

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.891
doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Электрохимическое шлифование гальванизированных электрических соединителей для увеличения коэффициента трения покоя в соединении

Анатолий Григорьевич Суслов¹, д.т.н.
Денис Александрович Дербуш², инженер-испытатель

Михаил Геннадьевич Шалыгин³, д.т.н.
^{1,3} Брянский государственный технический университет, Брянск
² НИЦ (ИМО и ИО) войсковой части 15644, Знаменск

¹ naukatm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² denderbush@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0831-5557>

³ migshalygin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8102-9918>

Аннотация. Рассмотрено гальваническое покрытие электрических соединителей. Установлено, что существующие технологии нанесения гальванических покрытий обеспечивают то качество поверхности, которое было получено на подложке. На примере гальванического никелирования на медную подложку предложен способ повышения качества поверхностного никелированного слоя. В качестве дополнительной технологической операции предложено использовать электрохимическое шлифование. Чередование электрохимического шлифования и гальванического никелирования позволит получить более качественный поверхностный слой никеля, что позволит обеспечить большую площадь фактического контакта в соединении. Это, в свою очередь, позволит повысить коэффициент трения покоя и надежность электрического соединения при вибрациях. Представленная поверхность обеспечит минимальное число трещин, глубоких царапин и вмятин на изделии, что в свою очередь увеличивает электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, а также снижает возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление.

Ключевые слова: никелирование, электрохимическое шлифование, коэффициент трения покоя, качество поверхности, площадь фактического контакта

Для цитирования: Суслов А.Г., Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г. Электрохимическое шлифование гальванизированных электрических соединителей для увеличения коэффициента трения покоя в соединении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Electrochemical grinding of galvanized electrical connectors for the raise of static coefficient of friction in the connection

Anatoly G. Suslov¹, D.Eng.
Denis A. Derbush², Test engineer
Mikhail G. Shalygin³, D.Eng.

^{1,3} Bryansk State Technical University, Bryansk
² RDE (IMMO and IO) of military unit 15644, Znamensk

¹ naukatm@yandex.ru

² denderbush@yandex.ru

³ migshalygin@yandex.ru

Abstract. *Galvanic coating of electrical connectors is viewed. It was established that the existing electroplating technologies ensure the surface quality that was obtained on the support material. Using the example of galvanic nickel plating on a copper support plate, a method for improving the quality of the nickel-plated surface layer is proposed. It is proposed to use electrochemical grinding as an additional technological operation. Alternating electrochemical grinding and galvanic nickel plating will make it possible to obtain a higher-quality nickel surface layer, which will allow for a larger area of actual contact in the connection. This, in turn, will increase the static coefficient of friction and the reliability of the electrical connection during vibrations. The presented surface will provide a minimum number of cracks, deep scratches and dents on the product, which in turn increases electrical conductivity, surface compound of the contact electrical connectors, and also reduces the electrical resistance that occurs when interconnection.*

Keywords: nickel plating, electrochemical grinding, static coefficient of friction, surface quality, actual contact area

For citation: Suslov A.G., Derbush D.A., Shalygin M.G. Electrochemical grinding of galvanized electrical connectors for the raise of static coefficient of friction in the connection / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48

Введение

Подвижные соединения представляют собой одни из самых ненадежных элементов техники, что приводит к значительным материальным и энергетическим потерям, масштабы которых могут достигать десятков миллиардов рублей. Один из наиболее распространенных типов подвижных соединений в технической сфере – это электрические контакты. Они должны обеспечивать высокую эксплуатационную надежность работы энергетических систем и автоматических устройств. Надежность работы сопряжения электрических соединителей определяется через качество поверхностного слоя, которую влияет на коэффициент трения покоя и на долговечность работы сопряжения. Обеспечению должного качества поверхностного слоя соединений посвящено значительное число работ [1, 2]. Большая часть электроэнергии, вырабатываемой в мире, проходит через скользящие электрические контакты, поэтому даже небольшое снижение электрических и механических потерь в этих контактах может привести к значительной экономии энергии.

Одним из этапов в производстве электрических контактов является гальваническая обработка [3]. Наносимая металлическая пленка предотвращает коррозию и окисление поверхностей, придавая им привлекательный внешний вид, а также улучшая износостойкость, твердость и электропроводность. Существует множество видов гальванических покрытий, которые наносят на различные

электрические контакты. Среди них меднение, хромирование, никелирование, серебрение, золочение и другие.

