

Потеря режущей способности алмазных зерен при шлифовании композиционного материала на основе диборида циркония

А.Р. Янюшкин^{1а}, В.Ю. Попов^{2б}, А.Н. Хлыстов^{2с}

¹Чувашский государственный университет, пр. Московский, 15, Чебоксары, Чувашская Республика, Россия

²Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а andreyyanyushkin@gmail.com, ^б slapopov@gmail.com, ^с alexey.khlystov@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-3017-9788>

Статья поступила 14.01.2025, принята 04.03.2025

С момента начала применения синтетического алмаза в шлифовальных кругах ученых интересует причина образования засаженного слоя на их поверхности. Этот вопрос остается актуальным как для прикладных исследований в области резания материалов, так и для моделирования процессов резания. Рентабельность алмазного шлифования зависит от режущих свойств алмазного круга и состояния его алмазоносного слоя. Существует потенциал для улучшения режущей способности кругов и качества поверхности при шлифовании композиционного материала на основе диборида циркония ZrB_2 , особенно при сочетании применения алмазного круга на металлической связке и электроалмазного метода обработки. Однако эта область машиностроения требует дальнейшего развития и актуального научного сопровождения. На первом этапе исследования установлено, что образцы режущей поверхности алмазного круга обладают сильно деформированной структурой с микро- и макротрещинами. На поверхности имеются участки без засаженного слоя, которые не участвуют в процессе. Быстро изнашивающиеся алмазные зерна находятся на уровне засаженного слоя. Исследование показало, что засаженный слой связан с поверхностью круга адгезионно-диффузионными силами, и граница между ними неразличима даже при большом увеличении. На втором этапе изучены причины потери режущей способности алмазного круга. SEM-фотографии показывают его износ и дефекты алмазоносного слоя, влияющие на качество обработки. Обнаружены механические разрушения режущей кромки из-за столкновений с карбидными включениями и образование лунок в результате дефектов синтетических алмазов или электрических пробоев. Также на алмазных зернах представлены многочисленные налиты, формирующие засаженный слой на режущей поверхности. Исследования подтвердили, что применение комбинированных электроалмазных методов обработки способствует повышению режущей способности алмазного круга на металлической связке и приводит к повышению качества изделий, изготавливаемых из композиционного материала на основе ZrB_2 .

Ключевые слова: алмазные круги; режущая способность; засаливание; износ алмазных зерен; причины износа; диборид циркония; качество.

Loss of cutting ability of diamond grains when grinding a composite material based on zirconium diboride

A.R. Yanyushkin^{1а}, V.Yu. Popov^{2б}, A.N. Khlystov^{2с}

¹Chuvash State University; 15, Moskovsky Ave., Cheboksary, Republic of Chuvashia

²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а andreyyanyushkin@gmail.com, ^б slapopov@gmail.com, ^с alexey.khlystov@gmail.com

^а <https://orcid.org/0000-0002-5744-8987>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-6299-9161>,

^с <https://orcid.org/0000-0003-3017-9788>

Received 14.01.2025, accepted 04.03.2025

Since the beginning of synthetic diamond application in grinding wheels, scientists have been interested in the cause of greasy layer formation on their surface. This question remains relevant both for applied research in the field of cutting materials and for modeling of cutting processes. The profitability of diamond grinding depends on the cutting properties of the diamond wheel and the condition of its diamond-bearing layer. There is a potential for improvement of cutting ability of wheels and surface quality in grinding of composite material based on zirconium diboride ZrB_2 , especially when combining the use of metal-bonded diamond wheel and electro-diamond machining method. However, this area of mechanical engineering requires further development and actual scientific support. At the first stage of the study it was found that the samples of the cutting surface of the diamond wheel have a highly deformed structure with micro- and macro-cracks. On the surface there are areas without a greasy layer, which are not involved in the process. Quickly wearing diamond grains are at the level of the greasy layer. The study shows that the greasy layer is bound to the surface of the wheel by adhesion-diffusion forces, and the boundary between them is indistinguishable even under high magnification. In the second step, the reasons for the loss of cutting ability of the diamond wheel are studied. SEM-photographs show its wear and defects of the diamond-bearing layer affecting the quality of machining. Mechanical destruction of the cutting edge due to collisions with carbide inclusions and the formation of holes as a result of defects in synthetic diamonds or electrical breakdowns are detected. Also, the diamond grains have numerous stickers forming a greasy layer on the cutting surface. Studies have confirmed that the use of combined electro-diamond pro-

cessing methods contributes to an increase in the cutting ability of a diamond wheel on a metal bond and leads to an increase in the quality of products made of ZrB₂-based composite material.

Keywords: diamond wheels; cutting ability; salting; wear of diamond grains; reasons for wear; zirconium diboride; quality.

