

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.27

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-47-59>

Упрочнение корпуса резца дорожной фрезы путем нанесения электроискрового покрытия на основе твердого сплава ВК8

Л.П. Кузнецова^{1✉}, К.Ю. Кузнецов¹, В.И. Колмыков¹, А.С. Переверзев¹,
Б.А. Семенихин¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: lubakk8@list.ru

Резюме

Цель. Разработка технологического процесса упрочнения корпуса резца дорожной фрезы путем нанесения электроискрового покрытия на основе сплава ВК8.

Методы. Для выполнения поставленной цели применялись современные приемы и оборудование. Нанесение покрытий производилось на предварительно подготовленные образцы, изготовленные из резца дорожной фрезы КЗТС А6/20, на установке электроискрового легирования UR-121. Технологические параметры: анод – наконечник резца (твердый сплав ВК8); катод – корпус резца (конструкционная легированная сталь); напряжение искрообразования 70 В; рабочая температура 18–20°C; технологический режим NORMA 100 Гц; амплитуда вибрации вибратора VIBRATION 11; электрический режим обработки MODE 3.

Для изучения элементного состава и микроструктуры упрочняющего покрытия осуществлены снимки при помощи энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в расторовый электронный микроскоп Quanta 600 FEG.

Испытание микротвердости по Виккерсу образцов до и после упрочнения проводили с помощью микротвердомера AFFRI DM-8.

Для испытания прочности, стойкости к царапанию и определения механизма разрушения образца использовали скретч-тестер Revetest.

Результаты. В результате эксперимента были получены электроискровые упрочняющие покрытия на основе сплава ВК8 на корпусе резца дорожной фрезы. Осуществлен рециклинг отходов наконечников резцов путем нанесения износостойких покрытий на корпус резца КЗТС А6/20 методом электроискрового легирования.

Установлено, что упрочняющее покрытие не имеет пор, трещин и других дефектов, основными элементами его являются Fe, W, Mn, Cr, O. Микротвердость покрытия в 1,6 раз выше микротвердости подложки. При царапании покрытие на образцах истирается, но нет отслоек, то есть разрушается по когезионному механизму.

Заключение. Выполненное исследование позволит разработать рекомендации к практическому применению ресурсосберегающих технологий по восстановлению и упрочнению корпусов резцов дорожной фрезы, осуществить процесс рециклинга.

Ключевые слова: электроискровое покрытие; упрочнение; сплав; резец.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Упрочнение корпуса резца дорожной фрезы путем нанесения электроискрового покрытия на основе твердого сплава ВК8 / Л.П. Кузнецова, К.Ю. Кузнецов, В.И. Колмыков, А.С. Переверзев, Б.А. Семенихин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 47–59. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-47-59>

Поступила в редакцию 20.09.2024

Подписана в печать 11.11.2024

Опубликована 13.12.2024

Strengthening the cutter body of a road milling machine by applying an electrospark coating based on VK8 hard alloy

Lyubov P. Kuznetsova^{1✉}, Konstantin Yu. Kuznetsov¹, Valeriy I. Kolmykov¹,
Anton S. Pereverzev¹, Boris A. Semenikhin¹

¹ Southwest State University
50 let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

Abstract

The purpose of the study. Development of a technological process for strengthening the body of a road milling cutter by applying an electric spark coating based on VK8 alloy.

Methods. Modern techniques and equipment were used to achieve the set goal. The coatings were applied to pre-prepared samples made from the cutter of the KZTS A6/20 road milling machine using the UR-121 electric spark alloying unit.

Technological parameters: anode – cutter tip (VK8 hard alloy); cathode – cutter body (structural alloy steel); sparking voltage 70 V; operating temperature 18–20°C; NORMA process mode 100 Hz; vibration amplitude of the vibrator VIBRATION 11; electric processing mode MODE 3.

To study the elemental composition and microstructure of the hardening coating, images were taken using an EDAX energy-dispersive X-ray analyzer built into a Quanta 600 FEG scanning electron microscope.

Vickers microhardness testing of samples before and after hardening was performed using an AFFRI DM-8 microhardness tester.

A Revetest scratch tester was used to test strength, scratch resistance, and determine the mechanism of sample failure.

Results. As a result of the experiment, electrospark hardening coatings based on VK8 alloy were obtained on the cutter body of a road milling machine. Recycling of cutter tip waste was carried out by applying wear-resistant coatings to the cutter body of the KZTS A6/20 by the electrospark alloying method. It was found that the hardening coating does not have pores, cracks and other defects, its main elements are Fe, W, Mn, Cr, O. The microhardness of the coating is 1.6 times higher than the microhardness of the substrate. When scratched, the coating on the samples wears off, but there are no delaminations, that is, it is destroyed by the cohesive mechanism.

