

УДК 621.891.923

DOI: 10.33839/2223-3938-2018-21-1-183-192

**А. М. Кузей**, д-р техн. наук<sup>1</sup>, **В. Е. Бабич**, канд. техн. наук<sup>2</sup>, **В. Г. Кудрицкий**<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,  
e-mail: anatkuzei@mail.ru

<sup>2</sup>Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Минск, Беларусь  
e-mail: babich83@tut.by

<sup>3</sup>Институт механики металлополимерных систем, г. Гомель, Беларусь

## **ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТА**

*Исследована абразивная способность композиционных материалов с монокристаллами и гранулами поликристаллического алмаза. Определен износ монокристаллов и гранул поликристаллического алмаза при обработке бетона и стали. Износ монокристаллов сопровождается разрушением магистральными трещинами, гранул поликристаллического алмаза – хрупким разрушением алмазных зерен и скалыванием отдельных алмазных зерен от гранул. В большей степени, абразивная способность композиционных материалов определяется масштабным фактором – размером режущего элемента. Увеличение размеров режущего элемента алмазосодержащего композиционного материала изменяет характер взаимодействия обрабатываемого материала с матрицей, снижая скорость ее износа, и одновременно обеспечивает большую прочность его закрепления в матрице.*

**Ключевые слова:** алмазобразивный инструмент, композиционные материалы, износ, контактные взаимодействия.

Основными видами абразивного инструмента, используемого органами и подразделениями по чрезвычайным ситуациям при ликвидации ЧС (дорожно-транспортные аварии, пожары, обрушения строительных, промышленных конструкций и т.д.), являются абразивные и алмазобразивные сегментные круги. Эти инструменты применяются так же и в народном хозяйстве для обработки (резки) изделий из стали, строительных материалов, асфальта, бетона, железобетона, природных камней и т.д. и адаптированы для обработки определенных материалов.

Объектами исследования являлись алмазосодержащие композиционные материалы в форме сегментов алмазных кругов диаметром 300 мм. В качестве режущих элементов сегментов синтетические алмазные порошки (монокристаллы) фракции 500/400 мкм с прочностью K200 и поликристаллы фракции 2000/1600 марки APC-3. В качестве матрицы композиционных алмазосодержащих материалов использовался сплав системы Fe-Ni-Cu-Sn (связка марки М6-26). Концентрация алмаза в композиционных материалах 100–150%.

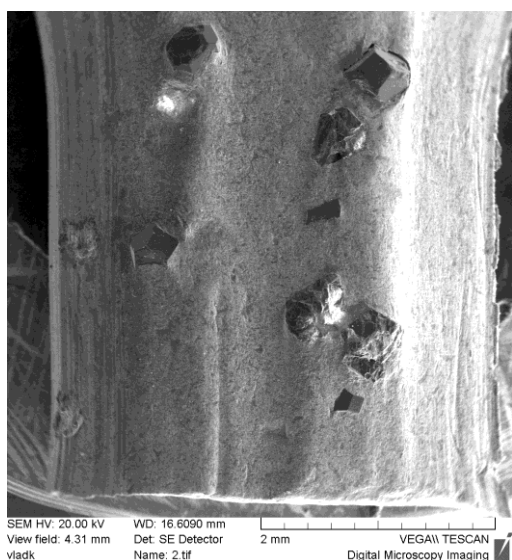
Алмазными кругами обрабатывали бетон (М300) и сталь (Ст3). Частота вращения круга 4000 об/мин, время обработки 15 минут, линейная скорость вращения круга 80 м/с. Режущая способность круга с монокристаллами алмаза с гранулами поликристалла при обработке бетона определялась по высоте износа сегмента. Измерения радиального износа производились на каждом сегменте в 3 точках.

