

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ КОНТАКТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ**Г.П. Гололобов**

gololobov.gennady@yandex.ru

С.А. Круглов

kruglov.s.a@rsreu.ru

Д.В. Суворов

dmitriy_suvorov@mail.ru

Е.В. Сливкин

e.slivkin@mail.ru

В.В. Гудзев

rcpm-rgrtu@yandex.ru

РГРТУ, Рязань, Российская Федерация**Аннотация**

Приведены результаты исследования контактных групп экспериментального электромагнитного реле с покрытиями на основе сплавов с вольфрамом и молибденом, полученных методом электрохимического осаждения. Установлены и проанализированы закономерности изменения контактного электрического сопротивления в зависимости от числа циклов коммутации в режиме коммутации резистивной нагрузки при токе 1 А, напряжении 12 В и частоте 10 Гц. Показано, что использование контактных покрытий на основе сплавов Ni–W, Co–W и Ni–Mo позволяет стабилизировать разброс значений контактного электрического сопротивления на основной части испытательного интервала. Экспериментально установлено, что нанесение контактного покрытия на основе сплавов с вольфрамом существенно увеличивает коммутационный ресурс серебряной контактной группы с $2,3 \cdot 10^6$ до $4,5 \cdot 10^6$ коммутаций, при этом среднее значение контактного электрического сопротивления в установившемся режиме увеличивается с 0,08 до 0,15 Ом. Проведено исследование изменения состояния микрорельефа поверхности контактных групп с покрытиями и без покрытий в ходе коммутационных испытаний. Рассмотрены основные механизмы, определяющие интенсивность электроэрозионных процессов и коммутационный ресурс контактных групп с исследуемыми типами контактных материалов

Ключевые слова

Контактное покрытие, сплавы тугоплавких металлов, электроосаждение, микрорельеф поверхности, контактное сопротивление, коммутационные испытания, электрическая эрозия

Поступила 25.12.2023

Принята 19.01.2024

© Автор(ы), 2024

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

Введение. Коммутационные приборы, работающие по принципу сухого контакта, получили широкое распространение в технике (автоматике, телемеханике, измерительных приборах, датчиках и др.).

Важным элементом конструкции коммутационных приборов является контактное покрытие, которое показало эффективность применения в подавляющем большинстве типов электрических контактов. Традиционно контактные покрытия используют для уменьшения переходного контактного сопротивления, повышения ресурса работы, надежности эксплуатации и обеспечения возможности пропускания требуемых значений тока [1]. В связи с этим к контактным покрытиям предъявляется много требований.

Для коммутационных приборов, электрические контакты которых подвержены влиянию окружающей атмосферы, а также большинства типов электрических разъемов ключевым параметром является коррозионная стойкость контактного покрытия [2, 3].

Одна из основных причин, ограничивающих коммутационный ресурс и максимальную коммутируемую мощность, — электрическая эрозия контактных площадок [3–7]. Электроэрозийная стойкость контактных покрытий коммутационных приборов полностью определяется свойствами покрытия и в значительной степени обуславливает срок службы устройства. Коррозионная стойкость и электроэрозийная стойкость обеспечивают долговременную стабильность контактного сопротивления.

Стойкость к механическому износу и термическая стойкость контактных покрытий позволяют сохранить физическую целостность и требуемый микрорельеф контактирующих поверхностей при длительном коммутационном цикле, что также определяет коммутационный ресурс устройств.

В большинстве случаев в коммутационных устройствах малой и средней мощности применяют контактные покрытия на основе благородных (редкоземельных) металлов (золото, серебро) и их сплавов с легирующими компонентами, а также палладий, родий, рутений и их сплавы [3, 8–10]. Перечисленные покрытия имеют недостатки и в некоторых случаях не обеспечивают необходимых параметров электрического контакта и, следовательно, срока службы и надежности работы коммутационных приборов.

Основные недостатки покрытий на основе золота и серебра — разрушение контактирующей поверхности в результате механического износа и залипание контактов — обусловлены их недостаточно высокими механическими характеристиками (твердость, износостойкость) и низкой тем-

пературой плавления. Покрытия на основе металлов платиновой группы — рутения, родия и палладия — имеют склонность к деламинеции и карбонизации контактов в результате каталитической реакции образования полимерных углеродсодержащих пленок на поверхности покрытия при контакте с атмосферой. Общий недостаток перечисленных покрытий — высокая стоимость и достаточно сложная технология нанесения, особенно покрытий на основе металлов платиновой группы (рутения, родия).

В качестве альтернативы указанным материалам все большее распространение получают контактные покрытия на основе бинарных сплавов тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама) с металлами группы железа (никелем, кобальтом) [3, 11–15]. Эти сплавы обладают высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и твердостью [16–19]. Следует также отметить очень высокую стойкость этих сплавов к электрической эрозии. Условия осаждения, способствующие получению качественных покрытий сплавом Ni–W с достаточно однородной и мелкокристаллической структурой и исключающие образование дефектов и трещин при толщине более 6 мкм, предложены в [20].

Сведения об электрических свойствах перечисленных покрытий, в частности, контактном электросопротивлении, приведены в [3, 4, 21, 22]. Покрытие сплавом Co–W использовано в качестве технологического подслоя под основной (рабочий) слой рутения в [22]. Результаты сравнительного исследования контактного сопротивления однослойных покрытий на основе сплавов Co–W, Ni–W, Co–Mo и Ni–Mo [21] показывают, что по этому параметру ($< 0,05$ Ом) они сопоставимы с покрытиями на основе металлов платиновой группы. Авторы работ [3, 4] утверждают, что по значениям контактного сопротивления и его стабильности в ходе коммутаций покрытия на основе сплавов тугоплавких металлов уступают покрытиям на основе редкоземельных металлов. Это основано на исследованиях миниатюрных магнитоуправляемых контактов, особенностью которых являются малая сила контактного нажатия, составляющая десятки–сотни мН, и наличие защитной атмосферы (колба с азотом или аргоном).

Электрические свойства таких покрытий при коммутационных испытаниях с большей силой контактного нажатия в диапазоне сотен–тысячи мН в воздушной атмосфере (электромагнитные реле, кнопки, микропереключатели и др.) не изучены и могут существенно отличаться. Этим и обусловлена актуальность проведения настоящего исследования.

