

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 40-48.

Научная статья
УДК 621.923.04
doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Проблемы и решения обработки новых композиционных материалов на основе диборида циркония электроалмазными методами

Андрей Романович Янюшкин¹, аспирант
Дмитрий Владимирович Лобанов², д.т.н.
Александр Сергеевич Янюшкин³, д.т.н.
Владимир Владимирович Скрипняк⁴, к.ф.-м.н.
Владимир Альбертович Скрипняк⁵, д.ф.-м.н.

^{1, 2, 3} Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

^{4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ andreyyayushkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>

² lobanovdv@list.ru <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>

³ yanyushkinas@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>

⁴ skrp@ftf.tsu.ru <https://orcid.org/0000-0003-2238-5856>

⁵ skrp2012@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-7162-3983>

Аннотация. Рассмотрены проблемные вопросы, связанные с разработкой, обрабатываемостью и областью применения новых высокопрочных керамических материалов. Эти материалы обладают высокой твердостью, соизмеримой с твердостью абразивных материалов. Поэтому изготовление изделий из таких материалов по традиционным технологиям затруднительно, а в ряде случаев просто невозможно. Для решения этой проблемы предложена модернизация станка модели PP600F с реализацией комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных керамических материалов алмазными кругами на металлической связке. Модернизация предусматривает разработку специальных узлов и конструкций токосъемника, катода для правки круга, схемы источника технологического тока и конструктивных решений автоматического управления током правки. На основе результатов исследования установлены рациональные режимы резания, гарантирующие качество изделий из высокопрочных композиционных материалов. Эксперименты выполнены по стандартным методикам с использованием оптической и электронной микроскопии. Поставленные задачи решены с учетом исследования удельного расхода алмазных кругов на металлической связке, сил, мощности, температуры резания, дефектов на поверхности шлифовального круга и обрабатываемого изделия. Показано решение управления режущей способностью шлифовального круга и условия их работы в режиме самозатачивания. На основе стабилизации мощности резания установлен режим самозатачивания алмазных кругов на металлической связке и режимы шлифования: $v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 0,5...1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,02...0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,2...0,6$ А/см²; $i_{мп} = 4...6$ А/см². На примере шлифования диборида циркония алмазным кругом АС6 с зернистостью 125/100 на этих режимах гарантирует отсутствие микро, макротрещин, шероховатость обработанной поверхности в пределах 0,2...0,4 мкм.

Ключевые слова: алмазные круги, шлифование, комбинированная обработка, управление процессом правки, качество, модернизация, высокопрочные керамические материалы

Для цитирования: Янюшкин А.Р., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.В., Скрипняк В.А. Проблемы и решения обработки новых композиционных материалов на основе диборида циркония электроалмазными методами // Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Problems and solutions of composite machining by electro-diamond methods for materials based on zirconium diboride

Andrey R. Yanushkin¹, PhD student

Dmitry V. Lobanov², D. Eng.

Alexander S. Yanushkin³, D. Eng.

Vladimir V. Skripnyak⁴, Cand.Sc.

