличному сочетанию высокой механической прочности с высокой проводимостью, как тепловой, так и электрической. В промышленности используются два принципиально отличных по состоянию хромовой фазы способа изготовления контактного материала. Способ порошковой металлургии сохраняет хромовую составляющую в исходном состоянии, а методы дугового плавления или индукционного литья позволяют переплавать как медную, так и хромовую составляющую.

Медно-хромовые контакты, изготовленные методом дуговой плавки, позволяют достичь более высоких технических характеристик вакуумных выключателей, чем контакты, изготовленные ме-

тодами порошковой металлургии [1, 2]. Тем не менее, методы изготовления контактов путем плавления не получили широкого распространения в силу сложности технологического процесса, а методы дугового переплава – в силу патентной защиты, ограничивающей их применение. Поэтому большая часть рынка вакуумных выключателей использует спеченные контакты, а для повышения их эксплуатационных характеристик применяют разные способы, создающие литую структуру поверхностного слоя меднохромовых контактов.

Оплавление поверхностного слоя приводит к возрастанию электрической прочности вакуумного промежутка [3, 4]. Одним из способов создания литой структуры поверхностного слоя контактного материала является метод плакирования спеченной заготовки путем одновременной прокатки в вакууме при температуре 900 °С спеченного кон-

тактного материала с фольгой того же сплава имеющего литую структуру [5]. В других методах для оплавления поверхностного слоя используют лазерное излучение или импульсный широкоапертурный электронный пучок [6].

Кроме того, для повышения эксплуатационных характеристик широко используется предварительная тренировка электродов вакуумных дугогасительных камер. Однако использование оплавления поверхности контактов особенно в режиме токов короткого замыкания, составляющих более 10 кА, изменяет геометрию контактов и не позволяет добиться равномерного оплавления контактного материала. К тому же нормы технической эксплуатации вакуумных выключателей допускают в лучшем случае не более пяти десятков таких отключений. Это накладывает ограничение на использование метода тренировки для создания литой структуры контактного сплава. При дальнейшей работе такого вакуумного выключателя в режиме номинальных токов плавления поверхности контактного слоя не происходит.

Учитывая то обстоятельство, что при оплавлении контактного материала дугой или каким-либо другим способом улучшаются его электрические свойства и вакуумные выключатели повышают свои технические характеристики, можно сказать, что под действием электрической дуги происходит самоорганизация микроструктуры контактного материала для наиболее благоприятной работы в условиях вакуумной дуги.

Наиболее близкие условия плавления контактного материала, происходящие при отключении токов в режиме короткого замыкания, реализуются в методе вакуумной электронно-лучевой наплавки (ЭЛН). Метод ЭЛН формирует покрытие, близкое к условиям работы вакуумного выключателя в режиме токов короткого замыкания. В результате вакуумного переплава хромовой и медной фаз происходит рафинирование контактного материала, что положительным образом влияет на отключающую способность вакуумных выключателей. В отличие от импульсного воздействия катодного пятна плавление электронным лучом происходит непрерывно в течение всего цикла электронно-лучевой наплавки.

Целью работы является изучение особенностей формирования самоорганизованных микроструктур, образующихся при электронно-лучевой наплавке образцов меднохромового сплава и дуговом оплавлении поверхности CuCr контактов в условиях работы вакуумных дугогасительных камер.

Материал, оборудование и методы исследования

Для электронно-лучевой наплавки использовали смесь порошков меди и хрома с содержанием хрома от 20 до 50 вес. %. Дисперсность порошков меди и хрома находилась в диапазоне от 90 до 125 мкм. Электронно-лучевую наплавку проводили по спирали Архимеда на медные заготовки диаметром 80 мм и толщиной 10 мм по методике, описанной в [7].