Новизна исследования заключается в установлении и анализе основных механизмов, определяющих характер изменения контактного сопротивления и ресурс контактных групп с покрытиями на основе сплавов Ni–W и Co–W, а также без покрытия (с контактной площадкой из серебра) при коммутации тока 1 А в условиях воздушной атмосферы и значительной (десятые доли Н) силы контактного нажатия.

Методика эксперимента. Исследование коммутационных свойств образцов контактных покрытий на основе сплавов тугоплавких металлов проводили с использованием серийно производимого, электромагнитного, двухпозиционного реле открытого типа РЭС 14, предназначенного для коммутации электрических цепей аппаратуры проводной связи. Выбор реле обусловлен требуемыми электрическими (коммутируемый ток — до единиц А) и механическими (сила нажатия — десятые доли Н) параметрами, а также возможностью многократного разбора-сборки контактной группы без нарушения ее геометрии и взаимного позиционирования контактных площадок. Внешний вид контактной группы реле и одиночной контактной пружины с серебряной контактной площадкой показан на рис. 1.

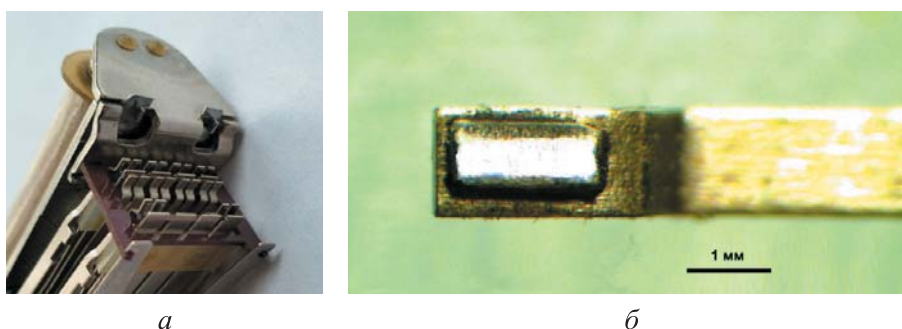


Рис. 1. Внешний вид контактной группы реле РЭС 14 (а) и одиночной контактной пружины с серебряной контактной площадкой (б)

Начальное значение контактного сопротивления R_c серебряных контактов реле без покрытия составляет 0,1 Ом при силе контактного нажатия около 0,25 Н. Контактные покрытия на основе сплавов Ni–W, Co–W, Ni–Mo и Co–Mo наносили на контактную поверхность из серебра (Ag 999), которая имела форму, близкую к параллелепипеду размерами $1,7 \times 0,8 \times 0,25$ мм. Во всех случаях содержание тугоплавкого компонента поддерживалось выбором режимов осаждения на уровне 18...19 ат. %. Условия осаждения каждого гальванопокрытия обеспечивали минимальное число дефектов (пор, трещин), однородность и мелкокристалличность сплава, хорошую адгезию

к подложке. Составы электролитов и режимы осаждения покрытий подробно описаны в [19]. Толщина покрытий около 6 мкм.

Изменения поверхностного микрорельефа образцов гальванопокрытий в ходе коммутационного цикла исследовали с использованием металлографического цифрового видеомикроскопа MET 5 («Альтами», Россия) и растрового электронного микроскопа JSM-6610LV (JEOL, Япония), оснащенного рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным детектором INCA X-MAX (Oxford Instruments, США), позволяющим проводить качественный и количественный анализ элементного состава поверхности. Получение растровых электронно-микроскопических изображений (РЭМ-изображений) проводили при ускоряющем напряжении 30 кВ.

Исследование коммутационных свойств контактных покрытий выполняли в режиме коммутации резистивной нагрузки при токе 1 А, рабочем напряжении 12 В и частоте коммутации 10 Гц. Коммутационные испытания проводили на специально разработанном стенде (рис. 2), который позволяет фиксировать изменение контактного сопротивления каждой контактной группы (пары) в процессе длительного коммутационного цикла. На основе обработки результатов измерений строили зависимости контактного сопротивления от числа срабатываний.

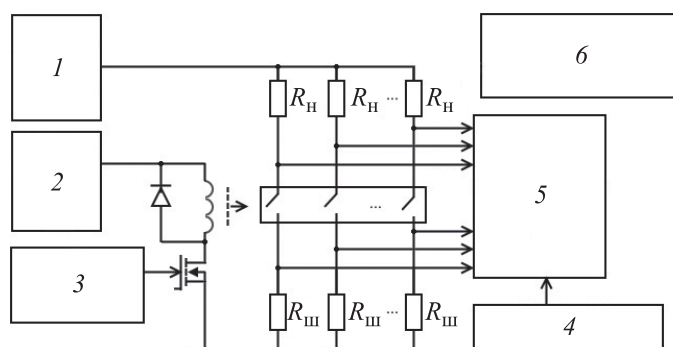


Рис. 2. Функциональная схема экспериментального стенда проведения коммутационных испытаний:

- 1 — источник питания нагрузки; 2 — источник питания обмоток реле;
 3 — генератор импульсов; 4 — цифровой осциллограф; 5 — измерительная система;
 6 — контактные группы реле

Методическая точность каждого единичного измерения R_c составляла менее 1,5 %. Основной вклад в погрешность проведенных измерений вносил разброс электрического сопротивления токоизмерительных резисторов. Вычисление среднего значения R_c и разброса значений контакт-

ного сопротивления ΔR_c выполняли с помощью математической обработки данных.

В состав стенда входят следующие основные блоки: система управления коммутацией контактных групп, включающая в себя источник питания обмоток реле и генератор импульсов; система измерения R_c контактных групп в процессе испытаний с цифровым осциллографом; экспериментальные контактные группы реле с исследуемыми типами покрытий.

В схеме питания обмоток реле осуществляется от источника стабилизированного напряжения MPS-6005L-1 (Matrix, Китай). В качестве генератора импульсов применяется генератор сигналов специальной формы AWG-4110 («Актаком», Россия). В измерительной системе используется цифровой осциллограф TDS3032C (Tektronix, Китай), для питания нагрузки контактных групп — источник напряжения NY30001E (Mastech, Китай).