Conclusion. The completed study will allow developing recommendations for the practical application of resource-saving technologies for the restoration and strengthening of road milling cutter bodies and implementing the recycling process.

Keywords: electric spark coating; hardening; alloy; cutter.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuznetsova L.P., Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Pereverzev A.S., Semenikhin B.A. Strengthening the cutter body of a road milling machine by applying an electrospark coating based on VK8 hard alloy. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):47–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-47-57>

Received 20.09.2024

Accepted 11.11.2024

Published 13.12.2024

Введение

Нанесение электроискровых покрытий (электроискровое легирование) является микросварочным процессом производства и нашло применение в различных областях машиностроения и металлообработки [1]: повышение режущих свойств обрабатывающего инструмента [2], упрочнение зубьев шестерен, обработка штампов [3], восстановление работоспособности поврежденных поверхностей деталей и др. [4]

Сущность метода нанесения электроискровых покрытий состоит в полярном переносе материала электрода (анода) за счет энергии импульсных разрядов на поверхность изделия, являющегося катодом [3].

К главным отличительным особенностям технологии получения электроискрового покрытия можно причислить:

- получение покрытий с использованием различных материалов на поверхности изделия;
- простота применяемой технологии упрочнения [5];

- компактное, портативное и малогабаритное спецоборудование;
- надежность применяемого оборудования;
- отсутствие необходимости в специальной подготовке поверхности изделия перед нанесением покрытия;
- изделие не испытывает значительного нагрева и деформации во время нанесения покрытия [6].

Целью исследования является разработка технологического процесса упрочнения корпуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20 Кировоградского завода твердых сплавов путем нанесения электроискрового покрытия на основе сплава ВК8.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели были задействованы передовые методы и технические средства.

Блок-схема технологии процесса нанесения электроискрового упрочняющего покрытия на основе сплава ВК8 из наконечника резца дорожной фрезы представлена на рисунке 1 [7].



Рис. 1. Блок-схема технологии процесса нанесения электроискрового покрытия

Fig. 1. Block diagram of the electrospark coating process technology

На первом этапе были изготовлены образцы цилиндрической формы из корпуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20 из конструкционной легированной стали [8]. При изготовлении образцов корпус резца дорожной фрезы был разрезан на несколько частей цилиндрической формы [9], а затем их торцы подвергались шлифованию (для устранения царапин, дефектов, рисок на поверхности) [10], полированию (для удаления мельчайших неровностей и получения блестящей поверхности) и обезжириванию (для удаления различных загрязнений) [11].

Наконечник резца изготовлен из твердого сплава марки ВК8 [12], который используется в качестве анода при нанесении электроискровых покрытий, для чего к их основаниям приварены держатели из токопроводящего материала [13].

Нанесение покрытий производилось на установке электроискрового легирования UR-121 со следующими технологическими параметрами:

- анод – наконечник резца дорожной фрезы, изготовленный из твердого сплава марки ВК8;
- катод – корпус резца КЗТС А6/20, изготовленный из конструкционной легированной стали [10];

- напряжение искрообразования 70 В;
- рабочая температура 18–20°C;
- технологический режим NORMA (частота вибрации электрода – 100 Гц);
- амплитуда вибрации вибратора VIBRATION 11;
- электрический режим обработки MODE 3 [14].

Электроискровое упрочнение проводили при взаимном перемещении электрода относительно образца с постоянной скоростью под углом к обрабатываемой поверхности [15], перемещение электрода проводили пошаговым движением [16].

Применяя специальный метод растровой электронной микроскопии, получены результаты экспериментального исследования микроструктуры полученного упрочняющего покрытия на основе ВК8 по поверхности образца и по поперечному шлифу. С помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG (рис. 2), были получены спектры характеристического рентгеновского излучения в различных точках на поверхности образца и по поперечному шлифу [17].



Рис. 2. Растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG

Fig. 2. Scanning Electron Microscope Quanta 600 FEG

Испытание микротвердости по Виккерсу до и после нанесения упрочняющего покрытия на основе сплава ВК8 проводили с помощью автоматизированного микро-

твердомера AFFRI DM-8 (рис. 3) при нагрузке на индентор 50 г в соответствии с ГОСТ 9450-76. Время нагружения индентора составило 15 с [18].