Морфологию поверхностей композиционного материала, монокристаллов, поликристаллов алмаза исследовали в исходном состоянии, после обработки бетона, стали,

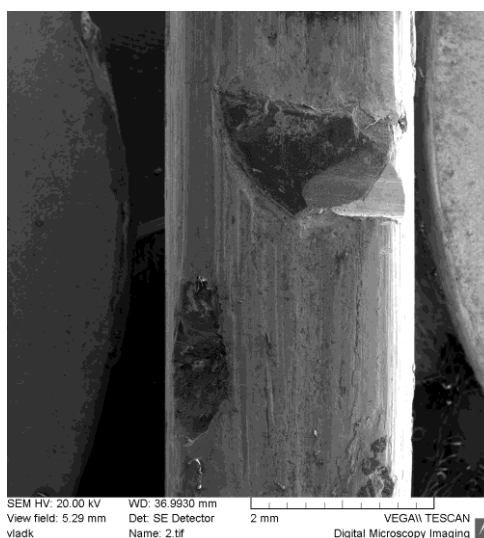
после травления в растворе из соляной (3 массовые части) и азотной (1 массовая часть) кислот в течение 2 минут и далее после травления в эквимольном растворе нитритов калия, натрия, при 750 К в течение 40 минут.

### Результаты исследований

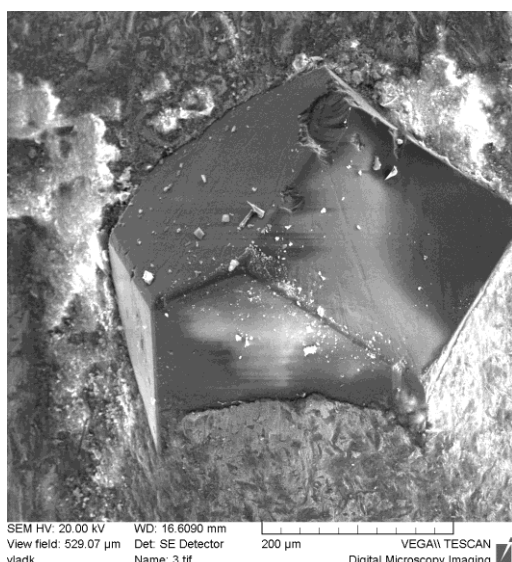
Обработка бетона алмазными кругами приводит к образованию на поверхности композиционных материалов характерных микрорельефов (рис.1).



