

**ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА,
СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕТЫ.
АЛМАЗ-КАРБИДНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

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

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

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

Содержит результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционных порошковых материалов на медной основе с добавками карбидов хрома и вольфрама. Удельное электросопротивление, твердость и электроэрозионный износ исследованных образцов представлены в абсолютных величинах и в сравнении с аналогичными характеристиками эталонного материала – электротехнической меди, в зависимости от состава композита, режимов его изготовления и полярности образца (образца-анода и образца-катода).

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

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-12-19

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья продолжает серию публикаций авторов по результатам исследования электроконтактных свойств композитов на основе меди с добавками тугоплавких компонентов [1–5].

Порошковые технологии позволяют вплотную приблизиться к созданию материалов с требуемыми эксплуатационными свойствами благодаря практически аддитивному характеру этих свойств. Применительно к электроконтактным материалам набор желательных эксплуатационных свойств зависит от назначения контакт-деталей, для изготовления которых предназначен материал.

Многие требования универсальны для всех электроконтактных материалов. Так, единым требованием является высокая проводимость и малое контактное электросопротивление. Желательна и высокая теплопроводность материала, способствующая отводу джоулева тепла из зоны контакта. В металлах, как известно, эти два свойства – высокая электро- и теплопроводность – сочетаются (закон Видемана – Франца). Для материалов для разрывных контактов дополнительными требованиями являются высокая электроэрозионная износостойкость и стойкость к свариванию. Не следует забывать и о механическом изнашивании, которое в той или иной степени присутствует в электроконтактных соединениях. Стойкость материалов к механическому изнашиванию можно оценить по величине твердости материала: чем она выше, тем, как правило, меньше механическая составляющая износа контакт-деталей.

По проводимости среди электроконтактных материалов лидируют серебро и медь – металлы с наименьшим удельным сопротивлением. Они широко применяются в самых различных электроконтактных соединениях. Их общими недостатками является невысокая механическая прочность, склонность к свариванию и к образованию плохо

проводящих пленок на рабочей поверхности контакт-деталей. У серебра к этим недостаткам добавляется сравнительно высокая стоимость и дефицитность.

По электроэрозионной стойкости среди чистых металлов лидирует вольфрам. К его достоинствам можно отнести также стойкость к свариванию и высокую твердость. При этом у вольфрама есть и существенные недостатки: достаточно высокое удельное электросопротивление, склонность к образованию оксидных пленок на поверхности и плохая обрабатываемость.

Помимо чистых металлов, в состав композитов для изготовления электрических контактов включают их химические соединения, например оксиды. Имеется положительный опыт применения карбидов тугоплавких металлов в качестве компонентов электроконтактных композитов [6–10]. Карбиды обладают целым комплексом свойств, желательных для электроконтактных материалов: высокой температурой плавления, уникальной твердостью, коррозионной стойкостью, металлическим характером проводимости. Например, по критерию электроэрозионной стойкости (видоизмененный критерий Палатника):

$$Pa = T_{пл} \sqrt{\lambda c_{уд} \rho}$$

карбиды вольфрама W_2C и WC немного уступают меди и не уступают серебру. Для карбидов $Pa \approx 30$ МДж/с^{0,5}м², для меди $Pa \approx 41$ МДж/с^{0,5}м², для серебра $Pa \approx 31$ МДж/с^{0,5}м² [11]. (В формуле использованы обозначения: $T_{пл}$ – температура плавления материала; λ – теплопроводность; $c_{уд}$ – удельная теплоемкость; ρ – плотность.)

Еще одним широко применяемым материалом для различных по назначению, конструкции и режимам работы электроконтактных устройств является графит. При всех неоспоримых преимуществах графита как электроконтактного материала его существенные недостатки – невысокие твердость и прочность – становятся критическими для разрывных контактов, в которых контакт-детали испытывают циклические ударные нагрузки. В работе [12] предложено использовать другую аллотропную модификацию углерода (алмаз в виде мелкодисперсного порошка) и приведены аргументы в пользу такой замены.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом вышеизложенного объектом данного исследования были выбраны композиты, предназначенные для разрывных электрических контактов и изготовленные по порошковой технологии на основе медной матрицы с добавлением тугоплавких компонентов. В качестве последних выбраны карбиды тугоплавких металлов (вольфрама и хрома) и углерод в виде мелкодисперсного алмазного порошка (размер частиц 8...12 мкм).

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием 2 % алмазного порошка и 2 % карбида, остальное медь. Компактирование заготовок образцов производилось 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 (± 10) °С.

