

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК620.178

О СОЧЕТАНИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОММУТИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

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

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены сравнительные экспериментальные данные по электроэрозионной и абразивной износостойкости композиционных материалов на основе меди для коммутирующих электроконтактных устройств с тугоплавкими добавками, изначально предназначенными для повышения электроэрозионной износостойкости материала. В качестве добавок использованы мелкодисперсные технические алмазы, карбиды хрома и вольфрама и их сочетания. Эксперименты выявили значительную степень корреляции характеристик электроэрозионного и абразивного изнашивания исследованных материалов. Показано, что некоторые добавки, повышающие электроэрозионную износостойкость материала, увеличивают его абразивную износостойкость. Сделан вывод, что такие материалы целесообразно использовать для изготовления деталей коммутирующих электроконтактных устройств, конструкция которых предусматривает в процессе коммутации относительное скольжение контакт-деталей.

Ключевые слова: электроконтактные материалы, тугоплавкие добавки, электроэрозионная износостойкость, абразивная износостойкость, корреляция.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Практически все электроконтактные соединения, характеризующиеся разнообразными конструкциями, назначением и условиями эксплуатации, могут рассматриваться как триботехнические системы, надежность которых в значительной степени определяется процессами контактного взаимодействия поверхностей контакт-деталей, трения и изнашивания. В большей степени эти процессы влияют на надежность скользящих электрических контактов, однако отметим, что и в коммутирующих контактах они играют важную роль. Исключением являются только неразборные соединения (типа сварных или паяных), где отсутствует контакт двух поверхностей как трибологический объект. Задача обеспечения надежности электроконтактных соединений осложняется наличием сочетания механического изнашивания с электроэрозионным, причем каждый из этих видов изнашивания усугубляет негативные последствия другого. Классическим примером электро-контактного соединения, в котором проявляются отрицательные последствия как механического, так и электроэрозионного изнашивания, может служить скользящий электрический контакт токосъемника электрифицированного транспорта с контактным проводом.

Однако в некоторых конструкциях коммутирующих электрических контактов, функция которых – замыкание (размыкание) или переключение электрической цепи, также в течение цикла коммутации возникает скольжение рабочей поверхности одной контакт-детали по другой при одновременном действии прижимающей нагрузки [1, 2]. При этом часть поверхностных пленок, покрывающих рабочие поверхности, разрушается (происходит так называемое самоочищение контактов), что способствует снижению контактного электросопротивления и электроэрозионного износа. В контакте не защищенных пленками металлических поверхностей возможно адгезионное изнашивание. Многократное циклическое нагружение контакт-деталей в процессе коммутации приводит к усталостному изнашиванию. Некоторые исследователи отмечают определенное сходство между электроэрозионным и абразивным изнашиванием [3, 4]: и в том и в другом случае электрический разряд сопровождается возникновением ударной волны, под действием которой в материале контакт-деталей образуются трещины и скалывания.

Тем не менее электроэрозионное изнашивание в коммутирующих контактах в основном преобладает над механическим, поэтому в целях повышения надежности таких контактных соединений принимаются меры по снижению именно электроэрозионного износа.

Одним из ключевых факторов, обуславливающих надежность любого электроконтактного соединения, является выбор оптимального материала контакт-деталей, в том числе с точки зрения электроэрозионной износостойкости. Распространенным электроконтактным материалом является медь (в первую очередь из-за своей высокой электро- и теплопроводности). Для повышения электроэрозионной износостойкости используются композиции на основе меди, содержащие тугоплавкие добавки: вольфрам, молибден, их карбиды, мелкодисперсные алмазы и др. [2, 3, 5]. Имеются отдельные экспериментальные свидетельства о положительном влиянии таких добавок и на трибологические свойства электроконтактных материалов (см., например, [6]), однако в целом этот вопрос изучен недостаточно.