Меднение в основном применяют как подслоя при нанесении никеля, хрома, серебра и золота, т. к. медные покрытия не обладают надежными антикоррозионными свойствами.

Хромирование используется для защиты от коррозии деталей из стали, меди, алюминия и никеля, а также для повышения отражательной способности поверхности (до 70 %), износостойкости, жаростойкости и твердости.

Серебряное покрытие, применяется в основном для улучшения электропроводности поверхности деталей. Оно способствует коррозионной стойкости против щелочей и некоторых органических кислот.

Золотое покрытие применяют для защиты от внешних воздействий, повышения износостойкости и увеличения электропроводности деталей наиболее ответственного назначения, электрических контактных пар, электрических выводов интегральных схем и др.

Никелевое покрытие широко применяется как защитно-декоративное покрытие деталей, работающих в легких и средних условиях эксплуатации. Это покрытие имеет высокую механическую прочность, коррозионную стойкость и красивый внешний вид [4]. Рассмотрим никелевые покрытия, которые наиболее эффективны при нанесении на медь. Пара $Cu-Ni$ идеально сочетаются при гальваническом нанесении.

Гальваническое никелирование осуществляется путем осаждения никеля на подложку посредством электролиза. Никель, благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность и отличная адгезия, образует толстый и прочный слой, что делает его идеальным выбором для защиты меди от окисления и износа [5]. Никелирование обладает множеством преимуществ. Этот процесс позволяет надежно защищать поверхности от воздействия атмосферной коррозии, растворов органических кислот, а также солевых и щелочных сред. Кроме того, никелированная поверхность отличается привлекательным внешним видом, являясь блестящей и гладкой на ощупь [6]. Также стоит отметить, что как сам никель, так и его соединения абсолютно безопасны с точки зрения экологии.

Недостатком гальванического никелирования является то, что слой никеля точно

повторяет рельеф поверхности подложки (рис. 1). Ввиду малых размеров электрических контактов получить механически более качественную поверхность не представляется возможным или является очень дорогостоящей операцией. Повторение слоев никеля геометрии подложки определяет геометрию поверхностного слоя соединителя в целом. Следствием этого является то, что площадь контакта электрического соединителя в сопряжении определяется микрогеометрией подложки. Площадь фактического контакта влияет не только на электропроводимость соединителя, но и на долговечность электрического соединителя, т.к. чем больше площадь фактического контакта, тем больше коэффициент трения покоя, больше устойчивость соединителей к вибрациям и больше число циклов соединения – разъединения.

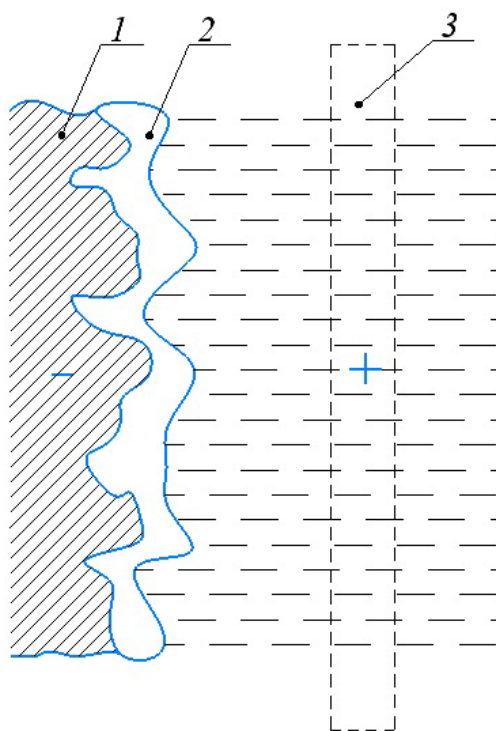


Рис. 1. Схема после нанесения покрытия:

1 – катод; 2 – слой нанесения никеля; 3 – анод

Fig. 1. Scheme after coating:

1 – cathode; 2 – nickel deposition layer; 3 – anode

В работе представлена технология, позволяющая получить никелированное покрытие электрических соединителей с улучшенным

качеством поверхности. Это позволит обеспечить большую площадь фактического контакта в соединении, чем при традиционном

гальваническом никелировании и, как следствие, большие значения коэффициента трения покоя и долговечности готового изделия.