Сравнительные испытания образцов проводили на установке [13] в режиме импульсного разряда. Образцы из исследуемых материалов в виде таблеток диаметром 14 мм и высотой 3...4,5 мм контактировали с контробразцом – зондом из вольфрамовой

проволоки диаметром 1 мм. В качестве эталона для сравнительных испытаний использован монолитный образец из меди марки М1.

Усилие нажатия в контакте создавалось с помощью разновесов и равнялось во всех экспериментах 0,5 Н. Для устранения вибрации контактов в установке используется фрикционный демпфер. Источником коммутируемой электрической энергии в установке служит емкостный накопитель, максимальная величина коммутируемого заряда составляет 66 мКл за одну коммутацию. Продолжительность испытаний – 60 циклов коммутации.

После окончания испытания образца измеряли объем изношенного материала по диаметру и глубине кратера. Диаметр измеряли под микроскопом, глубину – с помощью часового индикатора с погрешностью 0,01 мм. За нулевой уровень отсчета глубины кратера принималась исходная поверхность образца; образовавшиеся вокруг кратера наплывы материала не учитывались. Таким образом, общий объемный износ измеряли как результат испарения и переноса материала.

Как известно, величина электроэрозионного износа зависит от полярности электрода, поэтому испытания каждого материала проводили при положительной полярности образца (анод) и при отрицательной (катод). Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [14]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний материалов представлены в табл. 1 в виде объемной удельной эрозии $I_V = V/q$, которая рассчитывается как отношение абсолютной величины объемного износа V к величине коммутируемого заряда q . Другой часто используемой в литературе формой представления электроэрозионного износа является массовая удельная эрозия $I_m = m/q$, где m – масса изношенного материала. Объемная и массовая удельная эрозия связаны очевидным соотношением $I_m = I_V \cdot d$, где d – плотность материала. Значения удельного электросопротивления и удельной эрозии приведены с доверительным интервалом при 95%-й доверительной вероятности.

Таблица 1. Состав и характеристики исследованных образцов

Характеристика	Состав		
	Т _{сп.} , °С	Cu+2 % C+ +2 % Cr ₃ C ₂	Cu+2 % C+ +2 % W ₂ C
Пористость, %	950	16	12
	900	15	13
	850	15	11
Твердость индентирования H при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	950	566	620
	900	650	620
	850	716	716
Удельное электросопротивление ρ , 10^{-8} Ом·м	950	3,2±0,1	3,8±0,4
	900	3,5±0,3	3,6±0,5
	850	3,7±0,4	2,8±0,4
Удельная эрозия I_V , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – анод)	950	1,6±0,1	2,0±0,1
	900	2,4±0,1	2,4±0,3
	850	2,2±0,2	2,8±1,3
I_V , 10^{-11} м ³ /Кл (образец – катод)	950	1,5±0,1	0,9±0,1
	900	1,9±0,3	1,7±0,2
	850	0,9±0,1	1,5±0,1

Значения массового удельного износа исследованных образцов заключены в интервале $I_m \approx 0,1 \dots 0,3$ мг/Кл, что по порядку величин соответствует диапазону типичных значений удельного массового износа таких распространенных электроконтактных материалов, как вольфрам, молибден и медь. Согласно классическим работам Усова, Займовского, Буткевича, Хольма этот диапазон составляет $I_m \approx 0,1 \dots 10$ мг/Кл.

