

Научная статья

УДК 621.921

doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

Эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников

Олег Викторович Душко¹, д.т.н.

Сергей Анатольевич Крюков², д.т.н.

^{1,2} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ ovd28@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3982-1899>

² sf-visteh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9558-0452>

***Аннотация.** В машиностроительном производстве значимое место занимает технология шлифования деталей подшипников. Особенно актуальна эта тема в настоящее время, так как к этому процессу предъявляются повышенные требования, как по производительности, так и по качеству готовых изделий. Эффективность финишной обработки деталей подшипников в современном высокотехнологичном производстве обуславливается применением высокоэффективного абразивного инструмента со стабильными эксплуатационными характеристиками. Абразивный инструмент на керамической связке подвержен значительному влиянию внешней среды, особенно при работе с водными смазочно-охлаждающими жидкостями (СОЖ), которые в значительной степени изменяют физико-механические свойства шлифовальных кругов, снижая его твердость, прочность и, как следствие, ведут к снижению его эксплуатационных характеристик. Одним из эффективных направлений совершенствования абразивного инструмента можно считать введение в его поры твердых смазок (импрегнирование), улучшающих условия шлифования и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей подшипников. Проведенные авторами лабораторные исследования на базе НТЦ «ВНИИАШ» и изученный опыт промышленного применения импрегнированного инструмента на предприятиях по производству подшипников показывает его эффект только в случае равномерной пропитки всего объема абразивного инструмента и обеспеченности равномерности заполнения его порового пространства. По результатам проведенных исследований нами установлена возможность производительного, качественного импрегнирования абразивного инструмента серой способом свободного капиллярного поднятия по порам круга. Применение импрегнированного абразивного инструмента на предприятиях корпорации ЕПК позволяет повысить качество обработки деталей подшипников и снизить расход абразивного инструмента в 1,1 – 1,8 раза.*

Ключевые слова: шлифование, термообработка, импрегнирование, абразивный инструмент, твердость, пропитка

Для цитирования: Душко О.В., Крюков С.А. Эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

The impregnated abrasive tool potency in mechanical tooling of bearing parts

Oleg V. Dushko¹, D.Eng.

Sergey A. Kryukov², D.Eng.

^{1,2} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ ovd28@mail.ru

² sf-visteh@mail.ru

***Abstract.** The technology of grinding bearing parts holds a significant place in machinery production. This topic is particularly relevant at the present time, as there are raised requirements for this process, both in terms of productivity and the quality of finished products. The efficiency of finishing bearing parts in modern high-tech manufacturing is determined by the use of highly efficient abrasive tools with stable performance characteristics. Ceramic-bonded abrasive tools are subject to significant environmental effects, especially when working with water-based cooling lubricants (coolants), which significantly alter the physical and mechanical properties of grinding discs, reducing its hardness and strength and, resulting in a decrease in its performance characteristics. One of the effective ways to improve an abrasive tool can be considered the introduction of solid lubricants (impregnation) into its pores, which improve the grinding conditions and the quality of the surface layer of the machined bearing parts. The laboratory studies carried out by the authors on the basis of the Scientific and Technical Center "VNIASH" and considered experience of industrial use of impregnated tools in bearing manufacturing enterprises show its effect only in the case of uniform impregnation of the entire abrasive tool and ensuring uniform filling of its pore space. Based on the results of our research, we have found the possibility of productive, high-quality impregnation of abrasive tools with sulfur using the method of free capillary ascent along the pores of the disc. The use of impregnated abrasive tools at the enterprises of the EPC corporation makes it possible to improve the quality of processing bearing parts and reduce the consumption of abrasive tools by 1,1 – 1,8 times.*

Keywords: grinding, heat treatment, impregnation, abrasive tool, hardness

For citation: Dushko O.V., Kryukov S.A. The impregnated abrasive tool potency in mechanical tooling of bearing parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 4 (166). P. 17–23. doi: 10.30987/2223-4608-2025-4-17-23

Введение

Выбор абразивного инструмента для обработки деталей подшипников следует рассматривать как совокупность физико-механических свойств и химического сходства абразива и металла [1]. Стойкость круга и его твердость оказывают определяющее влияние на качество обрабатываемых деталей подшипников.