Для сравнения проводили оплавление электронным лучом спеченного CuCr60 контактного сплава. Оплавление проводили лучом, сфокусированным в точку, и лучом, развернутым в линию длиной 5 мм поперек движения оплавляемой детали при скорости ее перемещения 5 мм/с, токе луча 150 мА и напряжении 27 кВ. Толщина контактного слоя составляла 5 мм.

Дуговое воздействие проводили на спеченных контактах производства Тулачермет после испытаний на отключающую способность вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) при токе 40 кА. Серийная ВДК была установлена в вакуумный выключатель ВВТЭ-М-10-31,5/1600 с электромагнитным приводом. Выключатель обеспечивает при отключении следующие параметры ВДК: раствор контактов 8мм; средняя скорость подвижного контакта при отключении 1,6 м/с [8].

Анализ образующихся микроструктур в меднохромовом сплаве после ЭЛН и дугового воздействия проводили с помощью растрового электронного микроскопа Leo Evo 50, снабженного микроанализатором в отраженных и обратно рассеянных электронах.

Результаты и обсуждение

Микроструктура поверхностного слоя после дугового оплавления. Поверхности контактов вакуумных выключателей подвергаются воздействию дуги, сила тока которой соответствует режиму работы вакуумного выключателя. В режиме номинальных токов, как правило, не превышающих одного килоампера, оплавления поверхности не происходит и, анализируя поверхность контактного материала, можно определить наиболее предпочитаемые участки горения катодного пятна. На рис. 1, а показана поверхность спеченного контактного материала со следами эрозии, сформированными катодными пятнами. Наибольшее количество следов катодных пятен (белые полосы) наблюдается около границ темных хромовых частиц. Межфазные границы хромовых частиц и медной матрицы являются наиболее предпочтительными для существования катодных пятен.

Анализ межфазных границ в спеченном контактном материале позволяет выявить мелкодисперсные выделения хрома в этих областях. В процессе спекания меднохромового композита около одного процента хрома растворяется в медной матрице и при охлаждении спеченного контакта этот растворенный хром выпадает в виде мелкодисперсных выделений вблизи хромовых частиц. Таким образом, в спеченном материале образуются участки микроструктуры с мелкодисперсными выделениями хрома, которые и являются благоприятными участками для существования катодных пятен.

При воздействии сильноточной вакуумной дуги происходит оплавление поверхности меднохромового контакта. Геометрические характеристики зоны оплавления зависят от режимов токового воздействия. Оплавление происходит в процессе

