

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.31

## ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТУГОПЛАВКИЕ КОМПОНЕТЫ. МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ МАТЕРИАЛ

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

Представлены результаты исследования основных электроконтактных характеристик композиционных порошковых материалов на медной основе, содержащих мелкодисперсный алмазный порошок и тугоплавкий компонент в виде порошка молибдена, вольфрама, хрома, твердого сплава ВК6М. 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, полярности образца (образец – анод и образец – катод) и взаимного расположения электродов. С помощью функции желательности Харрингтона выбран композит с оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик.

*Ключевые слова:* композиционный алмазосодержащий медный материал, тугоплавкие компоненты, электропроводность, электроэрозионный износ, функция желательности Харрингтона.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-5-13**

### ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе меди составляют основную часть применяемых электродных материалов [1]. Широкое использование меди в качестве материала для различных электрических контактов обусловлено удачным сочетанием ее физических свойств, определяющих эксплуатационные характеристики электроконтактных соединений.

Для контактных соединений, подверженных электроэрозионному изнашиванию под воздействием импульсного разряда, существует два критерия оценки их электроэрозионной стойкости. Если импульсный разряд принимает форму искрового, рекомендуется так называемый критерий Палатника [2]:

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{c_{\text{уд}} \lambda \gamma},$$

где  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления материала;  $c_{\text{уд}}$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – плотность. По величине этого критерия медь заметно уступает только вольфраму, практически не уступает молибдену и на 30 % превосходит серебро.

Для дуговой формы импульсного разряда рекомендуется другой критерий [2]:

$$R_{\text{эп}} = \frac{c_{\text{уд}} T_{\text{пл}}}{k_{\text{в}} U'_{\text{э}}},$$

где  $k_{\text{в}}$  – коэффициент выброса материала;  $U'_{\text{э}}$  – эквивалентное приэлектродное падение напряжения. Поскольку величины  $k_{\text{в}}$  и  $U'_{\text{э}}$  для типичных электроконтактных материалов отличаются незначительно, основным критерием электроэрозионной стойкости материала становится произведение теплоемкости на температуру плавления. По величине этого произведения медь лишь на 27 % уступает вольфраму, почти вдвое превосходя серебро. Кроме всего прочего, надо учесть хорошую обрабатываемость меди и ее относительно невысокую стоимость.

Тем не менее электроконтактные характеристики меди можно улучшить, создавая, например, на ее основе порошковые композиционные материалы. Достоинством порошковых композиций является практически аддитивное сочетание свойств компонентов. Вводя в композиционный материал на основе меди небольшое количество тугоплавких компонентов, можно значительно повысить его электроэрозионную стойкость без существенного снижения проводимости. В качестве таких компонентов используют тугоплавкие металлы, их карбиды и другие тугоплавкие соединения [3–5].

Цель данной статьи – провести сравнительные испытания на электроэрозионную износостойкость многокомпонентных композиционных материалов на основе меди и рекомендовать материал (материалы) с оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 использовали углерод в виде мелкодисперсного алмазного порошка и металлические порошки (молибден, вольфрам, хром, твердый сплав ВК6М).

Исследуемые образцы композитов получены прессованием смеси порошков с массовым содержанием алмазного порошка 2 % и металлического порошка 2 %, 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 температуре 1 000 °С ( $\pm 10$  °С). Плотность изготовленных образцов составляла  $\gamma = 8,7$  г/см<sup>3</sup>, пористость – 12–15 %.

Так как плотности компонентов исследуемых композиционных материалов значительно различаются, то массовые концентрации компонентов не всегда дают полное представление о составе материала. Объемные доли алмазного и металлического порошков в образцах составляют примерно 4 и 1 % соответственно.

Сравнительные испытания образцов на электроэрозионную износостойкость проводили на установке [6] в режиме импульсного разряда. В качестве эталона для сравнительных испытаний использовали монолитный образец из меди марки М1.

Образцы из исследуемых материалов контактировали с контрольным образцом – зондом из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм. Источником коммутируемой

электрической энергии в установке служит емкостный накопитель, максимальная величина коммутируемого заряда составляет 66 мКл за одну коммутацию. Продолжительность испытаний – 100 циклов коммутации.