Многочисленные исследования [2 – 5] показали, что основным разрушающим фактором работающего круга являются тангенциальные напряжения в отверстиях круга: под действием центробежной силы в инструменте возникают напряжения, которые при наличии дефектов приводят к его разрыву. Кроме этого, абразивный инструмент на керамической связке подвержен значительному влиянию внешней среды, особенно при работе с водными СОЖ, которые заметно изменяют физико-механические свойства шлифовальных кругов, снижая их твердость, а это приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик инструмента.

Одним из приоритетных направлений решения этих проблем можно считать введение в поры абразивного инструмента твердых смазок [6, 7], улучшающих условия шлифования и качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей подшипников. Проведенные нами лабораторные исследования и изученный

опыт промышленного применения импрегнированного инструмента на предприятиях по производству подшипников показывают положительный эффект только при условии равномерности пропитки по всему объему абразивного инструмента и обеспеченности равномерности заполнения его порового пространства. Для достижения обозначенного выше эффекта нами была разработана и запатентована новая технология импрегнирования шлифовальных кругов на керамической связке. В её основе лежит предварительная термообработка, позволяющая очистить поровое пространство инструмента и, тем самым, обеспечить быструю и эффективную пропитку. Для подтверждения эффективности инструмента, импрегнированного по предлагаемой технологии, были проведены сравнительные лабораторные исследования.

Целью данного исследования является повышение эффективности шлифования деталей подшипников за счет применения предварительно термообработанного и импрегнированного абразивного инструмента на керамической связке.

Материал и методы исследования

На предприятиях корпорации ЕПК операции абразивной обработки в технологических процессах составляют до 40...50 %. В

этой связи повышение производительности и качества абразивной обработки является актуальной задачей в современном машиностроении. Повышение эксплуатационных свойств абразивного инструмента на керамической связке (основной вид этого инструмента) используются различные пути. На подшипниковых предприятиях широкое применение получила практика пропитки абразивного инструмента на керамической связке различными химическими веществами [8]. В качестве твердых смазок используется сера, сульфированный стеарин, тонкодисперсные порошки алюминия и дисульфида молибдена, бакелитовый лак, которые обеспечивают исключение прижогов при финишной обработке поверхности, повышение стойкости применяемого абразивного инструмента вплоть до полного его износа, снижение шероховатости обработанной поверхности. Известно, что все подшипниковые заводы шлифуют детали подшипников из закаленной легированной стали марок, например, сталь ШХ15. Для её обработки, на операциях шлифования упорных бортов и дорожек колец подшипников, предприятия ЕПК используют круги из электрокорундовых материалов на плавящейся керамической связке твердостью $J-L$, импрегнированные расплавом серы.

Следует отметить, что сера активный минерал, имеющий высокие антифрикционные свойства за счет образования при шлифовании на поверхности металла значительное количество сульфидов железа, которые обладают хорошей смазывающей способностью. А также сера имеет низкую стоимость. Технология импрегнирования доступна для любого металлообрабатывающего производства, а на абразивных заводах ее реализация еще менее затратная. Импрегнированный серой инструмент обладает повышенными эксплуатационными свойствами, как при шлифовании, так и при доводочных операциях. Однако в технологическом процессе пропитки абразивного инструмента крайне сложно добиться равномерности распределения импрегнатора по всему объему. Непропитанные участки в процессе эксплуатации инструмента вызывают снижение качества обработанной поверхности металла и, как следствие, ведут к возникновению прижога.

Также недостаточно равномерно заполненный серой абразивный инструмент не обеспечивает высокую эффективность при шлифовании, при этом не удается обеспечить стабильность качества обработки деталей подшипника, что исключает применение такого инструмента на станках с ЧПУ, где требуется стабильные показатели его работы.

Проведенные нами исследования на кругах шлифовальных керамических электрокорундовых, пропитанные серой без удаления избытка импрегнатора (степень заполнения 0,2...0,25) показали высокую засаливаемость, рост температуры в зоне контакта инструмент – деталь, как следствие возникновения прижогов, а по совокупности показателей худшею работу, чем непропитанные. Степень заполнения импрегнатором абразивного инструмента определена, как отношение массы импрегнатора к общей массе инструмента.

