

Машиностроение Mechanical engineering

Обзорная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2782-5957-2024-10-4-11

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Денис Александрович Дербуш¹, Михаил Геннадьевич Шалыгин², Елена Сергеевна Евтух³✉

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ denderbush@yandex.ru

² migshalygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

³ karmanova.helena@yandex.ru

Аннотация

В статье представлен обзор технологий и методов, применяемых при создании контактных электрических соединителей. Показано, что современные исследования направлены на создание поверхностного слоя контактного электрического соединителя с заданными эксплуатационными свойствами. При создании покрытий электрических контактных соединителей работы ведутся как со стороны материалов покрытия, так и с точки зрения технологий нанесения, так и с точки зрения качества поверхности. Большое число исследований подтверждает тезис о том, что необходимо продолжить исследование в данном направлении, с возможностью улучшения характеристик электри-

ческих контактов. Установлено, что необходимо продолжить исследование совершенствованием технологий нанесения покрытий с обеспечением заданной контактной плотности тока и большего коэффициента трения, обеспечивающего большее число циклов для разъемных контактных соединителей. Увеличить коэффициент трения возможно путем увеличения фактической площади контакта соединения посредством технологического изменения режимов нанесения подложки на соединитель, что обеспечит более «гладкую» контактную поверхность соединителя.

Ключевые слова: контакт, площадь, технология, обработка, упрочнение, машиностроение.

Ссылка для цитирования:

Дербуш Д.А. Обзор технологий улучшения эксплуатационных показателей контактных электрических соединителей / Д.А. Дербуш, М.Г. Шалыгин, Е.С. Евтух // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 10. – С. 4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2024-10-4-11.

Original article
Open Access Article

OVERVIEW OF TECHNOLOGIES TO IMPROVE PERFORMANCE CRITERIA OF CONTACT ELECTRIC CONNECTORS

Denis Aleksandrovich Derbush¹, Mikhail Gennadievich Shalygin², Elena Sergeevna Yevtukh³✉

^{1,2,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ denderbush@yandex.ru

² migshalygin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

³ karmanova.helena@yandex.ru

Abstract

The paper provides an overview of the technologies and methods used to develop contact electric connectors. It is shown that modern research is aimed at developing a surface layer of a contact electric connector with specified performance properties. When developing coatings for electric contact connectors, such things as coating materials, application technologies, and surface quality are kept in mind. A large number of studies confirm the thesis that it is necessary to continue research in this direction, with the possibility of improving the characteristics of electric contacts.

Reference for citing:

Derbush DA, Shalygin MG, Yevtukh ES. Overview of technologies to improve performance criteria of contact electric connectors. Transport Engineering. 2024;10:4-11. doi: 10.30987/2782-5957-2024-10-4-11.

Введение

В технике применяется все больше электронных средств, направленных на облегчение работы оператора. Передача сигнала в таких средствах осуществляется посредством контактных разъемных и неразъемных электрических соединителей. Интерес к электрическим контактам растет из-за расширения областей их применения и необходимости работы в экстремальных условиях. Одним из главных преимуществ электрических соединителей является низкое сопротивление в замкнутой электрической цепи и высокое сопротивление в разомкнутой цепи. Электрические контакты способны коммутировать высоковольтные электрические цепи с напряжением в десятки и сотни киловольт. Кроме того, потери электрической энергии на контакте в статическом режиме работы минимальны. Например, работа техники в условиях запыленности и вибраций предполагает,

Обзор

В работе с электрическими соединителями выделяется несколько основных недостатков. Во-первых, низкая скорость работы является одной из главных проблем. Включение и отключение соединителей может занимать значительное время, что замедляет процесс. Во-вторых, существует риск возникновения электрических разрядов при использовании этих соединителей. Это может быть опасно и привести к непредвиденным последствиям. Другой недостаток - механический и электрический износ соединителей. При постоянном

It is found out that it is necessary to continue the study by improving coating technologies to ensure a given contact current density and a higher friction factor, which provides a greater number of cycles for detachable contact connectors. It is possible to increase the friction factor by increasing the actual contact area of the joint by technologically changing the modes of applying the substrate to the connector, which will provide a smoother contact surface of the connector.

Keywords: contact, area, technology, treatment, hardening, mechanical engineering.