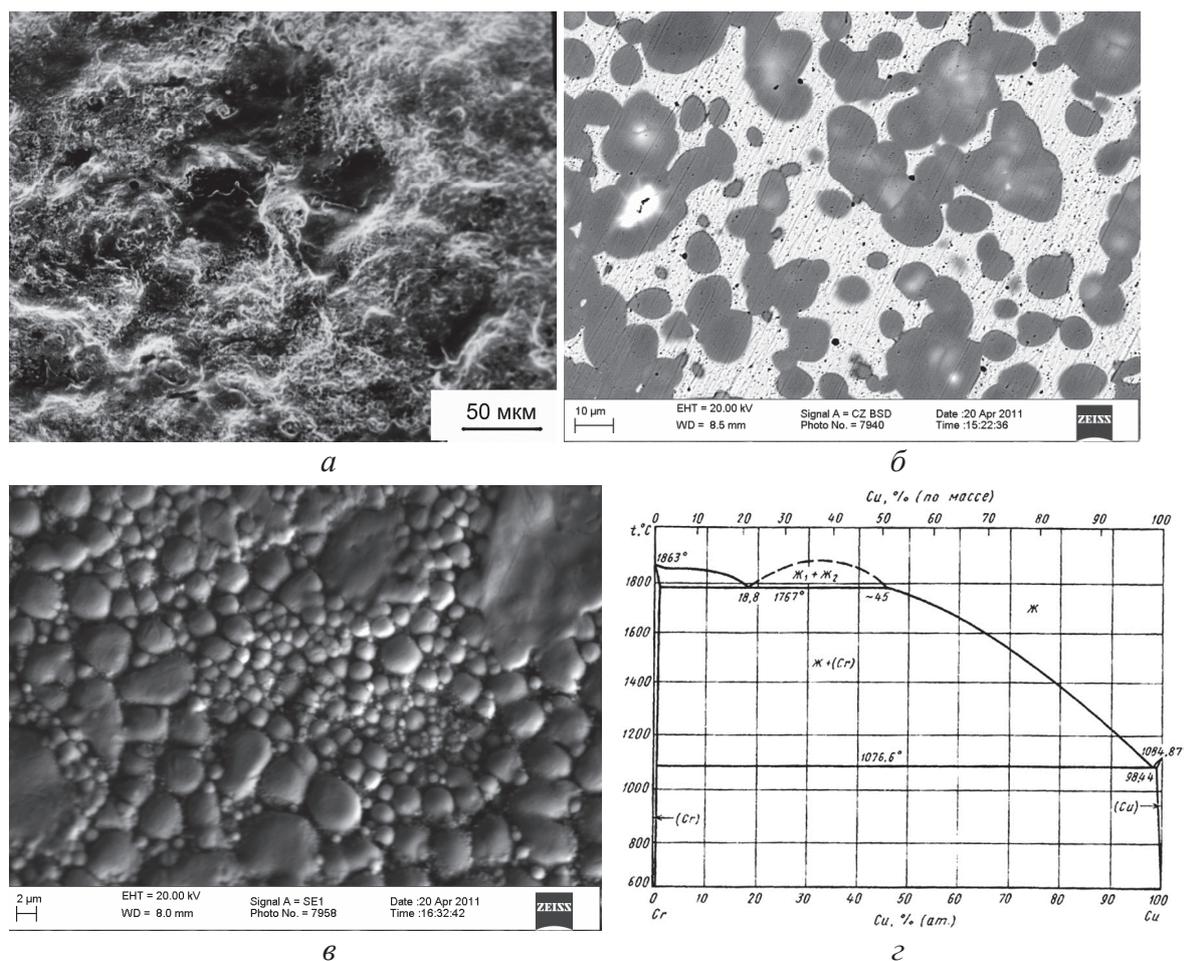


Рис. 1. Микроструктура спеченного CuCr_{25} сплава после оплавления электрической дугой; а, в) в отраженных электронах с поверхности электрода, б) в обратно рассеянных электронах с поперечного шлифа, г) фазовая диаграмма CuCr

разъединения контактов при токах короткого замыкания, составляющих десятки килоампер, в течение 10...30 мс, и соответствующих нескольким полупериодам тока частотой 50 Гц. Причем оплавление поверхности происходит неравномерно. На поперечном шлифе (рис. 1, б) наблюдаются переплавленные участки глубиной до 1 мм, а на поверхности обнаруживаются как исходные, так и переплавленные частицы хрома (рис. 1, а, в).

Медь имеет более высокое давление насыщенных паров по сравнению с хромом, и поэтому при плавлении сильноточной электрической дугой меднохромового сплава в вакууме происходит селективное испарение медной фазы, а переплавленный слой обогащается хромовой фазой с присутствием ему эффектами жидкофазного разделения и кумулятивной сегрегации хрома. Кроме переплавленных зерен хрома в медной матрице наблюдаются вторичные выделения хрома, имеющие размеры менее 0,5 мкм, которые образуются при распаде пересыщенного медного раствора. При содержании хрома выше 50 % в соответствии с фазовой диаграммой (рис. 1, г) может происходить кумулятивная сегрегация выделений хрома. Поверхность контакта, обработанного электрической дугой,

практически полностью состоит из зерен хрома сферической формы, а медная фаза находится на некоторой глубине под слоем хромовых выделений. Таким образом, под воздействием сильноточной вакуумной электрической дуги происходит самоорганизация структуры меднохромового композита с образованием мелкодисперсных выделений хрома (рис. 1, б, в).