Введение. С того момента, как был синтезирован алмаз, машиностроение искало пути наиболее эффективного его применения. Конечно, очевидным стало совершенствование металлорежущего инструмента. Одновременно это происходило по нескольким направлениям:

- определение оптимальных режимов резания;
- поиск более совершенных для резания форм синтетического алмаза (СА);
- экспериментальный подбор определенных марок СА для обработки разных групп материалов;
- поиск экономически выгодных операций, переходов, технологических приемов в металлообработке;
- применение СА в металлорежущих инструментах, в частности, в шлифовальных кругах.

Первые эксперименты показали, что, например, при шлифовании СА высокоуглеродистых материалов процессы резания тормозятся в силу определенных причин. Со временем научное сообщество подошло к углубленному изучению природы формирования засаленного слоя на поверхности различных материалов при их шлифовании.

Исследования показали, что этот слой образуется с значительно большей интенсивностью при обработке инструментальных материалов [1, 2], по сравнению с обработкой композиционного материала на основе ZrB₂ [3–6]. В настоящее время этот вопрос остается достаточно актуальным, потому что при его научном решении станет возможным прогнозирование качества обработанных поверхностей из разных материалов после шлифования. Уже сейчас некоторые данные эффективно используются нами не только в контексте прикладных исследований, но и при компьютерном, атомистическом моделировании процесса резания разных материалов [7–9].

Изображение поверхности алмазного шлифовального круга (АШК), полученное путем оптической микроскопии после предварительной обработки композиционного материала на основе ZrB₂, показано на рис. 1, а. Здесь светлые области – это засаленный слой (ГОСТ 21445-84) со скрытыми под ним СА, а темные – режущая поверхность АШК с рабочими СА. Процесс шлифования невозможен, потому что светлые области находятся выше темных (см. рис. 1, б), препятствуя соприкосновению режущих граней СА с обрабатываемой поверхностью.

Известно, что рентабельность алмазного шлифования зависит от режущих свойств АШК, а также от состояния поверхности их алмазного слоя в процессе резания [10, 11]. Практика показывает, что для операций шлифования АШК композиционного материала на основе ZrB₂ имеется определенный резерв в плане сохранения высокой режущей способности самих кругов [12–14], а также качественной составляющей обработанной поверхности [15–17].

Однако выбор АШК достаточно велик, существуют круги на керамической, органической, гальванической

связках. Опыт показывает, что вышеперечисленным благоприятным факторам способствует применение АШК на металлической связке. Одновременно с ними следует применять прогрессивные комбинированные электроалмазные методы обработки (КЭАО), таким образом позволяя АШК работать и со сверхтвёрдыми, сверхпрочными материалами. Однако, как показывает практика, в настоящее время эти моменты машиностроительного производства нуждаются в постоянном актуальном сопровождении и дальнейшем развитии.

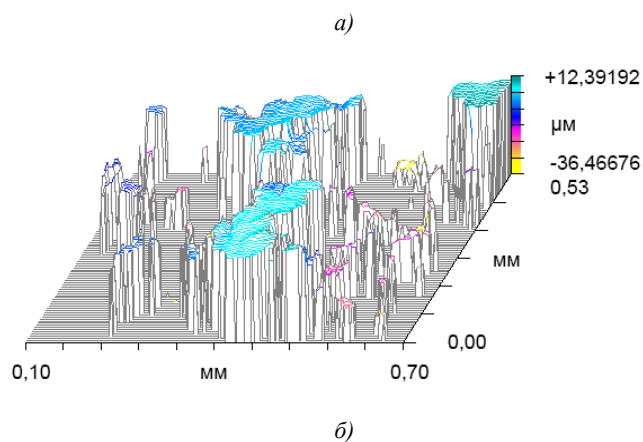
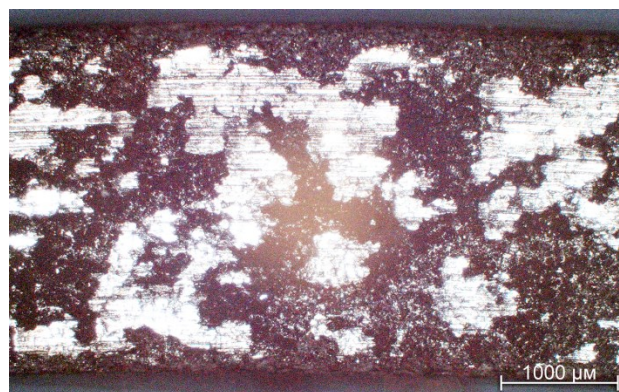


Рис. 1. Поверхность АШК, потерявшая режущую способность вследствие непрерывного процесса адгезионно-диффузионного засорения алмазного слоя элементами обрабатываемого материала: а – изображение поверхности засаленного слоя; б – топография поверхности засаленного слоя