что электрический соединитель должен обладать высоким коэффициентом трения покоя. Для этого применяют специальные методы нанесения покрытий на соединители и специальные сплавы. Тем не менее, такие технологии и сплавы должны удовлетворять основным функциям электрического соединителя – это передача стабильного электрического контакта. Часто при использовании электрических контактов возникают проблемы, связанные с их старением и износом. Это приводит к нестабильной работе и ухудшению показателей электрических контактов, что в конечном итоге выводит из строя функционирование электрического контакта, поэтому необходимо искать пути решения данной проблемы. В настоящей статье приведен обзор последних исследований в данной области.

использовании они могут стать неэффективными и требовать замены. Наконец, вибрация, возникающая при соударении движущихся и неподвижных частей соединителя, также является проблемой. Особенно эти проблемы проявляются в переходный период при включении и отключении электрических цепей. Все эти недостатки важно учитывать при использовании электрических соединителей и их пытаются решить совершенствованием способов нанесения покрытия на поверхность соединителя.

Так, в качестве твердой смазки и структурной составляющей триботехнического композита был использован свинец [1]. Одним из предполагаемых эффектов было уменьшение износа композита с помощью свинцовой пластины толщиной 1,5 мм. Порошковая основа для композита была получена путем восстановления из шлифовального шлама, полученного в процессе производства подшипников. Однако, непританые композиты быстро изнашивались из-за их низких механических свойств и высокого электросопротивления, как в присутствии свинцовой пластины, так и без нее. Спекание при температуре ниже 1000 °С в электрической печи без вакуума высокопористых композитов состава подшипниковая сталь-графит показало повышение износостойкости композита при скольжении по медному контртелу и при воздействии электрического тока с высокой контактной плотностью (более 100 А/см²). Для триботехнического нагружения композитов использовалась схема контакта типа вал-колодка с скоростью скольжения 5 м/с и контактным давлением 0,09 МПа. Авторы [1] установили, что при скольжении на поверхности меди возникает слой передачи, который существенно снижает электропроводность контакта и увеличивает его шероховатость. Износ начинался при плотности контактного тока 150...200 А/см², а при наличии свинцовой пластины в зоне контакта - при плотности контактного тока 250...300 А/см². Авторами сделан вывод о перспективности использования восстановленной подшипниковой стали для создания токопроводящих материалов, устойчивых к износу под высокой контактной плотностью электрического тока.

Продление срока службы контактов улучшением износостойкости материала коммутации, и сокращением потерь напряжения на контактном переходе предлагается за счет использования для электрических контактов материала на основе серебра, содержащего никель (в диапазоне от 9,0 % до 24,8 %), ниобий (в диапазоне от 0,5 % до 7,0 %) и серебро (оставшаяся часть) [2]. Отмечается, что такой материал обладает износостойкостью коммутации

на уровне $(4,50...4,85)10^{-7}$ Г/цикл и потерями напряжения на контактном переходе (13...200) при токе 32 А. Использование новой составной композиции серебро-оксид олова приводит к избавлению от вредного оксида кадмия, который приводил к появлению трещин в материале, что значительно повысило качество, надежность и износостойкость материалов электрических контактов [3].

На основе изготовления пористых заготовок путем смешивания графита, кокса и связующего в пропорции, где графит составляет не менее 15 % от общей массы предложен способ изготовления материалов скользящих электрических контактов [4]. Заготовка формируется следующим образом: обжиг заготовок для образования остаточного кокса из связующего и создания открытой пористости в заготовках; насыщение заготовок газофазным термодиффузионным методом, при котором пиролизный углерод образуется на поверхности открытых пор в движущейся зоне пиролиза путем импульсной подачи углеводородного газа и последующей его откачки. Подвижная зона пиролиза формируется путем поддержания температуры одной стенки упомянутой заготовки в диапазоне температур разложения упомянутого углеводородного газа и увеличения температуры противоположной стенки заготовки от температуры окружающей среды в начале процесса газофазного термодиффузионного насыщения до температур разложения упомянутого углеводородного газа в конце процесса газофазного термодиффузионного насыщения со скоростью 1,0...10,0 °С/час. В итоге авторам [4] удалось получить материал для скользящих электрических контактов с улучшенными эксплуатационными характеристиками: твердость на внешней поверхности не менее 36 НС, твердость на глубине, равной половине толщины материала, измеренную послойным методом, не менее 30 НС, удельное электрическое сопротивление, 4-17 мкОм·м, потеря в объеме в электрической дуге, (2,3 кА, 0,5 с) 3...49 мм³ и плотность 1,33...1,8 г/см³.