Экспериментальное реле имеет шесть контактных групп, вследствие чего возможно проведение в едином испытательном цикле сравнительного коммутационного теста нескольких типов покрытий, нанесенных на разные контактные группы.

Исследование контактного электрического сопротивления экспериментальных контактных групп в процессе коммутационных испытаний. Для исследования изготовлены экспериментальные контактные группы реле с покрытиями на основе сплавов Ni-W, Co-W, Ni-Mo и Co-Mo.

Деградация контактирующей поверхности коммутационных устройств малой и средней мощности приводит к двум типам отказа: 1) значительному увеличению контактного сопротивления; 2) залипанию контактов, наблюдаемому при резком уменьшении контактного сопротивления в открытом состоянии на уровне нескольких десятков Ом. Эксперименты явление залипания не выявили, что можно объяснить хорошими физико-механическими и теплофизическими характеристиками покрытий на основе сплавов тугоплавких металлов и электрическими параметрами коммутации. Этому способствует и значительная сила упругости контактных пружин.

Динамика контактного электрического сопротивления контактной группы без покрытия (с контактной площадкой из серебра) при коммутациях (режим 12 В, 1 А, 10 Гц) представлена на рис. 3. Аналогичная динамика для контактных групп с исследуемыми типами гальванопокрытий показана на рис. 4. Во всех случаях окончание испытательного интервала происходило при увеличении значения R_c на порядок.

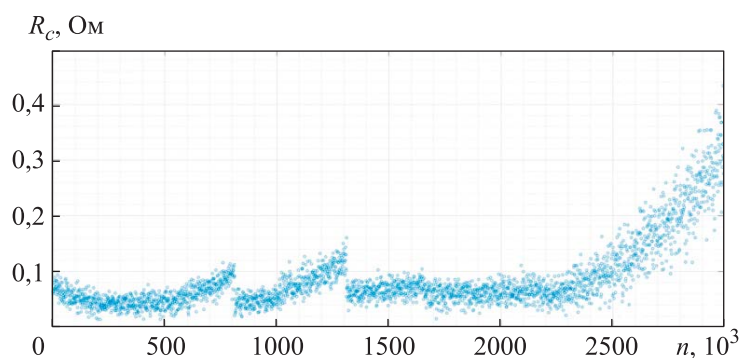


Рис. 3. Динамика контактного электрического сопротивления контактной группы с серебряными контактами при коммутациях

Общий вид зависимостей $R_c(n)$ (n — число коммутаций) для всех исследованных образцов соответствует известным представлениям. В каждом случае зависимости имеют начальный спадающий участок различной длительности, определяемой, в основном, уровнем шероховатости исходной поверхности и физико-механическими характеристиками материала гальванопокрытия [7].

В большинстве случаев основная часть коммутационного интервала сопровождается относительно стабильным значением R_c . Резкому увеличению исследуемого параметра на заключительном участке испытательного интервала, свидетельствующему о значительной деградации контактного гальванопокрытия, предшествует заметный участок плавного подъема.

Динамика контактного электрического сопротивления контактной группы без покрытия (см. рис. 3) характеризуется существенной нестабильностью уровня. Можно выделить несколько участков возрастания и почти мгновенного снижения исследуемого параметра до исходного уровня. В соответствии с [4, 7] подобное явление можно объяснить следующим образом. Коммутационные тесты покрытий на основе благородных металлов, особенно серебра, в условиях воздушной атмосферы сопровождаются образованием плохо проводящих абсорбированных пленок на контактирующих поверхностях. Увеличение общей площади, занимаемой пленками в процессе коммутаций, медленно уменьшает реальную площадь контакта, что приводит к возрастанию R_c . Резкие снижения параметра связаны с разрывом пленок в результате существенного механического воздействия ($\approx 0,25$ Н) контактных пружин на контактирующие поверхности с развитым микрорельефом. Следует отметить, что, несмотря на нестабильность уровня контактного сопротивления, почти на всем испытательном интервале наблюдается соотношение $R_c < 0,1$ Ом.

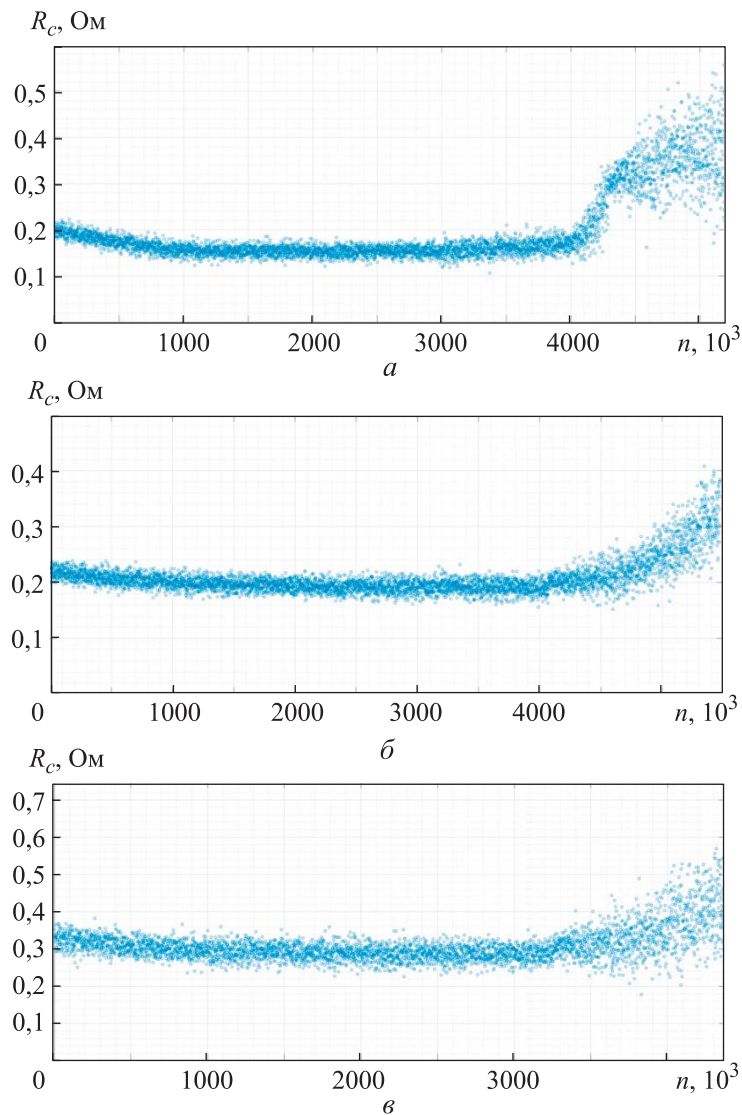


Рис. 4. Динамика контактного электрического сопротивления экспериментальных контактных групп при коммутациях для контактов с покрытием на основе сплавов Ni–W (а), Co–W (б) и Ni–Mo (в)

