

Пименова Н.В.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА CU-CR ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР

Введение

Вакуумная дугогасительная камера является основным рабочим элементом вакуумного выключателя. Она представляет собой устройство с электрическими контактами, помещенными в высокий вакуум, и предназначена для гашения электрической дуги, возникающей на контактах выключателя при размыкании цепи.

Вакуумные выключатели в настоящее время находят широкое применение в электрооборудовании, применяемом в различных отраслях промышленности, например на подстанциях распределительных электрических сетей. Вакуумные выключатели отличаются простым и компактным устройством, высокой надежностью, высоким эксплуатационным ресурсом, безопасностью и экологичностью эксплуатации, а также простотой технического обслуживания, поэтому они постепенно вытесняют масляные и воздушные выключатели [1].

Разработкой и выпуском материалов электрических контактов занимаются ведущие зарубежные и российские электротехнические компании, такие как General Electric Company, Westinghouse Electric Company, Siemens, Sirui, в России ОАО «Полема» (Тула), ТОО «Таврида Электрик» (Москва) и «Научный центр порошкового материаловедения» (Пермь).

Материалы электроконтактов должны обладать следующим комплексом свойств: высокой электро- и теплопроводностью; тугоплавкостью и коррозионной стойкостью; высокой механической прочностью как при комнатной, так и при повышенных температурах; высокой электроэрозионной стойкостью; незначительной склонностью к свариваемости и прилипанию; стабильностью в процессе работы контакта.

Чистые металлы и их сплавы не всегда могут реализовать в себе необходимый комплекс физико-механических свойств. Методы порошковой металлургии позволяют сочетать в одном материале разнородные компоненты и фазы, которые не поддаются консолидации другими технологическими методами, что позволяет расширить спектр свойств композиционного материала. Наряду с взаимнорастворимыми системами – сплавами можно получить псевдосплавы – системы, фазовые составляющие которых не взаимодействуют ни в твердом, ни в жидком состоянии или слабо взаимодействуют в широком диапазоне

температур, сохраняя в композиционном материале свои индивидуальные свойства [2].

Свойства композиций, получаемых шихтованием, прессованием и последующим спеканием, меняются немонотонно и часто зависят от технологических характеристик используемых порошков, таких как дисперсность и гранулометрический состав составляющих, индивидуальная плотность укладки частиц, твердость. Поэтому в каждом конкретном случае нужна оптимизация режимов получения и составов композиций для получения наиболее благоприятного сочетания необходимых свойств.

Исследования проведены для оптимизации состава композиции Cu–Cr, обеспечивающего максимальную электро- и теплопроводность при высоком значении плотности, коррозионной стойкости, механической прочности и твердости, обеспечиваемой добавлением хрома.

Методики и объекты исследования

В качестве исходных материалов были выбраны порошок меди марки ПМС-1 и порошок хрома алюмотермического. Частицы используемого порошка меди имеют дендритную форму и средний размер ~ 40 мкм; частицы порошка хрома округлой формы при среднем размере ~ 33 мкм.

Подготовка образцов для исследования проводилась в следующем порядке. Исходные порошки меди и хрома смешивались в смесителе со смещенной осью вращения в течение 8 ч. Скорость вращения 60 об/мин. Для улучшения смешивания в емкость смесителя добавлялись мелющие тела из нержавеющей стали Г-образной формы. Масса мелющих тел составляла 20% от массы шихты. Из шихты (смесей порошков) прессовали образцы в форме таблеток диаметром 5 мм при давлениях 600, 700 и 800 МПа. Спекание проводили в среде вакуума не хуже 10^{-2} Па, при температуре 1050°C. Спекание проводили твердофазное, т.е. в процессе спекания ни один из компонентов не переходил в жидкую фазу, не плавился. Температура плавления меди 1083°C, хрома – 1890°C.

Микроструктуру исследовали на оптических микроскопах («Neophot-21», «Neophot-32»). Механические свойства порошковых псевдосплавов на основе меди были оценены по результатам измерения твердости НВ (по Бриннелю). Электропротивление материала определялось на

специально изготовленных образцах размерами $60 \times 5 \times 3$ мм миллиметром GOM - 802 M, работающем по четырехпроводной схеме измерения электросопротивления.