Vladimir A. Skripnyak⁵, Dr.Sci in Physics and Maths,

^{1, 2, 3} I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

^{4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ andreyayushkin@mail.ru

² lobanovdv@list.ru

³ yanyushkinas@mail.ru

⁴ skrp@ftf.tsu.ru

⁵ skrp2012@yandex.ru

Abstract. Problematic issues related to the development, machinability and application of new high-strength ceramic materials are viewed. Such materials possess high hardness comparable to the hardness of abrasive materials. Therefore, it makes difficult to produce such materials using traditional techniques. To solve this problem, we have proposed the modernization of the PP 600F machine with the implementation of combined electro-diamond processing of high-strength ceramic materials with diamond wheels on a binder metal. The modernization provides for the development of special components and structures of a current collector, a cathode for straightening a circle, a circuit for a technological current source and constructive solutions for automatic control of the straightening current. Based on the results of the study, rational cutting modes have been established to guarantee the quality of products made of high-strength composite materials. The experiments were performed with standard techniques using optical and electron microscopy. The tasks were solved taking into account the study of diamond wheels flow density on a metallic binder, as well as forces, power, cutting temperature, defects on the surface of the grinding wheel and the machined product. The solution for controlling the cutting capacity of a grinding wheel and the conditions of their operation in the self-sharpening mode is shown. Based on the stabilization of cutting power, the self-sharpening mode of diamond wheels on a metallic binder and grinding modes are switched on: $v_{gwh} = 35 \text{ m/s}$; $S_{pr} = 0.5 \dots 1.5 \text{ m/min}$; $S_{np} = 0.5 \dots 1.5 \text{ м/мин}$; $S_{non} = 0.02 \dots 0.05 \text{ mm/dv.stroke}$ $i_{np} = 0.2 \dots 0.6 \text{ A/cm}^2$; $i_{mp} = 4 \dots 6 \text{ A/cm}^2$. Using the example of grinding zirconium diboride with an AC6 diamond wheel with a grain size of 125/100 in these modes, it guarantees the absence of micro, macro cracks, and the roughness of the machined surface within $0.2 \dots 0.4 \text{ microns}$.

Keywords: diamond wheels, grinding, combined machining, control of the truing, quality, modernization, high-strength ceramic materials.

For citation: Yanushkin A.R., Lobanov D.V., Yanushkin A.S., Skripnyak V.V., Skripnyak V.A. Problems and solutions of composite machining by electro-diamond methods for materials based on zirconium diboride / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 2 (164). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-2-40-48

Введение

Диборид циркония ZrB_2 уникальный высокопрочный керамический материал. Основная область его применения: детали в химической, ракетной, космической отрасли и высокотемпературных узлах различной техники. Температура его плавления выше 3000°C , устойчив к окислению, имеет значительную химическую стойкость в агрессивных средах.

Поэтому может использоваться для создания защитных слоев на ответственных деталях машиностроения, а также при проектировании режущих инструментов на операциях механической обработки закаленных труднообрабатываемых и жаропрочных сталей [1 – 5]. Однако, несмотря на его высокую твердость, износостойкость, тепло и электропроводность, для инструментального материала он очень хрупкий. Единственным недостатком,

приемлемых режущих свойств, является недостаточная прочность. Поэтому на операциях восстановления режущих свойств, как лезвийного инструмента, использовать его проблематично, практически невозможно создать режущую кромку, которая разрушается при затачивании и шлифовании.

Для решения этой проблемы диборид циркония необходимо армировать, с целью увеличения его прочности, упрочненными частицами боридов, карбидами различных металлов или волокнами тугоплавких материалов, или как-то иначе.

Целью данных исследований, является продолжение изучения свойств композитов на основе диборида циркония, результаты которых представлены в работах [6, 7], а также изыскание приемлемых условий обрабатываемости новых высокопрочных композиционных материалов и установления рациональных режимов шлифования комбинированными электроалмазными методами с использованием алмазных кругов на металлической связке [8 – 11].

Исследования выполнены на примере электропроводящей ZrB_2 керамики с учётом минимального расхода алмазного круга, температуры, сил резания, мощности, образования микро макротрещин и шероховатости обработанной поверхности.

Материалы и оборудование

Обрабатываемость новых высокопрочных композиционных материалов механическим образом с применением лезвийного инструмента невозможна, а на операциях шлифования параметры обработки недостаточно изучены. Образцы диборид-циркониевой керамики показаны на рис. 1.