Цель данной работы – исследовать влияние тугоплавких добавок на механическую износостойкость электроконтактных материалов и оценить корреляцию характеристик их механической и электроэрозионной износостойкости.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследованию подвергались образцы шести электроконтактных композиционных материалов на основе меди Cu с добавками тугоплавких компонентов: мелкодисперсных алмазов C с размером зерен 8–12 мкм, карбида хрома Cr_3C_2 и карбида вольфрама W_2C . Состав и характеристики исследованных материалов приведены в табл. 1, в которой П – пористость; НВ – твердость по Бринеллю; ρ – удельное сопротивление. В качестве эталонного материала использована медь Cu (100 %) (медь марки М1, монолит). Композиционные материалы получены компактированием в пресс-форме с последующим спеканием при температурах 850...1 000 °С.

Для оценки электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов использовалась установка, схема рабочего узла которой приведена на рис. 1а. Вольфрамовый электрод 1 диаметром 1 мм, играющий роль эталонного зонда, периодически контактировал с цилиндрическим образцом 2 из исследуемого материала, закрепленным в латунной обойме 3 прижимной пластиной 4 с центральным отверстием.

Обойма закреплена на шпинделе 5, который перемещается микрометрическим винтом, что позволяет регулировать как раствор контактов, так и усилие нажатия в контакте зонда 1 с образцом 2. Частота коммутаций (число циклов замыкание – размыкание) 20 коммутаций в минуту. Раствор контакта равен 7 мм, продолжительность включения – 50 %. Нагрузка на вольфрамовый электрод формировалась за счет разновесов и равнялась во всех экспериментах 0,5 Н. Импульсный разряд в контакте зонда с образцом создавался с помощью емкостного накопителя энергии. Энергия в импульсе 6,5 Дж, величина коммутируемого заряда $Q \approx 66$ мКл.

Таблица 1. Состав и свойства материалов

Материал	П	НВ, МПа	ρ , нОм·м
Cu + C (5 % мас.)	0,12	650	38,7
Cu + C (10 % мас.)	0,15	716	61,3
Cu + C (2 % мас.) + Cr ₃ C ₂ (2 % мас.)	0,15	650	34,9
Cu + C (2 % мас.) + W ₂ C (2 % мас.)	0,13	620	36,2
Cu + Cr ₃ C ₂ (5 % мас.)	0,10	519	26,9
Cu + Cr ₃ C ₂ (10 % мас.)	0,15	620	32,2
Cu (100 %)	0	716	17,6