Объем изношенного материала измеряли по диаметру и глубине кратера. Диаметр определяли под микроскопом, глубину – с помощью часового индикатора с погрешностью 0,01 мм. За нулевой уровень отсчета глубины кратера принимали исходную поверхность образца, а образовавшиеся вокруг кратера наплывы материала не учитывали. Таким образом, измеряли общий объемный износ 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). Дополнительно образцы были испытаны при различном взаимном расположении электродов (контрообразец располагался над образцом и наоборот). Дело в том, что на коэффициент выброса расплавленного металла из зоны контакта  $k_v$  влияют величина и соотношение различных сил: газодинамических, электромагнитных, сил поверхностного натяжения. Очевидно, что направление гравитационных сил – вглубь расплавленного материала или наружу – будет влиять на величину коэффициента выброса. Поскольку в условиях наших испытаний в основном изнашивается анод, то важно учитывать его расположение относительно направления гравитационных сил.

Измерение удельного сопротивления опытных образцов производилось четырехзондовым методом [7]. Зонды были изготовлены из вольфрама, расстояние между ними 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 удельные эрозии связаны очевидным соотношением  $I_m = I_V \cdot \gamma$ . Значения удельного электросопротивления  $\rho$  и удельной эрозии  $I_V$  приведены с доверительным интервалом при 95%-й доверительной вероятности. Твердость индентирования  $H$  соответствует нагрузке на индентор 10 Н.

Таблица 1. Состав и характеристики исследованных образцов

Характеристика	Состав материала					
	Cu+2%C	Cu+2%C+ +2%Mo	Cu+2%C+ +2%W	Cu+2%C+ +2%Cr	Cu+2%C+ +2%VK6M	Медь М1 (эталон)
$H$ , МПа	592					716
$\rho$ , $10^{-8}$ Ом·м	2,2±0,3	2,3±0,1	2,2±0,2	2,3±0,1	3,0±0,2	1,8
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – анод, внизу	3,7±0,2	4,0±0,2	2,2±0,9	3,8±0,6	2,9±0,6	6,1±0,1
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – катод, внизу	1,3±0,7	1,3±0,2	1,0±0,7	1,3±0,2	1,2±0,4	0,6±0,3
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл образец – анод, вверху	1,4±0,2	1,7±0,5	0,6±0,3	1,4±0,1	1,0±0,5	3,7±1,2
$I_V$ , $10^{-11}$ м <sup>3</sup> /Кл; образец – катод, вверху	0,2±0,0	0,2±0,0	0,7±0,3	0,8±0,2	0,8±0,2	1,1±0,3

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 примерно 80 % от твердости монолитного медного эталонного образца, проводимость (за исключением образца, содержащего ВК6М) – около 80 % от проводимости эталона. Для сравнения: проводимость чистого вольфрама составляет 30 % от проводимости меди, платины – 16 %. При этом и тот и другой широко используются в электрических контактах. В то же время электроэрозионная износостойкость исследованных композитов существенно (в 2–5 раз) превышает износостойкость меди.

Для более наглядного сравнения характеристик исследованных композитов и эталона в табл. 2 приведены результаты испытаний в виде относительных величин, где  $H/H_{Cu}$ ,  $\sigma/\sigma_{Cu}$  и  $I/I_{Cu}$  – относительные твердость, электропроводность и удельная эрозия исследованных материалов в сравнении с эталоном.

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

Характеристика	Состав материала				
	Cu+2%С	Cu+2%С+ +2%Мо	Cu+2%С+ +2%W	Cu+2%С+ +2%Cr	Cu+2%С+ +2%ВК6М
$H/H_{Cu}$	0,83				
$\sigma/\sigma_{Cu}$	0,82	0,78	0,82	0,78	0,6
$I/I_{Cu}$ образец и эталон – анод (катод), внизу	0,61 (2,2)	0,66 (2,2)	0,36 (1,7)	0,62 (2,2)	0,48 (2,0)
$I/I_{Cu}$ образец и эталон – анод (катод), сверху	0,38 (0,18)	0,46 (0,18)	0,16 (0,64)	0,38 (0,73)	0,27 (0,73)

Для электроконтактного материала, подверженного 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 рис. 1 и 2. По величине принятого критерия оптимальным является материал Cu+2%С+2%W.