Нанесение контактного покрытия на основе сплавов вольфрама и молибдена (см. рис. 4) приводит в большинстве случаев к стабилизации R_c контактной группы в ходе основной части коммутационного интервала. Минимальный разброс значений исследуемого параметра $\Delta R_c = 0,05 \dots 0,06$ Ом на основной части коммутационного интервала (рис. 4, а) наблюдается у контактной группы с покрытием на основе сплава Ni–W. Учитывая меньшую продолжительность начального спа-

дающего участка зависимости ($\approx 8 \cdot 10^5$ коммутаций, см. рис. 4, *a*) и результаты исследования, приведенные в [8, 21, 22], можно предположить следующее: физико-механические характеристики покрытия на основе указанного сплава (микротвердость, пластичность) и шероховатость поверхности обеспечивают наиболее благоприятный режим приработки контактирующих поверхностей, способствующий формированию площади фактического контакта (общей токопроводящей площади) и ее стабильности. Контактная группа с гальванопокрытием на основе сплава Co–Mo характеризуется максимальным значением разброса: $\Delta R_c = 0,17$ Ом и более.

Нанесение контактного покрытия на основе сплавов вольфрама и молибдена (см. рис. 4) способствует существенному увеличению значения R_c контактной группы на всем исследуемом коммутационном интервале. С большой вероятностью это можно объяснить существенным различием удельного электрического сопротивления серебра ($1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) и исследуемых сплавов ($(6,7 \dots 8,0) \cdot 10^{-8}$ Ом·м). В случае с гальванопокрытием на основе сплава Ni–W значение R_c в среднем возрастает на $0,07 \dots 0,08$ Ом. Нанесение покрытия на основе сплава Co–W увеличивает это значение более чем на $0,1$ Ом. Некоторое различие среднего значения R_c у образцов покрытий сплавами Ni–W и Co–W определяется, в основном, отличием физико-механических характеристик сплавов и микрорельефом поверхности, так как удельное электрическое сопротивление этих материалов сопоставимо. Гальванопокрытия на основе сплавов молибдена повышают контактное сопротивление реле более существенно. Так, среднее значение R_c в испытательном интервале у контактной группы с гальванопокрытием на основе сплава Ni–Mo более чем в 3 раза превышает этот параметр у контактной группы без покрытия (рис. 4, *b*), а у контактной группы с гальванопокрытием на основе сплава Co–Mo — в 5 раз и более.

Окончание испытательного интервала в рассмотренных случаях сопровождается увеличением диапазона разброса значений и дальнейшим резким возрастанием R_c , приводящим к отказу контактной группы. Согласно экспериментальной зависимости, представленной на рис. 3, можно сделать вывод, что отказ контактной группы без покрытия при коммутациях (режим 12 В, 1 А, 10 Гц) происходит после $2,3 \cdot 10^6$ коммутаций в коротком интервале значений ($\approx 2 \cdot 10^5$ коммутаций).

В соответствии с зависимостями на рис. 4 нанесение контактного покрытия на основе сплавов с вольфрамом существенно увеличивает ком-

мутационный ресурс контактной группы. В исследуемом режиме для гальванопокрытия на основе сплава Ni–W он составляет более $4 \cdot 10^6$ коммутаций, а для покрытия сплавом Co–W — примерно $4,25 \cdot 10^6$ коммутаций. Следует отметить, что в случае со сплавом Co–W повышение значения R_c и отказ происходит медленнее.

Контактные покрытия на основе сплавов молибдена обеспечивают менее значительную наработку, чем на основе сплавов вольфрама. Ресурс контактной группы с гальванопокрытием Ni–Mo составляет около $3,4 \cdot 10^6$ коммутаций, а с гальванопокрытием Co–Mo — $3,75 \cdot 10^6$ коммутаций.

Коммутационный ресурс контактной группы в процессе испытаний определялся числом n , после которого начинался необратимый рост значения R_c .

Исследование микрорельефа контактирующих поверхностей контактных групп. Для понимания механизмов, приводящих к увеличению контактного электрического сопротивления и деградации контактирующих поверхностей контактных групп, исследован микрорельеф и элементный состав исходных образцов и образцов, прошедших коммутационные испытания.

Результаты исследования микрорельефа приведены на рис. 5, 6. РЭМ-изображения типичных участков контактирующей поверхности серебряной контактной пары до и после испытаний приведены на рис. 5: на рис. 5, а показаны электроэрозионные изменения микрорельефа поверхности контакта, подключенного к положительному выводу источника питания (аноду), а на рис. 5, б — контакта, подключенного к отрицательному выводу (катоде). Согласно РЭМ-изображениям, при коммутациях

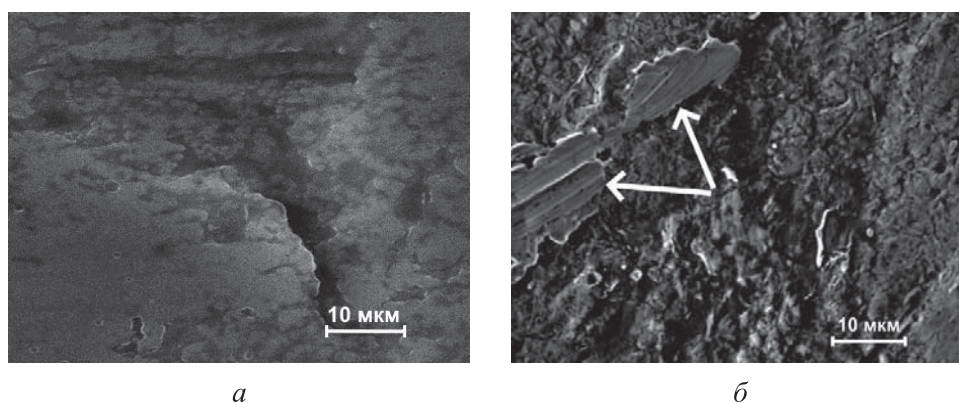


Рис. 5. РЭМ-изображения типичных участков контактирующей поверхности серебряной контактной пары до и после испытаний:

a — анод; *б* — катод

произошло существенное изменение поверхностного микрорельефа как катода, так и анода. РЭМ-изображение типичного участка поверхности анода (см. рис. 5, *а*) свидетельствует о наличии бесформенного углубления значительных размеров.

