

УДК 621.357.77  
EDN: LAHNEZ

PACS: 81.15.-z



## Особенности электроэрозионных процессов контактных гальванопокрытий на основе бинарных сплавов с вольфрамом и молибденом

Г. П. Гололобов, С. А. Круглов, Д. В. Суворов, Е. В. Сливкин

*Обсуждаются особенности процессов электромеханической эрозии контактных покрытий на основе сплавов Co-W, Ni-W и Ni-Mo при их испытаниях в режиме коммутации резистивной нагрузки при токе 1 А, рабочем напряжении 12 В, частоте – 10 Гц. Проведен анализ динамики изменения контактного электрического сопротивления экспериментальных контактных групп с исследуемыми типами покрытий. Установлена взаимосвязь между морфологическими характеристиками, характеризующими развитость и регулярность структуры микрорельефа контактных покрытий на основе исследуемых сплавов, величиной их контактного сопротивления, а также интенсивностью эрозионного износа в ходе коммутационного цикла.*

*Ключевые слова:* контактное покрытие, электроосаждение, сплавы тугоплавких металлов, микрорельеф, контактное сопротивление, фактическая площадь контакта, электрическая эрозия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-72-79

### Введение

Для обеспечения основных функциональных характеристик коммутационных устройств и увеличения эксплуатационного ресурса традиционно используют контактные покрытия [1]. В связи с этим к контактным покрытиям предъявляется целый ряд требований.

Современные исследования показывают, что этим требованиям могут удовлетворять перспективные гальванопокрытия на основе бинарных сплавов тугоплавких металлов – молибдена и вольфрама с металлами группы железа – никелем и кобальтом. В работе [2] представлены результаты обширного исследования условий осаждения, способствующих получению покрытий данного типа с достаточно однородной и мелкокристаллической структурой сплава, исключая образование дефектов и трещин при толщине более 6 мкм. Зафиксированы высокие значения микротвердости гальванопокрытий. Коррозионная стойкость гальванопокрытий исследована в работе [3].

Электрические свойства покрытий этого типа при ресурсных испытаниях в воздушной атмосфере с силой контактного нажатия в диапазоне сотни – тысячи мН, (возможная область применения – электромагнитные реле, кнопки, микропереключатели и др.) не изучались. Этим и обусловлена актуальность проведения исследования, представленного в ра-

Гололобов Геннадий Петрович, доцент, к.т.н.

E-mail: golobov.gennady@yandex.ru

Круглов Сергей Александрович, зав. кафедрой, д.т.н.

E-mail: kruglov.s.a@rsreu.ru

Суворов Дмитрий Владимирович, доцент, к.т.н.

E-mail: dmitriy\_suvorov@mail.ru

Сливкин Евгений Владимирович, доцент, к.т.н.

E-mail: e.slivkin@mail.ru

ФГБОУ ВО «РГРТУ».

Россия, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Статья поступила в редакцию 30.12.2023

После доработки 25.01.2024

Принята к публикации 29.01.2024

Шифр научной специальности: 2.2.2.

боте [4]. В статье приведены результаты исследования коммутационных свойств контактных групп экспериментального электромагнитного реле с гальванопокрытиями на основе сплавов Ni-W, Co-W, Ni-Mo. С использованием специально разработанного стенда, получены и проанализированы зависимости изменения контактного электросопротивления ( $R_c$ ) от числа циклов коммутации.

Установлено, что нанесение контактных покрытий позволяет стабилизировать разброс значений  $R_c$  и существенно увеличивает коммутационный ресурс серебряной контактной группы с  $2,3 \times 10^6$  до  $4,5 \times 10^6$  коммутаций. При этом в зависимости от типа контактного покрытия динамика изменения  $R_c$  и коммутационный ресурс экспериментальных контактных групп существенно различаются.

Настоящая работа является продолжением описанного выше исследования и посвящена анализу особенностей процессов электромеханической эрозии контактных гальванопокрытий на основе бинарных сплавов тугоплавких металлов в ходе коммутационных испытаний.