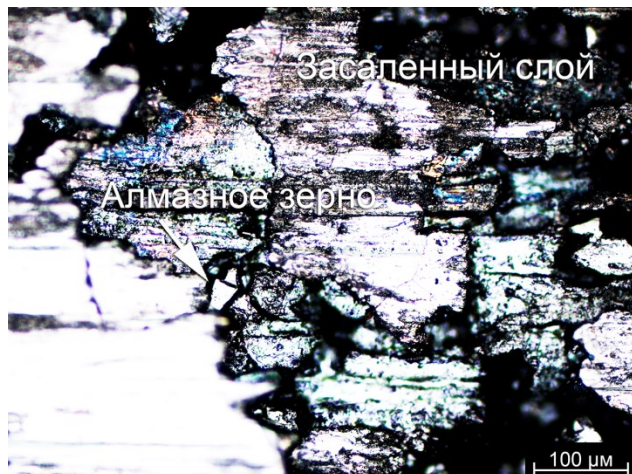
Необходимость постоянного сопровождения обусловлена тем, что в период действия санкций, направленных против машиностроения и станкостроения Российской Федерации, все большее количество стран отказывается нам в продаже металлообрабатывающего оборудования, станков и инструментов. Вот и Тайвань, в свою очередь, в ноябре 2024 г. объявил о запрете экспорта 77 наименований станков, включая электроэрозионные, шлифовальные и др. [18].

Таким образом, создание оптимальных условий для эффективной работы шлифовального инструмента на

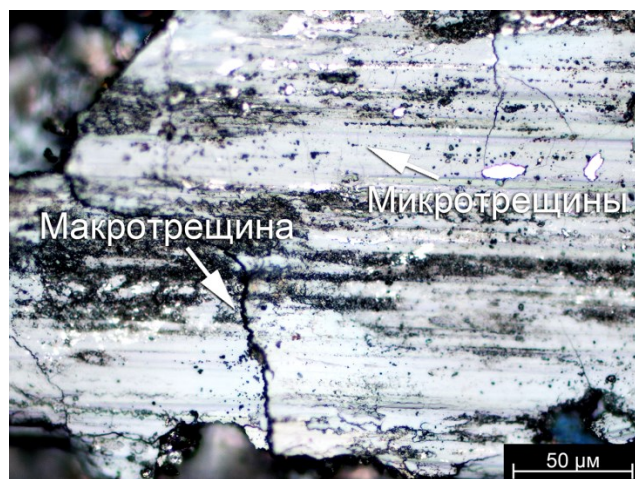
металлической связке [19–21] приобретает актуальное практическое и научное значение, так как позволяет обеспечить высокое качество обработанной поверхности машиностроительной продукции без привязки к новым моделям зарубежных станков, находящихся под санкциями.

Наши многолетние исследования поведения АШК во время шлифования показывают, что при обычных условиях возникает ряд определенных недостатков:

- интенсивное засаливание, которое сначала ухудшает режущие свойства шлифовального круга, а затем и вовсе останавливает процесс шлифования (рис. 2, а, рис. 3, а);



а)



б)

Рис. 2. Засаленный слой со стороны рабочей поверхности АШК: а – на одном уровне с засаленным слоем видно изношенное алмазное зерно с площадкой износа сверху, которая и вызывает рост температуры в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью; б – участок с микро- и макротрещинами

- увеличенный расход режущей поверхности круга, который заключается в ускоренном вырывании СА из связки круга;

- рост температуры в зоне контакта, что является сигнальным признаком начала процесса засаливания (см. рис. 2, б);

- рост сил резания, что также представляет собой сигнальный признак начала процесса засаливания и говорит о том, что в работе участвует все меньшее количество острых режущих граней СА;

- требуется частая периодическая правка круга для восстановления его режущей способности, так как алмазные зерна с хорошей режущей кромкой скрываются под засаленным слоем (см. рис. 3, б), который необходимо удалить.

Таким образом, обычное шлифование, либо КЭАО с достаточно мягкими технологическими режимами, создают сложные условия, при которых процесс резания становится возможным только при принудительной подаче.



а)



б)

Рис. 3. Граница контакта засаленного слоя с поверхностью АШК в поперечном разрезе: а – засаленный слой после шлифования; б – алмазное зерно с хорошей режущей кромкой, скрытое под засаленным слоем

Однако и в этом случае шлифование остается малоэффективным и может сопровождаться рядом уже других недостатков:

- низкая производительность операции шлифования, потому что иногда приходится совершать правку АШК; самый долгий способ правки – со снятием АШК со станка, самый быстрый, когда она совершается автоматически в процессе шлифования;

– неудовлетворительное качество обработанной поверхности в силу появления на ней микротрещин, включая общее изменение характеристик поверхностного слоя.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является исследование возможности шлифования композиционного материала на основе ZrB_2 за счет изучения его контактного взаимодействия с синтетическими алмазными зернами, входящих в состав шлифовального круга на металлической связке.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

– раскрыть перспективы эффективного применения технологии КЭАО, которые способны обеспечить высокие физико-механические свойства при шлифовании поверхности изделий из композиционного материала на основе ZrB_2 ;

– провести аналитическое исследование результата контактного взаимодействия, оказываемого на шлифовальные алмазные зерна в виде процесса засаливания.

