

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.31:620.22

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

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

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

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

Представлены результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционного порошкового материала на медной основе с различным содержанием карбида 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 (образец-анод и образец-катод).

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

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-5-11**

### ВВЕДЕНИЕ

Порошковая технология является перспективным способом создания конструкционных и функциональных материалов для изготовления изделий современной техники. Одно из направлений, где порошковые технологии практически безальтернативны, – изготовление электроконтактных материалов, которые должны сочетать в себе, с одной стороны, высокую проводимость, а с другой – высокую механическую прочность, механическую и электроэрозионную износостойкость. Совмещение таких трудносовместимых свойств возможно в порошковом композиционном материале.

Состав композиционного материала зависит от назначения электроконтактного устройства, для которого предназначается материал. В частности, для повышения электроэрозионной стойкости контакт-деталей в композиционный материал вводят тугоплавкие компоненты в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерод, графит [1–8].

В данной статье представлены результаты сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового материала на основе меди, содержащего тугоплавкий компонент в виде карбида вольфрама  $W_2C$ . Конкретной целью является изучение влияния состава и технологических режимов изготовления образцов на их износостойкость в режиме электроэрозионного изнашивания. За эталон в сравнительных испытаниях принята электротехническая медь марки М1. Данная работа является продолжением исследований влияния функ-

циональных наполнителей на механические и электрические свойства электроконтактных материалов на основе меди [1, 3, 7, 9].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием карбидов 2, 5 и 10 %, 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 и 1 000 °С ( $\pm 10$  °С). Плотность образцов составляет 9,0...9,3 г/см<sup>3</sup>. Поскольку плотности меди и карбида вольфрама значительно различаются (табл. 1), массовые концентрации компонентов не всегда дают полное представление о составе материала. Приведем соответствующие объемные доли карбидов в образцах, %: 1; 2,2...2,7; 4,5...5,5. В табл. 1 указаны также некоторые характеристики компонентов композитов, важные с точки зрения их применения как материалов для электрических контактов.

Таблица 1. Характеристики порошковых материалов

Характеристика	Материал	
	Cu	W <sub>2</sub> C
Плотность, г/см <sup>3</sup>	8,92	15,8 [10]
Микротвердость, ГПа	0,055	13...22 [10]
Температура плавления, °С	1 083	2 780 [10]
Удельное сопротивление, $10^{-8}$ Ом·м	1,8	76 [10]

Методика и установка для оценки электроэрозионной износостойкости образцов описаны в патенте [11]. Образец из исследуемого материала в виде таблетки диаметром 20 мм и высотой 3...5 мм контактировал с контрообразцом в виде зонда диаметром 1 мм из вольфрама. Максимальный коммутируемый заряд за одну коммутацию – 66 мКл. Для гашения вибрации контактов используется 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 незначительно, поэтому им пренебрегали.

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

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [12]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между зондами равнялось 1 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав исследованных композитов, их физико-механические и электроконтактные характеристики 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. Даны величины удельной эрозии образцов при их положительной и отрицательной полярностях (образец – анод и катод соответственно).

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

Таблица 2. Состав и характеристики содержащих карбид вольфрама образцов, полученных при различных температурах спекания  $T_{сп}$

Характеристика	Состав			
	$T_{сп}, ^\circ\text{C}$	Cu+ +2 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +5 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +10 % W <sub>2</sub> C
Пористость, %	1 000	18	7	11
	950	12	12	17
	900	17	17	16
	850	16	14	15
Твердость индентирования $H$ при нагрузке на индентор 10 Н, МПа	1 000	566	716	794
	950	620	620	716
	900	566	650	650
	850	716	716	716
Удельное электро- сопротивление $\rho, 10^{-8}$ Ом·м	1 000	4,9±0,3	5,4±0,2	6,2±0,8
	950	3,9±0,5	5,5±0,7	7,1±1,2
	900	4,1±0,5	6,0±0,7	6,0±0,4
	850	3,9±0,7	5,2±0,7	6,8±0,8
Удельная эрозия $I, 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – анод)	1 000	9,3±1,2	8,5±0,3	8,8±0,2
	950	5,5±0,9	6,1±0,4	5,4±1,3
	900	5,2±0,1	5,2±0,2	5,4±0,6
	850	4,0±0,1	5,2±0,1	4,9±0,0
$I, 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл (образец – катод)	1 000	4,2±0,2	2,8±0,1	4,6±0,1
	950	2,0±0,1	2,6±0,1	2,5±0,1
	900	2,0±0,3	2,8±0,1	2,9±0,2
	850	1,8±0,1	3,2±0,4	3,0±0,7

