УДК 621.31

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА

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

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

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

Показаны возможности применения обобщенной функции желательности Харрингтона в качестве интегрального показателя качества электроконтактных композиционных порошковых материалов. Расчет обобщенной функции желательности произведен для ряда материалов на основе меди с учетом основных эксплуатационных характеристик: удельной проводимости, удельной электроэрозионной износостойкости и твердости. Данная функция является универсальным безразмерным критерием, не зависящим от размерности входящих в него величин. По наибольшему значению функции желательности выделены образцы с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств. Таковыми оказались образцы с большим процентным содержанием меди, износостойкость которых повышена введением небольшого количества тугоплавких компонентов – мелкодисперсных алмазов и хрома.

Ключевые слова: электроконтактный материал, порошковые композиты, медь, тугоплавкие компоненты, проводимость, электроэрозионная износостойкость, твердость, функция желательности.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-4-14-22

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальный выбор конструкционных и функциональных материалов – непременное условие надежной и эффективной работы современных технических устройств.

Одно из основных направлений современного материаловедения – получение материалов с заданными свойствами. В этом плане наиболее перспективными являются композиционные материалы (КМ), полученные методами порошковой металлургии. Порошковым технологиям практически нет альтернативы, например, в таком направлении, как изготовление электроконтактных материалов (ЭКМ). Подобные материалы позволяют сохранить в композите индивидуальные свойства компонентов и получить требуемое сочетание свойств, порой антагонистических, чего невозможно достичь в традиционных сплавах.

Номенклатура современных электроконтактных устройств, их конструктивное исполнение, области применения и условия эксплуатации весьма разнообразны. В зависимости от этого могут меняться и требования к материалам конкретных электроконтактных устройств. Тем не менее многие требования универсальны для всех ЭКМ. Так, единым требованием является высокая проводимость и малое контактное электросопротивление. К материалам для разрывных контактов добавляются требования высокой электроэрозионной износостойкости и стойкости к свариванию. В любых электроконтактных соединениях в той или иной степени присутствует механическое изнашивание. Стойкость материалов к механическому изнашиванию можно оценить по величине твердости материала: чем выше твердость, тем меньше механическая составляющая износа контакт-деталей.

В некоторых случаях для целенаправленного выбора ЭКМ предложены критерии, сочетающие в себе физические свойства материала, наиболее важные в конкретных условиях. Так, для материалов контактов, подверженных электроэрозионному изнашиванию при воздействии импульсного разряда, применяется критерий Палатника [1]:

$$\Pi = T_{\text{пл}} \sqrt{\lambda c_{\text{уд}} \gamma}\,, \tag{1}$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала; λ – теплопроводность; $c_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость; γ – плотность. Данный критерий рекомендуется в основном при искровой форме импульсного разряда.

Если в контакте преобладает дуговая форма импульсного разряда, рекомендуется другой критерий [1]:

$$R_{\text{эр}} = \frac{c_{\text{уд}} T_{\text{пл}}}{k_{\text{в}} U'_{\text{э}}}, \tag{2}$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент выброса материала; $U'_{\text{э}}$ – эквивалентное приэлектродное падение напряжения.

Для однокомпонентных ЭКМ применение критериев, выраженных уравнениями (1) и (2), обычно не вызывает затруднений. Входящие в уравнения величины, характеризующие физические свойства ЭКМ, можно найти в справочных материалах или научных публикациях. Однако для многокомпонентных ЭКМ, в том числе композиционных, входящие в формулы величины, как правило, неизвестны. Теоретические расчеты этих величин на основании свойств отдельных компонентов не всегда достоверны, а экспериментальное определение невозможно ввиду огромного количества сочетаний компонентов.

Кроме того, критерии (1) и (2) характеризуют только одну из основных эксплуатационных характеристик ЭКМ – электроэрозионную износостойкость, не учитывая проводимость и механические свойства материала.

В качестве ЭКМ, например, широко применяются КМ на основе меди. Основные достоинства меди как ЭКМ – высокая проводимость (в этом плане медь уступает только серебру), хорошая обрабатываемость и относительно невысокая стоимость. К недостаткам меди как ЭКМ относятся склонность к образованию поверхностных пленок с высоким сопротивлением, а также невысокие механические свойства и электроэрозионная износостойкость. Так, по электроэрозионной износостойкости медь в несколько раз уступает таким ЭКМ, как вольфрам и молибден.

Можно повысить механическую прочность, электроэрозионную и механическую износостойкость меди введением в медный КМ тугоплавких компонентов в виде чистых металлов или их химических соединений (карбидов, боридов, силицидов), углерода, графита [2–8].