Материалы и методы исследований

Гальванический технологический процесс никелирования электрических соединителей включает нанесение слоя на медную подложку посредством электрохимического осаждения. Основные этапы процесса включают (рис. 2): проведение визуального осмотра обрабатываемой детали для выявления наличия покрытий и оценки состояния поверхности; выполнение процедуры обезжиривания, травления и активации поверхности детали; никелирование подложки осуществляется в специализированной ванне с электролитом, к которой

подключается один или два анода, в зависимости от характеристик ванны и состава электролита и деталь, присоединенная к катоду, помещается в ванну; активируется подача электрического тока, под воздействием которого ионы солей металла направляются к изделию с отрицательным зарядом; на всей поверхности изделия равномерно оседает тонкий слой металла; по завершении гальванического процесса подача электрического тока прекращается, изделие извлекается, тщательно промывается и сушится; при необходимости может быть подвергнуто дополнительной обработке. Заключительным этапом является контроль полученных характеристик (от адгезии до блеска, от теплопроводности до антикоррозионных качеств).

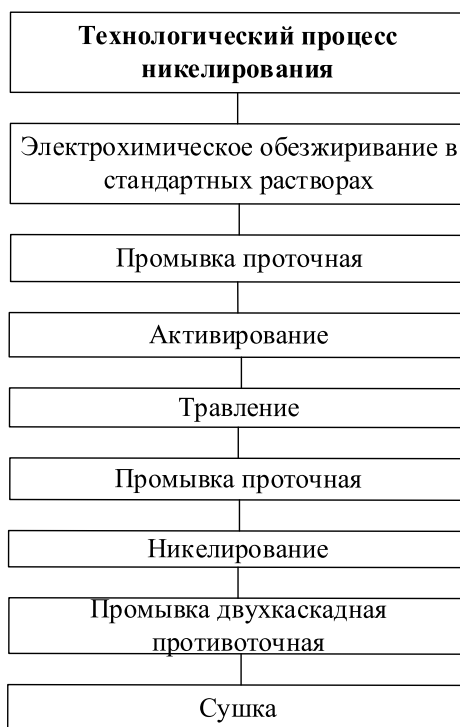


Рис. 2. Схема технологического процесса никелирования

Fig. 2. Diagram of nickel plating technical process

Результаты и обсуждение

Дополнительная технологическая операция позволит улучшить качество поверхности электрического контакта, увеличить

площадь фактического касания, коэффициент трения покоя и долговечность. Такой операцией может быть электрохимическое шлифование (рис. 3).

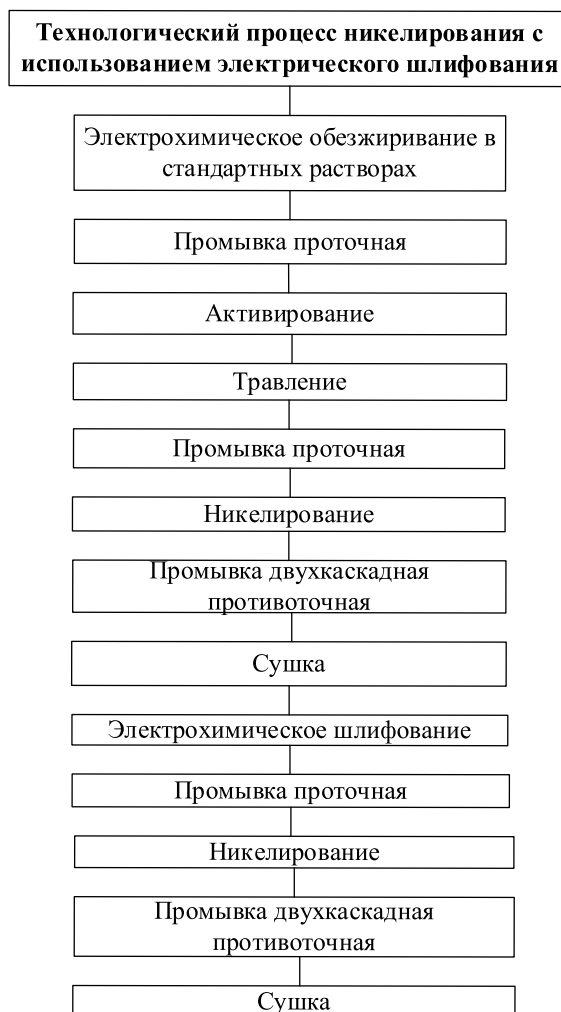


Рис. 3. Технологический процесс никелирования с использованием электрохимического шлифования