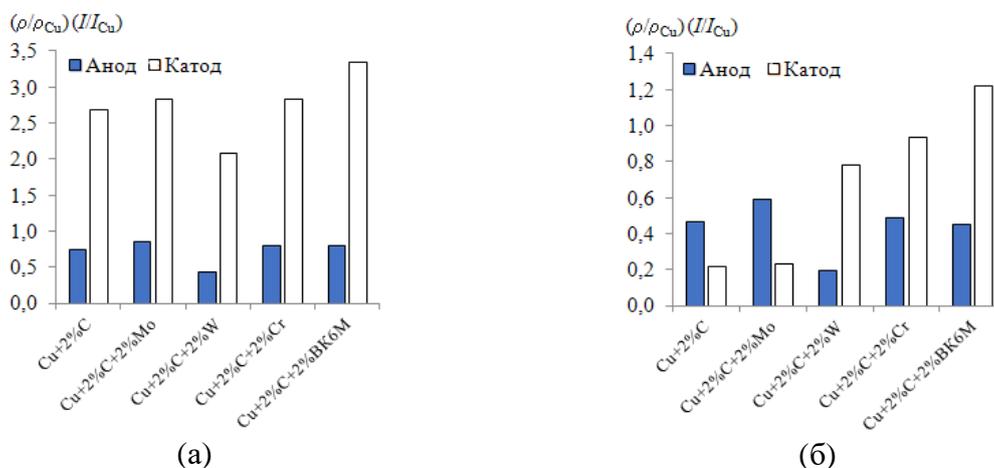


Рис. 1. Электроконтактные характеристики исследованных материалов в зависимости от полярности при различном взаимном расположении электродов: образец внизу (а); образец сверху (б)

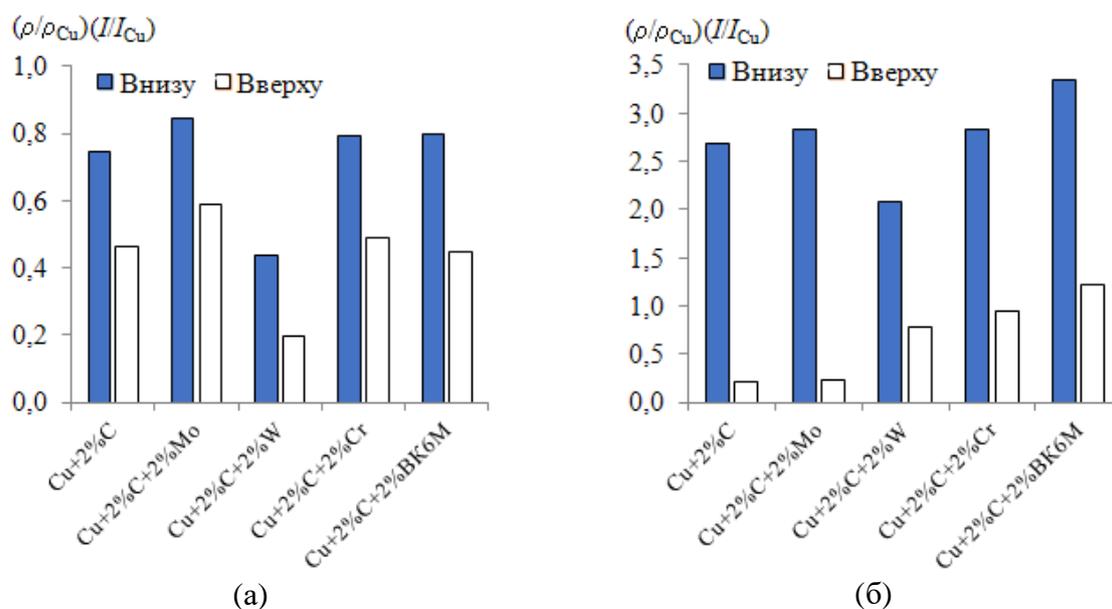


Рис. 2. Электроконтактные характеристики исследованных материалов в зависимости от взаимного расположения электродов при различной полярности: образец в качестве анода (а); образец в качестве катода (б)

Для более объективного сравнения испытываемых материалов используем так называемую функцию желательности Харрингтона [8], применяемую в самых различных по тематике научных исследованиях – от медицинских и экологических до экономических и исследований космической техники [9–14]. Функция желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \quad (1)$$

где  $d$  – количественная оценка желательности;  $y'$  – преобразованные безразмерные значения частных показателей. Обычно используется линейное преобразование  $y' = b_0 + b_1 y$ , где  $y$  – абсолютное значение показателя.