Рис. 3. Автоматизированный микротвердомер AFFRI DM-8 (по Виккерсу)

Fig. 3. Automated microhardness tester AFFRI DM-8 (Vickers)

Для испытания адгезионной / когезионной прочности, стойкости к царапанию и определения механизма разрушения образца использовали скретч-тестер Revetest (CSM Instruments), схема которого представлена на рисунке 4. Алмазным индентором сферической формы на электроис-

кроевое покрытие образца наносили царапины при усиливающейся нагрузке (0,9–190 Н). Устанавливали точку разрушения электроискрового упрочняющего покрытия после испытаний посредством оптического микроскопа, а также фиксировали изменение коэффициента трения [19].

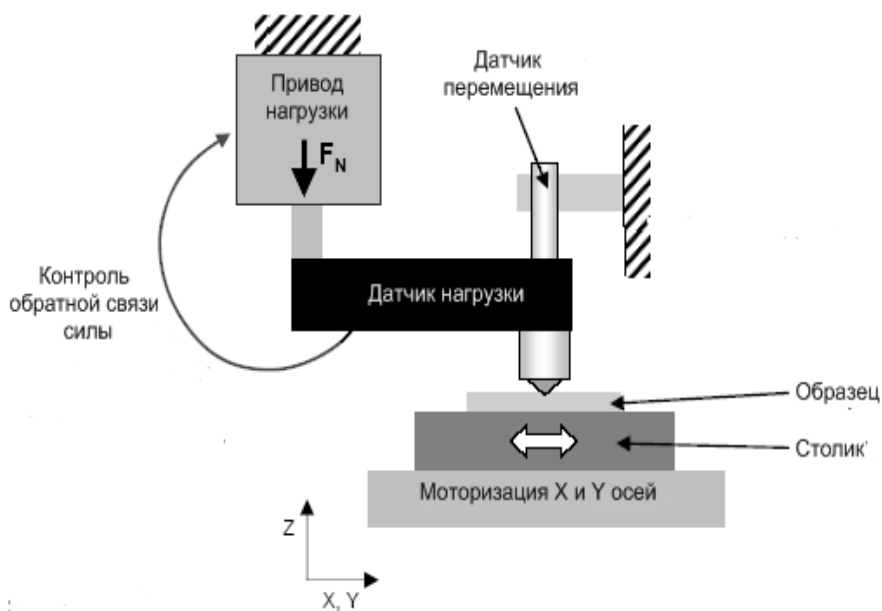


Рис. 4. Схема «Скретч-тестер Revetest»

Fig. 4. Scheme "Revetest Scratch Tester"

Результаты и их обсуждение

В результате процесса нанесения электроискрового покрытия на стальных цилиндрических образцах, изготовленных из корпуса резца дорожной фрезы

КЗТС А6/20 Кировоградского завода твердых сплавов с помощью установки UR-121, было получено упрочняющее покрытие на основе твердого сплава ВК8 [20]. На рисунке 5 представлены стадии нанесения упрочняющего покрытия.



Рис. 5. Стальные цилиндрические образцы из корпуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20: 1 – без покрытия; 2 – с частичным покрытием; 3 – с покрытием

Fig. 5. Steel cylindrical samples from the cutter body of the KZTS A6/20: road milling machine: 1 – without coating; 2 – with partial coating; 3 – with coating

Микроструктура покрытия по поверхности и по поперечному шлифу, полученная электроискровым упрочнением на основе сплава ВК8 представлена на рисунке 6. Упрочняющее покрытие не имеет видимых дефектов, отсутствуют поры и трещины.

На рисунке 7 представлен элементный состав покрытия на основе сплава ВК8. Установлено, что основными элементами упрочняющего покрытия являются Fe, W, Mn, Cr, O.

Результаты измерений микротвердости по Виккерсу представлены в таблице 1.