Fig. 3. Technical process of nickel plating using electrochemical grinding

Электрохимическое шлифование обладает следующими достоинствами:

- увеличивает прочность и препятствует появлению ржавчины на поверхности металла;
- позволяет снизить время шлифования поверхности заготовки;
- благодаря высокой производительности, во время обработки металла не нарушаются основные конструкции изделия;
- ускоряет процедуру производства шлифования.

Электрохимическое шлифование является процессом, противоположным гальваническому осаждению металлов: обрабатываемая деталь выступает в роли анода и помещается в электролитическую ванну, где при определённых условиях (плотность тока, температура и время погружения) происходит удаление

металла. Анодное растворение применяется в таких операциях, как очистка металлической поверхности, удаление заусенцев и грат, а также заострение и шлифование. Данный процесс позволяет установить ключевые критерии качества поверхностного слоя, такие как макро- и микрогеометрия, наклеп, микроструктура и остаточные напряжения. Эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов, включая усталостную прочность, отражательные свойства, теплоизлучение и теплопоглощение, а также обтекаемость жидкостями и газами и коррозионную стойкость, находятся в прямой зависимости от этих критериев [7]. При внесении изменений в технологический процесс никелирования предлагается проводить частичное электрохимическое шлифование поверхности с повторным нанесением никелирования на полученную поверхность.

При этом, с целью экономии цветных металлов, существуют технологии, позволяющие снять снимаемый слой никеля при гальваническом шлифовании и использовать цветной металл повторно.

Рассмотрим полный технологический процесс никелирования и внесем дополнительные изменения, связанные с проведением электрохимического шлифования:

1. Состав электрохимической ванны для проведения обезжиривания:

1.1. Карбонат натрия (технический) – концентрация – 35 г/л;

1.2. Тринатрий фосфат – концентрация – 40 г/л ;

При режиме работы процесса электрохимического обезжиривания температура состава составляет 40 °С, при постоянной подаче тока $i^k = 5 \text{ А/дм}^2$, при этом напряжение составляет 12 В, время проведения электрохимического обезжиривания 3 мин;

2. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 50 °С;

3. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

4. Химическое травление, состав:

4.1. Серная кислота – концентрация – 1100 г/л;

4.2. Нитрат аммония – концентрация – 275 г/л;

Химическое травление производится на протяжении 1 мин, при температуре состава 25 °С;

5. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

6. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет $t = 50 \text{ °С}$;

7. Состав гальванической ванны для проведения никелирования приведен в табл. 1:

1. Состав гальванической ванны для проведения никелирования

1. Composition of the galvanic tank for nickel plating

Состав	Концентрация, г/л
Сульфат никеля	250
Хлорид никеля	15
Борная кислота	30
Сахарин	0,3
Нафталин	2,0
Моющее средство	0,2

Никелирование производится при постоянном токе $i^k = 4 \text{ А/дм}^2$ кислотно-основных свойств раствора $\text{pH} = 4...5$ и температуре 20 °С с доведением толщины слоя в 20 мкм, при этом необходимо установить время нахождения элемента в электролите на протяжении 2 ч 4 мин. Результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку толщиной в 20 мкм схематично показан на рис. 1;

8. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 мин;

9. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

10. Промывка в теплой воде

производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 50 °С;

11. Сушка элемента на протяжении 5 мин, при температуре 70 °С;

12. Электрическое шлифование;

12.1. Для электрохимического шлифования электролитом служит серная кислота марки «химически чистая» или «аккумуляторная» [8]. Очень важно отсутствие или малое содержание в ней хлор-иона. Техническая серная кислота непригодна. Никаких добавок в электролите не требуется. Предпочтительно применять 30 % кислоту, так как при этой концентрации раствор обладает наивысшей электропроводностью, что выгодно в отношении экономии расхода электроэнергии, минимально

требуемого напряжения повышенной рассеивающей способности, возможности работы при большой плотности тока (при которой нагрев джоулевой теплотой невелик вследствие малого омического сопротивления раствора), и значительной растворимости меди в кислоте такой концентрации [9]. Благодаря этому оно не выпадает в осадок и не мешает процессу. Температура раствора должна быть комнатной (18...20 °С), допустимо повышение до 30 °С. При высоких температурах медь не пассивируется. Медь пассивируется на аноде в серной кислоте, только при значительно более высокой плотности тока – при работе в аккумуляторной серной кислоте плотность тока должна быть не меньше 30...35 А/дм². Верхний предел плотности тока ограничен только мощностью источника тока и опасностью разогрева электролита джоулевой теплотой [10].