Для обеспечения равномерности пропитки абразивного инструмента на керамическом связующем нами разработана и запатентована технология импрегнирования [9, 10] представленная на рис. 1, которая включает в себя несколько этапов: термообработку абразивного инструмента на керамической связке при температуре 450...500 °С и выдержкой 20...30 мин для удаления адсорбционных загрязнений в поровом пространстве круга; приготовление импрегнатора путем расплавления серы; пропитывание абразивного инструмента путем его погружения в расплав серы с последующим охлаждением на воздухе.

Последним этапом заявленной технологии является контроль качества, включающий в себя: визуальный контроль, проверку на неуравновешенность, испытания на разрыв и определение равномерности пропитки. Такая технология импрегнирования в разы увеличивает адгезию серы к поверхности инструмента, повышает степень и коэффициент пропитывания, а также уменьшает дисбаланс кругов почти в 2 раза по сравнению с заводской технологией. Такой способ импрегнирования позволяет достичь оптимальной равномерности пропитки и повышения эксплуатационных свойств инструмента.

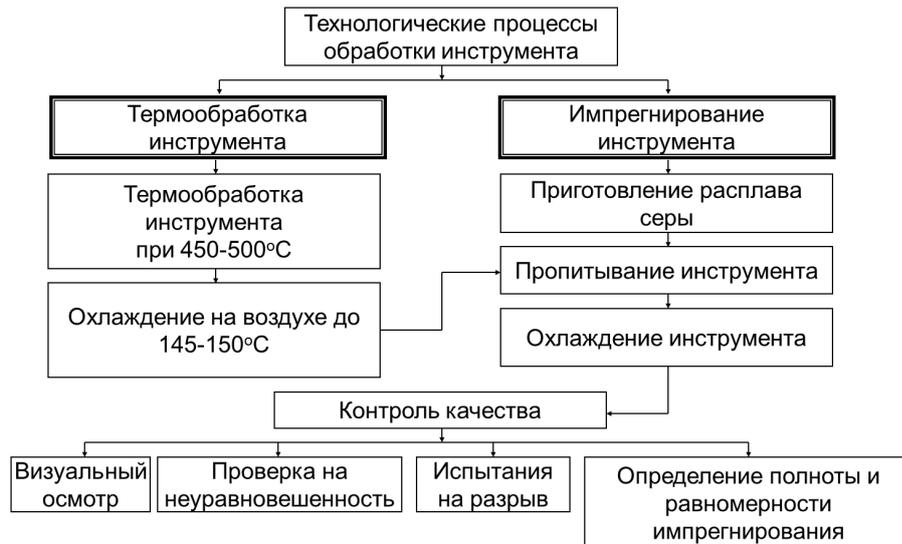


Рис. 1. Схема импрегнирования

Fig. 1. Impregnation scheme

Для проверки выводов о влиянии термообработки и импрегнирования абразивного круга на изменение составляющих сил резания P_y и P_z , характеризующих динамику процесса шлифования стали ШХ 15, были проведены лабораторные эксперименты.

Исследования проводились на операциях шлифования дорожек качения внутренних колец роликоподшипников на станке SIW-3M. Режимы шлифования: скорость круга $v_{кр} = 35$ м/с; продольная скорость стола $v_{ст} = 12$ м/мин; подача круга на глубину $t = 0,01$ мм/дв.ход. Шлифование проводилось без применения СОЖ.

Круги подвергались правке перед началом каждого испытания алмазно-металлическим карандашом.

Силы резания P_y (нормальная составляющая сила) и P_z (касательная составляющая сила) замерялись посредством динамометра конструкции НТЦ «ВНИИАШ» ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Каждый опыт имел продолжительность 20 мин. Опыты повторялись по 5 раз. Полученные экспериментальные данные были обработаны известными методами математической статистики.

Результаты исследования и их обсуждение

Динамика изменения сил резания P_y и P_z от продолжительности шлифования представ-

лена на рис. 2 и 3. На графиках хорошо видны изменения сил резания при работе разными кругами. Круги импрегнированные серой показали сокращение времени стабилизации сил резания в 2,5 раза.