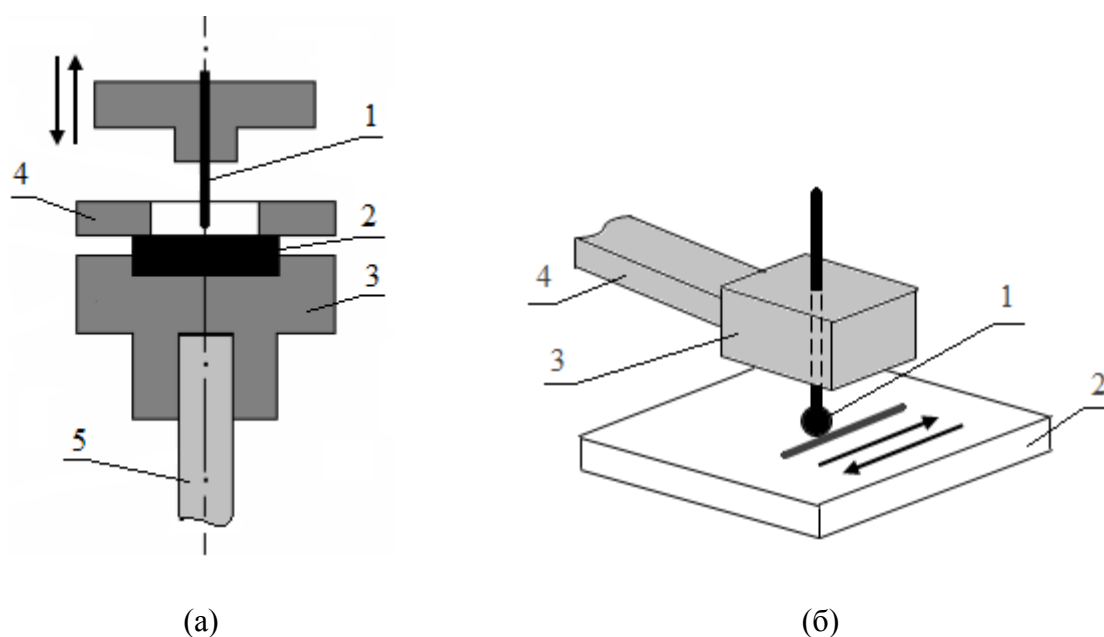


Рис. 1. Схемы установок для испытаний материалов на изнашивание: электроэрозионное (а); механическое (абразивное) (б)

После испытаний измеряли линейный износ образцов, т. е. уменьшение длины вольфрамового зонда и глубину лунки на образце из исследуемого материала. Точность измерений 0,01 мм. В качестве характеристики электроэрозионной износостойкости используют объемную и массовую эрозию в расчете на один цикл коммутации, объемную и массовую эрозию в расчете на единицу коммутируемого заряда Q и другие величины [7, 8]. В данной работе мы выбрали в качестве характеристики электроэрозионной износостойкости линейный износ за один цикл коммутации i_{he} – величину,

аналогичную такой же характеристике для механического изнашивания. Линейная i_{he} и объемная i_{ve} величины эрозии за один цикл связаны очевидной функциональной зависимостью:

$$i_{he} = \frac{i_{ve}}{\pi r^2},$$

где r – радиус лунки, практически равный радиусу зонда.

Испытания на механическое изнашивание регламентируются целым рядом отечественных и зарубежных стандартов. Кроме того, известно достаточно большое количество нестандартных методик таких испытаний [9]. Для данного исследования оптимальным является метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы. Согласно ГОСТ 17367-71, цилиндрический образец исследуемого материала трется торцевой поверхностью о плоскую поверхность абразивной бумаги. Недостатк метода – малый диаметр цилиндрического образца (всего 2 мм). От этого недостатка свободна схема испытаний по стандарту *ASTM G 133 “Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear”* («Стандартный метод испытаний на износ при линейном возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости»). В этом методе шаровой образец диаметром примерно 9,5 мм совершает возвратно-поступательное скольжение по плоскому образцу с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Однако в данном случае ни шаровой, ни плоский образец не содержат абразивные частицы.

Примененный в данной работе метод испытаний материалов на абразивную износостойкость сочетает достоинства двух описанных выше методов. Изнашивание образцов электроконтактного материала проводили о закрепленные абразивные частицы по схеме *шар – плоскость* (см. рис. 1б). В качестве шарового контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40–50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку в 0,5 Н. Износостойкость определяли в процессе возвратно-поступательных движений шарового контробразца 1 по плоской поверхности исследуемого образца 2. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца, закрепленного в обойме 3, сопряженной с электромеханическим приводом 4 с питанием от генератора импульсов, осуществлялись с частотой 20 Гц. За один период (цикл) путь трения составлял 5–8 мм. Принимая во внимание возможность так называемого засаливания абразива, когда частицы изнашиваемого материала заполняют пространство между абразивными частицами, вследствие чего скорость изнашивания существенно снижается, была проведена серия предварительных экспериментов в течение различных промежутков времени для выбора продолжительности испытаний. Было установлено, что основной прирост износа происходит примерно в первые тридцать минут, затем скорость изнашивания уменьшается, поэтому длительность испытания была выбрана равной 30 мин.