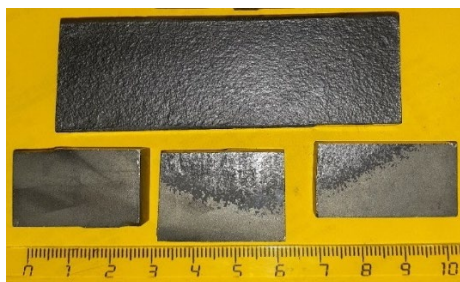


Рис. 1. Образцы диборид-циркониевой керамики

Fig. 1. Samples of diboride-zirconium ceramics

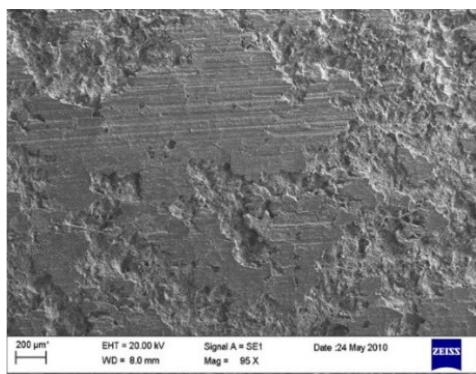
Для решения обозначенных проблем наиболее перспективны технологии на основе электрофизических методов обработки [12 – 14]. Одним из таких методов рекомендуется комбинированная электроалмазная обработка алмазными кругами на металлической связке с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга [15]. Но для этого требуется создание новых видов станков или существенная модернизация станков на базе существующего оборудования. Кафедра технологии машиностроения располагает достаточным опытом по модернизации различного вида оборудования шлифовально-заточной группы. В более ранних работах имеются сведения о множественных вариантах модернизации различных моделей станков под процессы комбинированной электроалмазной обработки, например: 3Д642Е, 3Е624, 3Г711 и др. В рамках данной статьи особое внимание уделяется информации по модернизации станка модели РР600F. Далее показаны отдельные фрагменты, связанные с качеством обработанной поверхности и модернизацией необходимых узлов и оснастки оборудования для шлифования различных высокопрочных композиционных материалов.

Результаты и обсуждения

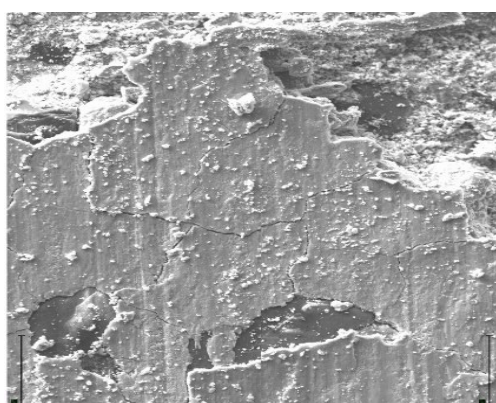
Поверхность алмазного круга АС6 125/100 М1 – 100 % после обычного шлифования показана на рис. 2. На рис. 2, а представлена обычная фотография, свидетельствующая о невозможности нормальной работы при шлифовании и поверхность этого же круга в отдельных точках при большом увеличении на растровом электронном микроскопе. На рис. 2, б видно, что рабочая поверхность алмазного круга не имеет режущих зерен, а те зерна, которые просматриваются, находятся ниже алмазоносного слоя и в работе не участвуют (рис. 2, в). Процесс резания в таких условиях сопровождается трением, высокими температурами и пластической деформацией на поверхности, как самого шлифовального круга, так и на поверхности обрабатываемого изделия.



a)



b)



в)

Рис. 2. Поверхность алмазного круга после обычного шлифования:

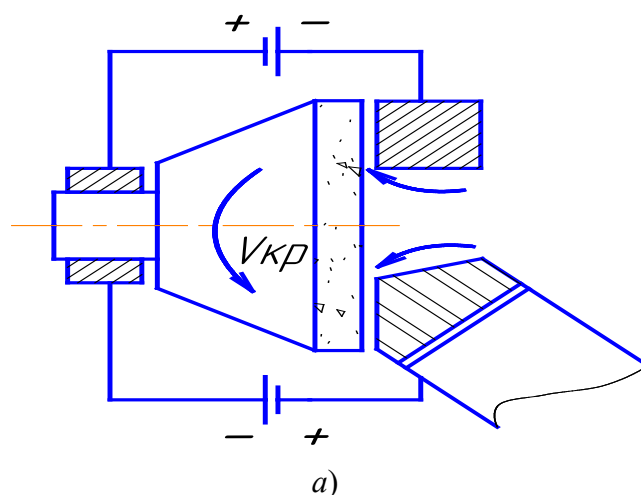
a – общий вид поверхности круга после обычного шлифования; б, в – вид поверхности алмазного круга при большом увеличении

Fig. 2. Surface of the diamond wheel after conventional grinding:

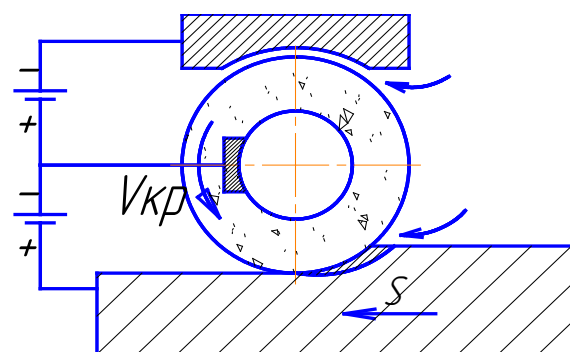
a – general view of the surface of the wheel after regular grinding; b, c – view of the surface of the diamond wheel at high magnification

Таким образом, всегда на операциях шлифования для эффективной работы требуется поддерживать режущие свойства шлифовального круга. Лучше будут условия, при которых шлифовальный круг работает с постоянными режущими свойствами в режиме самозатачивания. Для решения поставленной задачи предлагается один из вариантов шлифования алмазными кругами на металлической связке в

режиме самозатачивания с непрерывной электрохимической правкой круга. Варианты исполнения этих схем описаны в работе [15]. На рис. 3 показана принципиальная электрическая схема комбинированной электроалмазной обработки. Представленная схема обеспечивает работу алмазного круга в режиме самозатачивания с минимальными силами резания.



a)



б)

Рис. 3. Принципиальная электрическая схема комбинированной электроалмазной обработки:

a – шлифование торцом алмазного круга; б – шлифование периферией алмазного круга

Fig. 3. Schematic electrical diagram of combined electro-diamond processing:

a – diamond disk grinding; b – peripheral grinding

Общий вид станка модели PP600F, на котором решены обозначенные проблемы показан на рис. 4. На станке дополнительно установлены токосъемник, катод для непрерывной правки круга, источник технологического тока, специальная оснастка.

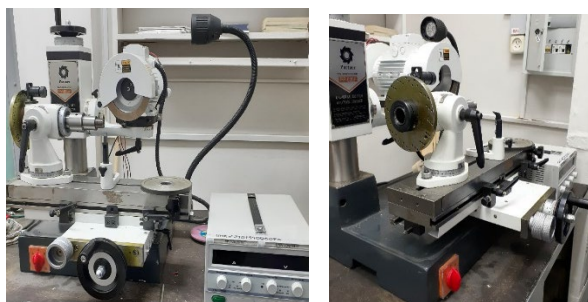


Рис. 4. Общий вид станка модели PP600F, используемый для шлифования комбинированным электроалмазным методом

Fig. 4. General view of the PP600F machine used for grinding with the combined electro-diamond method

Токосъемник установлен на шпинделе станка, вне рабочей зоне, представляет устройство, в котором расположены три подпружиненные графитовые щетки (рис. 5, а). К корпусу графитовых щеток от источника технологического тока подключен электрический провод, второй провод крепится на рабочем столе станка. Для исключения короткого замыкания корпус станка изолирован специальными прокладками между токосъемником и катодом для правки алмазного круга (рис. 5, а, б). Также станок дополнительно оснащен необходимыми приспособлениями (тиски, патроны, центра, универсальные головки и др. устройства).

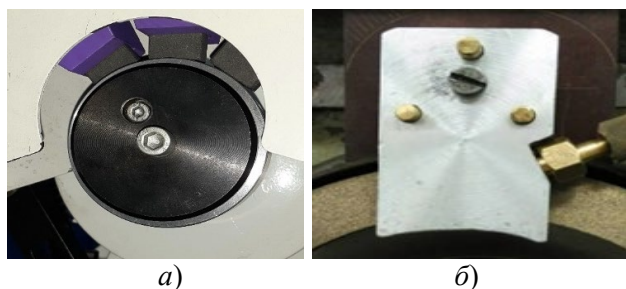


Рис. 5. Конструктивное исполнение узлов с токосъемником (а) и катодом для правки алмазного круга (б)

Fig. 5. Structural design of nodes with a current collector (a) and a cathode for a diamond wheel truing (b)

Со стороны рабочей зоны, на защитном кожухе алмазного круга закреплен правящий катод, через внутренние полости которого подается электролит. Таким образом осуществляется непрерывная правка алмазного слоя круга и обеспечивается его работа в режиме самозатачивания (рис. 5, б).