### Методика эксперимента

Технические особенности экспериментального электромагнитного реле с контакт-

ными группами с покрытиями на основе сплавов Co-W, Ni-W, Ni-Mo и испытательного стенда, а также характеристики гальванопокрытий, условия их нанесения и методики исследования подробно описаны в [4]. Элементный состав образцов исследовался с использованием рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного детектора INCA X-MAX (Oxford Instruments, США). Для контурного изучения поверхности, определения ее геометрических параметров и локальной структуры был привлечен метод атомно-силовой микроскопии. Использовался СЗМ «NTEGRA Spectra» (NT-MDT, Россия). Определялись основные морфологические характеристики и параметры исследуемых участков, такие как перепад высот, среднеарифметическая шероховатость и др.

Коммутационные испытания проходили при токе 1 А, напряжении 12 В и частоте коммутации – 10 Гц, в режиме коммутации резистивной нагрузки.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Вид зависимостей среднего значения  $R_c$  от числа коммутационных циклов  $n$  для покрытий исследованных типов (рис. 1) соответствует известным данным, представленным в работах [5–7].

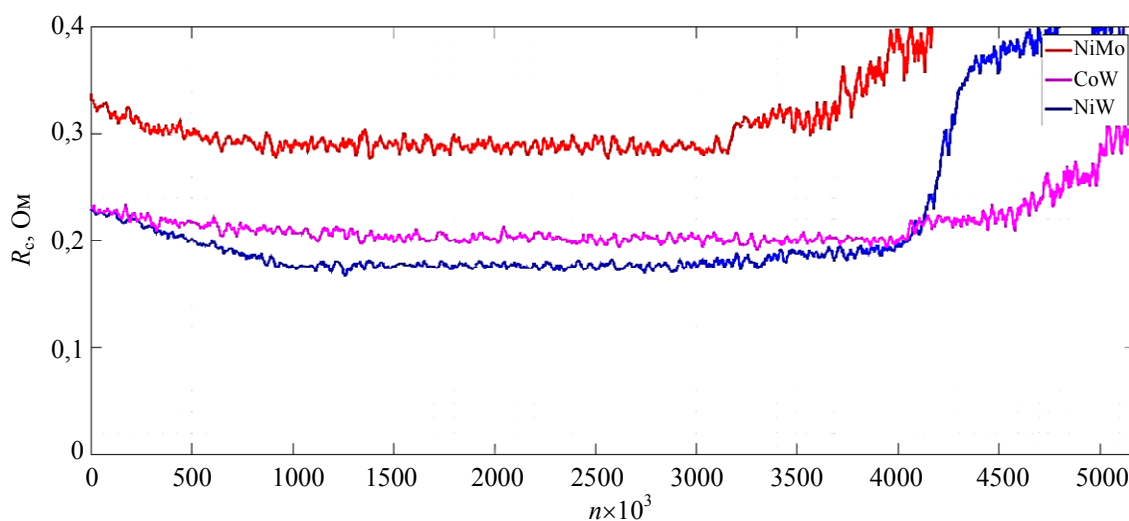


Рис. 1. Динамика изменения контактного электросопротивления экспериментальных контактных групп с покрытиями на основе сплавов Ni-W, Co-W и Ni-Mo в ходе коммутационных испытаний

Представленные кривые и полученные в работе [4] результаты показывают, что минимальным значением  $R_c$  на уровне 0,15~0,16 Ом и минимальным разбросом значений параметра  $\Delta R_c = 0,05\sim 0,06$  Ом на основной части испытательного интервала характеризуется покрытие сплавом Ni-W. А максимальные значения данного параметра зафиксированы у контактной группы с покрытием сплавом Ni-Mo. Наибольший коммутационный ресурс обеспечивают также покрытия на основе сплавов с W.

Анализ элементного состава поверхности контактных групп с исследуемыми типами покрытий, прошедших коммутационные тесты, показал появление выраженного углеродного пика во всех случаях. Резистивные пленки на основе углерода могут существенно увеличивать  $R_c$ .