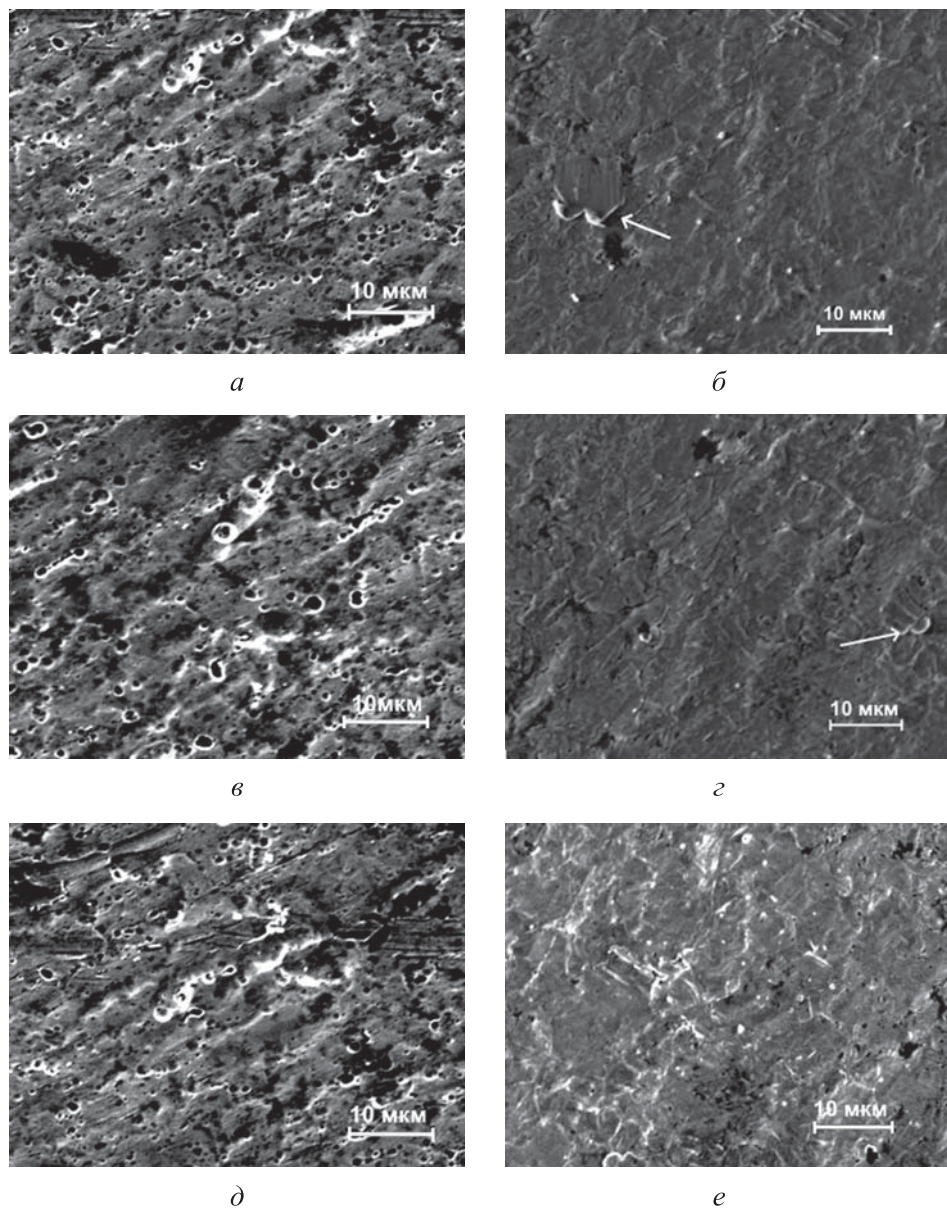


Рис. 6. РЭМ-изображения типичных участков контактирующей поверхности контактной пары с покрытием на основе сплавов Ni–W (*а*, *б*), Co–W (*в*, *г*) и Ni–Mo (*д*, *е*) после испытаний:

а, *в*, *д* — анод; *б*, *г*, *е* — катод; стрелками показаны бесформенные выступы

Морфологические изменения поверхности катода (см. рис. 5, б) связаны с образованием бесформенных выступов, являющихся следствием электроэрозионных процессов (перенос расплавленного материала с одной контактирующей поверхности на другую), а также сопровождающей их деформации выступов (наклепа) противоположной контактирующей поверхностью.

Даже при малых значениях напряжения на контакте, как в рассматриваемом случае, значения температуры перегрева могут быть достаточными для плавления зон контактных пятен [23, 24]. В процессе размыкания контактирующих поверхностей число токопроводящих участков изменяется, уменьшается фактическая площадь контакта. Сопротивление токопрохождению возрастает. Повышается и выделяющаяся в них джоулева теплота, которая расплавляет участки токопрохождения, и при дальнейшем расхождении контакт-деталей на расплавленных участках образуются так называемые жидкие мостики. При последующем возрастании температуры мостики испаряются, образуя плотное облако пара с внутренним давлением до 50 атм [23]. При нахождении металлического пара в электрическом поле в нем происходит термическая ионизация и образуется плазма газового разряда (микродуга), которая обеспечивает дальнейшее токопрохождение. Степень ионизации в плазме может достигать 40 % [23]. Высокое внутреннее давление пара и плазмы ведет к разлету металлического облака. Постепенно давление в нем снижается настолько, что токопрохождение нарушается.