Для исследованных карбидосодержащих материалов величина удельной эрозии (см. табл. 2) находится в пределах  $(2...10) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл. Этот результат не противоречит известным литературным данным [13] по удельной эрозии медных образцов  $(10^{-12}...10^{-9})$  м<sup>3</sup>/Кл).

Для более наглядного сравнения с эталоном (медь марки М1) результаты испытаний приведены в виде относительных величин в табл. 3, где  $\sigma/\sigma_{Cu}$  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  $I = (8,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл, в качестве катода  $I = (2,3 \pm 0,8) \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/Кл.

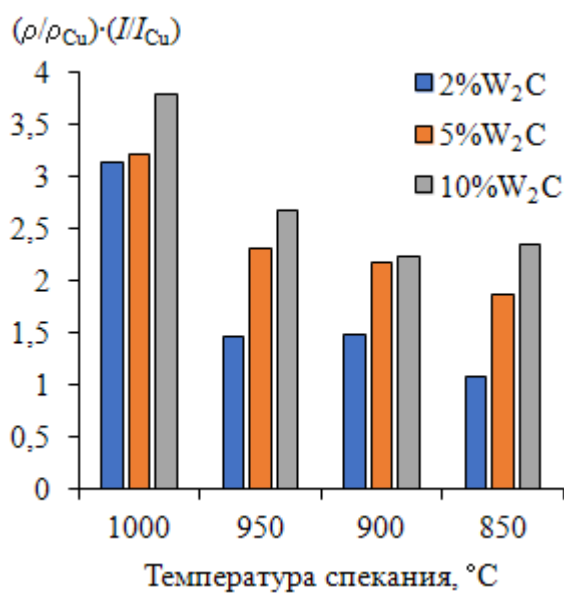
Таблица 3. Характеристики исследованных образцов в сравнении с эталоном

Характеристика	Состав			
	$T_{сп}, ^\circ C$	Cu+ +2 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +5 % W <sub>2</sub> C	Cu+ +10 % W <sub>2</sub> C
$H/H_{Cu}$	1 000	0,79	1,00	1,11
	950	0,86	0,86	1,00
	900	0,79	0,91	0,91
	850	1,00	1,00	1,00
$\sigma/\sigma_{Cu}$	1 000	0,37	0,33	0,29
	950	0,46	0,33	0,25
	900	0,44	0,30	0,30
	850	0,46	0,35	0,26
$I/I_{Cu}$ анод (катод)	1 000	1,16 (1,83)	1,06 (1,22)	1,10 (2,00)
	950	0,67 (0,87)	0,76 (1,13)	0,67 (1,08)
	900	0,65 (0,87)	0,65 (1,22)	0,67 (1,26)
	850	0,50 (0,78)	0,65 (1,39)	0,61 (1,30)