Обсуждение результатов

Плотность меди ($8,96 \text{ г/см}^3$) выше плотности хрома ($7,19 \text{ г/см}^3$). Чистая медь обладает твердостью $\sim 350 \text{ Мн/м}^2$ (35 НВ), более низкой, чем чистый хром, имеющий твердость $700\text{--}900 \text{ Мн/м}^2$ (70–90 НВ). Следовательно, относительная плотность образцов, прессованных из смеси твердой и пластичной компонент, должна уменьшаться с увеличением содержания твердой компоненты (рис. 1). Уменьшение плотности прессовок по мере увеличения весового содержания Cr происходит немонотонно, в районе 35% весового содержания Cr выявлена точка перегиба. На участках до и после точки перегиба зависимость хорошо описывается квадратичными полиномами.

Для выяснения причины появления точки перегиба была определена насыпная плотность смесей порошков композиций Cu–Cr. Насыпная плотность зависит от следующих факторов: плотности материала, компактности укладки частиц порошка в объеме, размера и формы частиц, наличия выступов и неровностей на поверхности. Чем крупнее частицы и менее разветвленная их поверхность, тем больше насыпная плотность. Увеличение содержания тонких фракций порошка уменьшает насыпную плотность. Однако, если мелкие фракции заполняют промежутки между крупными частицами, то насыпная плотность увеличивается. Во всех случаях с увеличением поверхности порошков насыпная плотность уменьшается и наоборот. Порошки, имеющие сферическую форму, имеют максимальную насыпную плотность при одинаковом гранулометрическом составе. Смесь порошков Cu и Cr является бидисперсной. Средний размер частиц меди составляет $\sim 40 \text{ мкм}$, средний размер частиц

хрома составляет $\sim 30 \text{ мкм}$. Частицы смеси имеют либо дендритную (Cu), либо округлую (Cr) форму, в связи с этим, с изменением весового соотношения порошков – компонентов меняется характер укладки частиц смеси порошков. Увеличение содержания в смеси доли частиц порошка хрома, обладающих округлой формой, сопровождается увеличением насыпной плотности смеси порошков (рис. 2).

Обнаружено, что в районе 35% весового содержания Cr наблюдается изменение характера зависимости насыпной плотности от весового содержания Cr. Зависимость можно разбить на два участка: до 35% и после, на каждом из которых она описывается квадратичным полиномом. Для подтверждения наличия максимума была определена насыпная плотность шихты с содержанием Cr 32,5 и 37,5%; максимум сохранился. Логично предположить, что в этом интервале весовых соотношений порошков меняется характер укладки частиц. Когда основную массу смеси составляют частицы порошка меди дендритной формы, более мелкие по сравнению с ними частицы хрома округлой формы занимают промежутки между разветвленными частицами меди. При увеличении весовой доли порошка хрома до определенного значения (35 вес. % Cr) промежутки между частицами меди заполняются до предела. Дальнейшее увеличение насыпной плотности смеси происходит за счет увеличения в общей массе смеси весовой доли частиц хрома. Максимально плотная укладка частиц достигается при весовом соотношении Cu–35% Cr, что вызывает после прессования шихты появление точки перегиба на кривой плотности.

После спекания образцов исследуемых композиций изменение характера зависимости на отрезке от 30 до 40 вес. % Cr с точкой перегиба в районе весового содержания Cr–35% сохранилось и стало более выраженным (рис. 3).

Относительная плотность материала Cu–

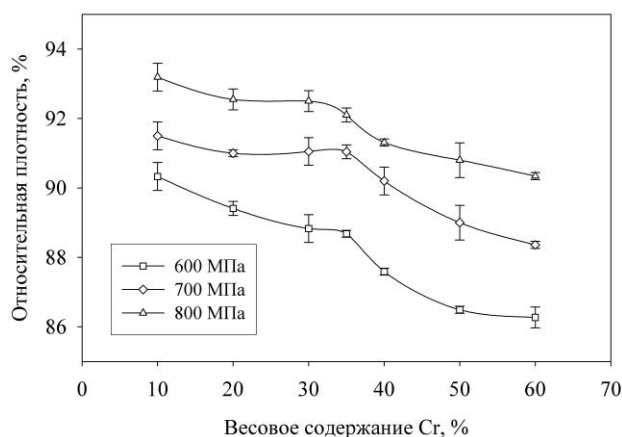


Рис. 1. Влияние тугоплавкой компоненты на плотность прессовок из шихты композиции Cu–Cr