Ранее вопросы обеспечения режущей способности АШК рассматривали следующие ученые: Ю.М. Зубарев, В.Г. Юрьев [3], О.И. Медведева [9], А.П. Гаршин, Т.М. Связкина и др. [11], а также ряд зарубежных ученых: О.А. Олуфайо, К. Абу-Ель-Хоссейн [8], С.Т. Вудин [13], Й.Л. Йианг, П.К. Ге [15] и др. Развитие и совершенствование обработки композиционных материалов кругами на металлической связке отразили в своих работах следующие исследователи: Е.Г. Скрипник, Д.В. Лобанов и др. [6]. Авторы отмечают, что обрабатываемая поверхность инструмента из композиционного материала на основе ZrB_2 должна характеризоваться высокой технологической стойкостью. Это условие является необходимым для обеспечения получения режущей кромки высокого качества.

Методика проведения эксперимента. В качестве исследуемого материала шлифовались образцы из диборида циркония ZrB_2 . Сегодня этот материал уже используется в области авиации, космонавтики, газотурбинных двигателей в качестве компонента ультравысокотемпературной керамики ZrB_2-SiC [5].

Шлифование проводилось на универсально-заточном станке 3Д642Е, модернизированном под процессы КЭАО. Применялся чашечный шлифовальный круг на металлической связке М1-01 с алмазами марки АС6, зернистостью 100/80 и 100 % относительной концентрацией алмазов в алмазоносном слое.

Для прохождения процесса шлифования в режиме самозатачивания необходимо, чтобы размер выступающих из связки круга зерен составлял не менее трети от их размера, т. е. около 26–33 мкм. Для этого технологические параметры обработки варьировались в следующих пределах: скорость резания $V = 17-35$ м/сек.; глубина резания $t = 0,01-0,08$ мм/дв. ход; продольная подача $S = 0,5-2$ м/мин.; плотность тока правки $i_{пр} = 0,17-0,25$ А/см²; плотность тока растравливания $i_{тр} = 6,25-20$ А/см².

Методика экспериментальных исследований структуры засаленной поверхности АШК и его поверхности после активной правки КЭАО проводилась средствами оптической микроскопии (МБС-10); с помощью растровой электронной микроскопии (Carl Zeiss EVO®50

XVP); параметры микрорельефа получены средствами оптической интерферометрии (Zygo NewView™7300).

Адгезионный износ АШК, вызванный засаливанием, служит показателем фактических условий, в которых осуществляется процесс шлифования – режущая способность таких кругов оказывает непосредственное влияние на технико-экономические показатели шлифовальной операции.

В результате проведенных работ мы пришли к выводу о необходимости структуризации дальнейших исследований по трем ключевым направлениям. Данный подход позволил выявить определенный потенциал к повышению качества и конкурентоспособности изделий в области машиностроения. Этого можно достичь за счет улучшения как качественных, так и количественных характеристик процессов комбинированной электроалмазной обработки.

Первое направление для обеспечения качественных характеристик АШК осуществляется следующими способами:

– минимизация процессов, приводящих к образованию засаленного слоя, что негативно сказывается на качестве обработки материалов;

– повышение режущей способности и продления срока службы АШК, что способствует улучшению его эксплуатационных свойств и долговечности;

– уменьшение абразивного износа АШК, что позволяет сохранить его геометрические параметры и функциональные возможности на протяжении более длительного периода использования.

Второе направление для обеспечения качественных характеристик обрабатываемой поверхности достигается принятием следующих мер:

– снижение шероховатости обработанной поверхности;

– сведение к минимуму структурных трансформаций в поверхностном слое;

– предотвращение образования как микро-, так и макротрещин, вызванных растягивающими, сжимающими напряжениями и термическими повреждениями, которые могут возникнуть в результате воздействия высокой температуры;

– избегание механического разрушения обрабатываемого материала, которое может возникнуть в процессе пластической деформации;

– минимизация окислительных и коррозионных процессов, происходящих на поверхности материала в процессе обработки, так как они негативным образом сказываются на эксплуатационных характеристиках;

– стремление к уменьшению разброса допусков, величины которых могут варьироваться в процессе обработки, поскольку они также влияют на итоговое качество изделия.