На рис. 6 показаны блоки реализации

предложенных электрических схем комбинированной электроалмазной обработки с одновременной правкой алмазного круга. Источник тока (рис. 6, а) кроме промышленной частоты 50 Гц, позволяет также работать в импульсном режиме на других частотах, $10^{-3} \dots 10^{-7}$ Гц. Возможно проектирование и других источников технологического тока.



а)



б)

Рис. 6. Источники технологического тока:

а – для травления обрабатываемой поверхности;
б – для правки алмазного круга

Fig. 6. Machining current sources:

а – for machined surface etching; б – for a diamond wheel truing

Представленная на рис. 7 электрическая схема, позволяет автоматически стабилизировать заданную величину тока в цепи правки и при необходимости изменять ее в зависимости от условий резания. Принцип работы схемы следующий. При потере режущих свойств алмазный круг теряет работоспособность и, как следствие, мощность резания возрастает, в результате чего повышается сила тока на фазах электропривода. При достижении мощности и сил резания критического значения, включается блок управления в цепи правки, происходит анодное растворение связки и засаленного слоя шлифовального круга, мощность резания снижается, а режущие свойства стабилизируются. В этом случае круг работает в режиме самозатачивания, происходит обновление абразивных зерен [16].

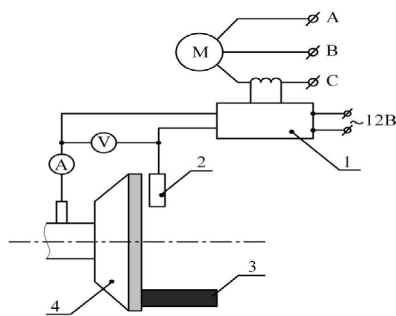


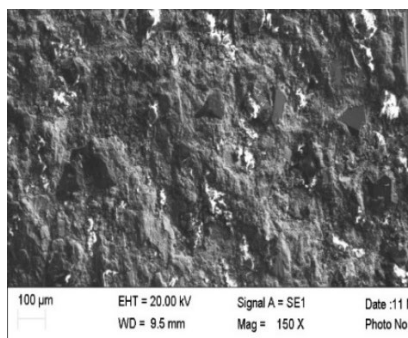
Рис. 7. Схема автоматического управления процессом непрерывной правки алмазного круга на металлической связке:

1 – блок управления; 2 – катод; 3 – деталь; 4 – алмазный круг

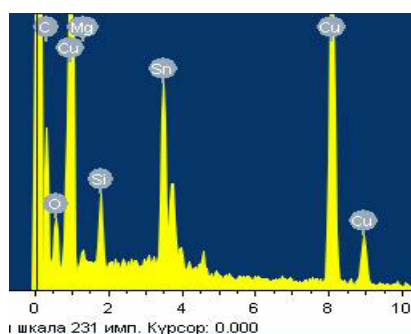
Fig. 7. Scheme of automatic control of the process of continuous truing of a diamond wheel on a metallic binder:

1 – control unit; 2 – cathode; 3 – part; 4 – diamond wheel

Поверхность алмазного круга на металлической связке после правки представлена на рис. 8. На ней виден развитый рельеф алмазного слоя с множественным количеством алмазных зерен с хорошими режущими свойствами (рис. 8, а) и спектр этой поверхности на котором отражены элементы связки круга с алмазными зернами (рис. 8, б).



а)



б)

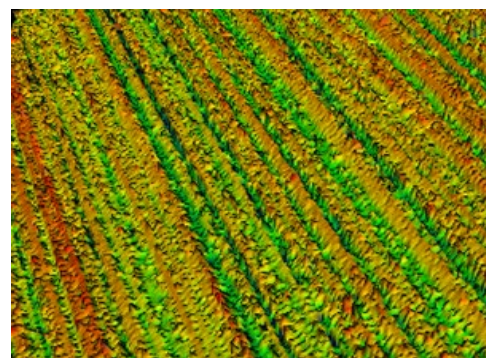
Рис. 8. Поверхность алмазного круга после правки:

а – рельеф поверхности круга; б – спектр поверхности круга

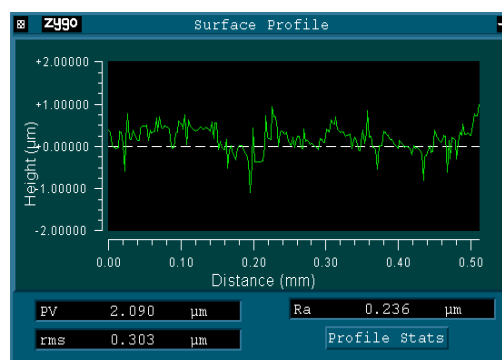
Fig. 8. The surface of the diamond wheel after truing:

а – the relief of the wheel surface; б – the spectrum of the wheel surface

Обработанная поверхность композиционного материала после шлифования комбинированным электроалмазным методом на рациональных режимах резания представлена на рис. 9. Экспериментами установлено, что шероховатость обработанной поверхности алмазными кругами на металлической связке с зернистостью 125/100 находится в пределах 0,2...0,4 мкм (рис. 9, б), что вполне приемлемо для большинства деталей машиностроения.



а)



б)

Рис. 9. Обработанная поверхность кругом AC6 125/100 M1 – 100 % концентрации при комбинированном электроалмазном шлифовании:

$V_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Fig. 9. The machined surface using the AC6 125/100 M1 wheel – 100% concentration under combined electro-diamond grinding:

$V_{gwh} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/dv.stroke; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Исследования удельного расхода алмазных кругов свидетельствуют об экстремальном характере зависимостей от электрических параметров: плотности тока правки и плотности тока травления. Расход кругов при комбинированном методе составляет 1,0...1,5 мг/г, что

ниже в сравнении с известными, при обычном шлифовании, в 3...4 раза.

На рис. 10 а, б, в показаны состояние режущей кромки инструмента со стороны

передней поверхности (рис. 10, а) и вторичные структуры в составе диборида циркония после шлифования (рис. 10, б, в).

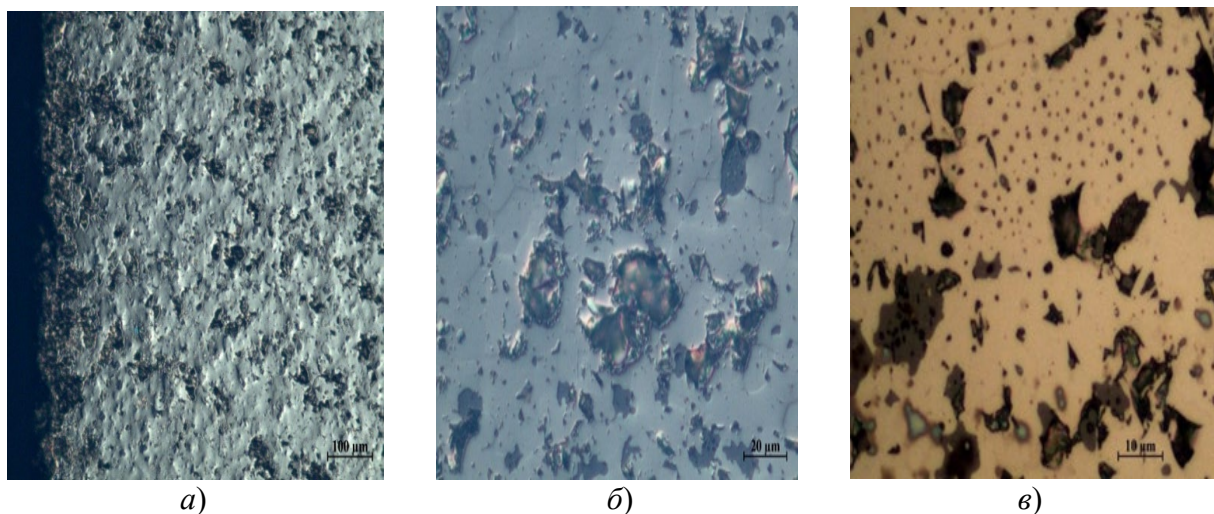


Рис. 10. Состояние кромки и структуры обработанной поверхности материала ZrB_2 после комбинированного электроалмазного шлифования:

$v_{кр} = 35$ м/с; $S_{пр} = 1,5$ м/мин; $S_{поп} = 0,05$ мм/дв.ход; $i_{пр} = 0,6$ А/см²; $i_{тр} = 4$ А/см²

Fig. 10. The state of the edge and structure of the treated surface of the ZrB_2 material after combined electro-diamond grinding:

$v_{gwh} = 35$ m/s; $S_{pr} = 1,5$ m/min; $S_{pop} = 0,05$ mm/dv.stroke; $i_{pr} = 0,6$ A/cm²; $i_{tr} = 4$ A/cm²

Закключение

В результате проведенных исследований установлено, что применение комбинированного электроалмазного метода позволяет выполнять шлифование керамических композитов на основе диборида-циркония с пониженным в 3...4 раза расходом алмазного круга, по сравнению с традиционным шлифованием.

Установлены рациональные параметры технологии электроалмазного шлифования для керамики на основе ZrB_2 : скорости резания $v_{кр} = 35$ м/с; продольной подачи $S_{пр} = 0,5...1,5$ м/мин; поперечной подачи $S_{поп} = 0,02...0,05$ мм/дв.ход; плотности тока правки алмазного круга $i_{пр} = 0,2...0,6$ А/см²; плотности тока травления поверхности обрабатываемого изделия $i_{тр} = 4...6$ А/см².

Представленные исследования дополняют полученные ранее результаты, хорошо согласуются с результатами работ [17, 18], гарантируют качество изготавливаемых изделий из высокопрочных композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крутский Ю.Л., Гудыма Т.С., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов: Свойства, область применения и методы получения, Ч. 2. Дибориды хрома и циркония (обзор) // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 395–412.
2. Bakshi S.D., Basu B., Mishra S.K. Microstructure and mechanical properties of sinter-HIPed ZrO_2 – ZrB_2 composites // Composites. 2006. Part A 37. P. 2128–2135.
3. Microstructure and mechanical properties of ZrB_2 –Nb composite / X. Sun., W. Han, P. Hu [et. al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2010. Vol. 28. P. 472–474.
4. Preparation of ZrB_2 based hybrid composites reinforced with SiC whiskers and SiC particles by hot-pressing / D. Chen, L. Xu, X. Zhang [et.al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2009. Vol. 27. P. 792–795.
5. Guo S.Q. Densification of ZrB_2 -based composites and their mechanical and physical properties: A review // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. P. 995–1011.
6. Степанов И.А., Скрипняк В.А., Андриец С.П. и др. Исследование закономерностей уплотнения наноструктурной керамики на основе диборида циркония при горячем прессовании // Ядерная физика и

инжиниринг. 2011. Т. 2. № 3. С. 1–16.

7. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Ваганова И.К., Янюшкин А.С., Скрипняк В.В., Лобанов Д.В. Механические свойства наноструктурной керамики на основе диборида циркония // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 7/2. С. 119–123.

8. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов // СТН. 2010. № 11. С. 2–4.

9. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6–13.

10. Макаров В.Ф., Волковский А.А., Сабирзянов А.И. Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 9 (111). С. 40–48.

11. Киричек А.В., Федонин О.Н., Хандожко А.В., Жирков А.А., Соловьев Д.Л., Баринов С.В. Гибридные технологии и оборудование аддитивного синтеза изделий // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8(134). С. 31–38.

12. Смоленцев В.П., Ненахов Н.Н., Извеков А.А., Стародубцев И.Г. Аддитивные технологии изготовления инструмента для комбинированных методов обработки // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 7 (133). С. 3–8.

13. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Извеков А.А. Расширение области использования в машиностроении комбинированных научных технологий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 188–192.

14. Болдырев А.И., Усов С.В., Болдырев А.А., Мандрыкин А.В. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. С. 120–122.

15. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 336 с.

16. Пат. 2304504 RU, МПК B24B53/00, B23H3/00. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления / А. С. Янюшкин, А. А. Сурьев и др.; патентообладатель Братский гос. ун-т. 2010. Заявл. 31.01.05; опубл. 20.08.07, Бюл. 23.

17. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: Монография / Тонкие научные технологии. Старый Оскол. 2012. 296 с.

18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 87–91.