Такой факт позволяет нам говорить о различной степени приработки кругов после их правки, режущей способности абразивных зерен и их затупляемости. Абразивные круги, пропитанные серой имеют, повышение прочности удержания зерна в связке, чем у инструмента без пропитки. В этой связи в первоначальный период работы неимпрегнированных кругов происходит осыпание слабозакрепленных в связке зерен находящихся на режущей поверхности круга по сравнению с пропитанным серой абразивным инструментом. И как следствие сокращение количества абразивного зерна в зоне контакта пары инструмент – деталь, что ведет к растущим нагрузкам на работающие зерна и их более быстрому затуплению и разрушению.

Также наблюдается повышение величины разновысотности зерен в поверхностном слое абразивного круга. Это ведет к увеличению контактной площади связки с обрабатываемой поверхностью детали. Представленные обстоятельства приводят к дополнительному росту сил трения и сил резания.

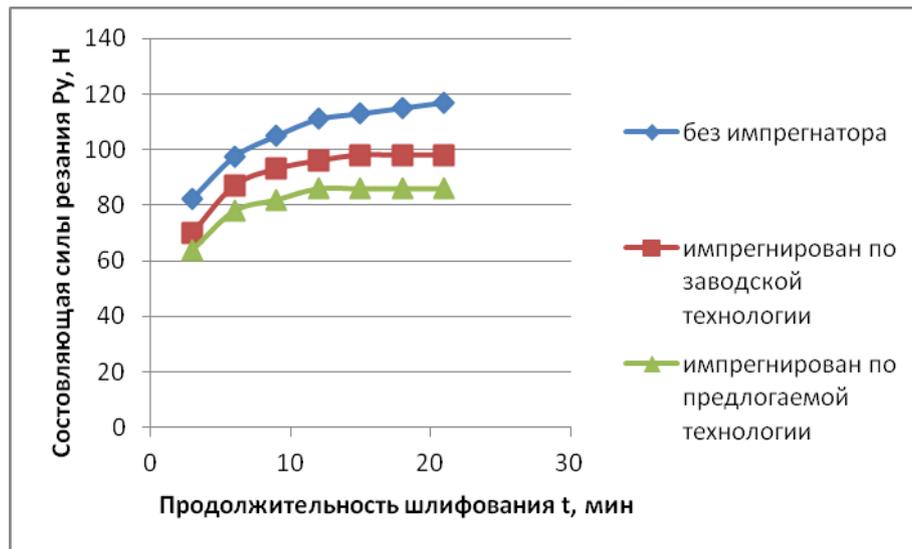


Рис. 2. Изменение силы резания P_y в зависимости от продолжительности шлифования

Fig. 2. Change in cutting tool force P_y depending on the duration of grinding

Как видно из рис. 2 значительное уменьшение силы P_y после шлифования импрегнированным кругом по заводской технологии. Предлагаемый нами инструмент позволяет

более чем на 30 % уменьшить нормальную составляющую силу по сравнению с непропитанным инструментом. Из рис. 3 видно снижение силы P_z соответственно в 1,37 и 1,58 раза.