В работе [5] авторами был разработан способ повышения эрозионной стойко-

сти контактов. Для этого оксиды были смешаны с серебряными компонентами в два этапа: до процесса сепарации и после него. Во время процесса внутреннего окисления, контакты были добавочно давлены и обжарены при температуре 815...900 °С в течение 1...1,5 часов на открытом воздухе. Затем контакты снова были дополнительно давлены и подвергнуты отжигу при температуре 500 °С в течение 1 часа на открытом воздухе. В работе [6] на поверхность контакта из электротехнической меди наносили покрытие из композита железо-медь. Толщина покрытия составляла от 15 % до 45 % от общей толщины контакта. Процентное содержание железа в материале покрытия плавно уменьшается от поверхности покрытия к границе с контактом, начиная с не менее чем 30% на поверхности и заканчивая не более чем 10% на границе. Таким образом, процентное содержание железа в композите может варьироваться от 80% на поверхности до нуля на границе. Это приводило к увеличению ресурса работы контакта.

Описаны причины возникновения неисправностей в электрических соединителях, а также причины износа покрытий на контактных поверхностях [7]. Было выяснено, что около половины износа объясняется фреттинг-изнашиванием. Был проведен качественный анализ фрикционного износа электрических разъемов с использованием экспериментальных и аналитических методов. Авторами [8] на основе контактной теории Герца с использованием решения Буссинеска и уравнения координаты контактной деформации были получены длинно- и короткоосные параметры контактной эллиптической поверхности. С помощью испытания электрических разъемов на синусоидальную вибрацию был проанализирован механизм разрушения фреттинг-износа и механизм изменения ЭЦР электрических разъемов в условиях вибрации. Определен наиболее эффективный диапазон начальной величины замыкания гнездовой пружины электрического соединителя с цилиндрическим пазом, что стало ориентиром для проектирования надежности электрических соединителей. Исследованию основных типов пленок и

процессы их образования на контактах электрических соединителей посвящена работа [9]. Отмечено, что в реальных рабочих условиях невозможно получить абсолютно чистые поверхности без пленок, который можно достичь только чистого металлического контакта в вакууме, поэтому при анализе влияния различных пленок на электрические свойства контактов необходимо применять индивидуальный подход, учитывая все факторы, воздействующие на электрический соединитель, его рабочие условия и требования к надежности.

В работе [10] исследуется влияние термообработки на тонкие пленки графена, нанесенные распылением на композиты углеродное волокно/полиэфирэфиркетон для уменьшения содержания пустот быстрого производства, подходящие для автоматизированных производственных процессов. Тонкие пленки графена, нанесенные на ленты препрега, имели среднеквадратическую шероховатость 1,99 мкм и средний угол смачивания 11°. После термообработки шероховатость увеличилась до 2,52 мкм при среднем угле смачивания 82°. СЭМ-изображения, угол контакта и измерения шероховатости поверхности коррелируют, что позволяет предположить успешное удаление избытка поверхностно-активного вещества и влаги с помощью термообработки. Рамановская спектроскопия использовалась для характеристики химического качества консолидированной прослойки графена. Термическая обработка контрольного образца успешно снизила содержание пустот с 4,2 об.% до 0,4 об.%, что привело к увеличению прочности на сдвиг на сжатие на 149 %. Для сравнения, термообработка образцов с улучшенным графеном (~ 1 мас.%) снизила содержание пустот с 5,1 об.% до 2,8 об.%. Хотя было измерено снижение прочности на сдвиг на 25 %, улучшенная электропроводность межламинарной области расширяет потенциальные возможности применения термопластичных композитов, армированных волокном.

Авторами [11] был рассмотрен метод горячего прессования порошкового спекания и процессы горячей экструзии на элект-

трических контактных соединителях из материалов, которые используются для контактных соединений. Итогом сравнения, проведенного при взаимодействии Cu-SnO₂ материалов и использовании Cu-ZnO₂ контакта стало заключение о том, что проводимость Cu-SNO₂ гораздо лучше, чем у материала с повышенной вязкостью, а также обладает лучшими свойствами для приготовления контактных материалов. Исследованию использования углерода в качестве диффузионного барьера тетраэдрита Cu₁₁Mn₁Sb₄S₁₃, а также эффективность различных методов фиксации для изготовления электрических контактов тетраэдрит/медь посвящена работа [12]. Контактное сопротивление измерялось с помощью специально изготовленной системы, основанной на методе трехточечного импульсного тока. Интерфейсы ветвей (Cu/графит/тетраэдрит) исследованы методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, дополненной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией и рентгеновской дифракцией. Между графитом и тетраэдритом или медью не образовалось межфазных фаз, что указывает на то, что графит является хорошим диффузионным барьером. Краска на водной основе Ag оказалась лучшим соединительным материалом, но использование горячего прессования без соединительных материалов преимущественно более надежный метод, обеспечивающий самые низкие значения контактного сопротивления. Таким образом, контактные сопротивления сильно снижают выходную мощность термоэлектрических устройств.