Однако платой за повышение указанных электроконтактных свойств является снижение электропроводности материала, приводящее к повышенному нагреву контакт-деталей и, как следствие, снижению надежности электроконтактного соединения. Таким образом, при выборе состава ЭКМ приходится искать компромиссное решение, позволяющее получить приемлемые значения нескольких антагонистических свойств.

Примером подобного подхода могут служить работы [9–12], в которых проведено сравнение ЭКМ по совокупности эксплуатационных характеристик в виде

произведения ($\rho \cdot I_V$), где ρ – удельное сопротивление, измеряемое в Ом·м; I_V – удельный объемный износ (объем удаленного при разряде материала в расчете на 1 Кл коммутируемого заряда), измеряемый в м^3/Кл. Недостатком такого критерия является отсутствие в его составе параметра, характеризующего механические свойства ЭКМ. Кроме того, предпочтительна универсальная безразмерная форма критерия, не зависящая от размерности входящих в него величин.

В данной работе показана возможность применения так называемой функции желательности Харрингтона в качестве количественного критерия выбора состава композиционного ЭКМ с оптимальным комплексом основных эксплуатационных характеристик. Универсальная безразмерная функция желательности Харрингтона находит широкое применение при решении оптимизационных задач в самых различных по тематике научных исследованиях – от медицинских и экономических до исследований химической технологии и космической техники [13–19].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Функция желательности имеет вид

$$d = \exp[-\exp(-y')], \tag{3}$$

где d – количественная оценка желательности; y' – преобразованные безразмерные значения частных показателей. Обычно используется линейное преобразование

$$y' = b_0 + b_1 y, \tag{4}$$

где y – абсолютное значение показателя; b_0 и b_1 – коэффициенты. Значения коэффициентов b_0 и b_1 определяются на основании решения системы двух линейных уравнений (4), записанных для двух абсолютных значений соответствующего показателя y согласно рекомендациям работы [13].

Обобщенная функция желательности рассчитывается на основании частных функций

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} d_i}\ . \tag{5}$$

В нашем случае, частные функции желательности рассчитывались для трех показателей (параметров) y: удельной проводимости $\sigma = 1/\rho$; удельной объемной износостойкости $И = 1/I_V$; твердости H. Во всех случаях желательны максимально возможные значения показателей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состав исследованных материалов [9–12] приведен в табл. 1. В составе указано массовое содержание тугоплавких компонентов в процентах. Присутствие углерода в КМ означает, что при изготовлении образцов в качестве одного из исходных компонентов использовался мелкодисперсный порошок технических алмазов с размером частиц 8–12 мкм. Исходные компоненты в виде мелкодисперсных порошков подвергались прессованию и спеканию. Давление прессования составляло 700 МПа, спекание происходило в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.) при температуре $T_{сп}$ (табл. 1). Пористость образцов – 12–15 %.

Твердость образцов измерялась методом индентирования, а именно алмазным индентором со сферической вершиной (под нагрузкой 10 Н). Проводимость образцов

ЭКМ измерялась четырехзондовым методом. Испытания на электроэрозионную износостойкость проводились в режиме импульсного разряда. Контробразцом служил вольфрамовый зонд диаметром 1 мм. Характеристиками износостойкости были выбраны удельный объемный износ I_V и удельная объемная износостойкость И.

Таблица 1. Массив исследованных материалов

Номер	$T_{сп}$, °C	Состав материала	Номер	$T_{сп}$, °C	Состав материала
1	1 000	$Cu+2\%Cr_3C_2$	25	950	$Cu+2\%C+2\%Cr_3C_2$
2	950		26	900	
3	900		27	850	
4	850		28	950	$Cu+2\%C+2\%W_2C$
5	1 000	$Cu+5\%Cr_3C_2$	29	900	
6	950		30	850	
7	900		31	1 000	Cu+2%C
8	850		32	1 000	Cu+2%C+2%Mo
9	1 000	$Cu+10\%Cr_3C_2$	33	1 000	Cu+2%C+2%W
10	950		34	1 000	Cu+2%C+2%Cr
11	900		35	1 000	Cu+2%C+2%ВК6М
12	850		36	1 000	**Cu+5%C**
13	1 000	$Cu+2\%W_2C$	**37**	**950**	
14	950		38	900	
15	900		39	850	
16	850		40	950	Cu+10%C
17	1 000	$Cu+5\%W_2C$	41	900	
18	950		42	850	
19	900		43	800	Cu+20%Cr
20	850		**44**	**1 100**	**Cu+40%Cr**
21	1 000	$Cu+10\%W_2C$	**45**	**1 100**	**Cu+50%Cr**
22	950		**46**	**1 100**	**Cu+60%Cr**
23	900		47	1 100	Cu+80%Cr
24	850				

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве эталонов для построения шкалы желательности были выбраны распространенные ЭКМ – медь и молибден. Каждому из трех показателей эталонных материалов были назначены значения функций желательности (табл. 2), выбранные из пяти диапазонов [13]: 1–0,8 – отлично (допустимый и очень хороший уровень); 0,8–0,63 – хорошо (допустимый и хороший); 0,63–0,37 – удовлетворительно (допустимый и достаточный); 0,37–0,2 – плохо (недопустимый); 0,2–0 – очень плохо (неприемлемый).