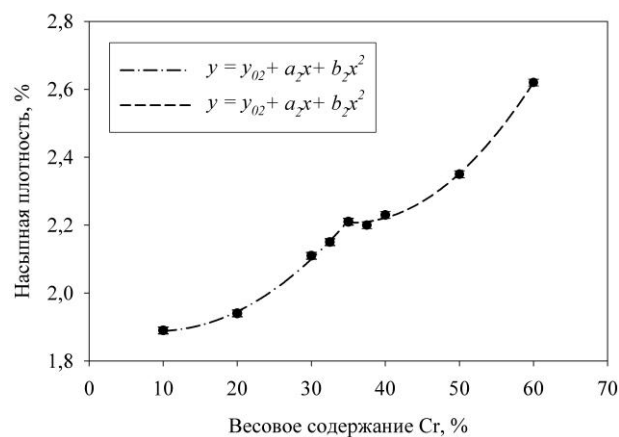


Рис. 2. Влияние тугоплавкой компоненты на насыпную плотность шихты композиции Cu–Cr

35% Cr достигает $95,5 \pm 0,2\%$, как и у материала Cu–30% Cr, и незначительно ниже относительной плотности материалов Cu–10% Cr ($96,6 \pm 0,5\%$), Cu–20% Cr ($96,2 \pm 0,2\%$).

Процессы спекания в медной фазе идут интенсивнее, чем в тугоплавкой фазе хрома. Объемная усадка композиционного материала Cu–Cr с содержанием тугоплавкой компоненты от 10 до 35% имеет наибольшие значения: для образцов, прессованных на максимальные давления, она составляет 4%, на более низкие давления – 5–6%. При меньших содержаниях хрома происходит спекание активной медной матрицы с тугоплавкими включениями хрома. Образованная при прессовании остаточная пористость по медной фазе устраняется. По мере увеличения содержания хрома, начиная с 40% Cr и далее, объемная усадка материала уменьшается по закону кубического полинома. Так происходит потому, что при больших содержаниях хрома начинает образовываться тугоплавкий каркас, менее активный при спекании и тормозящий

усадку композиционного материала, а остаточная пористость по медной фазе в процессе твердофазного спекания не устраняется.

Данные по кинетике спекания хорошо согласуются с исследованиями микроструктуры композиций материала Cu–Cr (рис. 4).

При содержаниях Cr фазы до 20 вес.% ее частицы имеют средний размер порядка $\sim 30\text{--}40$ мкм, округлую форму и равномерно распределены в медной матрице (рис. 4, а). В композиционном материале с содержанием Cr от 30 до 40 вес.% частицы Cr фазы имеют разветвленную форму из-за конгломерации частиц. Фаза Cu по-прежнему играет роль матрицы (рис. 4, б). При содержаниях Cr более 40 вес.% отщепления соседних частиц фазы Cr соприкасаются, что приводит к образованию каркаса из фазы Cr. Фаза Cu заполняет сформированный из тугоплавкой Cr-фазы каркас.

Электропроводность материала определяется в основном характеристиками индивидуальных контактов частиц (размерами площадки контакта, долей металлического контакта), сопротивлением контактов между отдельными частицами [3]. Измерения электросопротивления Cu–Cr композиционных материалов показали, что на промежутке от 10 до 60% весового содержания Cr электросопротивление возрастает по экспоненциальному закону от $\sim 0,03$ до $\sim 0,08$ мкОм·м (рис. 5).