12.2. Электрическое шлифование производится с возможностью частичного снятия слоя никеля до 10 мкм, при этом необходимо производить периодический контроль снятия поверхности. Результат проведения электрического шлифования никеля со снятием слоя до 10 мкм схематично показан на рис. 4;

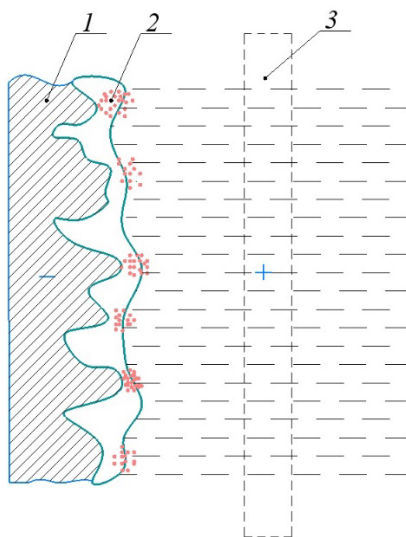


Рис. 4. Схема при проведенном электрическом шлифовании и полученной толщине в 10 мкм:
1 – катод; 2 – слой никеля при электрическом шлифовании; 3 – анод

Fig. 4. Scheme for electric grinding and the resulting thickness of 10 microns:
1 – cathode; 2 – nickel layer during electric grinding; 3 – anode

13. Повторное никелирование производится в тех же условиях с изменением времени до 1 ч 2 мин и доведением толщины слоя в 20 мкм. На рис. 5 схематично показан результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку после электрического шлифования толщиной в 20 мкм.

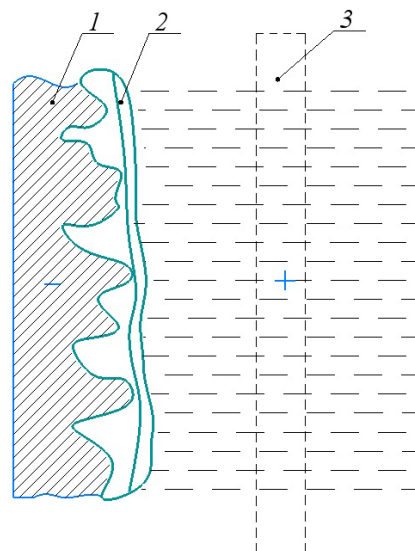


Рис. 5. Схема поверхности электрического контакта при повторном нанесении никелирования:
1 – катод; 2 – слой нанесения никеля в 20 мкм; 3 – анод

Fig. 5. Diagram of the electrical contact surface during nickel plating reapplication:
1 – cathode; 2 – nickel deposition layer of 20 microns; 3 – anode

14. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 мин;

15. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет 20 °С;

16. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет $t = 50$ °С;

17. Сушка элемента на протяжении 5 мин, при температуре 70 °С.

Таким образом, полученная поверхность покажет минимальное число трещин, глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия, что в свою очередь увеличивает электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, снижает возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление

(рис. 5), и повышает качество полученного поверхностного слоя контакта.

Заключение

Повторное никелирование необходимо для увеличения площади контакта, поэтому необходимо дополнительно применять в технологическом процессе никелирования электрохимическую шлифовку, с использованием следующего технологического процесса:

1. Заготовка размещается в ванне с регулируемым электролитом и выполняет функцию анода. Она соединяется с положительной клеммой источника постоянного тока, в то время как отрицательная клемма подключена к катоду.

2. Ток движется от анода, где происходит окисление металла на поверхности, что приводит к его растворению в электролите, к катоду.

3. На катоде осуществляется процесс восстановления, в ходе которого обычно выделяется водород.

4. Электролит проникает через поры покрытия к металлической подложке детали и растворяет её.