Третье направление осуществляется следующими способами:

– уменьшение сил резания;

– снижение энергозатрат и мощности, необходимых в процессе шлифования;

– снижение отрицательного воздействия адгезии и диффузии при контакте ювенильных поверхностей;

– повышение общей эффективности процесса шлифования, что подтвердит целесообразность использо-

вания АШК на металлической связке при обработке современных композиционных материалов и ультравысокотемпературной керамики;

- понижение температуры в зоне резания, что является важным для повышения износостойкости инструмента и качества обработки;

- повышение степени контроля над процессом шлифования, что позволяет более точно регулировать параметры обработки и достигать заданных характеристик;

- оптимизация процесса отвода стружки из зоны резания, что способствует улучшению условий шлифования.

Результаты и обсуждение. На первом этапе установлено, что на исследуемых образцах АШК видна сильно деформированная структура со следами пластической деформации, наличием микро- и макротрещин (см. рис. 2). На поверхности круга имеются свободные от засаженного слоя участки, которые находятся ниже его уровня и в работе не участвуют.

Отдельные алмазные зерна, вершины режущих граней которых видны на уровне засаженного слоя, быстро изнашиваются, даже истираются с образованием плоских площадок.

На образцах АШК, сделанных в поперечном разрезе, также установлена кинетика образования засаженного слоя. Видна его плотная связь с поверхностью связки круга. Здесь даже на травленых шлифах при большом увеличении невозможно различить границу раздела между алмазонасной поверхностью и засаженным слоем (см. рис. 3).

Более того, проведенные ранее микрорентгеноспектральные исследования [3] показали концентрационные кривые практически по всем элементам, из которых состоит связка АШК (Cu и Al). Изучались алмазные зерна из алмазных чашечных кругов на металлических связках, дефицитных зернистостей: AC6 80/63 M1 100 %, D = 125 мм, b = 15 мм; AC6 125/100 M1 100 %, D = 125 мм, b = 10 мм; AC6 80/63 A1 4 M1 D = 150 мм, b = 10 мм.

Это позволило сделать вывод, что засаженный слой удерживается на режущей поверхности круга за счет сил адгезии и диффузии. Поэтому, чтобы избавиться от процесса засаливания, нужно просто разорвать эти связи. Мы добились этого с помощью применения комбинированных электроалмазных методов обработки, но как было указано выше, возможен ряд и других решений.

На втором этапе изучены возможные причины потери режущей способности АШК при их нормальной работе. На SEM-фотографиях рис. 4 показан износ алмазного круга в различные периоды шлифования и объективно отображены различные этапы износа и некоторые дефекты на алмазонасном слое, влияющие на качество обработанной поверхности.

На рис. 4, а, б показаны разрушения вершины алмазного зерна. В первом случае причиной является

механическое разрушение режущей кромки вершины. Во втором образование лунки возможно из-за дефектов морфологии синтетических алмазов или в результате электрических пробоев между катодом правки и поверхностью АШК.

На рис. 4, в показано геометрически правильное зерно СА по всей вершине режущей грани которого стал образовываться налип. Со временем, если режимы резания останутся прежними, этот налип будет разрастаться, опускаясь к связке круга, где и соединится с ней.

Этот момент показан на рис. 4, г, из которого также видно, что налипы могут образовываться по несколько на одном зерне СА, что значительно ускоряет тот момент, когда засаженный слой покроет всю режущую поверхность АШК.

На рис. 4, д показан не только налип на режущей поверхности СА, но и площадка износа по всей вершине режущей грани. Предполагаем, что отличие механики образования налипа от площадки износа зависит от направления плоскостей спайности в кристаллитах СА. Если они расположены параллельно обрабатываемой поверхности, то для этого зерна преобладают дефекты в виде образования площадок износа. Если они расположены перпендикулярно обрабатываемой поверхности, то для этого зерна преобладают дефекты в виде образования налипов. Однако, если налипы могут образовываться по всей поверхности режущего зерна, которая контактирует со шлифуемым материалом, то площадки износа появляются только на режущей грани.

На рис. 4, е показаны множественные вырывы зерен СА с поверхности АШК. Этот вид дефекта может возникать по следующим причинам:

- из-за больших сил резания, появляющихся при столкновении поверхностей в начале их контакта;

- из-за слабого удержания этих зерен внутри связки круга, что иногда происходит в силу чрезмерного электрохимического растворения связки вдоль границ зерен. Процесс растворения при КЭАО происходит по причине активной электрохимической правки АШК.

Выводы и заключение. Исследования подтвердили перспективы эффективного применения технологии КЭАО, обеспечивающие высокие физико-механические свойства при шлифовании поверхности изделий из композиционного материала на основе ZrB_2 . Лучшей режущей способностью обладают алмазные круги, работающие при сочетании комбинированного метода обработки и активной правки режущей поверхности.