Сопоставление амплитуды пиков позволило предположить, что количество углерода во всех четырех случаях соизмеримо. Это дает основания полагать, что существенная разница в коммутационном ресурсе исследуемых типов контактных покрытий (для контактной группы с покрытием сплавом Ni-W  $n = 4 \times 10^6$ , для контактной группы с покрытием сплавом Ni-Mo  $n = 3,4 \times 10^6$ , а для группы с покрытием сплавом Co-W  $n = 4,25 \times 10^6$ ) слабо связана с образующимися на контактирующей поверхности углеродными пленками. Принимая во внимание представленные в работе [4] исследования морфологических изменений контактирующих поверхностей в ходе коммутационного цикла, являющихся следствием процессов переноса расплавленного материала. А также учитывая значительную силу нажатия контактных пружин реле на уровне 0,25 Н, способствующую механическому разрушению образующихся в ходе коммутаций резистивных пленок, можно предположить, что основным фактором, влияющим на повышение  $R_c$  и определяющим коммутационный ресурс контактных групп, является значительное изменение фактической площади контакта (ФПК).

В исследуемом режиме коммутации могут наблюдаться интенсивные электроэрозионные процессы. Это подтверждают работы [8–10]. Можно выделить основные из возможных механизмов участвующих в этом процессе: механический износ материала; механиче-

ский перенос материала в результате размягчения и/или плавления; полевое испарение и полевая эмиссия; ионизация паров металла в межконтактном зазоре; электромиграция; формирование «металлических мостиков».

Рассмотрим особенности эрозионных процессов исследуемых типов контактных гальванопокрытий, определяющих их коммутационный ресурс и динамику изменения  $R_c$ .

Для сравнительного анализа необходимо отметить, что все типы гальванопокрытий имели одинаковую толщину – около 6 мкм. Условия осаждения в каждом случае обеспечивали отсутствие дефектов (трещин и пор), хорошую адгезию к подложке, равномерность нанесения, однородную и мелкокристаллическую структуру сплава (с отсутствием побочных фаз и структурных несовершенств). Размер кристаллита по данным рентгеновской дифрактометрии составлял 9–10 нм. Была получена максимально возможная микротвердость на уровне 485 HV и 483 HV для покрытий на основе сплавов Ni-Mo и Ni-W соответственно, а также 490 HV для покрытия на основе сплава Co-W. Измеренное четырехзондовым методом удельное электрическое сопротивление  $\rho$  рассматриваемых гальванопокрытий сопоставимо с приведенными в справочной литературе данными (с учетом процентного соотношения компонентов сплава) и имеет следующие значения:  $\rho_{Ni-W} = 6,7 \times 10^{-8}$  Ом·м;  $\rho_{Co-W} = 7,4 \times 10^{-8}$  Ом·м;  $\rho_{Ni-Mo} = 7,1 \times 10^{-8}$  Ом·м.

Как видно из представленных данных основные структурные, физико-механические и электрофизические характеристики исследуемых гальванопокрытий, определяющие в значительной степени их эрозионную стойкость, имеют очень близкие значения. При этом в одинаковых условиях коммутации коммутационный ресурс и динамика изменения  $R_c$  контактных групп с покрытиями на основе сплавов Ni-W, Co-W, Ni-Mo имеют существенные различия.

Исходя из этого и анализируя возможные факторы, влияющие на эрозионный износ контактирующих поверхностей в ходе коммутаций, следует рассмотреть особенности структуры и морфологии поверхностного микрорельефа исходных контактных пар (до испытаний), так как он формирует кон-

тактные пятна и ФПК, которые в свою очередь определяют проводимость контакта, сопротивление стягивания и теплофизические процессы в зоне контактирования [13, 14].

При протекании электрического тока через проводящие пятна контакта, значения температуры в этих областях будут превышать объемную температуру. В этом случае сопротивление стягивания  $R_c$  выражается через сопротивление контакта по всей его номинальной площади формулой:

$$R_c = R_c(0) \left[ 1 + 2 / 3 \alpha (T_c - T_b) \right], \quad (1)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, член  $(T_c - T_b)$  – температура перегрева, как было отмечено в [15], связан с падением напряжения на контакте  $U$  формулой Хольма:

$$T_c^2 - T_b^2 = U^2 / 4L \quad (2)$$

где  $L$  – число Видеманна-Франца-Лоренца, равное  $2,45 \times 10^{-8}$  В/К<sup>2</sup>.

Из этого выражения следует, что даже при малых  $U$  значения температуры перегрева могут быть достаточными для плавления зон контактных пятен. Это может способствовать образованию мостиков из расплавленного металла [16, 17]. Которые при последующем охлаждении и затвердевании, в результате возникновения внутренних напряжений, образуют микротрещины [14, 18]. Что приводит к фреттингу и разрушению контакта. Перегрев контактных зон также способствует их окислению, что в свою очередь уменьшает площадь проводящих пятен.