5. За счет свойств электролита с вершин изображенных на рис. 4 слой никеля снимается, в то время как на углублениях задерживается.

6. Происходит выравнивание поверхности, с течением времени.

За счет увеличения площади фактического контакта между электрическими соединителями увеличится коэффициент трения покоя в данном сопряжении, что приведет к увеличению ресурса неразъемных соединителей, работающих в условиях вибрации, или разъемных соединителей в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. **Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения** / под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.

3. **Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г., Евтух Е.С.** Обзор технологий улучшения эксплуатационных показателей контактных электрических соединителей // Транспортное машиностроение. 2024. №. 10. С. 4–11.

4. **Астальюхина А.С., Пикалов Е.С.** Обзор путей повышения эффективности современных гальванических производств // Успехи современного естествознания. 2016. № 1. С. 7–8. EDN VLCYWJ

5. **Шумов О.В.** Повышение эксплуатационных свойств защитных покрытий на основе меди // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2008. № 8. С. 22–23. EDN UYZYCI

6. **Астальюхина А.С., Пикалов Е.С.** Обзор видов нанесения и эксплуатационных характеристик защитных гальванических покрытий // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. 2015. № 4-2. С. 111–114. EDN UMKAWF

7. **Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А.** Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). С. 85–86. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86. EDN ASXQRJ

8. **Виноградов С.С., Балахонов С.В., Демин С.А., Кириллова О.Г.** Влияние шлифования композиционного покрытия на его электрохимическое поведение в коррозионной среде // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 44–47. EDN VHXBOX

9. **Гурьев А.А., Сафонова Д.С.** Роль электролита в процессе электрохимического шлифования // Механика XXI века. 2012. № 11. С. 239–241. EDN RDHISV

10. **Апарин В.М., Уткевич А.М., Каневский Ю.Л., Зайцев А.А.** Авторское свидетельство № 545442 А1 СССР, МПК В23Р 1/16. Электролит для электрохимического шлифования : № 2309811 : заявл. 08.12.1975 : опубл. 05.02.1977 / заявитель предприятие П/Я Р-6793. EDN NFDDBPL

REFERENCES

1. Suslov, A. G. The quality of the surface layer of machine parts / A. G. Suslov. Moscow: Scientific and Technical Publishing House «Mashinostroenie», 2000, 320 p.
2. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products / ed. by A.G. Suslov. - Moscow: Innovative engineering, 2022, 552 p.
3. Derbush D.A., Shalygin M.G., Evtukh E.S. Overview of technologies to improve performance criteria of contact electric connectors // Transport Engineering. 2024. No. 10, pp. 4–11.
4. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Summary of ways to enhance the effectiveness of modern galvanic production // Successes of modern natural science. 2016. No. 1, pp. 7–8. EDN VLCYWJ
5. Shumov O.V. Improving the operational properties of copper-based protective coatings // Bulletin of Polotsk

State University. Series B. Industry. Applied sciences. 2008. No. 8, pp. 22–23. EDN UYZYC

6. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Review of the types of application and operational characteristics of protective electroplating coatings // New science: Experience, traditions, innovations. 2015. No. 4-2, pp. 111–114. EDN UMKAWF

7. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review) // Proceedings of VIAM. 2020. No. 12 (94), pp. 85–86. DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86. EDN ASXQRJ

8. Vinogradov S.S., Balakhonov S.V., Demin S.A., Kirillova O.G. The influence of polishing of a composite

coating on its electrochemical behavior in a corrosive medium // Corrosion: materials, protection. 2016. No. 1, pp. 44–47. EDN VHXBOX

9. Guryev A.A., Safonova D.S. The role of electrolyte in the process of electrochemical grinding // Mechanics of the 21st century. 2012. No. 11, pp. 239–241. EDN RDHISV

10. Aparin V.M., Rutkevich A.M., Kanevsky Yu.L., Zaitsev A.A. Copyright certificate No. 545442 A1 USSR, IPC B23P 1/16. Electrolyte for electrochemical grinding : No. 2309811 : application 08.12.1975 : published 05.02.1977 / applicant COMPANY P/I R-6793. – EDN NFDBPL

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.12.2024; одобрена после рецензирования 12.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 22.12.2024; approved after reviewing 12.01.2025; accepted for publication 14.02.2025.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.04.2025. Выход в свет 30.04.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