Работа автора [13] посвящена исследованию создания покрытий на медных электрических контактах, при применении серебра и карбида вольфрама, которая включает использование взрывного проводника, состоящего из двухслойной серебряной оболочки и сердечника из порошка карбида вольфрама. После формирования продуктов детонации импульсной плазменной струей происходит плавление поверхности медного контакта с поглощаемой мощностью 4,5...6,5 ГВт/м². Далее на поверхность наносится композиционное покрытие WC-Ag, после которого осуще-

ствляется азотирование при температуре 500...600 °С в течение 3...5 часов. В конце процесса покрытие обрабатывается импульсно-периодическим электронным пучком с поглощаемой плотностью энергии 40...60 Дж/см, длительностью импульсов 150...200 мкс и количеством импульсов 10...30.

Анализ факторов, влияющих на нестабильность характеристик электрически вращающихся соединителей трения качения и трения скольжения, которые обусловлены наличием окисных пленок, показал, что частичное нагревание места контакта подвижных элементов этих соединителей может частично решить данную проблему [14]. Однако, это можно достичь путем использования замкнутой жидкой среды (например, трансформаторного масла) или инертного газа внутри соединителя. Повышению эрозионной стойкости электрических контактов для средненагруженной коммутационной аппаратуры посвящена работа [15].

Общий подход к моделированию взаимодействия шероховатых поверхностей в электрических контактных соединениях с использованием анализа марковского процесса описан в работе [16]. Данная поверхность считается имеющей случайные состояния с различными компонентами, такими как неровности и выступы. Изменения происходят при взаимодействии элементов поверхности друг с другом. Применяя описанный метод, можно рассчитать многократное распределение вероятностей поверхностных состояний с течением времени, при помощи марковского процесса. Следовательно, при распределении вероятностей можно оценить некоторые свойства взаимодействия поверхностных состояний с течением времени. Перемещающиеся выступы одной поверхности разной высоты воздействуют на каждый выступ на поверхности. Взаимодействуют друг с другом только самые высокие выступы, и вероятность изменения протомера при контакте минимальна. Это приводит к выводу, что движение любого поверхностного материала является пуассоновским. Характеристики трения в каждый момент времени определяются соответствующими

распределениями. Режим усталостного разрушения определяется как состояние, при котором элемент поверхности выходит из строя после нескольких точек контакта. Выбор подходящего интервала выборки для пересчета распределений позволяет существенно ускорить численный анализ этой модели за счет изменения матрицы вероятностей перехода.

В работе [17] рассмотрена электрическая соединительная система, которая включает в себя следующие компоненты: уплотнительную прокладку, размещенную между поверхностью основания и поверхностью соединителя; а также тонкопленочные силоизмерительные элементы, связанные с уплотнительной прокладкой и соединенные последовательно в электрическую цепь. Эти элементы способны создавать проводящий путь через последова-

Заключение

При создании покрытий электрических контактных соединителей работы ведутся в различных направлениях. Большое число исследований подтверждает тезис о том, что необходимо продолжить исследование для улучшения характеристик электрических контактов и, в частности, совершенствования технологий нанесения покрытий с обеспечением заданной контактной плотности тока и большего коэффициента трения, обеспечивающего боль-

тельную электрическую цепь. Кроме того, соединитель или основание содержат один или несколько контактов, которые могут быть использованы для электрического соединения и последовательного формирования электрической цепи. Путем измерения тока через последовательную электрическую цепь и вывода диагностического кода, воздействие на ток через эту цепь оказывается ниже заданного уровня.

Использование цангового зажима для разъемных контактных соединений для достижения необходимого давления в месте соединения приведено в [18]. Отмечено, что осевое усилие создается путем подвешивания электрического аппарата к хвостовой части гибкого токопровода цанговой розетки. Ламели на кольцевую обойму надежно фиксируют неподвижный контакт.