На рисунках 2 и 3 представлены АСМ-изображения типичных участков поверхности покрытий на основе сплавов Ni-W, Co-W и Ni-Mo. Морфологические характеристики и параметры профилей поверхности, характеризующие развитость и регулярность структуры микрорельефа приведены в таблице.

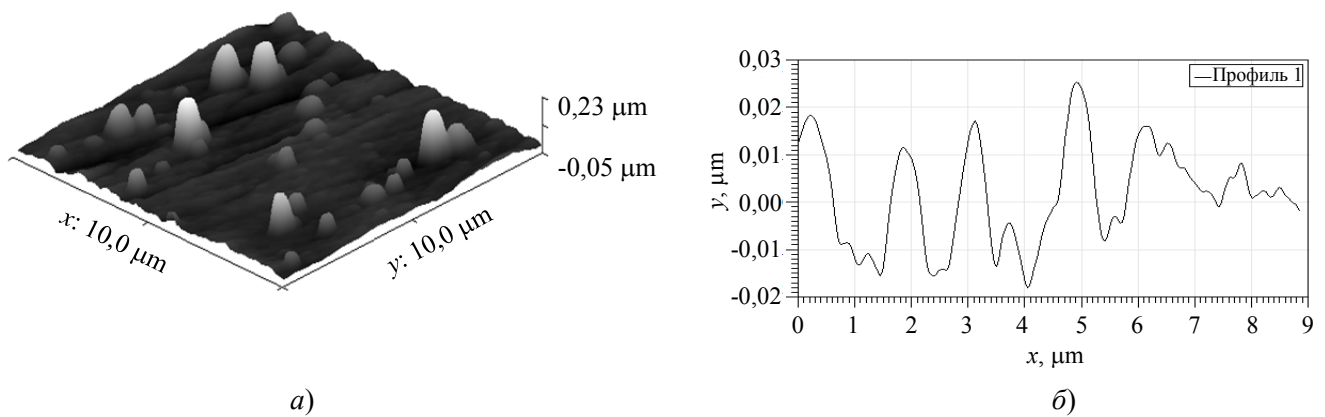


Рис. 2. АСМ-изображение типичного участка контактирующей поверхности с покрытием на основе сплава Ni-W (а) и профиль его сечения (б)

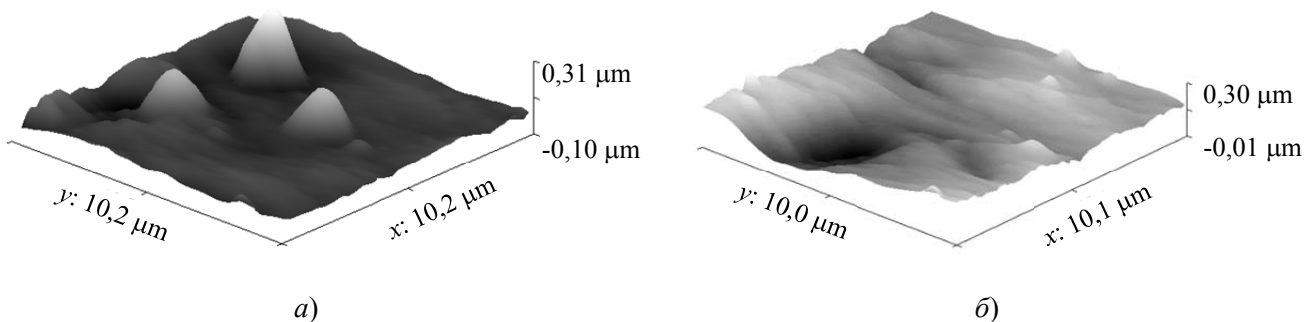


Рис. 3. АСМ-изображения типичных участков контактирующих поверхностей с покрытиями на основе сплавов Co-W (а) и Ni-Mo (б)

Таблица

**Морфологические характеристики и параметры профилей поверхности образцов контактных групп**

Геометрический параметр поверхности	Типы контактных гальванопокрытий		
	Ni-W	Co-W	Ni-Mo
$Z_{\max}$ , мкм	0,038	0,052	0,059
$R_a$ , мкм	0,019	0,028	0,03
$S_m$ , мкм	2,12	4,07	7,6

Сравнительный анализ полученных АСМ-изображений контактирующих поверхностей образцов и их профилей позволил выявить ряд особенностей геометрического строения.