Более высокое удельное электросопротивление материалов, прессованных при более низких давлениях, объясняется меньшей плотностью и соответственно более высокой пористостью материала. Изменение электросопротивления композиционного материала по мере изменения весового соотношения фаз объясняется композиционным эффектом [4]. Роль электропроводящей компоненты в композиции играет медь, обладающая низким удельным электросопротивлением, – $0,0172$ мкОм·м в нормальных условиях. Удельное электросопротивле-

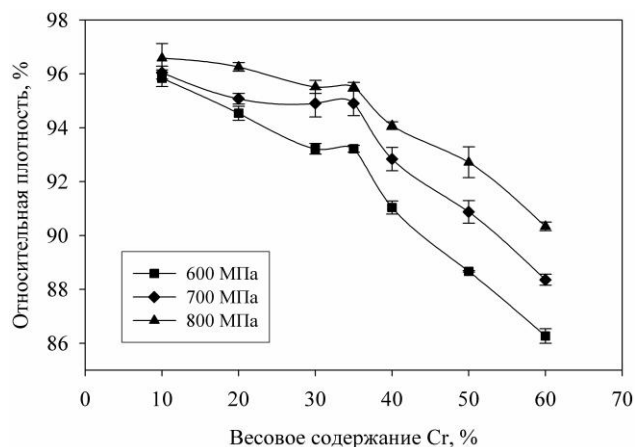
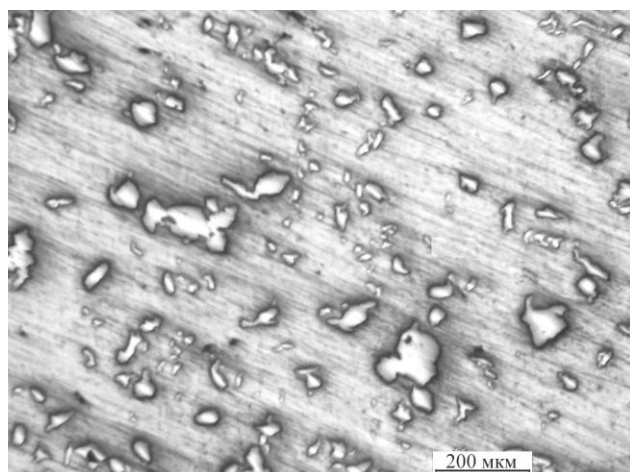
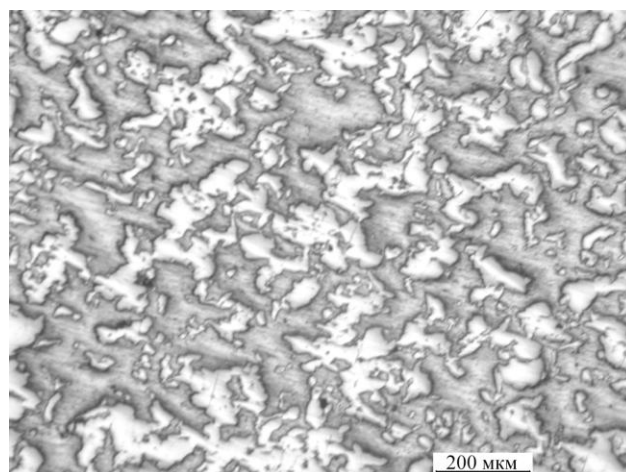


Рис. 3. Влияние тугоплавкой компоненты на плотность композиционного материала Cu–Cr



а



б

Рис. 4. Микроструктура спеченных образцов композиции Cu–Cr: а – 10% Cr; б – 35%Cr

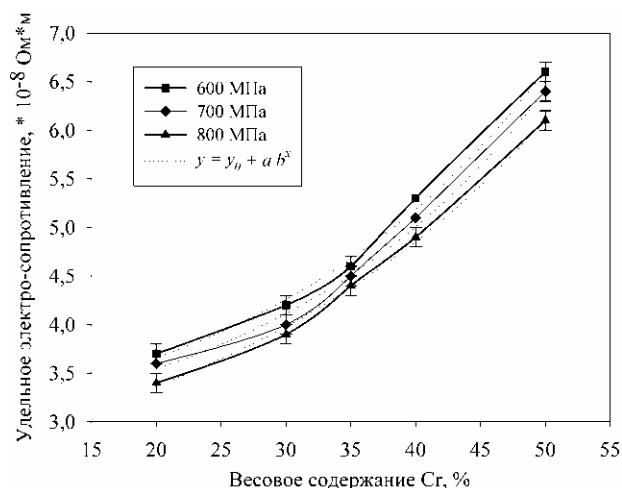


Рис. 5. Влияние Cr компоненты на электро-сопротивление композиции Cu-Cr

ние хрома при 20°C – 0,414 мк Ом·м.