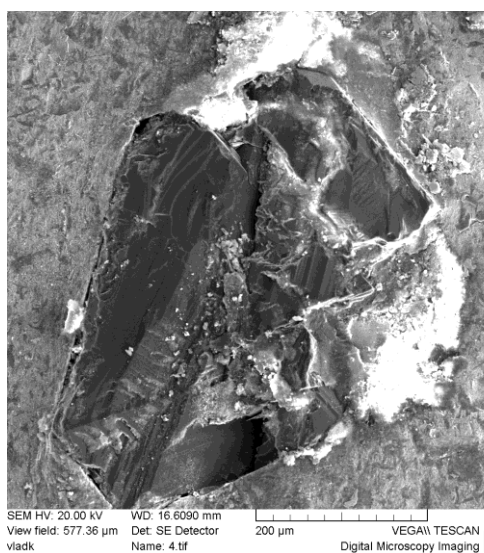
а



б

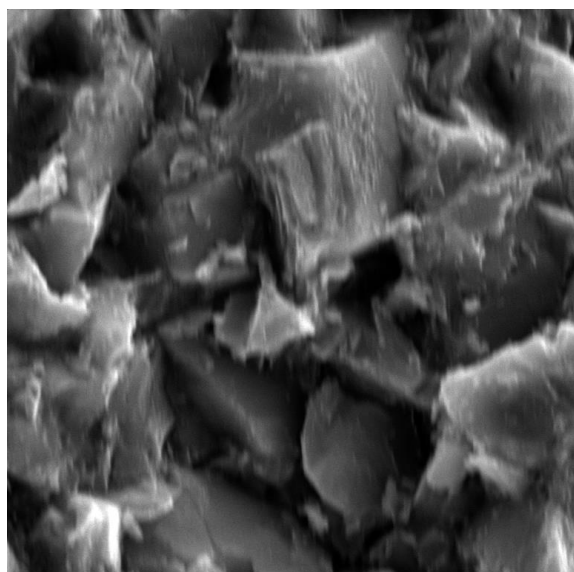


в

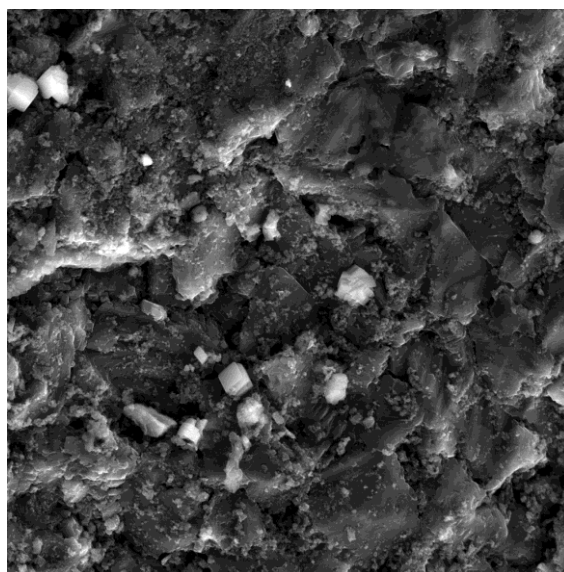


г

Рис. 1. Морфология поверхности износа алмазосодержащих сегментов при обработке бетона: а – морфология поверхности сегмента с монокристаллами алмаза; б – морфология поверхности сегмента с поликристаллами алмаза; в, г – морфология поверхностей разрушенных монокристаллов; д, е – морфология поверхностей разрушения поликристаллов алмаза



д

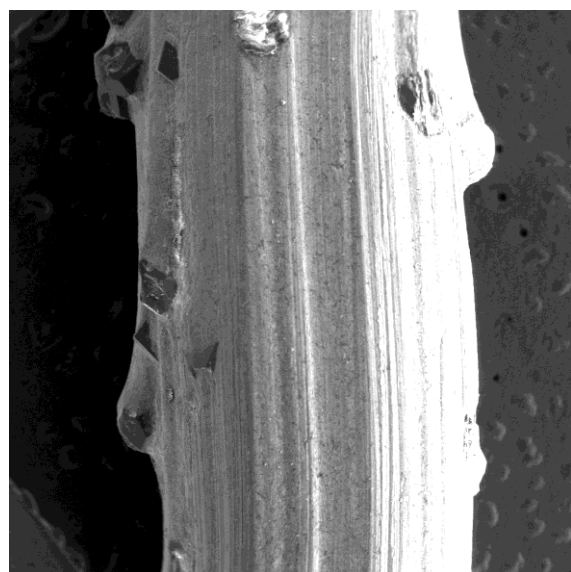


е

Окончание рис. 1

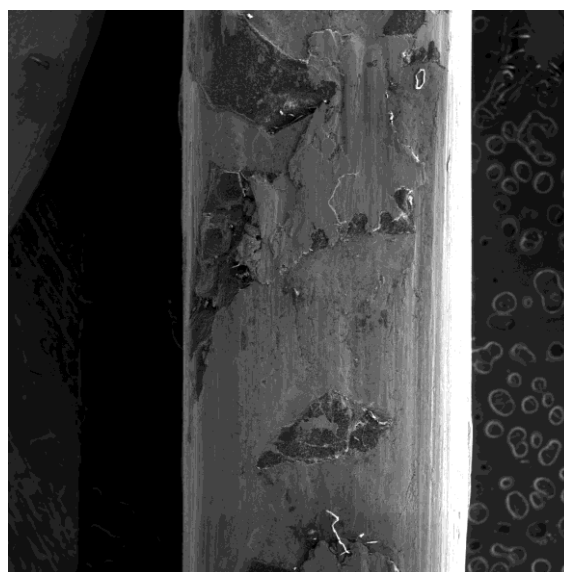
Особенностью микрорельефа на поверхности композиционного материала с монокристаллами алмаза является присутствие на поверхности матрицы следов от выкрашивания монокристаллов алмаза и присутствия на их поверхности сколов, микротрещин. Сколы, микротрещины присутствуют и на поверхности монокристаллов, находящихся на уровне поверхности матрицы.