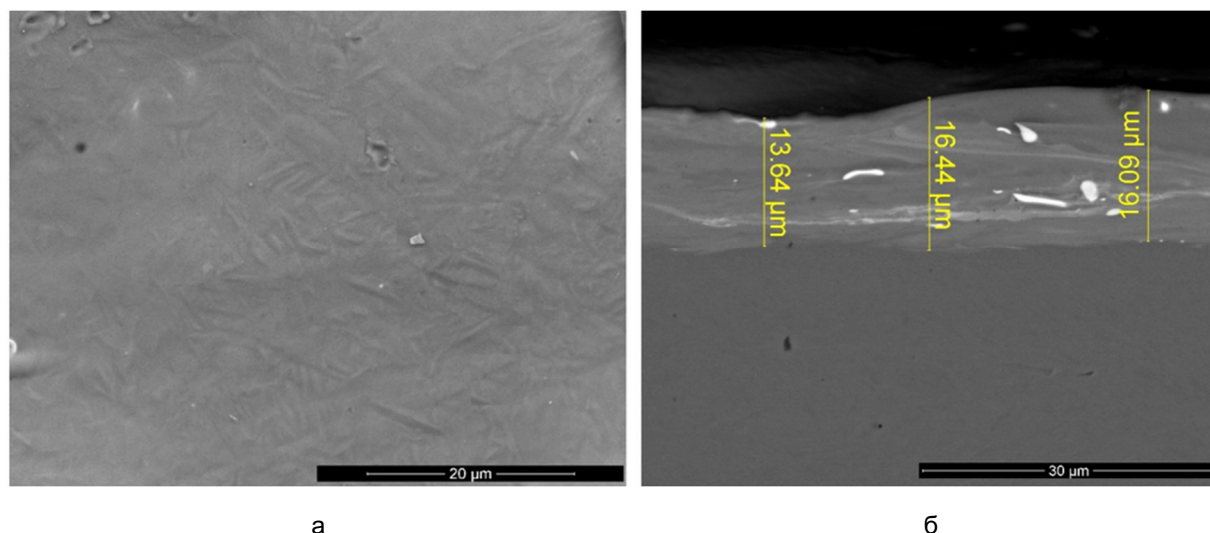


Рис. 6. Микроструктура покрытия, полученного электроискровым упрочнением: а – поверхность; б – поперечный шлиф

Fig. 6. Microstructure of the coating obtained by electric spark hardening: а – surface; б – transverse section

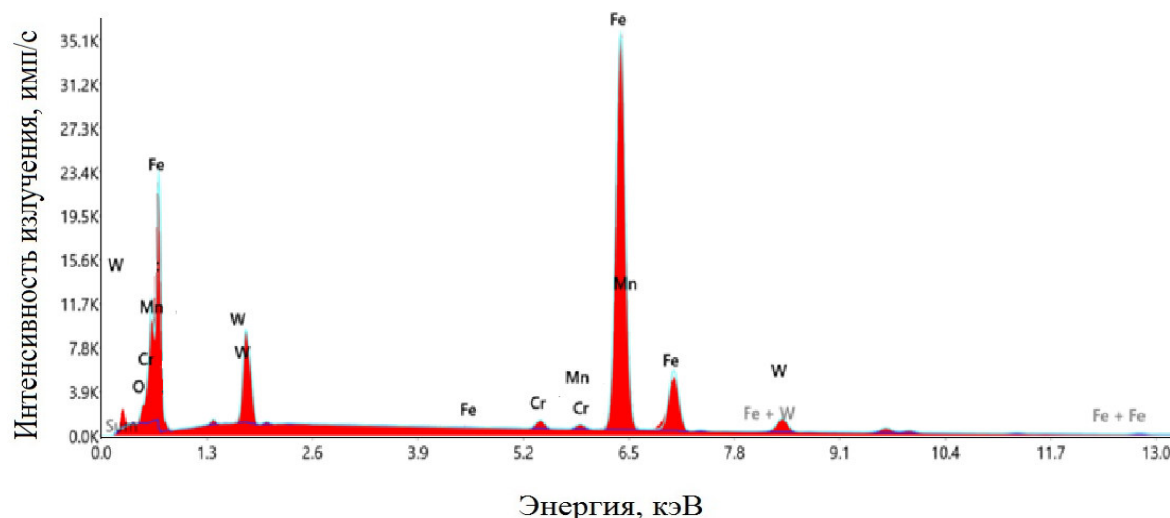


Рис. 7. Элементный состав покрытия на основе сплава ВК8

Fig. 7. Elemental composition of the coating based on VK8 alloy

Таблица 1. Результаты измерений микротвердости по Виккерсу

Table 1. Results of Vickers microhardness measurements

Номер отпечатка Imprint No.	Электроискровое покрытие на основе сплава ВК8 Electrospark coating based on VK8 alloy	Подложка резца А6/20 Cutter backing А6/20
1	649	497
2	780	469
3	606	418
4	812	407
5	672	407
6	672	418
7	696	443
8	649	443
9	649	456
10	627	418
HV _{0.01}	681,2	437,6
МПа	6675,7	4288,4
ГПа	6,676	4,288

На основании полученных результатов установлено, что микротвердость упрочняющего покрытия в 1,6 раз выше микротвердости подложки.