После испытаний проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам (перпендикулярно направлению движения шарового контробразца) измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали характеристики изнашивания исследуемого покрытия. Для описания механической износостойкости использовали стандартные параметры по ГОСТ 27674-88 (линейную I_h и объемную I_v интенсивности изнашивания, среднюю скорость изнашивания u), а также нестандартные: линейный износ за цикл i_h , безразмерный коэффициент износа k и объемную интенсивность изнашивания в расчете на единицу нормальной нагрузки

(размерный коэффициент износа) [10]. Последние два параметра связаны с известным в трибологии уравнением Арчарда:

$$I_V = \frac{V}{L} = k \frac{N}{H},$$

где V – объем изношенного материала; L – путь трения; N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость (микротвердость) более мягкого материала пары трения. Отношение $k / H = I_V / N$ называют размерным коэффициентом износа [10], обозначим его I_w .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Величины механического и электроэрозионного износа исследованных материалов приведены в табл. 2. Как видно из нее, введенные в электроконтактный материал тугоплавкие добавки, как и ожидалось, существенно повысили его электроэрозионную износостойкость (от 2 до 6 раз). Важно, что некоторые добавки заметно уменьшили также механический (абразивный) износ.

Таблица 2. Величины механического и электроэрозионного износа

Материал	Механическое изнашивание						Электрич. эрозия i_{he} , мкм/цикл
	$I_h, 10^{-7}$	$I_V, 10^{-14} \text{ м}^2$	$I_w, 10^{-14} \text{ м}^2/\text{Н}$	$u_3, \text{мм}^3/\text{ч}$	$i_h, \text{нм/цикл}$	$k, 10^{-7}$	
Cu + C (5 % мас.)	1,07	3,63	7,25	0,021	0,87	4,71	1,94
Cu + C (10 % мас.)	0,68	2,64	5,28	0,016	0,56	3,78	1,06
Cu + C (2 % мас.) + Cr ₃ C ₂ (2 % мас.)	1,84	4,24	8,49	0,017	1,02	5,52	2,06
Cu + Cr ₃ C ₂ (5 % мас.)	4,03	8,50	17,0	0,029	1,91	8,83	3,11
Cu + Cr ₃ C ₂ (10 % мас.)	2,72	7,10	14,2	0,028	1,48	8,80	2,44
Cu + C (2 % мас.) + W ₂ C (2 % мас.)	1,93	6,05	12,1	0,030	1,35	7,50	2,06
Cu (100 %)	2,50	6,67	13,3	0,026	1,33	9,55	6,72

Визуальное сравнение величин механического и электроэрозионного износа для различных материалов (рис. 2) показывает несомненную корреляцию механической и электроэрозионной износостойкости.

Для уточнения степени этой корреляции были применены непараметрические критерии, а именно коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ρ и Кендалла τ [11]. Указанные критерии использованы, во-первых, из-за малого объема выборки, во-вторых, ввиду нетребовательности их к виду функции распределения случайной величины в выборке. Значения коэффициентов ранговой корреляции величин механического и электроэрозионного износа приведены в табл. 3.