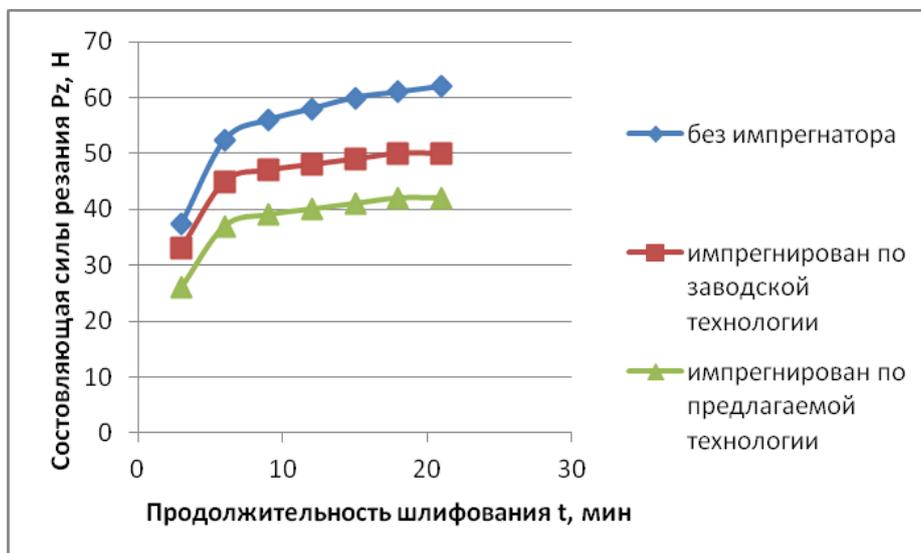


Рис. 3. Изменение силы резания P_z в зависимости от продолжительности шлифования

Fig. 3. Change in cutting tool force P_z depending on the duration of grinding

Уменьшение сил резания при шлифовании импрегнированным инструментом в первую очередь объясняется снижением сил трения за счет физико-химических свойств серы, которая обеспечивает уменьшение прочности поверхностных слоев обрабатываемой поверхности. Такое понижение прочности

позволяет значительно снизить силы резания при шлифовании в пределах 1,1 – 1,3 раза. Действие любого вида смазочно-охлаждающих технологических сред позволяют начать резание на меньшей глубине, что также способствует уменьшению динамических нагрузок на

абразивные зерна в зоне контакта и снижению силы резания.

Более значительное снижение сил резания (на 10...15 %) при работе абразивным инструментом, пропитанным по нашей технологии в сравнении с кругом, импрегнированным по заводской технологии без предварительной термообработки. На наш взгляд это связано со значительным влиянием термообработки на физико-механические свойства абразивного зерна. Термообработка позволяет повысить прочность, самозатачиваемость, микрохрупкость зерна. А сочетание положительных качеств термообработки и эффективного импрегнирования позволяют повысить и показатели качества абразивного инструмента в целом, что также ведет к дополнительному снижению сил резания. Предварительная термообработка инструмента в температурном диапазоне 450...500 °С позволяет обеспечить равномерность заполнения порового пространства круга серой и тем самым обеспечить стабильность его эксплуатационных показателей.

Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод об эффективности шлифования импрегнированным абразивным инструментом стали ШХ15, прошедшим предварительную термическую обработку по предложенной нами технологии. Равномерная пропитка абразивного круга в значительной мере оказывает влияние на силы резания и, как следствие, на динамику процесса шлифования через кинематические и структурно-механические свойства инструмента.

Сравнительные результаты экспериментов подтвердили эффективность предлагаемого подхода к пропитке электрокорундового абразивного инструмента на керамической связке. Абразивный инструмент, импрегнированный по нашей технологии, показал более стабильную работу при шлифовании, а также значительно увеличилась режущая способность, стойкость круга, коэффициент шлифования. Скорость изнашивания предлагаемого инструмента в 1,25 раза меньше чем у абразивных кругов, пропитанных по заводской технологии. Это косвенно подтверждает наши выводы об увеличении количества режущих

зерен, участвующих в процессе шлифования. За счет этого уменьшится толщина среза единственным зерном, как следствие уменьшение амплитуды силы резания, сил трения, уменьшения температуры в зоне контакта инструмент-деталь.

Анализ качества обработанных поверхностей показал полное отсутствие прижогов при шлифовании импрегнированным серой инструментом, а также уменьшение в 1,3 раза по сравнению с прототипом шероховатости поверхности.