Результаты испытаний адгезионной / когезионной прочности, стойкости к царапанию и определения механизма разрушения упрочняющего покрытия представ-

лены на рисунке 8 в виде оптического (x200) и растрового изображения участка царапины.

В результате испытаний определили минимальную (критическую) нагрузку $L_C = 133,82$ Н, которая приводила к разрушению покрытия (рис. 9).

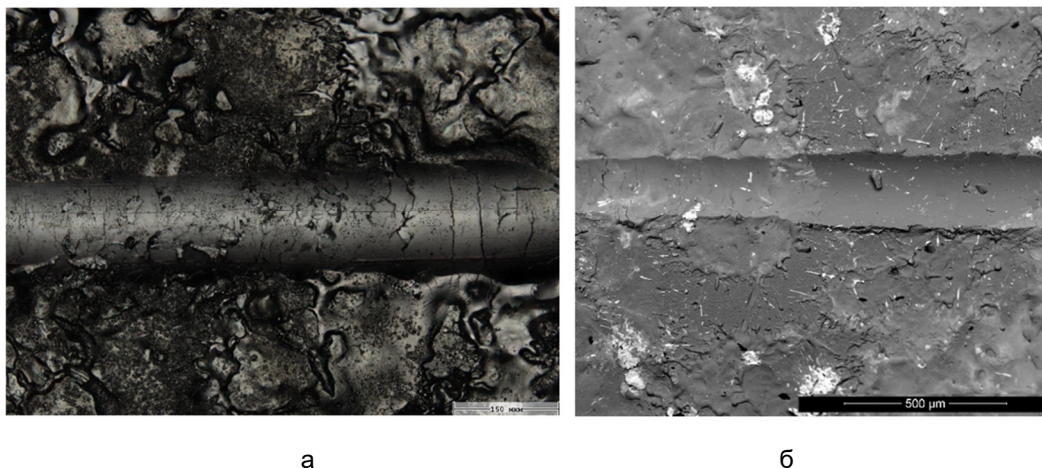


Рис. 8. Изображение участка царапины: а – оптическое; б – растровое

Fig. 8. Image of the scratch area: а – optical; б – raster

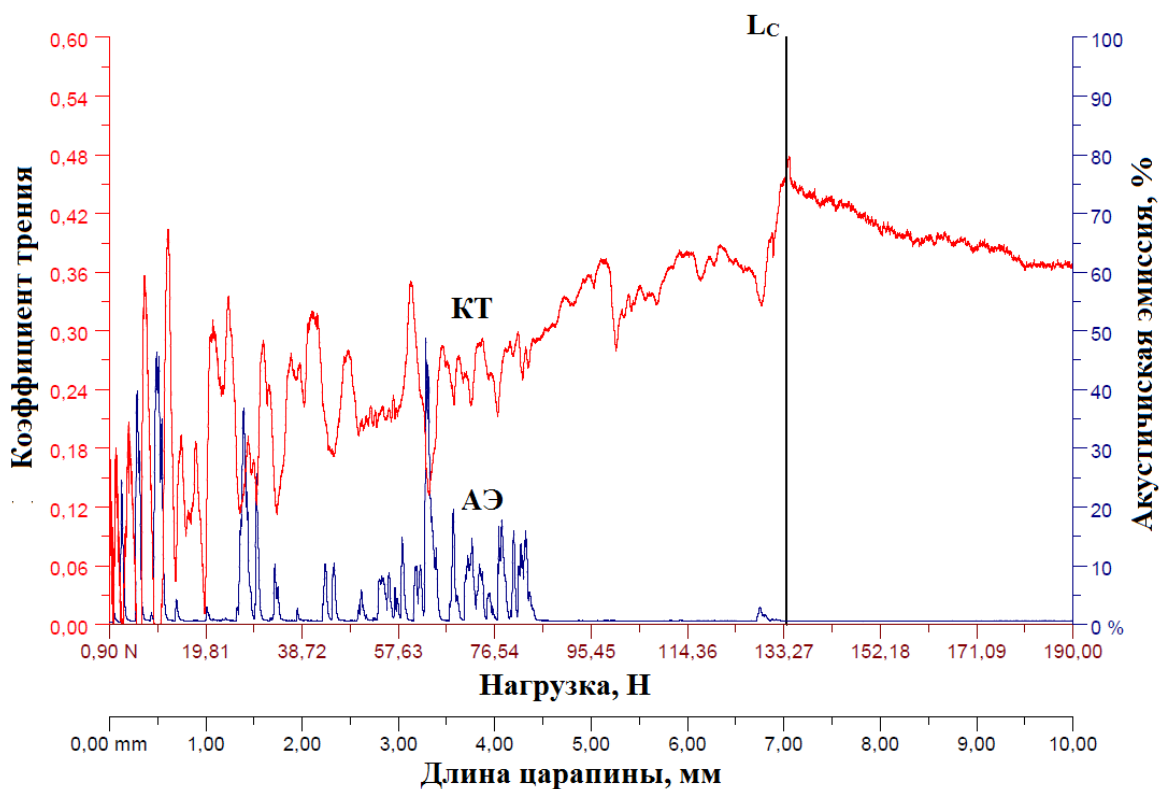


Рис. 9. Зависимости изменения акустической эмиссии и коэффициента трения от приложенной нагрузки

Fig. 9. Dependences of the change in acoustic emission and friction coefficient on the applied load

Установлено, что при царапании покрытие на образцах истирается, но не отслаивается, т. е. разрушается по когезионному механизму.

Выводы

В результате проведенного эксперимента по нанесению электроискрового

покрытия на основе твердого сплава ВК8 из наконечника резца дорожной фрезы на поверхности образца, изготовленного из корпуса резца дорожной фрезы КЗТС А6/20, получено упрочняющее покрытие, которое не имеет видимых дефектов, основными элементами его являются Fe, W, Mn, Cr, O.

Экспериментально установлено, что после электроискрового упрочнения поверхности образцов микротвердость увеличивается в 1,6 раз. При царапании по-

крытие на образцах разрушается по когезионному механизму посредством пластической деформации с образованием усталостных трещин в материале покрытия.

Разработана блок-схема технологии процесса нанесения электроискрового покрытия, рециклинга отходов наконечников резцов дорожной фрезы, изготовленных из сплава марки ВК8, путем нанесения электроискрового упрочняющего покрытия на корпуса резцов дорожных фрез.

Список литературы