Профили сечений типичных АСМ-изображений поверхности контактных покрытий на основе сплавов с вольфрамом Ni-W и Co-W характеризуются значительной степенью регулярности и небольшим диапазоном изменения шаговых параметров выступов со средним расстоянием  $S_m$  на уровне 2,12 мкм для поверхности покрытия сплавом Ni-W и 4,07 мкм для покрытия сплавом Co-W. Высотные (амплитудные) размеры неровностей поверхности этих покрытий различаются менее существенно. В случае покрытия сплавом Ni-W среднее значение  $Z_{\max}$  составляет 38 нм, а для поверхности покрытия сплавом Co-W  $Z_{\max} = 52$  нм.

Микрорельеф поверхности покрытия на основе сплава Ni-Mo мало регулярный. Он состоит в большей степени из квазипериодических неровностей и выступов размерного уровня волнистости (с относительно большим шагом) и в меньшей – уровня шероховатости (рис. 3б). Средние значения шаговых и высотных параметров профилей микрорельефа гальванопокрытия этого типа следующие:  $S_m = 7,6$  мкм;  $Z_{\max} = 59$  нм.

Проведенное исследование геометрического строения контактирующих поверхностей и представленные параметры микрорельефа, конечно, не позволяют количественно определить ФПК контактных групп, необходимую при оценке их контактного сопротивления, механического износа и электроэрозийных процессов в контактной зоне. Ее определение классическими методами механики твердого деформируемого тела не представляется возможным вообще. Но проведе-

ние качественной, сравнительной оценки исследуемых типов покрытий по этому параметру, с использованием представленных данных и результатов многочисленных современных исследований в этой области, представляется возможным. Для этого воспользуемся расчетами и результатами экспериментов, представленными в работах [14, 15, 19].

Как уже отмечалось выше, из-за микрорельефа реальных поверхностей в контакте, он происходит на группах контактных пятен, формирующих ФПК. Но пятна, несущие нагрузку, обеспечивают прохождение электрического тока не на всей своей поверхности, а посредством кластеров еще более мелких пятен. Расположение кластеров пятен (обычно считают, что они находятся на вершинах волн, деформируемых упруго) определяется волнистостью поверхностей, а расположение проводящих пятен контакта - шероховатостью на микро- и наноуровнях. Контактное сопротивление  $n$  круглых пятен, расположенных в одном кластере, в простом случае можно определить по формуле (3):

$$R_c = \rho(1/2na + 1/2\alpha) = R_1 + R_2, \quad (3)$$

где  $a$  – средний радиус пятна, равный  $\sum a_i/n$ ,  $a_i$  – радиус  $i$ -го пятна,  $n$  – число пятен и  $\alpha$  – радиус кластера, часто называемый Хольмовским радиусом, равный:

$$\alpha^{-1} = 3\pi/16n^2 \sum_{i \neq j} 1/S_{ij} \quad (4)$$

где  $S_{ij}$  – расстояние между пятнами.

Это выражение позволяет установить эффект расположения пятен, т. е. увеличение плотности их расположения приводит к уменьшению сопротивления кластера. Учет контактного сопротивления нескольких кла-

стеров, сгруппированных в номинальной площади контакта, осуществляется введением члена  $R_3$ , определяемого выражением:

$$R_3 = 16 / 3\pi^2 r. \quad (5)$$

Окончательное выражение для контактного сопротивления в приближенном виде:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \rho(1/2na + 1/2n_c\alpha + 1/2r). \quad (6)$$

Выражение (6) и данные качественных экспериментов позволяют утверждать, что уменьшению значения сопротивления электрического контакта способствуют максимальное число и равномерность распределения его пятен в номинальной площади контакта.

Далее была проведена приближенная качественная оценка количества и размеров неровностей, полученных АСМ-изображений контактирующих поверхностей, с наибольшей степенью вероятности формирующих кластеры и пятна контакта.