Невысокое удельное электро-сопротивление композиций с содержанием Cr до 35 вес.% объясняется относительно высоким содержанием проводящей фазы и относительно низкой связностью Cr-фазы. Благодаря отсутствию связей между частицами фаза Cr не участвует в проведении электрического тока, следовательно, не вносит вклад в электро-сопротивление композиционного материала. С увеличением содержания фазы Cr растет связность частиц фазы, частицы образуют проводящую электрический ток сетку. В результате фаза Cr, обладающая большим электро-сопротивлением, начинает вносить вклад в электро-сопротивление композиционного материала. Одновременно растет число контактов между частицами разноименных фаз Cu и Cr, вносящих дополнительный вклад в рост электро-сопротивления.

В области состава Cu-35% Cr наблюдается отклонение от экспоненциальной зависимости. Электро-сопротивление с увеличением содержания Cr фазы до 35 вес.% возрастает с меньшей скоростью, после – с большей. Такое поведение электро-сопротивления композиционного материала Cu-Cr объясняется максимумом плотности материала в области 35 вес.% Cr (см. рис. 3), а

так же сменой характера микроструктуры материала: началом замены основы материала – медной матрицы на сетку (каркас) из хрома.

Твердость чистой меди в два раза ниже твердости чистого хрома. Постепенное увеличение в пластичной медной матрице числа включений хрома высокой твердостью сопровождается постепенным, по закону кубического полинома, увеличением твердости композиционного материала от 60 до 78 НВ при увеличении содержания Cr от 10 до 35 вес. %. При больших содержаниях хрома рост твердости замедляется, тугоплавкая составляющая, равномерно распределенная по всему материалу, образует жесткий каркас и твердость композиционного материала определяется твердостью этого каркаса.

Выводы

В исследованном диапазоне составов Cu-10÷60 вес. % Cr существует область весовых соотношений меди и хрома – Cu-30÷40% Cr, в которой происходит смена характера поведения свойств композиционного материала. До 30% Cr свойства композиции определяются свойствами медной фазы, начиная с 40% Cr на свойства композиции существенное влияние оказывает тугоплавкая компонента. В композиционном материале состава Cu-35% Cr происходит начало замены матричной (Cu) структуры каркасной (Cr). В указанной области весовых соотношений Cu и Cr наблюдается локальный максимум по свойствам, обусловленный наиболее плотной укладкой частиц в смеси исходных порошков – частиц порошка меди дендритной формы и более мелких частиц порошка хрома округлой формы. Композиционный материал Cu-35% Cr обладает высокой относительной плотностью ~ 96%. Удельное электрическое сопротивление материала ~ $4,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, что в пересчете на электропроводность составляет 38% от электропроводности чистой меди. Твердость достигает величины ~ 78 НВ. Разработанный материал по свойствам не уступает мировым аналогам [5] и с успехом может быть использован в качестве материала для электрических контактов вакуумных выключателей.

Библиографический список

1. Применение вакуумных выключателей в России / ЗАО РКЦ «Калугазнепро-финанс». http://www.kef.ru/art_001.shtml, 17.04.2005.
2. Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые композиционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. М.: МГИУ, 1999. 206 с.
3. Новоселова М.В. Расчет электропроводности композиционных электро-контактных материалов // Вестник ПГТУ. Проблемы современных материалов и технологий. Пермь, 2004. С. 30–39.
4. Ilic D.J., Fiscina J., Gonzalez Oliver C., Ilic N., Mucklich F. Self Formed Cu-W Functionally Graded Material Produced Via Powder Segregation // Advanced Engineering Materials. 2007. 9. No 7. P. 542–546.
5. Baihe Miao, Yan Zhang, Guoxun Liu. Current Status and Developing Trends of Cu-Cr Contact Materials for VCB // IEEE. 2004. № 4. Vol. 311–314.