1. Астапов Е.С., Борилко А.С. Создание одно- и двухслойных электроискровых окалинстойких покрытий на вольфрамокобальтовых твердых сплавах // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы Всероссийской молодежной научной конференции. Благовещенск: Амур. гос. ун-т, 2012. С. 59–62.
2. Бурумкулов Ф.Х., Иванов В.И. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 2. С. 127–139.
3. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: Техника, 1982. 184 с.
4. Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А., Востриков Я.А. Формирование износостойкого покрытия методом ЭИЛ твердыми сплавами и переходными металлами IV – VI групп // Вестник института тяги и подвижного состава. 2014. № 10. С. 3–8.
5. Кузнецов К.Ю., Колмыков В.И., Кузнецова Л.П. Способы восстановления поверхности резцов дорожной фрезы // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2023): сборник научных статей 15-й Международной научно-технической конференции. Курск: Университетская книга, 2023. С. 119–122.
6. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии // Электронная обработка материалов. 2010. № 5 (265). С. 27–36.
7. Кузнецов К.Ю. Исторический аспект развития металловедения и ресурсосберегающих технологий // Исторические, философские, методологические проблемы современной науки : сборник статей 6-й Международной научной конференции молодых ученых. Курск: Университетская книга, 2023. С. 20–24.
8. Исследование элементного состава компонентов резцов дорожной фрезы методом рентгенофлуоресцентного анализа / Л.П. Кузнецова, К.Ю. Кузнецов, В.И. Колмыков, Б.А. Семенихин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 44–60. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-44-60>
9. Кузнецов К.Ю., Кузнецова Л.П. Твердосплавные резцы для дорожной фрезы // Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК: сборник научных статей Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск: Университетская книга, 2023. С. 229–232.