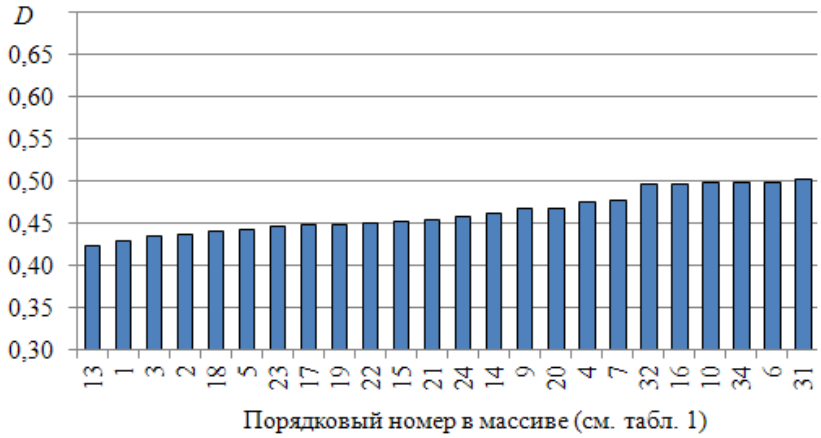
Таблица 2. Характеристики эталонных образцов

Параметры	Абсолютные значения *y*		Соответствующие значения функций желательности *d*		Обобщенная функция желательности *D*	
	Медь	Молибден	Медь	Молибден	Медь	Молибден
σ, МСм/м	55	18	0,95	0,70	0,51	0,73
И, 10^{11} Кл/м^3	0,16	1,1	0,37	0,80		
Н, МПа	716	1600	0,37	0,70		

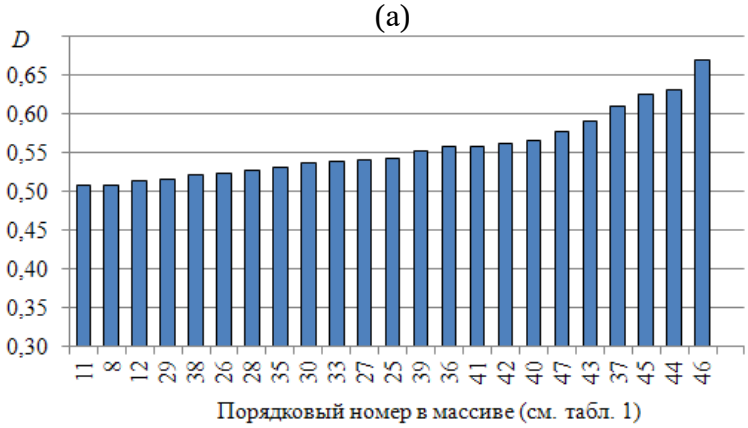
Медь характеризуется высокой проводимостью, уступая по этому критерию только серебру. Проводимость технической меди составляет примерно 95 % от проводимости серебра [20]. В то же время электроэрозионная износостойкость меди низкая (см. табл. 2).

Молибден обладает относительно высоким удельным сопротивлением (примерно в 3 раза выше, чем у меди), но является одним из лидеров по электроэрозионной стойкости среди чистых металлов. По этому критерию он незначительно уступает только вольфраму, превосходя в несколько раз медь и серебро [20, 21]. К достоинствам молибдена можно отнести также стойкость к свариванию и достаточно высокую твердость.

Результаты расчетов обобщенной функции желательности по формуле (5) для исследованных материалов (см. табл. 1) приведены на рисунке.



(а)



(б)

Распределение ЭКМ по значениям обобщенной функции желательности: начало гистограммы (а); продолжение (б)

Из рисунка видно, что все исследованные образцы ЭКМ попадают в диапазон значений функции желательности, соответствующий оценке «удовлетворительно» и более высоким оценкам (D > 0,37). Наибольшее значение обобщенной функции желательности (D > 0,6) имеют образцы (в табл. 1 выделены жирным шрифтом) с большим процентным содержанием меди, износостойкость которых повышена введением небольшого количества тугоплавких компонентов – мелкодисперсных алмазов и хрома. Наименьшее значение обобщенной функции желательности соответствует карбидосодержащим образцам.