шее число циклов для разъемных контактных соединителей. Увеличить коэффициент трения возможно путем увеличения фактической площади контакта соединения посредством технологического изменения режимов нанесения подложки на соединитель, что обеспечит более «гладкую» контактную поверхность соединителя. Однако, при этом следует обеспечить не уменьшение коэффициента трения по-
коя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А. Износ спеченных композитов на основе подшипниковой стали при граничном трении с токосъемом по меди // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 10. С. 780-786.
2. Барковский А.И. и др. Материал для электрических контактов на основе серебра // Патент на изобретение RU 2067129 C1, 27.09.1996. Заявка № 93007768/02 от 10.02.1993.
3. Барковский А.И., Дуксина А.Г., ПравOVEROV Н.Л. Материал для электрических контактов на основе композиции серебро - оксид олова // Патент на изобретение RU 2032954 C1, 10.04.1995. Заявка № 93004059/07 от 28.01.1993.
4. Гершман Е.И., Бучнев Л.М., Гершман И.С. Способ изготовления материала на основе графита для скользящих электрических контактов и материалов // Патент на изобретение RU 2708291 C1, 05.12.2019. Заявка № 2018140270 от 15.11.2018.
5. ПравOVEROV Н.Л., Дуксина А.Г. Способ получения материала для электрических контактов на основе серебра // Авторское свидетельство SU 1632255 A1, 20.04.1995. Заявка № 4679685/02 от 01.03.1989.
6. Рутберг Ф.Г., Кузнецов В.Е., Будин А.В., Ширяев В.Н. Электрический контакт с композитным покрытием // Патент на полезную модель RU 152890 U1, 20.06.2015. Заявка № 2014146686/07 от 20.11.2014.
7. Сафонов А., Сафонов Л. Прямоугольные электрические соединители. Фреттинг-коррозия в электрических контактах // Технологии в электронной промышленности / 2009. № 3 (31). С. 48-54.
8. Baohua Wen et al. Research on the Influence of the Closing Amount of Electrical Connector Contacts on Fretting Wear under a Vibration Environment,

Zhejiang Province's Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product, Zhejiang Sci-Tech University // Hangzhou 310018, China, Hangzhou Aerospace Electrical Technology Co., Ltd., Hangzhou 310015, China, 2023, 12(11).

9. Сафонов А., Сафонов Л. Прямоугольные электрические соединители. Пленки на электрических контактах // Технологии в электронной промышленности // 2008. № 5 (25). С. 58-62.
10. Christopher Leow et al. Heat treated graphene thin films for reduced void content of interlaminar enhanced CF/PEEK composites, 2023, 4:7.
11. Guanyu Cao et al. Contrastive Research on Electrical Contact Performance for Contact Materials of Cu-SnO₂ and Cu-ZnO₂ Alloys, 2019, 22(3): e20180901.
12. Rodrigo Coelho et al. An Electrical Contacts Study for Tetrahedrite-Based Thermoelectric Generators, 2022, Materials 15(Materials Physics in Thermoelectric Materials):6698.
13. Хёпнер У. Электрический соединитель, ответная часть электрического соединителя, электрическое штепсельное соединение и сборный электрический кабель // Патент на изобретение RU 2569317 C2, 20.11.2015. Заявка № 2012142509/07 от 28.02.20165.
14. Золотухин И.С., Ефимович И.А. Анализ возможности применения существующих электри-

ческих вращающихся соединителей для измерения термо-эдс резания // В сборнике: Нефть и газ Западной Сибири. материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию Тюменского государственного нефтегазового университета / 2011. С. 24-28.

15. Правоверов Н.Л. и др. Биметаллический металлокерамический материал для электрических контактов / Патент на изобретение SU 1415970 A1 от 26.06.1984, Заявка № 3755904/07 от 20.04.1995.
16. Горицкий Ю.А., Гаврилов К.В., Исмаилова Ю.С., Шевченко О.В. Марковская модель изменения шероховатых поверхностей при механическом взаимодействии // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 101-110.
17. Ганнем М.Ю., Карремм С.А., Дудар А.М., Хейдж К. Электрическая соединительная система (варианты) и уплотнительная прокладка электрического соединителя // Патент на изобретение RU 2669325 C1, 10.10.2018. Заявка № 2016124539 от 21.06.2016.
18. Мироченко В.И. Способ изготовления электрического соединения и электрический соединитель. Патент на изобретение RU 2204874 C2, 20.05.2003. Заявка № 2001111477/09 от 27.04.2001.

