

УДК 621.793.794.357.7

ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДНО-ХРОМОВОГО КОНТАКТНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ

В.Г. Дураков¹, С.Ф. Гнусов^{1,2}, С.З. Дехонова²¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск²Томский политехнический университет

E-mail: dana0863@mail.ru

Изучено влияние легирования никелем на микроструктуру Cu–Cr контактного материала, полученного в условиях вакуумной электронно-лучевой наплавки и дополнительного переплава. Введение никеля в исходную Cu–Cr-шихту способствует формированию гомогенного медно-хромового расплава, уменьшает сегрегацию и ограничивает рост дендритов хрома в процессе кристаллизации.

Ключевые слова:

Псевдосплав Cu–Cr, никель, электронно-лучевая наплавка, температурный режим, структура.

Key words:

Pseudoalloy Cu–Cr, nickel, electron beam facing, temperature mode, structure.

Введение

Медно-хромовые контактные материалы широко используются в большинстве промышленных силовых вакуумных выключателей, поскольку обладают хорошими электрическими свойствами, высокой отключающей способностью, стойкостью к дуговой эрозии и свариваемости. Наилучшими характеристиками по отключающей способности обладают композиты, содержащие ~25 % хрома [1, 2]. Однако многочисленные исследования структурных характеристик медно-хромового композита показали, что уменьшение размера частиц хрома [3–5] вплоть до наноразмеров [6] может значительно улучшить свойства Cu–Cr-материала. В.Ф. Ридер с соавторами [3] обнаружил, что максимальный прерывающий ток (ток среза) уменьшается и пробивная напряженность поля увеличивается, когда размер частиц хрома в контактном материале уменьшается от 150 до 36 мкм. Медно-хромовые композиты, производимые посредством дугового переплава, с размером зерен 15...30 мкм, имеют лучшие технические характеристики, чем традиционные спеченные Cu–Cr-материалы с размером зерен 74...150 мкм [5]. Более того, дополнительный вакуумный переплав спеченных медно-хромовых композитов способствует не только измельчению хромовых выделений, но и формированию полукогерентных межфазных границ, что обеспечивает более высокую допустимую нагрузку по току, электрическую прочность и меньшую шероховатость поверхности контактов после отключения, чем у спеченного материала того же состава [4]. Следовательно, уменьшение среднего размера и сферическая морфология частиц хрома, равномерное их распределение в медной матрице способствуют улучшению технических характеристик вакуумных выключателей.

Метод электронно-лучевой наплавки позволяет сформировать на медной основе (подложке) медно-хромовый контактный материал с мультимо-

дальной структурой [7, 8]: частицы исходного хрома, хром в виде первичных частиц, образовавшихся при кристаллизации, и хром, выделившийся по границам и внутри зерен матрицы (вторичные частицы хрома) в результате старения твердого раствора на основе меди. Средний размер первичных частиц хрома растет от 1,8 до 5,1 мкм, а вторичных частиц от 0,25 до ~1 мкм с увеличением температуры основного металла от 600 до 880 °С. Минимальное количество исходных частиц хрома в композиционном Cu–Cr-покрытии соответствует температуре основного металла в начале/конце процесса 500/600 °С. Сформировать более однородную структуру без включений исходных частиц хрома со средним размером первичных частиц хрома ~0,8 мкм возможно только при повторном оплавлении покрытия электронным лучом при условии, что температура основного металла не превышает 360 °С.

Наплавка же при температуре 600 °С сопряжена с определенными трудностями, которые заключаются в необходимости поддержания повышенного значения плотности мощности электронного луча и обеспечения теплоотвода от медной подложки. В технологическом плане наплавку проще вести при температуре подложки в диапазоне 800...900 °С, когда устанавливается баланс между подводимой энергией и энергией, рассеиваемой подложкой за счет излучения и теплопроводности в оснастку технологического оборудования. Увеличение температуры подложки способствует повышению производительности процесса наплавки, но приводит к росту среднего размера хромовых дендритов и коагуляции хромовых выделений.