Активная правка требуется, чтобы создать шлифовальному кругу устойчивую и постоянную очистку режущей поверхности от образования засаженного слоя, а также для создания благоприятных условий для самозатачивания режущих граней СА.

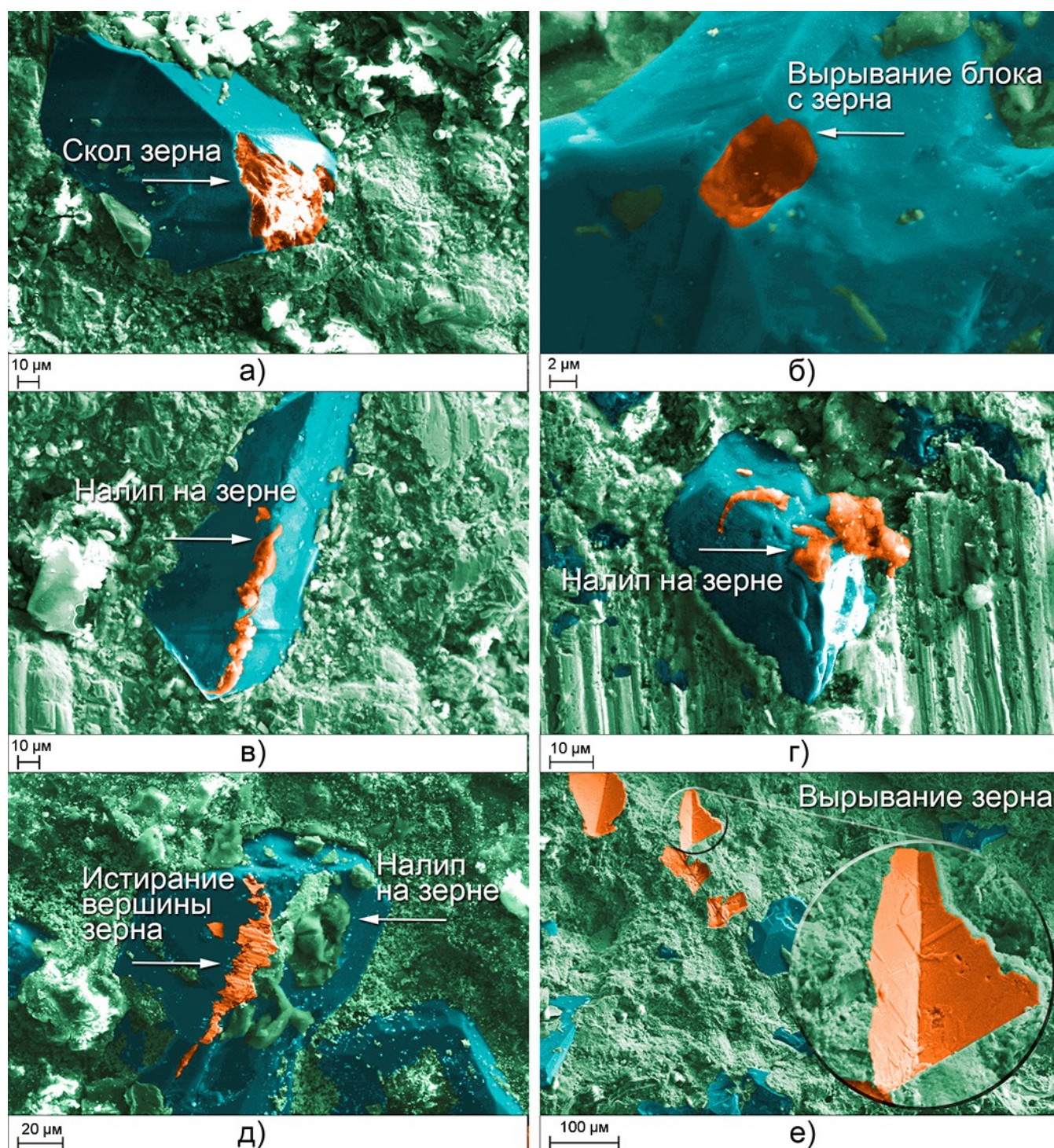


Рис. 4. Вид поверхности и дефектов алмазного круга в процессе электроалмазной обработки: а – SEM-фотография объемного разрушения вершины алмаза в виде макроскола (показан стрелкой); б – SEM-фотография объемного разрушения вершины алмаза в виде микроскола (показан стрелкой); в, г, д – SEM-фотографии адгезионного характера износа режущей поверхности алмаза, образование налива на режущей грани алмаза (показан стрелками); е – SEM-фотография абразивного характера износа режущей поверхности алмаза, множественные вырывания алмаза из связки шлифовального круга (показано увеличением)