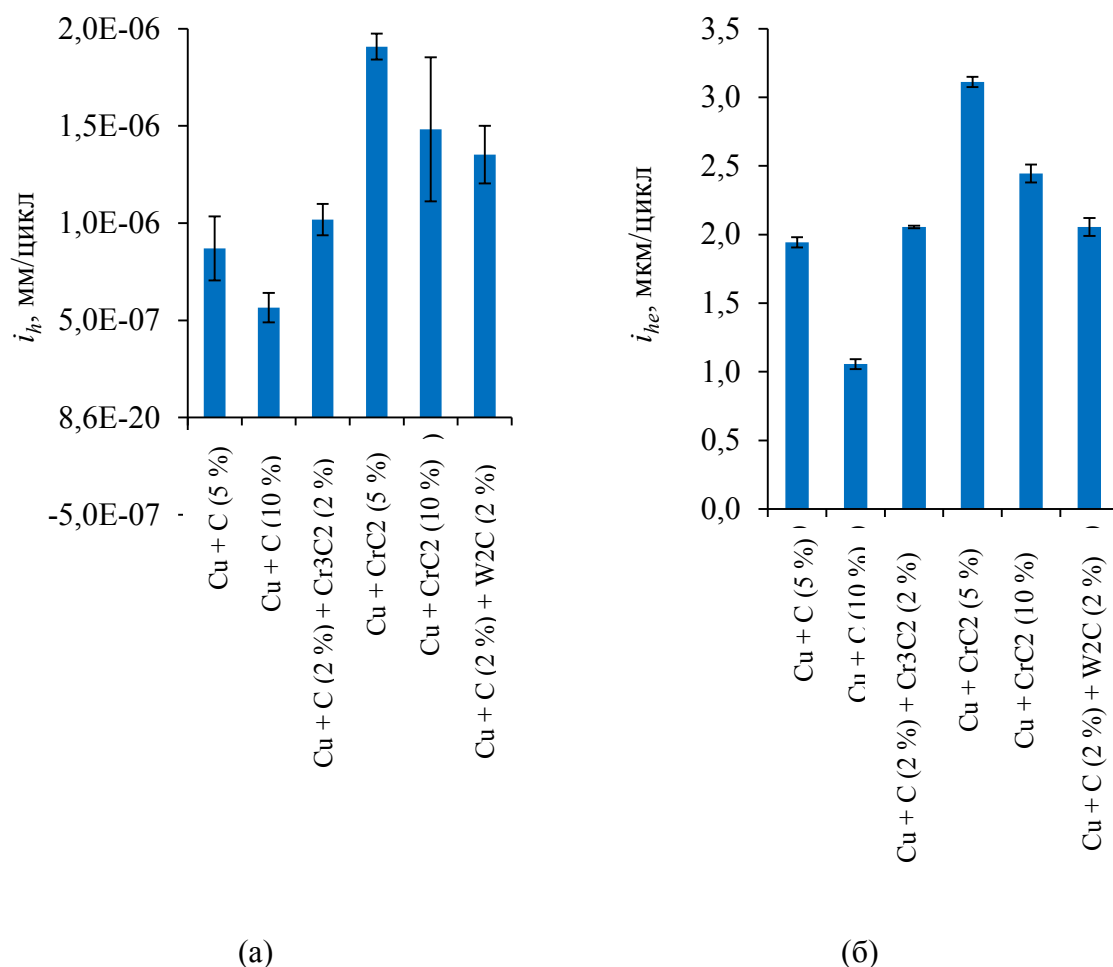


Рис. 2. Величины износа: механического (а); электроэрозионного (б)

Таблица 3. Коэффициенты ранговой корреляции

Название коэффициента	Зависимые переменные		
	i_h-i_{he}	$k-i_{he}$	I_w-i_{he}
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ	0,94	0,92	0,94
Коэффициент ранговой корреляции Кендалла τ	0,89	0,85	0,89

Все коэффициенты корреляции статистически значимы на уровне $p < 0,05$ и соответствуют высокой степени корреляции.

Рис. 3 иллюстрирует корреляцию параметров электроэрозионного и механического изнашивания в абсолютных величинах. Еще более выражена корреляция относительных параметров изнашивания (рис. 4), которые представляют собой отношение абсолютного параметра материала к соответствующему абсолютному параметру монолитной меди (см. табл. 1).

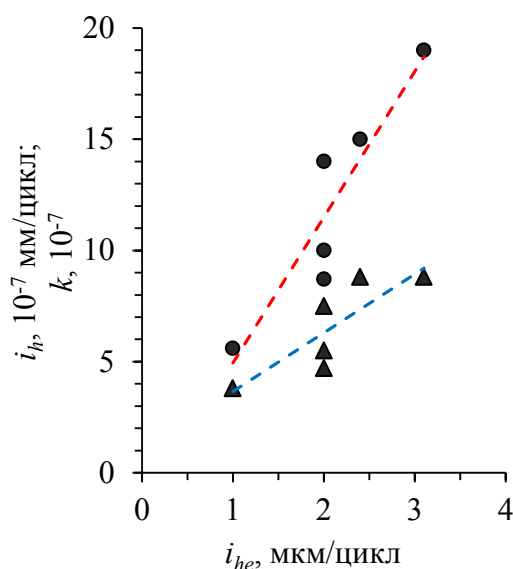


Рис. 3. Корреляция параметров электроэрозионного i_{he} и механического изнашивания:
● – i_h ; ▲ – k