Микроструктура после воздействия электронного луча. Тип структуры наплавленного CuCr контактного сплава зависит от содержания фазы хрома в медной матрице псевдосплава и температурных условий ЭЛН. При содержании хрома около 20 вес. % в структуре наблюдаются дендритообразные хромовые выделения (рис. 2, а). С увеличением содержания хрома примерно до 50 вес. % в структуре начинают преобладать сферические хромовые выделения (рис. 2, б). В области 50...70 вес. % хрома, что является предельным содержанием хрома в контактах вакуумных выключателей, наблюдаются эффекты жидкофазного разделения и кумулятивной сегрегации хрома в соответствии с фазовой диаграммой системы медь-хром (рис. 2, в). Исключить жидкофазное разделение хрома, приводящее к кумулятивной сегрегации, можно, если обеспечить быстрое ох-

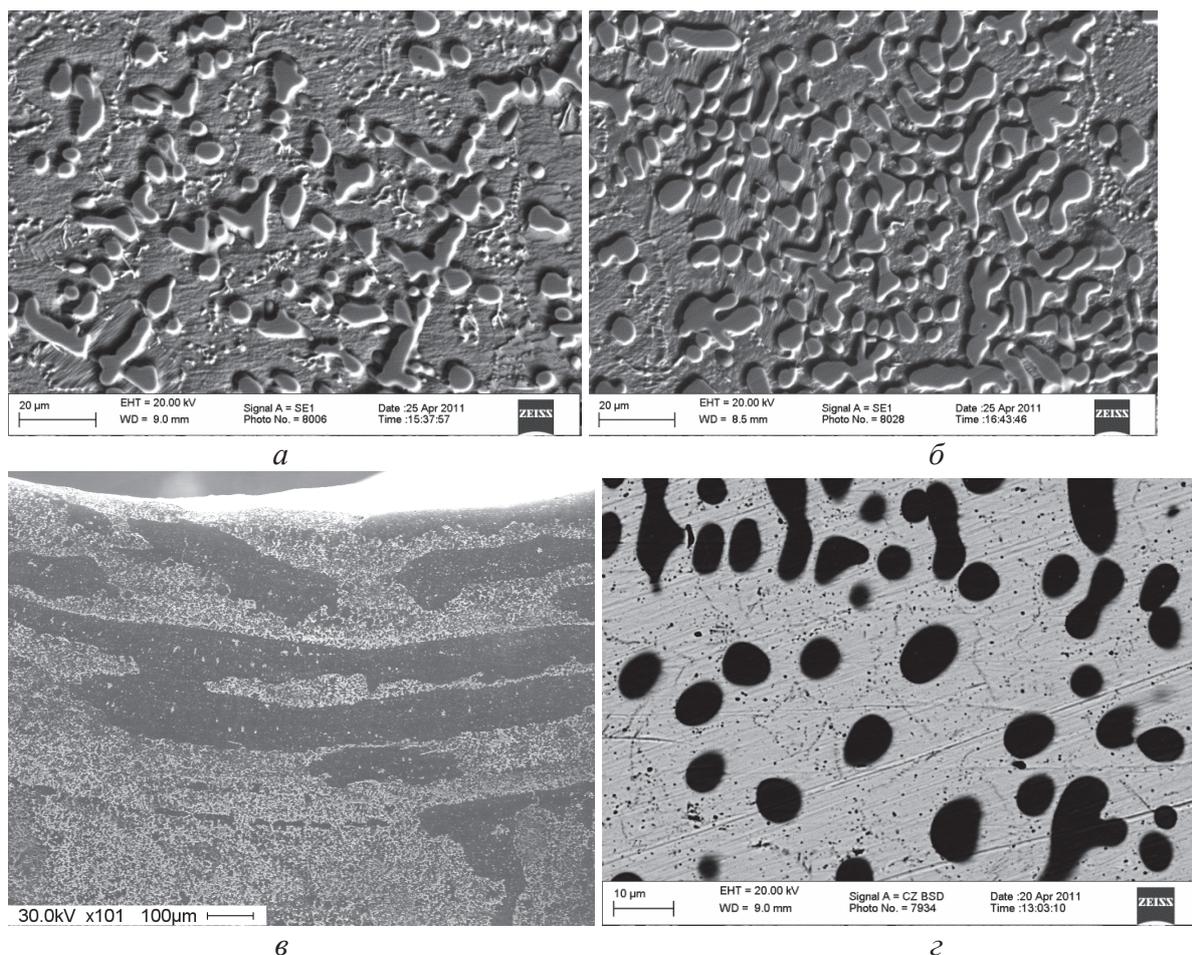


Рис. 2. Микроструктура наплавленного электронным лучом CuCr сплава: а) CuCr20, б) CuCr50, в) CuCr70, г) выделения мелко-дисперсных вторичных частиц хрома в наплавленном сплаве CuCr20; а, б, в) в отраженных электронах, г) в обратно рассеянных электронах

лаждение из области значительного перегрева ванны расплава, находящейся выше области несмешиваемости на фазовой диаграмме. В ряде случаев это удается сделать при электронно-лучевой наплавке меднохромового композита в условиях интенсивного теплоотвода от медной подложки.

Электронно-лучевая наплавка смеси порошков меди и хрома на медную подложку технически осуществима в диапазоне температур подложки от 500 до 900 °С. Данный диапазон температур обусловлен тем, что при меньшей температуре подложки для создания ванны расплава требуется плотность мощности электронного луча не менее 10⁶ Вт/см² и поток пара, образующийся в результате действия луча такой мощности, препятствует наплавочному материалу достигать зоны действия электронного луча. При температуре выше 900 °С сложно обеспечить сохранность медной подложки.

Микроструктура наплавленного электронным лучом CuCr контактного сплава исследовалась авторами неоднократно. В общем случае микроструктура наплавленного покрытия представляет собой двухфазный сплав и состоит из твердого ра-

