

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕНТЫ. КОМПОЗИТ МЕДЬ – КАРБИД ХРОМА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Приведены результаты исследования электроконтактных характеристик композиционного порошкового материала на медной основе с различным содержанием карбида хрома. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди. Исследовано влияние температуры спекания карбидосодержащего композиционного материала на его электроконтактные свойства, а также зависимость электроэрозионного износа от полярности образца (образец – анод и образец – катод).

Ключевые слова: композиционный материал, медь, карбид хрома, электропроводность, электроэрозионный износ, температура спекания.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-15-20

ВВЕДЕНИЕ

Медь и материалы на ее основе по-прежнему широко используются в качестве электроконтактных материалов ввиду удачного сочетания целого ряда свойств. Однако возможности повышения эксплуатационных и, в частности, электроконтактных характеристик таких материалов, разумеется, не исчерпаны. Одно из направлений такого совершенствования электроконтактных материалов – разработка композиционных материалов на медной основе с различными функциональными наполнителями, получаемых методами порошковой металлургии. Для повышения электроконтактных свойств (электроэрозионной и механической износостойкости, механической прочности) в композиционный материал вводят тугоплавкие компоненты в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерод, графит [1–7].

В данной статье представлены результаты сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового медного материала с различным содержанием карбида хрома Cr_3C_2 . Целью является изучение влияния состава и технологических режимов изготовления образцов на их износостойкость в режиме электроэрозионного изнашивания. За эталон электроконтактного материала в сравнительных испытаниях принята электротехническая медь марки М1. Данная работа является продолжением исследований влияния функциональных наполнителей на механические и электрические свойства электроконтактных материалов на основе меди [1, 3, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы композиционного материала получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием карбидов хрома 2, 5 и 10 %, остальное – медь. Физико-механические свойства компонентов приведены в табл. 1. Компакти-

рование заготовок образцов выполнялось под давлением 700 МПа при комнатной температуре в цилиндрической пресс-форме. Дальнейшее спекание образцов проводилось в вакууме 10^{-4} мм рт. ст. в течение 1 ч при температурах 850, 900, 950 и 1 000 °C (± 10 °C). Плотность образцов составляет 8,6...8,8 г/см³.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов

Характеристика	Материал	
	Cu	Cr ₃ C ₂
Плотность, г/см ³	8,92	6,68 [8]
Микротвердость, ГПа	0,055	10,4...20,2 [8]
Температура плавления, °C	1 083	1 895 [8]
Удельное сопротивление, 10^{-8} Ом·м	1,8	75 [8]

Методика и установка для оценки электроэрозионной износостойкости образцов описаны в патенте [9]. Образец из исследуемого материала в виде таблетки диаметром 20 мм и толщиной 3...5 мм контактировал с контрообразцом – вольфрамовым зондом диаметром 1 мм. Вольфрам был выбран в качестве материала зонда по причине его высокой электроэрозионной износостойкости. Частота коммутаций составляла 20 циклов в минуту. Максимальный коммутируемый заряд за одну коммутацию 66 мКл. Для гашения вибрации контактов использовался специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения. Нагрузка на контакт вольфрамового зонда с образцом прикладывалась с помощью разновесов и равнялась во всех описанных ниже экспериментах 0,5 Н.

Длительность одного испытания составляла 60 циклов коммутации. После испытаний измеряли линейный износ (глубину кратера на образце) с точностью 0,01 мм. Уменьшение длины вольфрамового зонда было незначительным, поэтому им пренебрегали.

В качестве характеристики износостойкости была принята величина удельной эрозии (отношение объема удаленного материала к величине прошедшего через контакт электрического заряда).

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырех-зондовым методом [10]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав материала, физико-механические и электроконтактные характеристики образцов из исследованных материалов представлены в табл. 2. Значения удельного электросопротивления и удельной эрозии приведены с доверительным интервалом, при расчете которого использовался коэффициент Стьюдента для 95%-й доверительной вероятности. Известно, что электроэрозионный износ зависит от полярности электрода, поэтому указаны величины удельной эрозии образцов при их положительной (в качестве анода) и отрицательной (в качестве катода) полярностях.