REFERENCES

1. Krutskiy Yu.L., Gudyma T.S., Dyukova K.D., Kuzmin R.I., Krutskaya T.M. Diborides of transition metals: Properties, application and production. review. Part 2. Chromium and zirconium diborides // Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 395–412.

2. Bakshi S. D., Basu B., Mishra S. K. Microstructure and mechanical properties of sinter-HIPed ZrO₂–ZrB₂ composites // Composites. 2006. Part A 37. P. 2128–2135.

3. Microstructure and mechanical properties of ZrB₂–Nb composite / X. Sun., W. Han, P. Hu [et. al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2010. Vol. 28. P. 472–474.

4. Preparation of ZrB₂ based hybrid composites reinforced with SiC whiskers and SiC particles by hot-pressing / D. Chen, L. Xu, X. Zhang [et.al] // Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2009. Vol. 27. P. 792–795.

5. Guo S.-Q. Densification of ZrB₂-based composites and their mechanical and physical properties: A review // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. P. 995–1011.

6. Stepanov I.A., Skripnyak V.A., Andriets S.P et al. Investigation of the compaction patterns of nanostructured ceramics based on zirconium diboride during hot pressing // Nuclear Physics and Engineering. 2011, vol. 2, no. 3, pp. 1–16.

7. Skripnyak V.A., Skripnyak E.G., Vaganova I.K., Yanushkin A.S., Skripnyak V.V., Lobanov D.V. Mechanical properties of nanostructured ceramics based on zirconium diboride // Izvestiya vuzov. Physics, 2012, vol. 55, no. 7/2, pp. 119–123.

8. Lobanov D.V., Yanushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composite // STN, 2010, no. 11, pp. 2–4.

9. Rychkov D.A., Skripnyak V.A., Yanushkin A.S., Lobanov D.V. Development of preparation technology of the cutting tools for layered composite materials treatment // Metalworking (technology, equipment, tools), 2014, no. 2 (63), pp. 6–13.

10. Makarov V.F., Volkovsky A.A., Sabirzyanov A.I. Increase of productivity and composite abrasion quality based on choice and abrasive tool rational use // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, no. 9 (111), pp. 40–48.

11. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Khandozhko A.V., Zhirkov A.A., Soloviev D.L., Barinov S.V. Hybrid technologies and technical equipment for additive synthesis of products // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8(134), pp. 31–38.

12. Smolentsev V.P., Nenakhov N.N., Izvekov A.A., Starodubtsev I.G. Additive processing technologies of tool engineering for combined tooling techniques // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 7(133), pp. 3–8.

13. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Izvekov A.A. Expanding the field of use of combined science-intensive technologies in mechanical engineering // Bulletin of the Voronezh State Technical University, 2024, vol. 20, no. 2. pp. 188–192.

14. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A., Mandrykin A.V. The experimental evaluation of technological facilities varieties in method of electrochemical shaping // Bulletin of the Voronezh State Technical University, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 120–122.

15. Yanushkin A. S. Technology of electro-diamond sharpening of cutting tools and methods of its realization: monograph / A. S. Yanushkin. – Stary Oskol: TNT publ., 2013, 336 p.

16. Pat. 2304504 RU, IPC B24B 53/00, B23N 3/00. Method of automatic control of the process of continuous electrochemical disk truing and a device for its implementation / A. S. Yanushkin, A. A. Suryev et al.; patent holder

Bratsk State University. 2010. Appl. 31.01.05; published. 20.08.07, Bul. 23.

17. Lobanov D.V., Yanushkin A.S. Tooling backup technology for composite non-metallic materials manufacturing: a monograph. Fine high-tech technologies, Stary Oskol, 2012, 296 p.

18. Yanushkin A.S., Lobanov D.V., Bataev V.A., Arkhipov P.V., Medvedeva O.I. Investigations of the operability of diamond wheels in processing composite materials. Methods. Technologies, 2010, no. 3 (7), pp. 87–91.

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 17.11.2024; одобрена после рецензирования 22.11.2024; принята к публикации 24.12.2024.

The article was submitted 17.11.2024; approved after reviewing 22.11.2024; assepted for publication 24.12.2024.

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

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.02.2025. Выход в свет 28.02.2025.

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