При этом, как следует из табл. 1 и рисунка, значение функции желательности зависит не только от состава, но и от технологических параметров изготовления ЭКМ.

Абсолютные значения обобщенной функции желательности свидетельствуют о возможности улучшения эксплуатационных характеристик композиционных ЭКМ по сравнению с исследованными. Из трех выбранных параметров на обобщенную функцию желательности наибольшее влияние оказывает величина электроэрозионной износостойкости (коэффициент детерминации $R^2 \approx 0{,}82$, т.е. на 82 % значения обобщенной функции желательности определяются величиной фактора износостойкости). В направлении повышения электроэрозионной износостойкости целесообразно продолжить поиски оптимального состава композиционных ЭКМ для разрывных контактов, работающих в условиях преобладания электроимпульсного изнашивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на некоторую субъективность описанного метода, его успешное применение в различных естественно-научных, технических и гуманитарных приложениях позволяет говорить о нем как простом, наглядном и гибком инструменте оптимизации состава многокомпонентных ЭКМ. Включение дополнительных параметров оптимизации и придание им различного статистического веса дают возможность учесть особенности назначения и конкретных условий эксплуатации электроконтактного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

2. Измайлов В.В., Гершман И.С., Новоселова М.В., Харитонов Е.О. Порошковые материалы для электрических контактов // *Материаловедение*. 2007. № 8. С. 22–28.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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 + Cr_3C_2 // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 5. С. 530–537.

7. Еремина М.А., Трифонов И.С., Ломаева С.Ф., Тарасов В.В., Паранин С.Н., Заяц С.В. Структура и износостойкость нанокомпозитов Cu-Cr_3C_2 // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 6. С. 107–115.

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

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. 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.

11. 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.

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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // *Исследования наукограда*. 2012. № 1 (1). С. 25–28.

18. 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.

19. 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).

20. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 560 с.

21. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов [и др.]. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 384 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Интегральная оценка электроконтактных свойств композиционных материалов с использованием функции желательности Харрингтона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 4 (12). С. 14–22.

INTEGRAL EVALUATION OF ELECTROCONTACT PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS USING HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION

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

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: iz2v2@mail.ru

The possibilities of using the overall Harrington desirability function as an integral indicator of the quality of electrocontact composite powder materials are shown. The calculation of the overall desirability function was performed for a number of copper-based materials, taking into account the main operational characteristics: specific conductivity, specific electrical discharge wear resistance and hardness. This function is universal dimensionless criterion that does not depend on the dimensions of the quantities included in it. According to the highest value of the desirability function, the samples with the optimal complex of operational properties were selected. These turned out to be samples with a high percentage of copper, the wear resistance of which was increased by the introduction of a small amount of refractory components – fine diamonds and chromium.

Keywords: electrical contact material, powder composites, copper, refractory components, conductivity, electroerosive wear resistance, hardness, desirability function.

REFERENCES

1. 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.

2. 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).

3. 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).

4. 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).

5. 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 / TiO2). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2015. V. 85. No. 12, pp 88–93. (In Russian).

6. Eremina M.A., Lomaeva S.F., Paranin S.N., Demakov S.L., Elsukov E.P. Influence of the method of compacting on the structure and properties of bulk composites Cu + Cr_3C_2. *Fizika metallov i metallovedeniye.* 2016. V. 117. No. 5, pp. 530–537. (In Russian).

7. Eremina M.A., Trifonov I.S., Lomaeva S.F., Tarasov V.V., Paranin S.N., Zayats S.V. Structure and wear resistance of Cu-Cr_3C_2 nanocomposites. *Fizicheskaya mezomekhanika.* 2016. V. 19. No. 6, pp. 107–115. (In Russian).

8. 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).

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. 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).

11. 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).

12. Izmailov V.V., Novoselova M.V. Electrical contact properties of a material containing refractory components. Multicomponent material. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2021. No. 4 (12), pp. 5–13. (In Russian).

13. 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.

14. 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).

15. 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).

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

17. 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).

18. 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).

19. 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).

20. Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M. Elektricheskiye kontakty. [Electrical contacts]. Dolgoprudnyy: Intellekt, 2008. 560 p.

21. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu kontaktnykh chastey sil'notochnykh elektricheskikh apparatov [Handbook for the calculation and design of contact parts of high-current electrical devices] / N.M. Adonyev, V.V. Afanasyev, V.V. Borisov [et al]. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 384 p.

Поступила в редакцию/received: 20.08.2021; после рецензирования/revised: 27.09.2021; принята/accepted: 01.10.2021