Анализ профилей поверхности, а также морфологических характеристик и параметров (таблица) позволяют установить, что наибольшее число и равномерность распределения выступов, образующих ФПК при сближении контактирующих поверхностей, содержат покрытия на основе сплавов с W. При этом микрорельеф поверхности покрытия на основе сплава Ni-W характеризуется максимальной плотностью расположения выступов и меньшей их высотой в сравнении с покрытием на основе сплава Co-W. Об этом свидетельствуют шаговые и высотные параметры  $S_m$  и  $Z_{max}$ . В данном случае, в соответствии с выводами, сделанными ранее, обеспечивается максимальная ФПК и как следствие, минимальное  $R_c$ .

С этих позиций можно объяснить динамику изменения  $R_c$  исследуемых контактных групп представленную на рисунке 1 и в работе [4], а также эрозионные изменения микрорельефа поверхности образцов.

Как видно из рисунка, контактная группа с покрытием на основе сплава Ni-W имеет минимальное среднее значение  $R_c$  и  $\Delta R_c$  на уровне 0,05~0,06 Ом на основной части ком-

мутационного интервала. Снижению  $\Delta R_c$ , т. е. флуктуаций параметра или контактного шума, также способствует увеличение количества точек контактирования, как в данном случае.

Микрорельеф поверхности гальванопокрытия на основе сплава Co-W характеризуется несколько меньшим числом выступов и большими их размерами (рис. 3а). Это подтверждают параметры  $S_m$  и  $Z_{max}$ . В следствие этого, уменьшение ФПК и ее стабильности приводят к некоторому увеличению как  $R_c$ , так и  $\Delta R_c$  в ходе коммутаций (рис. 1) (и данные работы [4]).

Микрорельеф поверхности покрытия на основе сплава Ni-Mo из-за наличия неровностей более высокого порядка не обеспечивает равномерное распределение пятен контакта. Это значительно снижает ФПК. В результате контактная группа с покрытием данного типа демонстрирует высокий средний уровень  $R_c$  (рис. 1) и контактный шум. Такое геометрическое строение контактирующих поверхностей способствует сосредоточению и развитию электроэрозионных процессов, снижению коммутационного ресурса контактной группы с гальванопокрытием сплавом Ni-Mo до  $3,4 \times 10^6$  коммутаций.

## Выводы

Проведенное исследование позволило установить взаимосвязь между морфологическими характеристиками, характеризующими развитость и регулярность структуры микрорельефа контактных покрытий на основе сплавов тугоплавких металлов и величиной их контактного сопротивления, а также степенью эрозионного износа в ходе коммутационного цикла.

Теоретически обосновано и экспериментально установлено:

– Минимизации  $R_c$  и контактного шума контактной группы с покрытием на основе сплава Ni-W способствует максимальное число и равномерность распределения пятен контакта образующих ФПК.

– Микрогеометрия, шаговый и высотный параметры структуры поверхностного рельефа контактного гальванопокрытия на основе сплава Co-W обеспечивают стабильность

ФПК, распределение ее в номинальной площади контакта. Это замедляет переход в стадию локализации тепловых процессов с оплавлением контактных зон, дальнейшую лавинообразную деградацию контактирующих поверхностей и увеличивает коммутационный ресурс контактной группы.