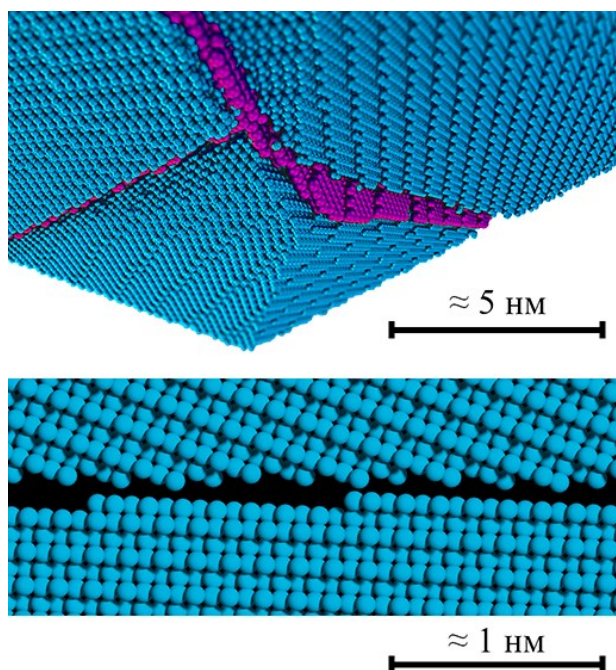


Рис. 5. Результаты физического моделирования в Blender морфологии кристаллической структуры алмазного зерна объемных дефектов (макродефектов) в виде трещин между блоками, проведенного с целью исследования контактного взаимодействия при КЭАО

Литература

1. Попов В.Ю. Повышение качества изделий из инструментальных сталей при электроалмазном шлифовании: дисс. ... канд. техн. наук. Братск, 2002. 159 с.
2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 4 (73). С. 16-23.
3. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов // *Вестн. Сибир. гос. аэрокосмич. ун-та*. 2013. № 1 (47). С. 178-183.
4. Зубарев Ю.М., Юрьев В.Г. Минералокерамический режущий инструмент и области его применения // *Справочник. Инженерный журнал*. 2018. № S5. С. 1-12.
5. Крутский Ю.Л., Гудыма Т.С., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Крутская Т.М. Дибориды некоторых переходных металлов: свойства, области применения и методы получения. Ч. 2. Дибориды хрома и циркония (обзор) // *Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия*. 2021. Т. 64, № 6. С. 395-412.
6. Скрипняк Е.Г., Лобанов Д.В., Скрипняк В.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.А., Рычков Д.А. Керамические нанокompозиты на основе диборида циркония // *Системы. Методы. Технологии*. 2011. № 2 (10). С. 95-98.
7. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // *Тр. Братск. гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки*. 2014. Т. 1. С. 201-207.
8. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // *Procedia CIRP*. 2013. № 8. P. 504-509.
9. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2014. № 3 (64). С. 68-75.
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 // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 9 (111). С. 40-48.
11. Гаршин А.П., Связкина Т.М., Федотова С.М., Вольфсон А.И., Молчанов Н.А. Шлифовальные и режущие инструменты на основе алмаза и нитрида бора в машиностроении. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 311 с.
12. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 1 (74). С. 30-39.
13. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // *Georgia Institute of Technology: Materials Science*. 2014. [Электронный ресурс]. <https://repository.gatech.edu/entities/publication/9cf49f3c-6e98-44f8-bbeb-0eedbb8c8813> (дата обращения 20.03.25).
14. Полищук В.С., Алехов Ю.А., Пересадченко А.Н. Композиционные магнитно-абразивные порошки неизометричной формы с поверхностным расположением абразива // *Технология машиностроения*. 2023. № 12. С. 11-16.
15. Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process // *International Journ. of Machine Tools and Manufacture*. 2013. Vol. 74. P.29-40.
16. Shashkov Y., Gusarov A., Gushchin V., Tumarkin S. Comparative analysis of finishing methods of hardened steel surfaces