Обработка алмазными кругами с монокристаллами и поликристаллами алмаза стального листа (ст 3), в отличие от обработки бетона протекает с различными скоростями. Обработка стали алмазным кругом с композиционным материалом, содержащим монокристаллы алмаза, сопровождается непрерывным снижением режущей способности и после 8 минут процесс резания периодически прекращается. По мере увеличения длительности обработки количество монокристаллов поверхности сегментов снижается, монокристаллы алмаза разрушаются и не возвышаются над матрицей, форма сегмента изменяется (рис. 2).



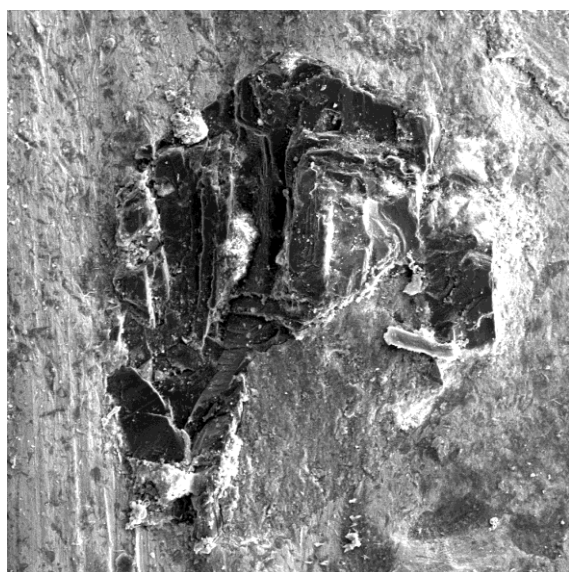
SEM HV: 20.00 kV WD: 16.6090 mm  
View field: 4.31 mm Det: SE Detector  
vladk Name: 1.tif VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging

*a*



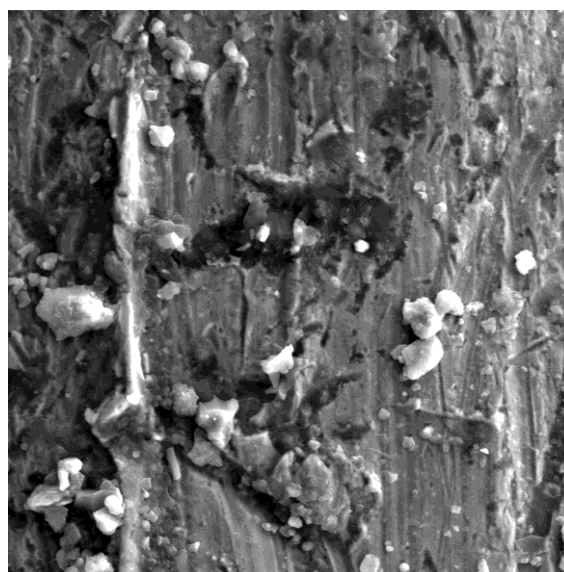
SEM HV: 20.00 kV WD: 36.9930 mm  
View field: 5.29 mm Det: SE Detector  
vladk Name: 1.tif VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging

*б*



SEM HV: 20.00 kV WD: 16.6090 mm  
View field: 629.98 µm Det: SE Detector  
vladk Name: 4.tif VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging

*в*



SEM HV: 20.00 kV WD: 16.6090 mm  
View field: 78.15 µm Det: SE Detector  
vladk Name: 6.tif VEGA\\ TESCAN  
Digital Microscopy Imaging

*г*

*Рис. 2. Морфология поверхностей износа алмазосодержащих композиционных материалов при обработке стали: а – морфология поверхности сегмента с монокристаллами алмаза; б – морфология поверхности сегмента с гранулами поликристаллического алмаза; в – морфология поверхности монокристалла алмаза; г – морфология поверхности матрицы композиционного материала*

На поверхности матрицы композиционного материала присутствуют округлые и вытянутые в направлении обработки частицы, морфологически связанные с матрицей.

Помимо их, на ее поверхности имеются продукты износа иного состава или матричный сплав (рис. 3).

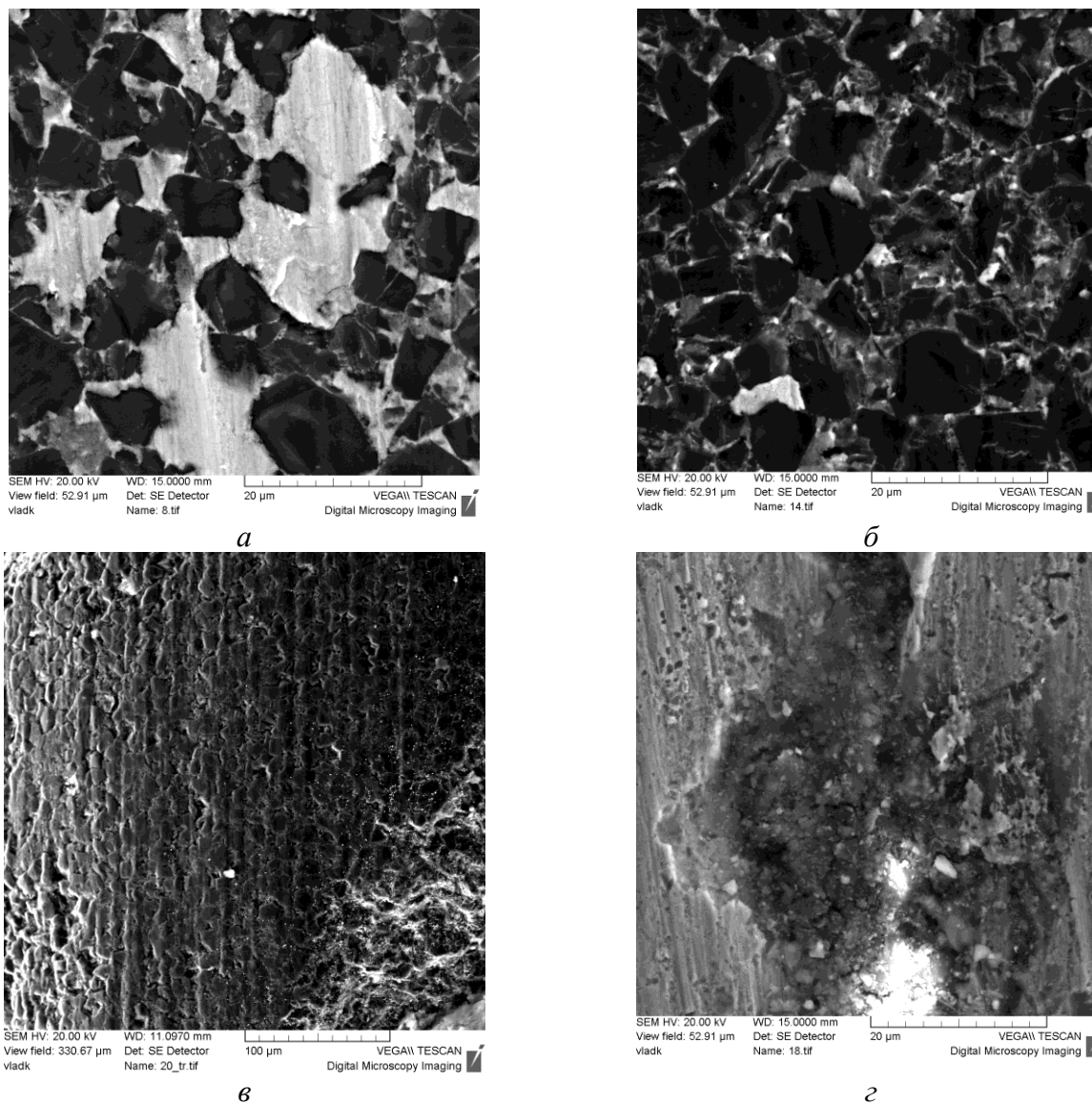


Рис. 3. Морфология поверхности износа композиционного материала с поликристаллами алмаза после обработки стали: а – морфология поверхности зерен на боковой поверхности поликристалла алмаза; б – морфология поверхности зерен на плоской площадке износа поликристалла алмаза; в – морфология поверхности площадки износа поликристалла алмаза; г – морфология поверхности матрицы композиционного материала