Для всех образцов при отрицательной полярности (катод) удельная эрозия меньше в 2...3 раза, чем при обратной.

Для исследованных карбидосодержащих материалов величина удельной эрозии (табл. 2) находится в пределах $(1...5) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл. Этот результат согласуется с известными из литературы [11] значениями удельной эрозии медных образцов – $10^{-12}...10^{-9}$ м³/Кл.

Таблица 2. Состав и основные характеристики опытных образцов, полученных при различных температурах спекания $T_{сп}$

Характеристика	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Состав		
		Cu + + 2 % Cr_3C_2	Cu + + 5 % Cr_3C_2	Cu + + 10 % Cr_3C_2
Пористость, %	1 000	12	13	9
	950	14	15	10
	900	13	10	15
	850	12	11	12
Твердость индентирования H при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	1 000	424	458	566
	950	379	566	650
	900	424	519	620
	850	566	716	650
Удельное электро-сопротивление ρ , 10^{-8} Ом·м	1 000	2,4±0,6	2,0±0,3	2,2±0,3
	950	3,1±0,4	2,6±0,3	3,1±0,3
	900	2,9±0,3	2,7±0,3	3,2±0,5
	850	2,9±0,8	3,0±0,6	3,8±0,6
Удельная эрозия I , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – анод)	1 000	7,5±1,3	7,4±2,5	6,8±0,9
	950	3,8±0,4	3,2±0,6	3,8±0,2
	900	5,2±0,1	3,7±0,2	2,9±0,3
	850	3,4±0,6	4,1±0,2	2,6±0,1
I , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – катод)	1 000	2,3±0,3	2,4±0,1	2,0±0,5
	950	1,8±0,4	1,5±0,1	1,3±0,1
	900	2,0±0,1	2,1±0,1	1,7±0,1
	850	1,3±0,2	1,9±0,1	1,2±0,1

Для более наглядного сравнения с эталоном (медью марки М1) результаты испытаний приведены в виде относительных величин в табл. 3, где σ/σ_{Cu} и I/I_{Cu} – относительные электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов по сравнению с эталоном. Твердость эталонного образца $H = 716$ МПа. Удельное сопротивление $\rho = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Электроэрозионный износ эталонного образца в качестве анода $I = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл, в качестве катода $I = (2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$ м³/Кл.

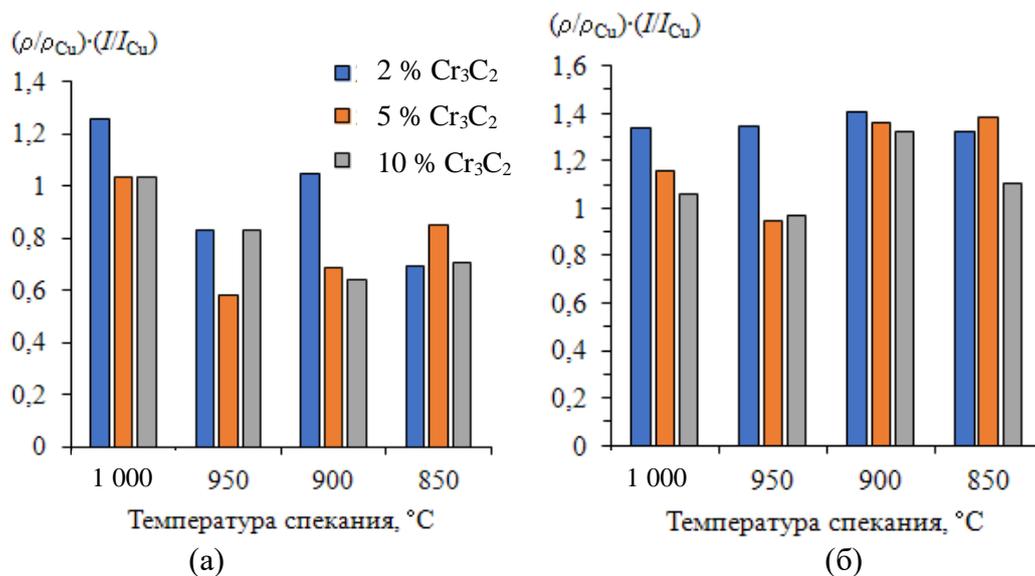
Электрическая проводимость исследованных материалов в основном невысокая – 50...60 % от проводимости меди. Наибольшей электропроводностью обладают образцы (независимо от содержания карбида хрома), спеченные при температуре 1 000 °С (75...90 % от проводимости меди), но, к сожалению, эти образцы имеют низкую электроэрозионную износостойкость – 85...100 % от износостойкости меди.