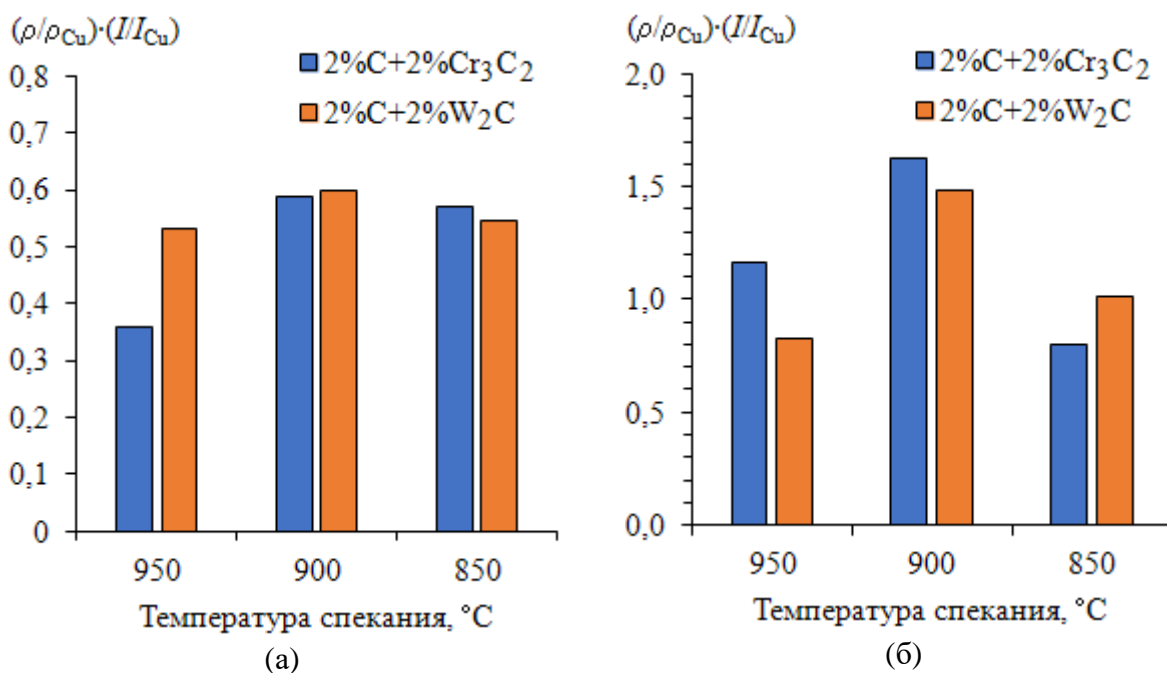
Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что исследованные композиты несущественно уступают эталонному материалу (меди) по величине твердости и проводимости. Твердость композитов составляет не менее 80 % от твердости монолитного медного эталонного образца, проводимость – не менее 50 % от проводимости эталона. Для сравнения: проводимость чистого вольфрама составляет 30 % от проводимости меди, платины – 16 %. При этом и тот и другой материал широко используются в электрических контактах. В то же время электроэрозионная износостойкость исследованных композитов существенно (до пяти раз) превышает износостойкость меди.

Для более детального сравнения характеристик исследованных композитов и эталона в табл. 2 приведены результаты испытаний в виде относительных величин, где H/H_{Cu} , σ/σ_{Cu} и I/I_{Cu} – относительные твердость, 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.

Таблица 2. Состав и характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	Состав		
	$T_{сп}, ^\circ C$	Cu+2 % C+ +2 % Cr ₃ C ₂	Cu+2 % C+ +2 % W ₂ C
H/H_{Cu}	950	0,79	0,86
	900	0,91	0,86
	850	1,00	1,00
σ/σ_{Cu}	950	0,56	0,47
	900	0,51	0,50
	850	0,49	0,64
I/I_{Cu} анод (катод)	950	0,20 (0,65)	0,25 (0,39)
	900	0,30 (0,83)	0,30 (0,74)
	850	0,28 (0,39)	0,35 (0,65)

Для электроконтактного материала, подвергающегося электроэрозионному изнашиванию, выгодно сочетание малого удельного сопротивления и малого удельного износа, поэтому за критерий сравнения исследованных материалов можно принять произведение относительных величин $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$. Значения этого произведения представлены на рисунке. По величине принятого критерия оптимальным является материал состава Cu+2 % C+ 2 % W₂C, полученный спеканием при температуре 950 °С. Ему немного уступает материал состава Cu+2 % C+2 % Cr₃C₂, полученный при той же температуре спекания.



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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты, приведенные в данной статье, могут быть полезны при выборе композиционного материала для электроконтактных устройств, подверженных электроэрозионному изнашиванию.

Как показали результаты исследований, введение в композиционный электроконтактный материал на медной основе карбидов вольфрама или хрома в сочетании с небольшими добавками мелкодисперсных алмазов существенно повышает его износостойкость по сравнению с медью. При этом твердость и проводимость композитов остаются в допустимых пределах.

Повышение электроэрозионной износостойкости композитов с тугоплавкими добавками зависит как от состава материала, так и от технологических параметров изготовления композита, в частности от температуры спекания. Представленные нами результаты нельзя считать окончательными. Исследования в этом направлении целесообразно продолжить в поисках оптимальных параметров.

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. 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.
3. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства композиционного алмазосодержащего медного материала // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 5. С. 25–29.