Наряду с рассмотренным механизмом, в зоне контактирования при горячем переключении могут наблюдаться процессы механического переноса материала, полевого испарения, полевой эмиссии и электромиграции [25, 26]. Исключая полевое испарение, перечисленные процессы, приводящие к деградации контактирующей поверхности, свидетельствуют о том, что материалы с более высокой температурой плавления или кипения будут иметь тенденцию к меньшему переносу материала и, предположительно, к большей эрозионной стойкости.

РЭМ-изображения на рис. 6, а, б свидетельствуют о менее значительной эрозии поверхности контактного покрытия на основе сплава Ni–W в процессе испытательного цикла. Как и в предыдущем случае, на поверхности контактного покрытия анода можно различить углубления, вызванные переносом материала на катод (см. рис. 6, а). В таком случае они имеют меньшие размеры (диаметр единицы мкм) и преимущественно округлую форму. Поверхность контактного покрытия катода

(см. рис. 6, б) отличается наличием деформированных выступов меньших латеральных размеров. Их общее число менее значительно.

Микрорельеф поверхности контактной группы с покрытием на основе сплава Co–W после испытаний (рис. 6, в, г) также мало изменяется и практически идентичен покрытию сплавом Ni–W. Особенности морфологических изменений поверхности, связанные с эрозионным переносом материала с анода на катод у гальванопокрытия такого типа, в основном, сохраняются, как и в случаях с покрытиями на основе сплавов Ni–Mo и Co–Mo. При исследовании контактного покрытия сплавом Ni–Mo можно отметить некоторое увеличение общей развитости микрорельефа поверхности катода после испытаний (рис. 6, е) по сравнению с предыдущими случаями.

Для контактного покрытия на основе сплава Co–Mo наиболее типичных участков микрорельефа поверхности анода и катода, характеризующих особенности эрозионных преобразований, зафиксировать не удалось.

Заключение. Выполнены коммутационные испытания серийно производимого электромагнитного, двухпозиционного реле открытого типа РЭС 14 с экспериментальными контактными группами с разработанными гальванопокрытиями на основе сплавов Ni–W, Co–W, Ni–Mo и Co–Mo в режиме коммутации резистивной нагрузки при токе 1 А и напряжении 12 В. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Нанесение контактного покрытия на основе сплавов тугоплавких металлов увеличивает коммутационный ресурс контактной группы с серебряными контактными площадками с $2,3 \cdot 10^6$ до $4 \cdot 10^6$ коммутаций при использовании сплава Ni–W и с $2,3 \cdot 10^6$ до $4,25 \cdot 10^6$ коммутаций при использовании сплава Co–W. При этом происходит возрастание среднего значения R_c на 0,08...0,11 Ом на всем испытательном интервале.

При использовании контактных покрытий на основе сплавов тугоплавких металлов минимизацию среднего значения R_c до 0,15...0,16 Ом на основной части испытательного интервала обеспечивает контактное покрытие на основе сплава Ni–W. Это покрытие также обеспечивает наиболее благоприятный режим трения (приработки контактирующих поверхностей) и минимальный разброс значений ΔR_c при коммутациях.

Коммутационный ресурс серебряных контактных групп с покрытиями на основе сплавов тугоплавких металлов в большей степени определяется изменением микрорельефа, вызванным электроэрозионным переносом материала, и в меньшей — формированием плохо проводящих поверхностных пленок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) и изделия на их основе. Долгопрудный, Интеллект, 2011.
- [2] Braunovich M., Myshkin N.K., Konchits V.V. Electrical contacts. CRC Press, 2013.
- [3] Shishkina L., Lokshtanova O., Karabanov S. Electroplated coatings for magnetically operated contacts (reed switches). *Coatings*, 2012, vol. 2, iss. 1, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings2010001>
- [4] Peschot A., Poulain C., Souchon F., et al. Contact degradation due to material transfer in MEM switches. *Microelectron. Reliab.*, 2012, vol. 52, iss. 9–10, pp. 2261–2266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.044>
- [5] Yang Z., Hoffmann S., Lichtenwalner D.J., et al. Resolution of the transfer direction of field-evaporated gold atoms for nanofabrication and microelectromechanical system applications. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, iss. 4, art. 044102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3545846>
- [6] Vincent M., Rowe S.W., Poulain C., et al. Field emission and material transfer in microswitches electrical contacts. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 97, iss. 26, art. 263503. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3529474>
- [7] Yang Z. Contact reliability in ohmic microswitches. *Mater. Technol.*, 2011, vol. 26, iss. 4, pp. 184–190. DOI: <https://doi.org/10.1179/175355511X13109965351158>
- [8] Karabanov S.M., Verlov N.A., Suvorov D.V., et al. Properties of contact coatings based on ruthenium nanofilms for MEMS switches. *Tech. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41, pp. 691–693. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785015070226>
- [9] Шишкина Л.В., Локштанова О.Г. Электролитические покрытия для герконов. *Известия СПбГТИ (ТУ)*, 2011, № 11, с. 124–127.
- [10] Шишкина Л.В., Карабанов С.М., Локштанова О.Г. Опыт разработки и применения электролитических покрытий, используемых в промышленном производстве магнитоуправляемых контактов (герконов). *Гальванотехника и обработка поверхности*, 2011, т. 19, № 2, с. 20–26.
- [11] Bodaghi A., Hosseini J. Corrosion behavior of electrodeposited cobalt-tungsten alloy coatings in NaCl aqueous solution. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, vol. 7, iss. 3, pp. 2584–2595. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)13904-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13904-6)
- [12] Ma L., Xi X., Nie Z., et al. Electrodeposition and characterization of Co–W alloy from regenerated tungsten salt. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, vol. 12, iss. 2, pp. 1034–1051. DOI: <https://doi.org/10.20964/2017.02.37>
- [13] Allahyarzadeh M.H., Aliofkhazraei M., Rezvanian A.R., et al. Ni–W electrodeposited coatings: characterization, properties and applications. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, part A, pp. 978–1010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.052>
- [14] Lee H.B. Synergy between corrosion and wear of electrodeposited Ni–W coating. *Tribol. Lett.*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 407–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0134-x>