Существенное снижение сил резания доказывает эффективность импрегнированного абразивного инструмента при обработке деталей подшипников на примере шлифования стали ШХ 15, как наиболее распространенную на предприятиях ЕПК.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколова И.Д., Беккель Л.С., Потемкин В.Ю. Исследование возможностей совершенствования абразивного инструмента // Инновационная наука. 2015. Т. 2. № 6 (6). С. 85–87.
2. Белухин Р.А., Вершинин Я.В., Костина А.В. Высокоструктурный абразивный инструмент при шлифовании подшипниковой стали ШХ15 / В сборнике: Научно-практическая конференция студентов ВПИ (филиал) ВолгГТУ «Наука молодых: идеи, результаты, перспективы». 2016. С. 51–53.
3. Гришин Р.Г., Носов Н.В., Сальников И.М., Гордиенко Я.М., Ладыгин Р.В. Разработка методики расчета шероховатости поверхности при мехобработке абразивным инструментом / Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2022. № 2 (77). С. 3–9.
4. Багайсков Ю.С. Особенности изготовления высокоструктурных равномернопористых абразивных инструментов на керамической связке/ В сборнике: Пром-Инжиниринг. Тр. III междунар. науч.-техн. конф.. 2017. С. 118–120.
5. Мельников В.В. Контроль качества абразивных материалов и инструментов / В сборнике: Россия молодая. Сб. матер. VII Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. 2015. С. 654.
6. Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г. Повышение эффективности финишной обработки поверхностей деталей машин импрегнированием абразивных инструментов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2018. № 1 (44). С. 99–103.
7. Иванов С.В., Алексеев Н.С., Капорин В.А. Влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на составляющие силы резания микропористого покрытия восстановленной детали // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 9 (179). С. 149–156.
8. Митрофанов А.П., Ли В.В. Исследование влияния импрегнирования абразивного инструмента на

состояние поверхностного слоя нержавеющей стали 12X18H10T / Современные научные исследования и инновации. 2018. № 5 (85). С. 11.

9. **Патент на изобретение** RU 2352451 C1, 20.04.2009. Заявка № 2007122816/02 от 18.06.2007. Способ пропитки абразивного инструмента / Шумячер В.М., Крюков С.А., Славин А.В.

10. **Патент на изобретение** RU 2354535 C2, 10.05.2009. Заявка № 2007111229/02 от 27.03.2007. Способ пропитки абразивного инструмента / Шумячер В.М., Славин А.В., Крюков С.А.

REFERENCES

1. Sokolova I.D., Bekkel L.S., Potemkin V.Yu. Investigation of the possibilities of improving an abrasive tool/ Innovative science. 2015, Vol. 2. No. 6 (6), p. 85

2. Belukhin R.A. Highly structured abrasive tool for grinding bearing steel SHX15 / Vershinin Ya.V., Kostina A.V. Proceedings: Scientific and practical conference of students of VPI (branch) VolgSTU "Science of the young scientists: ideas, results, prospects". 2016, pp. 51–53.

3. Grishin R.G. Procedure for calculating the surface roughness during grinding with an abrasive tool/ Nosov N.V., Salnikov I.M., Gordienko Ya.M., Ladyagin R.V. Progressive technologies and systems of mechanical engineering. 2022, No. 2 (77), pp. 3–9.

4. Bagaiskov Yu.S. Features high structural high degree of uniformity of the porosity manufacturing of abrasive

tools on ceramic bond/ In the collection: Industrial Engineering. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference. 2017, pp. 118–120.

5. Melnikov V.V. Quality control of abrasive materials and tools / In the collection: Young Russia. Proc. of the VII-th All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with international participation. 2015, p. 654.

6. Butenko V.I., Shapovalov R.G. Improving the efficiency of finishing the surfaces of machine parts by impregnating abrasive tools // Bulletin of the Russian State Technical University named after P. A. Solov'yov. 2018, No. 1 (44), pp. 99–103.

7. Ivanov S.V. The influence of grinding modes and characteristics of an abrasive tool on the components of the cutting force of a microporous coating of a restored part / Alekseev N.S., Kaporin V.A. Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2019, No. 9 (179), pp. 149–156.

8. Mitrofanov A.P. The effect of various methods of abrasive impact on the surface layer of 12X18H10T austenitic stainless steel / Li V.V. Modern scientific research and innovations. 2018, No. 5 (85), p. 11.

9. Patent for the invention RU 2352451 C1, 04/20/2009. Application No. 2007122816/02 dated 06/18/2007. The method of impregnation of an abrasive tool / Shumyacher V.M., Kryukov S.A., Slavin A.V.

10. Patent for the invention RU 2354535 C2, 05/10/2009. Application No. 2007111229/02 dated 27.03.2007. The method of impregnation of an abrasive tool / Shumyacher V.M., Slavin A.V., Kryukov S.A.

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 10.01.2025; одобрена после рецензирования 11.01.2025; принята к публикации 14.02.2025.

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 11.01.2025; assepted for publication 14.02.2025.