Известно положительное использование легирующих элементов при индукционном плавлении Cu–Cr контактного материала [9]. В частности, легирование никелем в количестве до 3 вес. % оказывает положительное влияние на морфологию и дисперсность хромовых выделений при индук-

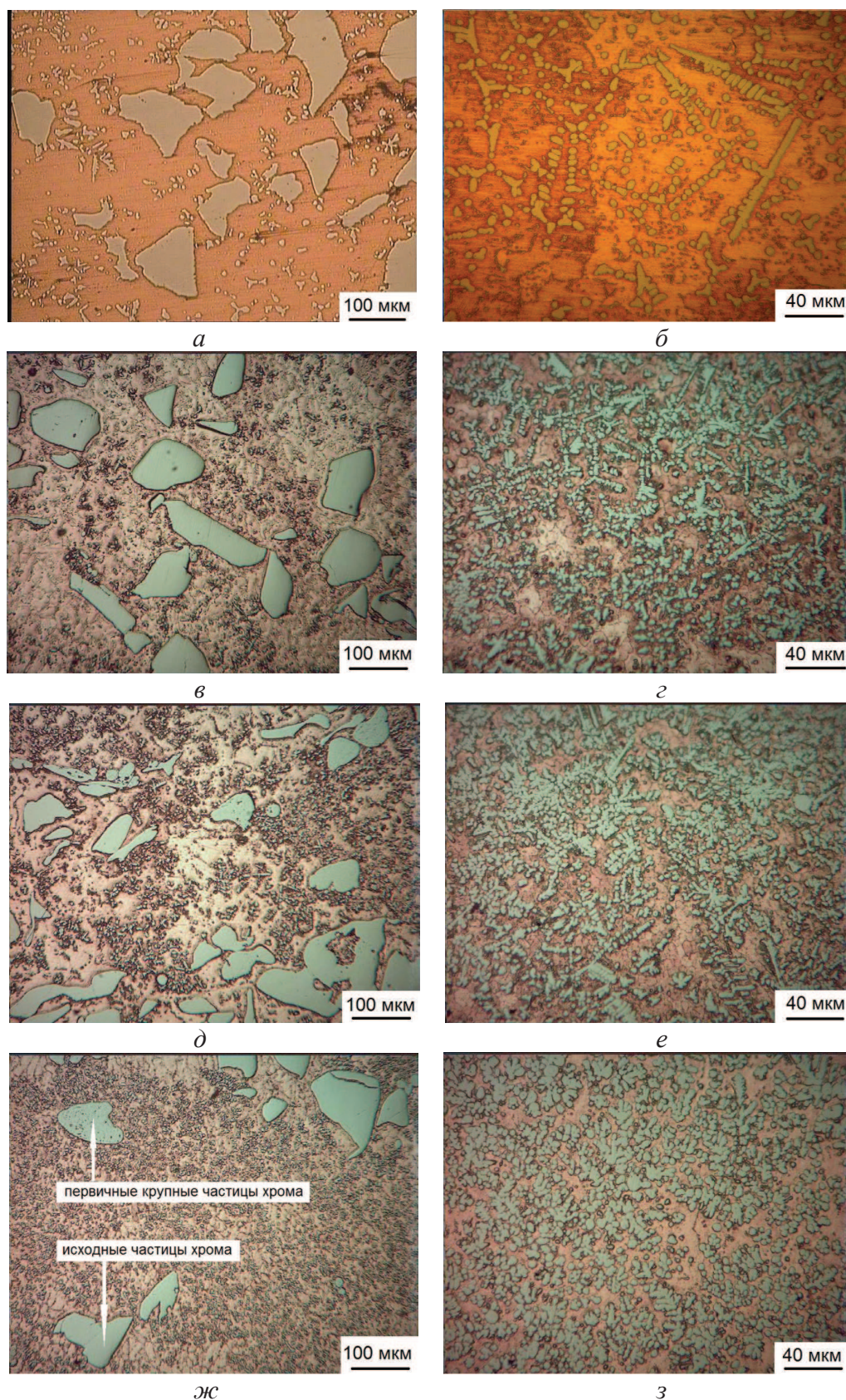


Рис. 1. Микроструктура Si-Cr-покрытия (ХД75) после наплавки (а, в, д, ж) и дополнительного переплава (б, г, е, з) с различным содержанием никеля: а, б - 0 %, в, г - 1 %, д, е - 2 %, ж, з - 4 %

ционном плавлении [10]. Процесс электронно-лучевой наплавки характеризуется малым временем существования жидкометаллической ванны, высокой скоростью охлаждения расплавленной зоны и формированием сильно пересыщенного твердого раствора. Вопросы о влиянии легирования никелем Cu–Cr-сплава в условиях быстрого охлаждения расплава при электронно-лучевой наплавке в литературе не изучены.