- [15] Udompanit N., Wangyao P., Henpraserttae S., et al. Wear response of composition-modulated multilayer Ni–W coatings. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 1025–1026, pp. 302–309. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.302>
- [16] Tsyntsarua N., Cesiulis H., Pellicer E., et al. Structural, magnetic, and mechanical properties of electrodeposited cobalt-tungsten alloys: intrinsic and extrinsic interdependencies. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 104, pp. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.022>
- [17] Eliaz N., Sridhar T.M., Gileadi E. Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by electrodeposition. *Electrochim. Acta*, 2005, vol. 50, iss. 14, pp. 2893–2904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.11.038>
- [18] Gomez E., Pellicer E., Alcobe X., et al. Properties of Co–Mo coatings obtained by electrodeposition at pH 6.6. *J. Solid State Electrochem.*, 2004, vol. 8, no. 7, pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-004-0495-z>
- [19] Gololobov, G.P., Suvorov, D.V., Serpova, M.A., et al. Study on the surface morphology and corrosion rates of electroplated coatings based on binary alloys of refractory metals after accelerated acid tests. *Trans. Inst. Met. Finish.*, 2021, vol. 99, iss. 2, pp. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/00202967.2021.1877482>
- [20] Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю., Сливкин Е.В. и др. Исследование электрохимически осажденных покрытий на основе сплава Ni–W. *Вестник РГРТУ*, 2018, № 66-2, с. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-30-39>
- [21] Gololobov G.P., Suvorov D.V., Serpova M.A., et al. The study of contact electrical resistance of coatings on the basis of refractory metal alloys Co–W, Co–Mo, Ni–W, Ni–Mo. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 889, art. 012017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/889/1/012017>
- [22] Gololobov G.P., Suvorov D.V., Karabanov S.M., et al. An effect of Co–W barrier sublayer on the functional characteristics of Au–Ru contact coatings. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 2, art. 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12020161>
- [23] Анитов Н.М., Арефьев А.С., Гололобов Г.П. О возникновении микроразрядов в герконах. *Вестник РГРТУ*, 2009, № 2, с. 87–90.
- [24] Гололобов Г.П., Арефьев А.С., Суворов М.С. и др. Статистические характеристики газового разряда в магнитоуправляемых контактах при различных режимах коммутации. *Вестник РГРТУ*, 2013, № 2, с. 76–82.
- [25] Yang Z., Lichtenwalner D., Morris A., et al. Contact degradation in hot/cold operation of direct contact micro switches. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, vol. 20, no. 10, art. 105028. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/10/105028>
- [26] Toler B.F., Coutu R.A.Jr., McBride J.W. A review of micro-contact physics for micro-electromechanical systems (MEMS) metal contact switches. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, vol. 23, no. 10, art. 103001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/10/103001>

Гололобов Геннадий Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники РГРТУ (Российская Федерация, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1).

Круглов Сергей Александрович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой промышленной электроники РГРТУ (Российская Федерация, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1).

Суворов Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники РГРТУ (Российская Федерация, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1).

Сливкин Евгений Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники РГРТУ (Российская Федерация, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1).

Гудзев Валерий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники РГРТУ (Российская Федерация, 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гололобов Г.П., Круглов С.А., Суворов Д.В. и др. Исследование электрической эрозии контактных покрытий на основе сплавов тугоплавких металлов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 1 (146), с. 19–37.

EDN: AWMNSM

**ELECTRICAL EROSION OF THE CONTACT COATINGS
BASED ON THE HIGH-MELTING POINT METAL ALLOYS**

G.P. Gololobov

S.A. Kruglov

D.V. Suvorov

E.V. Slivkin

V.V. Gudzev

gololobov.gennady@yandex.ru

kruglov.s.a@rsreu.ru

dmitriy_suvorov@mail.ru

e.slivkin@mail.ru

rcpm-rgrtu@yandex.ru

**Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Ryazan, Russian Federation**

Abstract

The paper presents results of studying contact groups of the experimental electromagnetic relay with coatings based on the alloys with tungsten and molybdenum, which were obtained by electrochemical deposition. Alteration patterns in the contact electrical resistance were established and analyzed depending on the switching cycles' number in the resistance load switching mode with 1 A current, 12 V voltage and 10 Hz frequency. The paper shows that introducing contact coatings based on the Ni–W, Co–W and Ni–Mo alloys makes it possible to stabilize spread in

Keywords

Contact coating, high-melting point metal alloys, electrodeposition, surface micro-relief, contact resistance, switching tests, electrical erosion

the contact electrical resistance values over the test interval main section. It was experimentally established that application of contact coating based on the tungsten alloys significantly increased switching life of the silver contact group from $2.3 \cdot 10^6$ to $4.5 \cdot 10^6$ switchings, while average value of the contact electrical resistance in steady state increased from 0.08 to 0.15 Ohm. A study was conducted to find the micro-relief alterations in the contact groups' surface state with and without coating during the switching tests. Main mechanisms determining the electrical erosion processes intensity and switching life of the contact groups with types of the contact materials under study were considered

Received 25.12.2023

Accepted 19.01.2024

© Author(s), 2024

This work was carried out using facilities of the Regional Center for Probe Microscopy Shared Service Center at Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

REFERENCES

- [1] Karabanov S.M., Mayzels R.M., Shoffa V.N. Magnitoupravlyaemye germetizirovannye kontakty (gerkony) i izdeliya na ikh osnove [Magnetically controlled sealed contacts (reed contacts) and products based on them]. Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2011.
- [2] Braunovich M., Myshkin N.K., Konchits V.V. Electrical contacts. CRC Press, 2013.
- [3] Shishkina L., Lokshtanova O., Karabanov S. Electroplated coatings for magnetically operated contacts (reed switches). *Coatings*, 2012, vol. 2, iss. 1, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings2010001>
- [4] Peschot A., Poulain C., Souchon F., et al. Contact degradation due to material transfer in MEM switches. *Microelectron. Reliab.*, 2012, vol. 52, iss. 9–10, pp. 2261–2266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.06.044>
- [5] Yang Z., Hoffmann S., Lichtenwalner D.J., et al. Resolution of the transfer direction of field-evaporated gold atoms for nanofabrication and microelectromechanical system applications. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, vol. 98, iss. 4, art. 044102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3545846>
- [6] Vincent M., Rowe S.W., Poulain C., et al. Field emission and material transfer in microswitches electrical contacts. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 97, iss. 26, art. 263503. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3529474>
- [7] Yang Z. Contact reliability in ohmic microswitches. *Mater. Technol.*, 2011, vol. 26, iss. 4, pp. 184–190. DOI: <https://doi.org/10.1179/175355511X13109965351158>
- [8] Karabanov S.M., Verlov N.A., Suvorov D.V., et al. Properties of contact coatings based on ruthenium nanofilms for MEMS switches. *Tech. Phys. Lett.*, 2015, vol. 41, pp. 691–693. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785015070226>