Шкала желательности  $0 \leq d \leq 1$  содержит пять диапазонов (табл. 3).

Таблица 3. Оценки по шкале желательности

Оценка желательности	Интервалы значений функции желательности
Отлично	0,80–1,00
Хорошо	0,63–0,80
Удовлетворительно	0,37–0,63
Плохо	0,20–0,37
Очень плохо	0,00–0,20

Обобщенная функция желательности рассчитывается на основании частных функций

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}. \quad (2)$$

Поскольку твердость всех исследованных материалов практически одинакова (см. табл. 1), частные функции желательности рассчитывались для двух показателей –

удельной проводимости  $\sigma = 1/\rho$  и удельной износостойкости  $I = 1/I_v$ . И в том и в другом случае желательны максимально возможные значения показателей.

Для перевода абсолютных значений проводимости и износостойкости (см. табл. 1) в безразмерные величины необходимо определить соответствующие значения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$ . Для этого воспользуемся рекомендациями, приведенными в работе [8]. Выберем в качестве эталонов два распространенных электроконтактных материала – медь и молибден. В качестве параметров  $y$  используем проводимость и износостойкость выбранных материалов (табл. 4). Назначим каждому из значений параметров  $y$  соответствующие значения функций желательности  $d$ . Назначенные значения  $d_1$  и  $d_2$  выбраны субъективно (это неизбежно при использовании функции желательности), но в целом мы считаем, что они соответствуют логике табл. 3. Зная два значения каждого из параметров  $y$  и два соответствующих значения функции желательности  $d$ , определяем для каждого из параметров коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$ .

Таблица 4. Характеристики эталонных образцов

Материал	Абсолютные значения параметров		Соответствующие значения функций желательности	
	$\sigma$ , МСм	$I$ , $10^{11}$ Кл/м <sup>3</sup>	$d_1$	$d_2$
Медь	55	0,16	0,9	0,37
Молибден	18	1,1	0,37	0,8

Затем по формулам (1) и (2) рассчитываем значения частных и обобщенной функций желательности. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения частных и обобщенной функций желательности

Функция желательности	Состав материала				
	Cu+2%С	Cu+2%С+ +2%Мо	Cu+2%С+ +2%W	Cu+2%С+ +2%Cr	Cu+2%С+ +2%ВК6М
$d_1$ (проводимость)	0,82	0,80	0,82	0,80	0,66
$d_2$ (износостойкость)	0,43	0,42	0,53	0,43	0,47
$D$ (обобщенная)	0,59	0,58	0,66	0,58	0,56

Наибольшее из приведенных в табл. 5 значений функции желательности наблюдается у материала Cu+2%С+2%W. Оно соответствует оценке «хорошо». Таким образом, подтверждается сделанный выше вывод о том, что данный материал обладает оптимальным для электроконтактного материала сочетанием свойств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатационные свойства меди как материала для электроконтактных соединений можно существенно улучшить, создавая на ее основе композиционные материалы с помощью технологии порошковой металлургии. При этом практически полностью сохраняется основное достоинство меди как электротехнического материала – ее высокая проводимость, но одновременно в несколько раз повышается электроэрозионная износостойкость. Для выбора материала с оптимальным сочетанием эксплуатационных свойств удобно использовать так называемую функцию желательности. Она позволяет не только провести сравнение материалов по нескольким параметрам в комплексе, но и оценить соответствие реальных характеристик данного материала ожидаемым (желательным) величинам. По величине