Целью работы является исследование влияния легирования никелем на микроструктуру Cu–Cr контактного материала, полученного в условиях электронно-лучевой наплавки.

Материал, оборудование и методы исследования

Для электронно-лучевой наплавки использовали смесь порошков меди (ПМС-Н) и хрома (ПЭРХ-1/160), соответствующую составу ХД75 (75 вес. % Cu). На этапе подготовки исходных смесей в них дополнительно вводился никель в количестве 0, 1, 2, 3 и 4 вес. %. Дисперсность порошков меди, хрома и никеля находилась в диапазоне от 90 до 125 мкм. После наплавки часть образцов дополнительно оплавливали электронным лучом. Наплавку проводили на образцы, изготовленные из бескислородной меди М06 (ГОСТ 10988-75), в виде дисков диаметром 60 мм и толщиной 10 мм по методике [11]. Температуру основного металла (подложки) контролировали с помощью термопары (WRe5-WRe20), вставленной в глухое отверстие, расположенное в центре диска. Диск вращался с угловой скоростью 3 мин⁻¹ при неподвижной термопаре. Температура образцов в процессе наплавки не превышала 700...900 °С. Дополнительное оплавление части образцов электронным лучом проводили при температуре подложки, не превышающей 600 °С. После окончания процесса наплавки и оплавления скорость охлаждения образцов до температуры ~200 °С составляла 20 °С/мин.

Микроструктуру наплавленных покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX51, снабженного анализатором изображений SIAMS 700. С помощью анализатора изображений оценивали объемные доли частиц хрома, их средние диаметры и средноквадратичное отклонение размеров. Микротвердость H_n упрочненного слоя по всей его толщине и подложки, непосредственно прилегающей к наплавке (1 мм), измеряли на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76) при нагрузке 0,981 Н с шагом между уколами 250 мкм.

Результаты и обсуждение

Как было показано в [11], доля исходных не расплавившихся частиц хрома определяется степенью перегрева медной ванны в зоне действия электронного луча и зависит от плотности его мощности и температуры подложки. При более высокой температуре подложки требуется меньшая плотность мощности электронного луча для поддержания требуемого размера ванны расплава. Это

положительным образом сказывается на производительности процесса наплавки за счет ослабления процесса сдувания наплавочной смеси потоком пара из ванны, но при этом уменьшается степень перегрева ванны, что ведет к увеличению в наплавленном слое доли не расплавившихся частиц хрома.

С помощью дополнительного легирования никелем предполагалось увеличить производительность процесса наплавки. Поэтому наплавка велась на верхнем пределе температуры (900 °С). Влияние никеля на микроструктуру медно-хромовых композитов, наплавленных электронным лучом, представлено на рис. 1, а, в, д, ж.

Во всех трех составах, содержащих никель (рис. 1, в, д, ж), наряду с не расплавившимися исходными частицами хрома и крупными первичными частицами (ж), выпавшими при кристаллизации и содержащими внутри себя отдельные мелкие выделения меди, наблюдаются мелкие выделения хрома, доля которых растет с увеличением содержания никеля. Это говорит о том, что никель положительно влияет на процесс плавления исходных хромовых частиц. Согласно двойным диаграммам состояния Cu–Ni и Cr–Ni, никель имеет неограниченную растворимость как в меди, так и в хrome. Следовательно, добавка никеля будет способствовать формированию более гомогенного Cu–Cr-расплава и уменьшать сегрегацию. Кроме того, присутствуя в медно-хромовом расплаве, никель ограничивает рост дендритов хрома при охлаждении (анизотропический рост кристаллов хрома).

При дополнительном переплаве покрытий электронным лучом независимо от содержания никеля полностью исчезают исходные частицы хрома (рис. 1, б, г, е, з). С увеличением содержания никеля изменяется морфология хромовых выделений от протяженных дендритообразных до округлых равноосных (рис. 1, г, е, з).