*Работа выполнена с использованием научного оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования РГРТУ.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карабанов С. М., Майзельс Р. М., Шоффа В. Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011.
2. Suvorov D. V. / Coatings. 2018. Vol. 8. P. 233.
3. Gololobov G. P. / Trans. Inst. Met. Finish. 2021. Vol. 99. P. 102–108.
4. Gololobov G. P. / Coatings. 2023. Vol. 13(2). P. 241.
5. Vincent M. / Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 263503.16.
6. Yang Z. / Mater. Technol. 2011. Vol. 26 (4). P. 184–190.
7. Karabanov S. M. / Technic. Phys. Lett. 2015. Vol. 41. P. 691–693.
8. Yang Z. / J. Micromech. Microeng. 2010. Vol. 20. P. 105028.
9. Basu A., Hennessy R. P., Adams G. G., McGruer N. E. / Proceedings of the 59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Newport, USA. 2013. P. 1–8.
10. Toler B. F. / J. Micromech. Microeng. 2013. Vol. 23. P. 103001.
11. Лернер Ю. Н. / Трение и износ. 1980. Т. 7. № 4. С. 686–694.
12. Myshkin N. K. / Wear. 1994. Vol. 172. P. 29–40.
13. Timsit R. S. / Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. – Montreal, Canada. 2004. P. 184–190.
14. Greenwood J. A. / Brit. J. Appl. Physics. 1966. Vol. 17. P. 1621–1631.
15. Мышкин Н. К., Кончиц В. В., Браунович М. Электрические контакты. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2008.
16. Анитов Н. М. / Вестник РГРТУ. 2009. Вып. 28. № 2. С. 87–90.
17. Гололобов Г. П. / Вестник РГРТУ. 2013. Вып. 44. № 2. С. 76–82.
18. Blok H. / Proc. Inst. Mech. Eng. Lond. 1937. Vol. 2. P. 222–235.
19. Greenwood J. A. / Proc. Roy. Soc. A. 1966. Vol. 295. P. 300–319.

PACS: 81.15.-z

## Features of the electroerosion processes of contact electroplating based on binary alloys with tungsten and molybdenum

*G. P. Gololobov, S. A. Kruglov, D. V. Suvorov and E. V. Slivkin*

Ryazan state radio engineering university named after V. F. Utkin  
59/1 Gagarina st., Ryazan, 390005, Russia  
E-mail: golobov.gennady@yandex.ru

*Received 30.12.2023; revised 25.01.2024; accepted 29.01.2024*

***The paper discusses the features of the processes of electromechanical erosion of contact coatings based on Co-W, Ni-W and Ni-Mo alloys during their tests in the switching mode of a resistive load at a current of 1 A, an operating voltage of 12 V, and a frequency of 10 Hz. The dynamics of changes in the contact electrical resistance of experimental contact groups with the studied types of coatings is analyzed. The relationship between the morphological characteristics characterizing the development and regularity of the microrelief structure of contact coatings based on the studied alloys, the magnitude of their contact resistance, as well as the intensity of erosive wear during the switching cycle has been established.***

**Keywords:** contact coating, electrodeposition, refractory metal alloys, microrelief, contact resistance, actual contact area, electrical erosion.

**REFERENCES**

1. Karabanov S. M., Maisels R. M. and Shoffa V. N., Magnetically controlled sealed contacts (reed switches) and products based on them, Dolgoprudny, Publishing House Intellect, 2011.
2. Suvorov D. V., *Coatings* **8**, 233 (2018).
3. Gololobov G. P., *Trans. Inst. Met. Finish.* **99**, 102–108 (2021).
4. Gololobov G. P., *Coatings* **13** (2), 241 (2023).
5. Vincent M., *Appl. Phys. Lett.* **97**, 263503.16 (2010).
6. Yang Z., *Mater. Technol.* **26** (4), 184–190 (2011).
7. Karabanov S. M., *Technic. Phys. Lett.* **41**, 691–693 (2015).
8. Yang Z., *J. Micromech. Microeng.* **20**, 105028 (2010).
9. Basu A., Hennessy R. P., Adams G. G. and McGruer N. E. *Proceedings of the 59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Newport, USA, 2013. P. 1–8.
10. Toler B. F., *J. Micromech. Microeng.* **23**, 103001 (2013).
11. Lerner Yu. N., *Friction and wear* **7** (4), 686–694 (1980).
12. Myshkin N. K., *Wear* **172**, 29–40 (1994).
13. Timsit R. S., *Proceedings of 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Montreal, Canada, 2004, pp. 184–190.
14. Greenwood J. A., *Brit. J. Appl. Physics* **17**, 1621–1631 (1966).
15. Myshkin N. K., Konchits V. V. and Brownovich M., *Electrical contacts*, Dolgoprudny, Intellect, 2008.
16. Anitov N. M., *Vest. of RSREU* **28** (2), 87–90 (2009) [in Russian].
17. Gololobov G. P., *Vest. of RSREU* **44** (2), 76–82 (2013) [in Russian].
18. Blok H., *Proc. Inst. Mech. Eng. Lond.* **2**, 222–235 (1937).
19. Greenwood J. A., *Proc. Roy. Soc. A.* **295**, 300–319 (1966).