створа на основе меди и частиц хрома, которые представлены первичными выделениями хрома, являющимися твердым раствором на основе хрома, и вторичными выделениями хрома, выпавшими из пересыщенного твердого раствора на основе меди (рис. 2). Средний размер первичных выделений хрома от 3 до 5 мкм, а вторичные выделения не превышают 0,5 мкм (рис. 2, а, б, г). Температура подложки влияет на величину среднего размера выделений хрома. Меньшая температура соответствует меньшему размеру хромовых выделений. Объемная доля хрома определяет морфологию выделений хрома. При минимально используемом содержании хрома 20 % кристаллизация расплава происходит с образованием протяженных дендритов хрома (рис. 2, а). Увеличение содержания хрома до 50 % приводит к большей коагуляции хромовых выделений за счет роста дендритов в «стенных» условиях (рис. 2, б). В области содержания хрома от 50 до 70 % начинается жидкофазное разделение, приводящее к кумулятивной сегрегации хрома с образованием крупнодисперсных выделений фазы на основе хрома (рис. 2, в).

Структура поверхности спеченного контактного материала изменяется под действием катодных пятен сильноточной дуги короткого замыкания. Это можно считать самоорганизацией структуры при внешнем воздействии на контактный материал. Образующаяся новая литая структура более благоприятна для условий горения дуги переменного тока, особенно в области минимальных значений тока в точке его перехода через ноль.

Процессы плавления и кристаллизации контактного материала под воздействием катодного пятна вакуумной дуги или в результате действия электронного луча аналогичны в физическом плане. В обоих случаях происходит плавление хромовой фазы, растворение хрома в медной матрице и выделение мелкодисперсной фазы хрома при кристаллизации сильно пересыщенного раствора (рис. 1, б, в; рис. 2, а, з). Кумулятивная сегрегация хрома имеет место в обоих случаях и происходит при содержании хрома, превышающем 50 вес. %.