10. Кузнецов К.Ю., Кузнецова Л.П. Износ резцедержателей дорожной фрезы // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей Всероссийской научно-технической конференции. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2023. С. 203–208.
11. Кузнецов К.Ю., Колмыков В.И., Кузнецова Л.П. Подготовка образцов из резца дорожной фрезы для нанесения упрочняющих покрытий // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ – 2023): сборник научных статей 15-й Международной научно-технической конференции. Курск: Университетская книга, 2023. С. 122–126.
12. Кузнецов К.Ю., Колмыков В.И., Кузнецова Л.П. Износ резцов дорожной фрезы // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сборник научных статей 4-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова. Курск: Университетская книга, 2023. С. 76–79.
13. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films / A. Wählich, C. Streeck, P. Hönicke, B. Beckhoff // J. Anal. At. Spectrom. 2020. Vol. 35. P. 1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>
14. Основы универсальности и эффективности электроискрового легирования и перспективы его развития / В.И. Иванов, А.Е. Гитлевич, А.Ю. Костюков, Л.А. Коневцов // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 2-2. С. 641–646.
15. Агеев Е.А., Серебровский В.И. Разработка и исследование технологии восстановления и упрочнения изношенных деталей машин композиционными гальваническими покрытиями с применением в качестве упрочняющей фазы вольфрамсодержащих электроэрозионных порошков микро- и нанодисперсий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 2. С. 42–86.
16. Казанцева А.Е., Новиков А.А. Повышение поверхностного упрочнения низкоуглеродистых сталей методом электроискрового легирования // Техника и технологии машиностроения: материалы IV Международной студенческой научно-практической конференции. Омск: Омск. гос. техн. ун-т, 2015. С. 89–92.
17. Микроструктура диффузионного покрытия, полученного одновременным насыщением бором, хромом и титаном углеродистой стали 45 / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, Е.В. Черных // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, № 2. С. 283–288.
18. Перевай Т.А. Измерение микротвердости по сечению наплавленного слоя методом газопорошковой наплавки // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11(95). С. 748–754.
19. Адгезионная прочность твердых антифрикционных покрытий узлов трения автомобильной техники / А.Ю. Родичев, А.Н. Новиков, М.А. Токмакова, И.В. Родичева // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-1(78). С. 3–12.
20. Осипов С.П., Школьный А.Н., Бида К.Б. Оценка экономической эффективности своевременной замены резцов дорожных фрез // Механизация строительства. 2014. № 9(843). С. 22–25.

Reference

1. Astapov E.S., Borilko A.S. Creation of one- and two-layer electrospark scale-resistant coatings on tungsten-cobalt hard alloys. In: *Fizika: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, obrazovanie: materialy Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii = Physics: fundamental and applied research, education: materials of the All-Russian Youth Scientific Conference*. Blagoveshchensk: Amur. gos. un-t; 2012. P. 59-62. (In Russ.)

2. Burumkulov F.Kh., Ivanov V.I. State and development of electrospark technologies and equipment in Russia and abroad. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*. 2012;109(2):127-139. (In Russ.)
3. Verkhoturov A.D., Mukha I.M. Technology of electrospark alloying of metal surfaces. *Technology*. Kiev: Tekhnika; 1982. 184 p. (In Russ.)
4. Verkhoturov A.D., Konevtsov L.A., Vostrikov Ya.A. Formation of a wear-resistant coating by the ESA method using hard alloys and transition metals of groups IV – VI. *Vestnik instituta tyagi i podvizhnogo sostava = Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock*. 2014;(10):3-8. (In Russ.)
5. Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Kuznetsova L.P. Methods for restoring the surface of road milling cutters. In: *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT – 2023): sbornik nauchnykh statei 15-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Modern automotive materials and technologies (SAMIT - 2023): collection scientific articles 15th International Scientific and Technical conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 119–122. (In Russ.)
6. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh. Strengthening and increasing the service life of objects using the electric spark method: classification, technology features. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic processing of materials*. 2010;(5):27-36. (In Russ.)
7. Kuznetsov K.Yu. Historical aspect of the development of metallurgy and resource-saving technologies. In: *Istoricheskie, filosofskie, metodologicheskie problemy sovremennoi nauki: sbornik statei 6-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh = Historical, philosophical, methodological problems of modern science: collection of articles of the 6th International scientific conference of young scientists*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 20–24. (In Russ.)
8. Kuznetsova L.P., Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Semenikhin B.A. Study of the elemental composition of the components of road milling cutters using X-ray fluorescence analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(3): 44–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-44-60>
9. Kuznetsov K.Yu., Kuznetsova L.P. Carbide cutters for road milling machines. In: *Tekhnologii, mashiny i oborudovanie dlya proektirovaniya, stroitel'stva ob'ektov APK: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov = Technologies, machines and equipment for the design and construction of agricultural facilities: collection of scientific articles of the international scientific and technical conference of young scientists, postgraduate students, masters and bachelors*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 229–232. (In Russ.)
10. Kuznetsov K.Yu., Kuznetsova L.P. Wear of cutter holders for road milling cutters. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sbornik nauchnykh statei Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: collection of scientific articles All-Russian scientific and technical conference*. Voronezh: Voronezh. gos. tekhn. un-t; 2023. P. 203-208. (In Russ.)
11. Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Kuznetsova L.P. Preparation of samples from a road milling cutter for applying hardening coatings. In: *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (SAMIT – 2023): sbornik nauchnykh statei 15-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Modern automotive materials and technologies (SAMIT - 2023): collection scientific Articles 15th International Scientific and technical conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023:122–126. (In Russ.)
12. Kuznetsov K.Yu., Kolmykov V.I., Kuznetsova L.P. Wear of road milling cutters. In: *Sovremennye problemy i napravleniya razvitiya metallovedeniya i termicheskoi obrabotki metallov i splavov: sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika A.A. Baikova = Modern problems and directions of development of metal science and heat treatment of metals and alloys: collection of scientific articles of the 4th International*