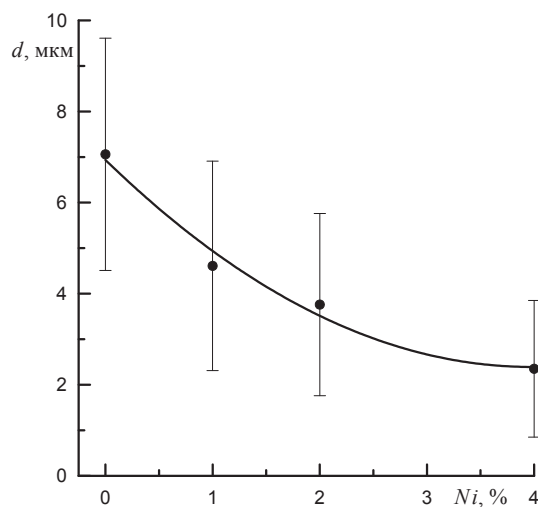


Рис. 2. Изменение среднего размера хромовых выделений от содержания никеля в Cu–Cr наплавочном материале

Кроме изменения морфологии хромовых выделений, влияние никеля также связано и с уменьшением среднего размера частиц хрома (рис. 2). При увеличении содержания никеля до 4 вес. % средний размер хромовых выделений уменьшается более чем в два раза. Наиболее интенсивно (~35 %) данное уменьшение отмечается уже при введении никеля в количестве 1 вес. % в исходный наплавочный материал. Одновременно с уменьшением размера хромовых частиц уменьшается и их дисперсия в распределении по размерам, что говорит о более однородной структуре.

Выводы

1. Изучено влияние легирования никелем на микроструктуру Cu–Cr контактного материала, полученного в условиях электронно-лучевой наплавки. Показано, что введение никеля в исход-

ную Cu–Cr-шихту способствует формированию более гомогенного медно-хромового расплава, уменьшает сегрегацию и ограничивает рост дендритов хрома при кристаллизации покрытий после вакуумной электронно-лучевой наплавки.

2. Доказано, что дополнительный переплав наплавленных Cu–Cr-покрытий, легированных никелем, способствует полному исчезновению как исходных, так и первичных крупных частиц хрома. С увеличением содержания никеля от 1 до 4 вес. % изменяется морфология хромовых выделений от протяженных дендритообразных до округлых равноосных, а их средний размер уменьшается более чем в два раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-00089-а и частично государственного задания Министерства образования и науки РФ на проведение научно-исследовательских работ № 8.3664.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Slade P.G. Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts // Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, IEEE Transactions. – 1994. – V. 17. – № 1. – P. 96–106.
2. Schellekens H. 50 Years of TMF Contacts Design Considerations // XXIII-rd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Bucharest, 2008. – 340 p.
3. Rieder W.F., Schussek M., Glatzle W., Kny E. The Influence of Composition and Cr Particle-Size of Cu/Cr Contacts on Chopping Current, Contact Resistance, and Breakdown Voltage in Vacuum Interrupters // Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology. – 1989. – V. 12. – P. 273–283.
4. Miao B., Zhang Y. Two New Cu–Cr Alloy Contact Materials // High Voltage Apparatus. – 2000. – V. 36. – № 3. – P. 60–62.
5. Muller R., Melted A. CuCr Alloy Contact Materials for Vacuum Interrupters // Siemens Forsch. UndEntwickl. – 1988. – V. 17. – № 3. – P. 105–111.
6. Yu L., Wang J., Geng Y., Kong G., Liu Z. High Current Vacuum Arc Phenomena of Nanocrystalline CuCr25 Contact Material / XXIVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Braunschweig, 2010. – P. 257–260.
7. Дехонова С.З., Дураков В.Г., Гнусов С.Ф. Формирование бимодальной структуры псевдосплава Cu–Cr методом электронно-лучевой наплавки // Сварочное производство. – 2003. – № 10. – С. 19–23.
8. Дураков В.Г., Гнусов С.Ф., Дампилон Б.В., Дехонова С.З. Влияние технологических параметров электронно-лучевой наплавки на структуру медно-хромовых композитов // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 2. – С. 80–86.
9. Zhang C., Wang Y., Yang Z., Guo Y., Bingjun D. Microstructure and properties of vacuum induction melted CuCr25 alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – V. 366. – P. 289–292.
10. Yu M., Wang Y., Sun Z. Effect of Ni addition on the microstructures of melt-spun CuCr ribbons // Materials Science-Poland. – 2008. – V. 26. – № 3. – P. 234–240.
11. Гнусов С.Ф., Дураков В.Г., Дехонова С.З., Белок С.И. Формирование бимодальной структуры контактного материала вакуумных выключателей // Перспективные материалы. – 2004. – № 2. – С. 65–70.

Поступила 03.09.2012 г.