Мелкодисперсные выделения хрома в медной матрице наиболее предпочтительны для структуры контактного сплава в плане улучшения условий горения вакуумной дуги. Это является необходимым моментом для уменьшения тока среза, являющегося важной характеристикой вакуумного выключателя.

Отличие наплавленного покрытия от слоя, переплавленного катодным пятном, прежде всего, заключается в их разной толщине. Наплавленное покрытие имеет литую структуру с мелкодисперсными выделениями хрома по всей своей толщине. Этот момент оказывается благоприятным для существования катодного пятна в любом месте на поверхности электрода. При работе вакуумного выключателя в режиме номинальных токов происходит эрозия контактного сплава, но структура наплавленного CuCr-сплава на поверхности электрода при этом не изменяется, в отличие от контактов, поверхность которых модифицирована с помощью сильноточной дуги.

Выводы

В работе показано, что при электронно-лучевом воздействии происходит самоорганизация структуры контактного материала системы CuCr аналогично структуре поверхностного слоя контактов вакуумных выключателей, образующейся в процессе их эксплуатации в режиме токов короткого замыкания.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ ТПУ № 862.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muller R. Arc-melted CuCr alloys as contact materials for vacuum interrupters // Siemens Forsch.-u. Entwickl.-Ber. – 1988. – V. 17. – № 3. – P. 105–111.
2. Baihe Miao Yan Zhang et al. Two New Cu-Cr Alloy Contact Materials // High Voltage Apparatus. – 2000. – V. 36. – № 3. – P. 60–62.
3. А.С. 915114 СССР, МКИ Н 01 Н 33/68. Способ подготовки контактов и электродов вакуумных дугогасительных устройств / Г.С. Белкин, С.Н. Воскресенский, В.Н. Киселев и др. (СССР). – Оpubл. 23.03.82. Бюл. № 11 // Открытия. Изобретения. – 1982. – № 11. – С. 204.
4. Effect of the microstructure of electrode materials on arc cathode spot dynamics / Yaping Wang, Chengyu Zhang, Hui Zhang, Bingjun Ding, Ke Lu // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – V. 36. – P. 2649–2654.
5. Коржов В.П. Спеченные порошковые заготовки электроконтактного сплава Cu–30 % Cr, плакированные литым сплавом того же состава // Физика и техника высоких давлений. – 2009. – Т. 19. – № 1. – С. 97–101.
6. Способ обработки электродов изолирующих промежутков высоковольтных электровакуумных приборов: пат. Рос. Федерация № 2384911; заявл. 15.12.2008; опубл. 20.03.10, Бюл. № 8.
7. Влияние технологических параметров электронно-лучевой наплавки на структуру медно-хромовых композитов / В.Г. Дураков, С.Ф. Гнюсов, Б.В. Дампилов, С.З. Дехонова // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 80–86.
8. Microstructure and properties of vacuum electron beam facing CuCr25 contact material / V.G. Durakov, S.F. Gnyusov, B.V. Dampilon, S.Z. Dekhonova, B.I. Ubiennykh // Proceedings of the XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Tomsk, Russia, Institute of high current electronics SB RAS, 2012, September 2–7. – V. 2. – P. 525–528.

Поступила 03.09.2013 г.