Scientific and Practical Conference, dedicated to the memory of Academician A.A. Baykova. Kursk: Universitetskaya kniga, 2023. P. 76–79. (In Russ.)

13. Wählich A., Streeck C., Hönigke P., Beckhoff B. Validation of secondary fluorescence excitation in quantitative X-ray fluorescence analysis of thin alloy films. *J. Anal. At. Spectrom.* 2020;35:1664–1670. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ja/d0ja00171f>

14. Ivanov V.I., Gitlevich A.E., Kostyukov A.Yu., Konevczov L.A. Fundamentals of universality and efficiency of electric spark alloying and prospects for its development. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Journal. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences.* 2018;9(2-2):641–646. (In Russ.)

15. Ageev E.A., Serebrovsky V.I. Development and research of technology for the restoration and strengthening of worn machine parts with composite galvanic coatings using tungsten-containing electroerosive powders of micro- and nanofractions as a strengthening phase. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology.* 2021;11(2):42–86. (In Russ.)

16. Kazantseva A.E., Novikov A.A. Increasing surface hardening of low-carbon steels by electrospark alloying. In: *Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: materialy IV Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Engineering and technology of mechanical engineering: materials of the IV international student scientific and practical conference.* Omsk: Omsk. gos. tekhn. un-t; 2015. P. 89–92. (In Russ.)

17. Gurev A.M., Ivanov S.G., Gurev M.A., Chernykh E.V. Microstructure of diffusion coating obtained by simultaneous saturation of carbon steel 45 with boron, chromium and titanium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya = Fundamental Problems of Modern Materials Science.* 2018;15(2):283–288. (In Russ.)

18. Perevaj T.A. Measuring microhardness across the cross-section of the deposited layer using gas-powder surfacing. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don.* 2022;(11):748–754. (In Russ.)

19. Rodichev A.Yu., Novikov A.N., Tokmakova M.A., Rodicheva I.V. Adhesive strength of solid antifriction coatings of friction units of automotive equipment. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin = The World of Transport and Technological Machines.* 2022;(3-1):3–12. (In Russ.)

20. Osipov S.P., Shkolny A.N., Bida K.B. Evaluation of the durability of rotating cutters with wear-resistant inserts of arbitrary shape. *Mekhanizatsiya stroitel'stva = Mechanization of construction.* 2014;(9):22–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Кузнецова Любовь Петровна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lubakk8@list.ru, ORCID: 0009-0004-1225-4021, Researcher ID ISA-1332-2023, SPIN-код: 1503-1411

Lyubov P. Kuznetsova, Candidate of Sciences (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lubakk8@list.ru, ORCID: 0009-0004-1225-4021, Researcher ID ISA-1332-2023, SPIN-код: 1503-1411

Кузнецов Константин Юрьевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Nightvol@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-1186-1470, SPIN-код: 3203-2282

Колмыков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kafedratmit@gmail.com

Переверзев Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: chaser-93@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8460-3364, Researcher ID C-4041-2019, SPIN-код: 5855-3763

Семенихин Борис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: borisss@bk.ru, ORCID: 0009-0007-6997-1656, SPIN-код: 9355-7566

Konstantin Yu. Kuznetsov, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Nightvol@yandex.ru, ORCID: 0009-0007-1186-1470, SPIN-код: 3203-2282

Valeriy I. Kolmykov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kafedratmit@gmail.com

Anton S. Pereverzev, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: chaser-93@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8460-3364, Researcher: C-4041-2019, SPIN-код: 5855-3763

Boris A. Semenikhin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: borisss@bk.ru, ORCID: 0009-0007-6997-1656, SPIN-код: 9355-7566