Таблица 3. Состав и характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Состав		
		Cu + + 2 % Cr_3C_2	Cu + + 5 % Cr_3C_2	Cu + + 10 % Cr_3C_2
H/H_{Cu}	1 000	0,59	0,64	0,79
	950	0,53	0,79	0,91
	900	0,59	0,72	0,86
	850	0,79	1,00	0,91

Характеристика	$T_{сп}$, °C	Состав		
		Cu + + 2 % Cr ₃ C ₂	Cu + + 5 % Cr ₃ C ₂	Cu + + 10 % Cr ₃ C ₂
σ/σ_{Cu}	1 000	0,75	0,90	0,82
	950	0,58	0,69	0,58
	900	0,62	0,67	0,56
	850	0,62	0,60	0,47
I/I_{Cu} анод (катод)	1 000	0,94 (1,00)	0,93 (1,04)	0,85 (0,87)
	950	0,48 (0,78)	0,40 (0,65)	0,48 (0,56)
	900	0,65 (0,87)	0,46 (0,91)	0,36 (0,74)
	850	0,43 (0,82)	0,51 (0,83)	0,33 (0,52)

Поскольку оптимальным сочетанием для электроконтактного материала в режиме электроэрозионного изнашивания являются малое удельное сопротивление и малый износ, за критерий сравнения материалов можно принять произведение относительных характеристик $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$. Значения этого произведения для исследованных материалов представлены на рисунке. По совокупности проводимости и износостойкости заслуживает внимания материал Cu + 5 % Cr₃C₂, спеченный при температуре 950 °C.



Сравнение электроконтактных характеристик исследованных материалов: анод (а); катод (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроэрозионная износостойкость материалов контакт-деталей в значительной мере определяет ресурс электроконтактных соединений. Электроэрозионное изнашивание является следствием сложных теплофизических и газодинамических процессов, происходящих в межэлектродном промежутке и на рабочей поверхности контакт-деталей. Теоретически оценить интенсивность электроэрозионного изнашивания электроконтактного материала не всегда представляется возможным. Приведенные в работе экспериментальные результаты могут оказаться полезными при выборе композиционного материала на медной основе для электрокоммутирующих устройств.

Экспериментальные результаты подтверждают, что введение карбида хрома в электроконтактный материал на медной основе существенно снижает интенсивность изнашивания по сравнению с медью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.
2. Пименова Н.В. Разработка и исследование композиционного материала Cu-Cr для электрических контактов вакуумных дугогасительных камер // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2008. № 2. С. 66–69.
3. Измайлов В.В., Дроздова Е.И., Черногорова О.П., Потапова И.Н., Новоселова М.В., Екимов Е.А. Электроконтактные свойства композиционного материала с медной матрицей, армированной сверхупругим твердым углеродом // *Металлы*. 2015. № 3. С. 45–50.
4. Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Белецкий В.В., Николаев С.В., Кожурин А.Н., Кучинский М.Ю., Григорьева О.А. Микроструктура и свойства электроконтактного материала Cu-(ZnO/TiO₂) // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. № 12. С. 88–93.
5. Еремина М.А., Ломаева С.Ф., Паранин С.Н., Демаков С.Л., Елсуков Е.П. Влияние способа компактирования на структуру и свойства объемных композитов Cu + Cr₃C₂ // *Физика металлов и материаловедение*. 2016. Т. 117. № 5. С. 530–537.
6. Еремина М.А., Трифонов И.С., Ломаева С.Ф., Тарасов В.В., Паранин С.Н., Заяц С.В. Структура и износостойкость нанокompозитов Cu-Cr₃C₂ // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–115.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.
8. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
9. Патент РФ 2265862. *Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов* / Измайлов В.В., Новоселова М.В. Заявл. 05.04.2004. Опубл. 10.12.2005, Бюл. № 34.
10. Радьков А.В., Малаханов А.А. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов. Актуальные вопросы технических наук: материалы V Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, февраль 2019 г.). СПб.: Свое издательство, 2019. С. 18–24.
11. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид хрома // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 15–20.