SELF-ORGANIZATION OF CONTACT MATERIAL CuCr STRUCTURE IN VACUUM SWITCH AT ELECTRON BEAM ACTION

Vasily G. Durakov,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS,
Russia, 634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4. E-mail: electron@ispms.tsc.ru

Sergey F. Gnyusov,

Dr. Sc., Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634021, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: gnyusov@rambler.ru

Bair V. Dampilon,

Cand. Sc., Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Russia,
634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4. E-mail: dampilon@ispms.tsc.ru

Svetlana Z. Dekhonova,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS, Russia, 634021,
Tomsk, Academician Zuev square, 1. E-mail: dana0863@mail.ru

Electron beam cladding in vacuum was carried out according to the Archimedes spiral on copper billet of 80 mm diameter and 10 mm thickness. The authors have used a mixture of copper and chromium powders with chromium content from 20 to 50 wt. % for electron-beam cladding. Copper and chromium powder particle size was in the range from 90 to 125 microns. The comparison study of microstructures generated on the contact materials by vacuum arc surface melting and the microstructure of contact materials after electron beam cladding was carried out. The analysis of the microstructures was carried out using a scanning electron microscope Leo Evo 50 equipped with microanalysis by secondary and backscattered electrons. The authors identified the areas of preferential combustion of cathode spots on the surface of the sintered contact material. It is shown that copper evaporates preferentially during the surface melting of the contact material by vacuum arc and the surface layer is enriched in chromium. Surface melting zone has a non-uniform depth on the contact material. Surface melting areas of contact material alternate with areas having the original structure. In the surface melting areas a bimodal structure is formed. It consists of primary and secondary chromium precipitates of either micron or submicron size, respectively. CuCr clad coatings demonstrate a bimodal structure similar to the structure of the surface layer contacts of vacuum switches fused by short circuit currents. Thus, it is shown that the electron-beam cladding is self-organizing structure of the contact material similar to the surface layer structure of vacuum circuit breakers contacts formed at their operation.

Key words:

CuCr coating, electron beam cladding, microstructure, contact alloy, bimodal structure.

REFERENCES

- Muller R. Arc-melted CuCr alloys as contact materials for vacuum interrupters. *Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber.*, 1988, vol. 17, no. 3, pp. 105–111.
- Baihe Miao Yan Zhang. Two New Cu-Cr Alloy Contact Materials. *High Voltage Apparatus*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 60–62.
- Belkin G.S., Voskresenskiy S.N., Kiselev V.N. A.S. 915114 SSSR, MKI N 01 N 33/68. *Sposob podgotovki kontaktov i elektrodov vakuurnykh dugogasitelnykh ustroystv* [Method for preparing contacts and electrodes of vacuum arc quenching device]. *Discoveries. Inventions*, 1982, no. 11, p. 204.
- Korzhev V.P. Spechennye poroshkovye zagotovki elektrokontaktного сплава Cu–30 % Cr, plakirovannye litym splavom togo zhe sostava [Sintered powder billets of electrocontact Cu–30 % Cr alloy clad by cast alloy of the same composition]. *High pressure physics and technics*, 2009, vol. 19, no. 1, pp. 97–101.
- Yaping Wang, Chengyu Zhang, Hui Zhang, Bingjun Ding, Ke Lu. Effect of the microstructure of electrode materials on arc cathode spot dynamics. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, vol. 36, pp. 2649–2654.
- Batrakov A.V., Ozur G.E., Proskurovskiy D.I., Rotshteyn V.P. *Sposob obrabotki elektrodov izoliruyushchikh promezhutkov vysokovolnykh elektrovakuurnykh priborov* [Method for treatment of electrodes in insulating gaps of high-voltage electric vacuum instruments]. Patent RF, no. 2384911, 2010.
- Durakov V.G., Gnyusov S.F., Dampilon B.V., Dekhonova S.Z. Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov elektronno-luchevoy naplavki na strukturu medno-khromovykh kompozitov [Influence of technological parameters of electron beam cladding on the structure of copper-chromium composites]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 2, pp. 80–86.
- Durakov V.G., Gnyusov S.F., Dampilon B.V., Dekhonova S.Z., Ubiennykh B.I. Microstructure and properties of vacuum electron beam facing CuCr25 contact material. *Proceedings of the XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Tomsk, Russia, Institute of high current electronics SB RAS, 2012, September 2–7. Vol. 2, pp. 525–528.