- // International Journ. of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 9-12.
17. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Бугай И.А., Назаров П.В. Специальный осевой режущий инструмент для обработки композиционных материалов // Станки Инструмент. 2015. № 4. С. 9-11.
18. Тайвань объявил о прекращении поставок станков в Россию. [Электронный ресурс]. <https://www.rbc.ru/politics/03/11/2024/672770549a794723d2f2c9ec.html> (дата обращения 03.11.2024).
19. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок. Патент на полезную модель RU 144708 U1, 27.08.2014. Заявка № 2014105641/02 от 14.02.2014.
20. Мигранов М.Ш., Максимов И.С., Репин Д.С. Износостойкость композиционных шлифовальных кругов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 5. С. 217-222.
21. Komanduri R., Huang H., Raff M., Corbett J. A review of grinding process development and optimization using simulation // Journ. of Manufacturing Science and Engineering. 2016. Vol. 138. № 4. P. 134-180.
22. Medvedeva O.I., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Influence of parameters of electrodiamond grinding of hard alloys on the value of the dissolved layer // Metal processing (technology, equipment, tools). 2014. № 3 (64). P. 68-75.
23. Makarov V.F., Volkovskiy A.A., Sabirzyanov A.I. Improving the productivity and quality of composite materials processing based on the selection and rational use of an abrasive tool // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020. № 9 (111). P. 40-48.
24. Garshin A.P., Svyazkina T.M., Fedotova S.M., Wolfson A.I., Molchanov N.A. Grinding and cutting tools based on diamond and boron nitride in mechanical engineering. St. Petersburg: POLITEH-PRESS, 2020. 311 p.
25. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Khlystov A.N. Defects in diamonds – the basis of adhesion during grinding // Metal processing (technology, equipment, tools). 2017. № 1 (74). P. 30-39.
26. Woodin C.T. Effects of dressing parameters on grinding wheel surface topography // Georgia Institute of Technology: Materials Science. 2014. [Electronic resource]. <https://repository.gatech.edu/entities/publication/9cf49f3c-6e98-44f8-bbeb-0eedbb8c8813> (date of address 20.03.25).
27. Polischuk V.S., Alekhov Yu.A., Peresadchenko A.N. Composite magnetic-abrasive powders of non-isometric shape with surface location of abrasive // Technology of mechanical engineering. 2023. № 12. P. 11-16.
28. Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process // International Journ. of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 74. P. 29-40.
29. Shashkov Y., Gusarov A., Gushchin V., Tumarkin S. Comparative analysis of finishing methods of hardened steel surfaces // International Journ. of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 102. P. 9-12.
30. Vasiliev E.V., Popov A.Yu., Bugai I.A., Nazarov P.V. Special axial cutting tool for processing composite materials // Machine Tools. 2015. № 4. P. 9-11.
31. Taiwan announced the termination of machine tool supplies to Russia. [Electronic resource]. <https://www.rbc.ru/politics/03/11/2024/672770549a794723d2f2c9ec.html> (date of address 03.11.2024).
32. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Popov V.Yu., Suryev A.A., Arkhipov P.V., Kuznetsov A.M., Medvedeva O.I. Abrasive wheel for electrochemical grinding with oblique arrangement of conductive inserts. Patent for utility model RU 144708 U1, 27.08.2014. Application № 2014105641/02 dated 14.02.2014.
33. Migranov M.Sh., Maksimov I.S., Repin D.S. Wear resistance of composite grinding wheels // Assembly in mechanical engineering, instrument making. 2023. № 5. P. 217-222.
34. Komanduri R., Huang H., Raff M., Corbett J. A review of grinding process development and optimization using simulation // Journ. of Manufacturing Science and Engineering. 2016. Vol. 138. № 4. P. 134-180.

References

1. Popov V. Yu. Quality improvement products from tool steels at electro-diamond grinding: dissertation ... candidate of technical sciences. Bratsk: Publishing house, 2002. 159 p.
2. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Khlystov A.N. Destruction of diamond grains during grinding // Metal processing (technology, equipment, tools). 2016. № 4 (73). P. 16-23.
3. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Loss of cutting ability of the diamond wheels on a metal bond at grinding of composite materials // Bulletin of Siberian State Aerospace Engineering University. 2013. № 1 (47). P. 178-183.
4. Zubarev Yu.M., Yuriev V.G. Mineral-ceramic cutting tool and its application areas (in Russian) // Reference. Engineering Journ. 2018. № S5. P. 1-12.
5. Krutskiy Yu.L., Gudyma T.S., Dyukova K.D., Kuzmin R.I., Krutskaya T.M. Diborides of some transition metals: properties, applications and methods of preparation. Chromium and zirconium diborides (review) // Tidings of higher educational institutions. Ferrous metallurgy. 2021. Vol. 64, № 6. P. 395-412.
6. Skripnyak E.G., Lobanov D.V., Skripnyak V.V., Yanyushkin A.S., Skripnyak V.A., Rychkov D.A. Ceramic nanocomposites based on zirconium diboride // Systems. Methods. Technologies. 2011. № 2 (10). P. 95-98.
7. Popov V.Yu., Shkuratova A.P., Khlystov A.N., Bondin A.V., Miroschnichenko N.A. 3D modeling of the process of combined electric diamond processing // Proceedings of Bratsk. state university. Series Natural and engineering sciences. 2014. Vol. 1. P. 201-207.
8. Olufayo O.A., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon // Procedia CIRP. 2013. № 8. P. 504-509.