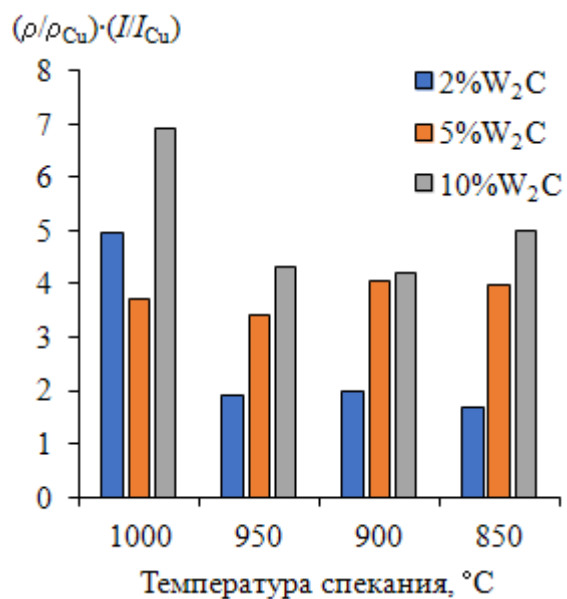
Как видно из табл. 3, электрическая проводимость исследованных материалов невысокая – 30...45 % от проводимости меди. Наибольшей электропроводностью (45 % от проводимости меди) обладают образцы, содержащие 2 % карбидов, спеченные при температурах ниже 1 000 °С. Проводимость порошкового композита определяется не только проводимостью компонентов и пористостью, но и состоянием поверхности гранул порошка [1]. Теоретическая модель двухкомпонентного порошкового материала [1] предсказывает для исследованных материалов проводимость в диапазоне 20...70 % от проводимости меди в зависимости от наличия оксидных пленок на поверхности гранул и степени их разрушения при прессовании и спекании композита.

Указанные выше образцы с содержанием 2 % карбида вольфрама имеют повышенную износостойкость (выше износостойкости меди в 1,5...2 раза при положительной полярности электрода и примерно в 1,2 раза – при отрицательной).

Очевидно, что качество электроконтактных материалов следует оценивать по комплексу их основных эксплуатационных характеристик. В режиме электроэрозионного изнашивания оптимальным сочетанием таких характеристик является малое удельное сопротивление и малый износ, поэтому за критерий сравнения исследованных материалов предложено принять произведение относительных величин  $(\rho/\rho_{Cu}) \cdot (I/I_{Cu})$ . Значения этого произведения представлены на рисунке. По величине принятого критерия в лучшую сторону выделяются материалы с содержанием 2 % карбида вольфрама, спеченные при температуре 850...950 °С.



(а)



(б)

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая оценка износостойкости композита в режиме электроэрозионного изнашивания, в отличие от проводимости материала, затруднительна по причине сложного характера процессов, протекающих в межэлектродном промежутке и на рабочей поверхности контакт-деталей. Поэтому экспериментальные результаты, приведенные в данной статье, будут полезны при выборе композиционного материала для электроконтактных устройств.

Как показали результаты исследований, введение карбида вольфрама в электроконтактный материал на медной основе повышает его износостойкость по сравнению с медью. Положительный эффект зависит как от процентного содержания карбида, так и от технологических параметров изготовления композита. 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. 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/TiO<sub>2</sub>) // *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  $\text{Cu} + \text{Cr}_3\text{C}_2$  // *Физика металлов и металловедение*. 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  $\text{Cu}-\text{Cr}_3\text{C}_2$  // *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. Королев А.П., Лоскутова А.Д. Исследование электрофизических свойств композита железо – карбид вольфрама // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2017. Т. 23. № 3. С. 535–540.

9. 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.

10. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения (справочник). М.: Металлургия, 1976. 560 с.

11. 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.

12. 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).

13. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия высокопрочных 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 вольфрама // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 5–11.

## **ELECTRICAL CONTACT PROPERTIES OF THE MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. COMPOSITE COPPER - TUNGSTEN 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 main electrical contact characteristics of a composite powder material based on a copper with different contents of tungsten carbide are presented. The electrical resistivity, hardness, and electrical erosive wear of the investigated 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).

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 3 (11), 2021*

*Keywords:* composite material, copper, 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. 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., Beletsky V.V., Nikolaev S.V., Kozhurin A.N., Kuchinsky M.Yu., Grigorieva O.A. Microstructure and properties of electrocontact material Cu- (ZnO / TiO<sub>2</sub>). *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 + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>. *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-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 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. Korolev A.P., Loskutova A.D. Investigation of the electrophysical properties of the iron - tungsten carbide composite. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. V. 23. No 3, pp. 535–540. (In Russian).
9. 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).
10. Samsonov G.V., Vinitskiy I.M. Tugoplavkiye soyedineniya (spravochnik). [Refractory compounds (reference book)]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 560 p.
11. RF patent 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. (In Russian).
12. 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).
13. 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.

Поступила в редакцию/received: 02.05.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;  
принята/accepted: 21.06.2021