обобщенной функции желательности можно заключить, что из испытанных нами электроконтактных материалов оптимальным сочетанием электроконтактных характеристик обладает композит состава  $Cu+2\%C+2\%W$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оглезнева С.А., Ханов А.М., Оглезнев Н.Д. Исследование относительной эрозионной стойкости электродов-инструментов из композиционных порошковых материалов на основе меди // *Металлообработка*. 2016. № 5 (95). С. 16–20.
2. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Измайлов В.В., Новоселова М.В., Левыкин Д.А. Исследование эрозионной износостойкости электроконтактных материалов в режиме импульсного разряда. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр.* Тверь: ТГТУ, 2005. С. 112–116.
7. 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.
8. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии / сост. С.Л. Ахназарова, Л.С. Гордеев. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 76 с.
9. Самохвалов Ю.Я., Бурба О.И. Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 4. С. 77–85.
10. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2014. № 4. С. 101–113.
11. Любушин Н.П., Брикач Г.Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 18 (370). С. 2–10.
12. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // *Исследования наукограда*. 2012. № 1 (1). С. 25–28.
13. Харитонов Е.А., Михайлов О.В. Функция желательности и возможности ее применения для оценки научной деятельности в национальных исследовательских университетах // *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 14. С. 142–145.

14. Королева С.В. Практические аспекты использования функции желательности в медико-биологическом эксперименте // *Современные проблемы науки и образования*. 2011. № 6. С. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (дата обращения: 26.09.2021).

**Для цитирования:** Измайлов В.В., Новоселова М.В. Электроконтактные свойства материала, содержащего тугоплавкие компоненты. Многокомпонентный материал // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 5–13.

## **ELECTRIC CONTACT PROPERTIES OF MATERIAL CONTAINING REFRACTORY COMPONENTS. MULTICOMPONENT MATERIAL**

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 composite powder materials on a copper basis containing fine diamond powder and a refractory component in the form of a powder of molybdenum, tungsten, chromium, and a hard alloy ВК6М are presented. The electrical resistivity, hardness, and electrical discharge wear of the investigated samples are presented in absolute values and in a comparison with similar characteristics of the reference material – electrical copper – depending on the composition of the material, the polarity of the sample (sample – anode and sample – cathode) and the relative position of the electrodes. Using the Harrington desirability function, the composite with the optimum combination of operational properties is selected.

*Keywords:* composite diamond-containing copper material, refractory components, electrical conductivity, electroerosive wear, Harrington desirability function.

### **REFERENCES**

1. Oglezneva S.A., Khanov A.M., Ogleznev N.D. Investigation of the relative erosion resistance of electrodes-tools made of composite powder materials based on copper. *Metalloobrabotka*. 2016. No. 5 (95), pp. 16–20. (In Russian).
2. 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.
3. 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).
4. 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).
5. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Copper-based diamond-carbide composite. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 3 (11), pp. 12–19. (In Russian).

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 4 (12), 2021*

6. Izmailov V.V., Novoselova M.V., Levykin D.A. Investigation of erosion wear resistance of electrical contact materials in a pulsed discharge mode. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel i detaley mashin: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Tver: TSTU, 2005, pp. 112–116. (In Russian).

7. 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).

8. Ispolzovaniye funktsii zhelatelnosti Kharringtona pri reshenii optimizatsionnykh zadach khimicheskoy tekhnologii [Using the Harrington desirability function when solving optimization problems of chemical technology] / sost. S.L. Akhnazarova, L.S. Gordeev. Moscow: RKHTU im. D.I. Mendeleyeva, 2003. 76 p.

9. Samokhvalov Yu.Ya., Burba O.I. Evaluation of the effectiveness of scientific and scientific-technical projects based on the generalized Harrington function. *Sistemy upravleniya, navigatsii i svyazi*. 2018. No. 4, pp. 77–85. (In Russian).

10. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Integral assessment of landscape pollution using the Harrington desirability function. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2014. No 4, pp. 101–113. (In Russian).

11. Lyubushin N.P., Brikach G.E. The use of the generalized Harrington desirability function in multiparameter economic problems. *Ekonomicheskiiy analiz: teoriya i praktika*. 2014. No. 18 (370), pp. 2–10. (In Russian).

12. Pichkalev A.V. Harrington's generalized desirability function for comparative analysis of technical means. *Issledovaniya naukograda*. 2012. No. 1 (1), pp. 25–28. (In Russian).

13. Kharitonov E.A., Mikhailov O.V. Desirability function and the possibility of its application for the assessment of scientific activity in national research universities. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. V. 19. No 14, pp. 142–145. (In Russian).

14. Koroleva S.V. Practical aspects of using the desirability function in a biomedical experiment. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2011. No. 6, pp. 71. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=5270> (date accessed: 26.09.2021). (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 04.05.2021; после рецензирования/revised: 03.06.2021;  
принята/accepted: 15.07.2021