ELECTRICAL CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. COMPOSITE COPPER – CHROMIUM CARBIDE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

The results of a study of the electrical contact characteristics of a composite powder material on a copper base with different contents of chromium carbide are presented. The electrical resistivity, hardness and electrical erosion wear of the studied samples are

presented in absolute values and in comparison, with similar characteristics of the reference material – electric copper. The effect of the sintering temperature of the carbide-containing composite material on its electrical contact properties, as well as the dependence of the electroerosive wear on the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode) was investigated.

Keywords: composite material, copper, chromium carbide, electrical conductivity, electroerosive wear, sintering temperature.

REFERENCES

1. Izmailov V.V., Gershman I.S., Novoselova M.V., Kharitonov E.O. Powder materials for electrical contacts. *Materialovedeniye*. 2007. No 8, pp. 22–28. (In Russian).
2. Pimenova N.V. Development and research of a Cu-Cr composite material for electrical contacts of vacuum interrupting chambers. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosov*. 2008. No 2, pp. 66–69. (In Russian).
3. Izmailov V.V., Drozdova E.I., Chernogorova O.P., Potapova I.N., Novoselova M.V., Ekimov E.A. Electrical contact properties of a composite material with a copper matrix reinforced with superelastic solid carbon. *Metally*. 2015. No 3, pp. 45–50. (In Russian).
4. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Beletskiy V.V., Nikolaev S.V., Kozhurin A.N., Kuchinsky M.Yu., Grigorieva O.A. Microstructure and properties of electrocontact material Cu- (ZnO/TiO₂). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. V. 85, No 12, pp. 88–93. (In Russian).
5. Eremina M.A., Lomaeva S.F., Pararin S.N., Demakov S.L., Elsukov E.P. Influence of the method of compacting on the structure and properties of bulk composites Cu + Cr₃C₂. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2016. V. 117. No 5, pp. 530–537. (In Russian).
6. Eremina M.A., Trifonov I.S., Lomaeva S.F., Tarasov V.V., Pararin S.N., Zayats S.V. Structure and wear resistance of Cu-Cr₃C₂ nanocomposites. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2016. V. 19. No 6, pp. 107–115. (In Russian).
7. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a composite diamond-containing copper material. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*. 2020. No 5, pp. 25–29. (In Russian).
8. Samsonov G.V., Vinititskiy I.M. Refractory compounds. Moscow: Metallurgiya, 1976. 560 p.
9. Patent RF 2265862. *Sposob otsenki elektroerozionnoy iznosostoykosti materialov dlya elektricheskikh kontaktov* [Method for assessing the electrical discharge wear resistance of materials for electrical contacts]. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Declared 05.04.2004, Published 10.12.2005, Bulletin No 34.
10. Radkov A.V., Malakhanov A.A. Methods of measuring the resistivity of semiconductor materials. *Topical issues of technical sciences: materials of the V International scientific conf. (St. Petersburg, February 2019)*. SPb.: Svoye izdatelstvo, 2019, pp. 18–24. (In Russian).
11. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Electrical erosion of high current contacts and electrodes. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2021; после рецензирования/revised: 03.03.2021;
принята/accepted: 15.03.2021