REFERENCES

1. Aleutdinova MI, Fadin VV, Aleutdinov KA. Wear of sintered composites based on bearing steel at boundary friction with current collection against copper. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(10):780-786.
2. Barkovsky AI. RF Patent for invention No. RU 2067129 C1 Material for electric contacts based on silver. 1996 Sept 27.
3. Barkovsky AI, Duksina AG, Pravoverov NL. RF Patent for invention No. RU 2032954 C1 Material for electrical contacts based on the composition silver - tin oxide. 1995 Oct 04.
4. Gershman EI, Buchnev LM, Gershman IS. RF Patent for invention No. RU 2708291 C1 Method of manufacturing graphite-based material for sliding electrical contacts and materials. 2019 Dec 05.
5. Pravoverov NL, Duksina AG. Author's certificate SU 1632255 A1 Method for obtaining a material for electrical contacts based on silver. 1995 Apr 20.
6. Rutberg FG, Kuznetsov VE, Budin AV, Shiryaev VN. RF Patent for utility model No. RU 152890 U1 Electric contact with composite coating. 2015 Jun 20.
7. Safonov A, Safonov L. Rectangular electrical connectors. Fretting corrosion in electrical contacts. *Tekhnologii v Elektronnoy Promishlennosti*. 2009;3(31):48-54.
8. Baohua W. Research on the influence of the closing amount of electrical connector contacts on fretting wear under a vibration environment. Zhejiang

Province's Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product. Hangzhou 310018 (China); 2023;12(11).

9. Safonov A, Safonov L. Rectangular electrical connectors. Films on electrical contacts. *Tekhnologii v Elektronnoy Promishlennosti*. 2008;5(25):58-62.
10. Christopher L. Heat treated graphene thin films for reduced void content of interlaminar enhanced CF/PEEK composites. 2023;4:7.
11. Guanyu C. Contrastive research on electrical contact performance for contact materials of Cu-SnO₂ and Cu-ZnO₂ alloys. 2019;22(3):e20180901.
12. Rodrigo C. An electrical contacts study for tetrahedrite-based thermoelectric generators. *Materials 15(Materials Physics in Thermoelectric Materials)*. 2022;6698.
13. Hepner U. RF Patent for invention No. RU 2569317 C2 Electrical connector, the mating part of an electrical connector, an electric plug connection and a prefabricated electric cable. 2015 Nov 20.
14. Zolotukhin IS, Efimovich IA. Analysis of the possibility of using existing electric rotating connectors for measuring thermo-EMF cutting. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 55th anniversary of the Tyumen State Oil and Gas University: Oil and Gas of Western Siberia. 2011. p. 24-28.
15. Pravoverov NL. RF Patent for invention No. SU 1415970 A1 Bimetallic metal-ceramic material for electrical contacts. 1984 Jun 26.

16. Goritsky YuA, Gavrilov KV, Ismailova YuS, Shevchenko OV. The Markov model of alteration of rough surfaces during their mechanical interaction. *VestnikMEI*. 2017;5:101-110.
17. Ghanem MYu, Karremm SA, Dudar AM, Hage K. RF Patent for invention No. RU 2669325 C1 Elec-

trical connection system (options) and sealing gasket of an electrical connector. 2018 Oct 10.

18. Mirochenko VI. RF Patent for invention No. RU 2204874 C2 Method of manufacturing an electrical connection and an electrical connector. 2003 May 20.

Информация об авторах:

Дербуш Денис Александрович – инженер-исследователь, аспирант Брянского государственного технического университета; тел. +7-960-561-76-58.

Шалыгин Михаил Геннадьевич – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государ-

ственного технического университета; тел. +7-903-868-85-68.

Евтух Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Трубопроводные транспортные системы» Брянского государственного технического университета; тел. +7-952-967-08-46.

Derbush Denis Aleksandrovich – Research Engineer, Postgraduate Student at Bryansk State Technical University; phone: +7-960-561-76-58.

Shalygin Mikhail Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the De-

partment «Pipeline Transport Systems» at Bryansk State Technical University; phone: +7-903-868-85-68.

Yevtukh Elena Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Pipeline Transport Systems» at Bryansk State Technical University; phone: +7-952-967-08-46.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 19.08.2024; одобрена после рецензирования 21.08.2024; принята к публикации 26.09.2024. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 19.08.2024; approved after review on 21.08.2024; accepted for publication on 26.09.2024. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.