- [9] Shishkina L.V., Lokshanova O.G. Electrolytic coatings used in the reed switches. *Izvestiya SPbGTI (TU)* [Bulletin of St PbSIT(TU)], 2011, no. 11, pp. 124–127 (in Russ.).
- [10] Shishkina L.V., Karabanov S.M., Lokshanova O.G. Experience of development and application of the electroplated coatings used in the industrial production of magnetically operated contacts (reed switches). *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 2011, vol. 19, no. 2, pp. 20–26 (in Russ.).
- [11] Bodaghi A., Hosseini J. Corrosion behavior of electrodeposited cobalt-tungsten alloy coatings in NaCl aqueous solution. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, vol. 7, iss. 3, pp. 2584–2595. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)13904-6](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13904-6)
- [12] Ma L., Xi X., Nie Z., et al. Electrodeposition and characterization of Co–W alloy from regenerated tungsten salt. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, vol. 12, iss. 2, pp. 1034–1051. DOI: <https://doi.org/10.20964/2017.02.37>
- [13] Allahyazadeh M.H., Aliofkhaezai M., Rezvanian A.R., et al. Ni–W electrodeposited coatings: characterization, properties and applications. *Surf. Coat. Technol.*, 2016, vol. 307, part A, pp. 978–1010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.052>
- [14] Lee H.B. Synergy between corrosion and wear of electrodeposited Ni–W coating. *Tribol. Lett.*, 2013, vol. 50, no. 3, pp. 407–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0134-x>
- [15] Udompanit N., Wangyao P., Henpraserttae S., et al. Wear response of composition-modulated multilayer Ni–W coatings. *Adv. Mat. Res.*, 2014, vol. 1025–1026, pp. 302–309. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.302>
- [16] Tsyntsarua N., Cesiulis H., Pellicer E., et al. Structural, magnetic, and mechanical properties of electrodeposited cobalt-tungsten alloys: intrinsic and extrinsic interdependencies. *Electrochim. Acta*, 2013, vol. 104, pp. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.022>
- [17] Eliaz N., Sridhar T.M., Gileadi E. Synthesis and characterization of nickel tungsten alloys by electrodeposition. *Electrochim. Acta*, 2005, vol. 50, iss. 14, pp. 2893–2904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.11.038>
- [18] Gomez E., Pellicer E., Alcobe X., et al. Properties of Co–Mo coatings obtained by electrodeposition at pH 6.6. *J. Solid State Electrochem.*, 2004, vol. 8, no. 7, pp. 497–504. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-004-0495-z>
- [19] Gololobov, G.P., Suvorov, D.V., Serpova, M.A., et al. Study on the surface morphology and corrosion rates of electroplated coatings based on binary alloys of refractory metals after accelerated acid tests. *Trans. Inst. Met. Finish.*, 2021, vol. 99, iss. 2, pp. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.1080/00202967.2021.1877482>
- [20] Gololobov G.P., Tarabrin D.Yu., Slivkin E.V., et al. Research of electrochemically deposited coatings based on Ni–W alloy. *Vestnik RGRU* [Vestnik of RSREU], 2018, no. 66-2, pp. 30–39 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-30-39>

[21] Gololobov G.P., Suvorov D.V., Serpova M.A., et al. The study of contact electrical resistance of coatings on the basis of refractory metal alloys Co–W, Co–Mo, Ni–W, Ni–Mo. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020, vol. 889, art. 012017.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/889/1/012017>

[22] Gololobov G.P., Suvorov D.V., Karabanov S.M., et al. An effect of Co–W barrier sublayer on the functional characteristics of Au–Ru contact coatings. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 2, art. 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12020161>

[23] Anitov N.M., Arefyev A.S., Gololobov G.P. On occurrence of microdischarges in reed switches. *Vestnik RGRTU [Vestnik of RSREU]*, 2009, no. 2, pp. 87–90 (in Russ.).

[24] Gololobov G.P., Arefyev A.S., Suvorov M.S., et al. Statistical characteristics of gas discharge in magnetically controlled contacts at different modes of commutation. *Vestnik RGRTU [Vestnik of RSREU]*, 2013, no. 2, pp. 76–82 (in Russ.).

[25] Yang Z., Lichtenwalner D., Morris A., et al. Contact degradation in hot/cold operation of direct contact micro switches. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, vol. 20, no. 10, art. 105028. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/10/105028>

[26] Toler B.F., Coutu R.A.Jr., McBride J.W. A review of micro-contact physics for microelectromechanical systems (MEMS) metal contact switches. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, vol. 23, no. 10, art. 103001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/23/10/103001>

Gololobov G.P. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Electronics, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (Gagarina ul. 59/1, Ryazan, 390005 Russian Federation).

Kruglov S.A. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Industrial Electronics, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (Gagarina ul. 59/1, Ryazan, 390005 Russian Federation).

Suvorov D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Electronics, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (Gagarina ul. 59/1, Ryazan, 390005 Russian Federation).

Slivkin E.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Electronics, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (Gagarina ul. 59/1, Ryazan, 390005 Russian Federation).

Gudzev V.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (Gagarina ul. 59/1, Ryazan, 390005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gololobov G.P., Kruglov S.A., Suvorov D.V., et al. Electrical erosion of the contact coatings based on the high-melting point metal alloys. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 1 (146), pp. 19–37 (in Russ.). EDN: AWMNSM