4. 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.
5. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Композит медь – карбид вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.
6. Акимов Е.Г., Белкин Г.С., Годжелло А.Г., Дегтярь В.Г., Курбатов П.А., Райнин В.Е., Таев И.С., Шоффа В.Н. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань, 2015. 592 с.
7. Николенко С.В., Хосен Ри. Электродные материалы для электроискрового легирования. Хабаровск: изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 206 с.
8. Оглезнев Н.Д., Оглезнева С.А., Доливец О.В., Мазуренко К.А., Морозов О.П. Исследование износостойкости электродов-инструментов из композиционных материалов при электроэрозионной прошивке // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16013> (дата обращения: 02.02.2021).
9. Оглезнев Н.Д., Оглезнева С.А., Гревнов Л.М., Абляз Т.Р. Исследование структуры и относительной эрозионной стойкости электродов-инструментов из порошковых материалов на основе меди и карбида, карбонитрида, карбосилицида титана // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19. № 3. С. 179–192.
10. Ловшенко Ф.Г., Хабибуллин А.И. Повышение электропроводности дисперсно-упрочненной меди // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 115–122.
11. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
12. Иванов В.В. Физико-химические основы технологии и материаловедение порошковых электроконтактных композитов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 234 с.
13. 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.
14. Радьков А.В., Малаханов А.А. Методы измерения удельного сопротивления полупроводниковых материалов. *Актуальные вопросы технических наук: материалы V Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, февраль 2019 г.)*. СПб.: Свое издательство. 2019. С. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (дата обращения: 24.01.2020).

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Алмаз-карбидный композит на основе меди // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 12–19.

ELECTRIC CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. DIAMOND-CARBIDE COMPOSITE BASED ON COPPER

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 the study of the main electrical contact characteristics of composite powder materials on a copper base with additions of chromium and tungsten carbides 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 – electrical copper – depending on the composition of the composite, the modes of its manufacture and the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode).

Keywords: composite material, copper, chromium carbide, tungsten 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. 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).
3. 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).
4. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper – chromium carbide. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 2 (10), pp. 15–20. (In Russian).
5. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Composite copper - tungsten carbide *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No 3 (11), pp. 5–11. (In Russian).
6. Akimov E.G., Belkin G.S., Godzhello A.G., Degtyar V.G., Kurbatov P.A., Rainin V.E., Taev I.S., Shoffa V.N. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov [Fundamentals of the theory of electrical apparatus] / Pod red. P.A. Kurbatova*. St. Petersburg: Lan, 2015. 592 p.
7. Nikolenko S.V., Hosen Ri. *Elektrodnyye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Electrode materials for electrospark alloying]*. Khabarovsk: izd-vo Tikhookeanskogo gos. universiteta, 2015. 206 p.

8. Ogleznev N.D., Oglezneva S.A., Dolivets O.V., Mazurenko K.A., Morozov O.P. Investigation of the wear resistance of electrodes-tools made of composite materials with electric discharge piercing. *Modern problems of science and education*. 2014. No 6. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16013> (date accessed: 02.02.2021). (In Russian).

9. Ogleznev N.D., Oglezneva S.A., Grevnov L.M., Ablyaz T.R. Investigation of the structure and relative erosion resistance of electrodes-tools made of powder materials based on copper and carbide, carbonitride, titanium carbosilicide. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2017. V. 19. No 3, pp. 179–192. (In Russian).

10. Lovshenko F.G., Khabibullin A.I. Increase of electrical conductivity of dispersion-hardened copper. *Litye i metallurgiya*. 2019. No 4. Pp. 115–122. (In Russian).

11. Butkevich G.V., Belkin G.S., Vedeshenkov N.A., Zhavoronkov M.A. Elektricheskaya eroziya silnotochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moscow: Energiya, 1978. 256 p.

12. Ivanov V.V. Fiziko-khimicheskiye osnovy tekhnologii i materialovedeniye poroshkovykh elektrokontaktnykh kompozitov [Physicochemical fundamentals of technology and materials science of powder electrocontact composites]. Krasnoyarsk: IPTS KGTU, 2002. 234 p.

13. Patent RF 2265862. *Sposob otsenki elektroerozionnoy iznosostoykosti materialov dlya elektricheskikh kontaktov* [Method for assessing the electroerosive wear resistance of materials for electrical contacts]. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Declared 05.04.2004. Published 10.12.2005, Bulletin No 34. (In Russian).

14. 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 conference (St. Petersburg, February 2019). St. Petersburg: Svoye izdatelstvo. 2019, pp. 18–24. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/324/14799/> (date accessed: 24.01.2020).

Поступила в редакцию/received: 09.03.2021; после рецензирования/revised: 23.03.2021;
принята/accepted: 05.04.2021