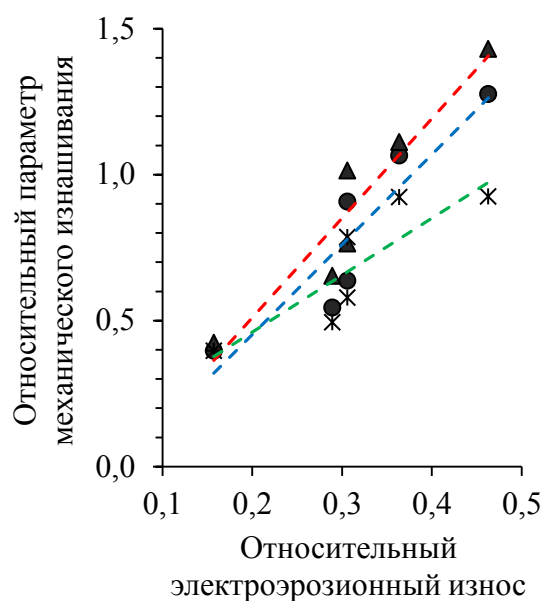


Рис. 4. Корреляция относительных параметров электроэрозионного i_{he}/i_{heCu} и механического изнашивания:
● – I_w / I_{wCu} ; ▲ – i_h / i_{hCu} ; × – k / k_{Cu}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что тугоплавкие компоненты, входящие в состав композиционного электроконтактного материала, повышают не только его электроэрозионную износостойкость, но в определенных случаях и механическую (в частности, абразивную). Между параметрами износостойкости в электроэрозионном и абразивном изнашивании выявлена высокая степень корреляции. Результаты данного исследования дают возможность заключить, что в коммутирующих (разрывных) электроконтактных соединениях, где конструкция предусматривает относительное скольжение контакт-деталей, благодаря выбору оптимального материала можно обеспечить сочетание требуемой электроэрозионной и механической износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов Н.Н. Дзекцер, В.В. Измайлов, Л.Н. Карпенко, И.П. Мирошников, А.М. Сегаль, В.Н. Федоров, Ю.А. Филиппов, Ю.А. Фоминых, Э.Н. Якунин; под ред. В.В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 381 с.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.
4. Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск: Аналитика Родис, 2016. 330 с.
5. Иванов В.В. Физико-химические основы технологии и материаловедение порошковых электроконтактных композитов: учебное пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 234 с.

6. Московский С.В., Почетуха В.В., Романов Д.А., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства электроэрозионностойких покрытий системы WN-WC-W₂C_{0,84}-Ag, полученных комбинированным методом // *Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» и LXIII Международной конференции* / отв. ред. Д.Л. Мерсон. Тольятти: ТГУ, 2021. С. 222.

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

8. Намитокоев К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.

9. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.

10. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

11. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

Для цитирования: Измаилов В.В., Новоселова М.В. О сочетании электроэрозионной и механической износостойкости материалов для коммутирующих электроконтактных соединений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2025. № 2 (26). С. 5–12.

ON THE MATCHING OF ELECTROEROSIVE AND MECHANICAL WEAR RESISTANCE OF MATERIALS FOR SWITCHING ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS

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

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

The article presents comparative experimental data on the electrical erosion and abrasive wear resistance of copper-based composite materials for switching electrical contact devices with refractory additives, originally intended to increase the electrical erosion wear resistance of the material. Finely dispersed technical diamonds, chromium and tungsten carbides and their combinations were used as additives. The experiments revealed a high degree of correlation between the characteristics of electrical erosion and abrasive wear for the studied materials. It is shown that some additives that increase the electrical erosion wear resistance of the material simultaneously increase its abrasive wear resistance. It is advantageous to use such materials for the manufacture of parts of switching electrical contact devices, the design of which permits a relative sliding of the contact parts during the switching process.

Keywords: electrical contact materials, refractory additives, electrical erosion wear resistance, abrasive wear resistance, correlation.

Поступила в редакцию/received: 23.01.2025; после рецензирования/revised: 07.02.2025;
принята/accepted: 12.02.2025