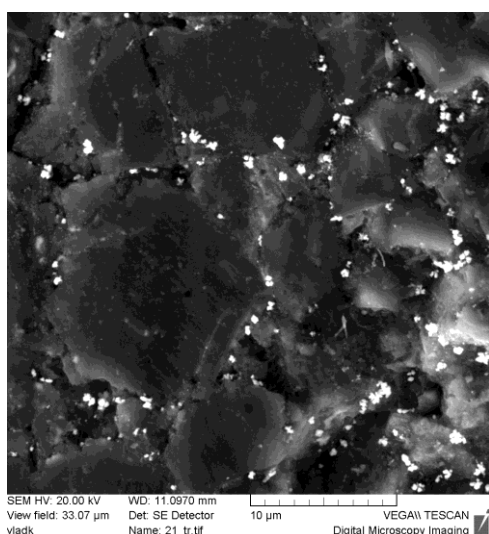
Обработка стали алмазным кругом с композиционным материалом, содержащим поликристаллы алмаза, в течение двух циклов по 15 минут происходит с постоянной режущей способностью. На поверхности сегментов отсутствуют следы от выкрошившихся поликристаллов. На боковых поверхностях износа поликристаллов присутствуют продукты износа стали в форме пленок и отдельных частиц (рис. 3). На режущих поверхностях

поликристаллов продукты износа частиц присутствуют в форме отдельных частиц на поверхности зерен и форме пленок между зернами алмаза.

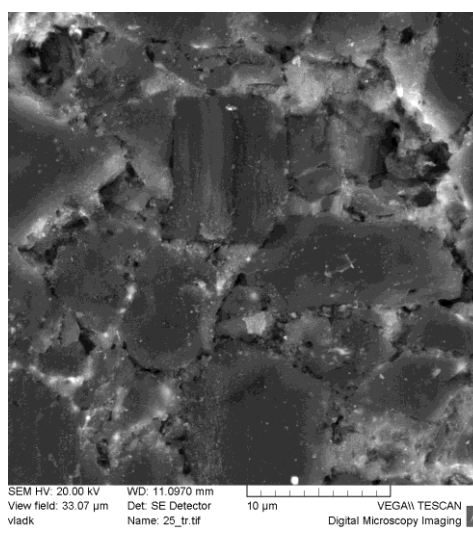
Морфология поверхности площадок износа (режущих поверхностей) поликристаллов алмаза представляет собой совокупность округлых углублений и гребней, ориентированных в направлении обработки (рис. 3, в).

Поверхность матрицы в микроскопическом масштабе плоская, с отдельными бороздами, ориентированными в направлении обработки, углублениями различных размеров (10–40 мкм), часть из которых заполнена продуктами износа стали, некоторые из них имеют округлую форму (рис. 3, з).

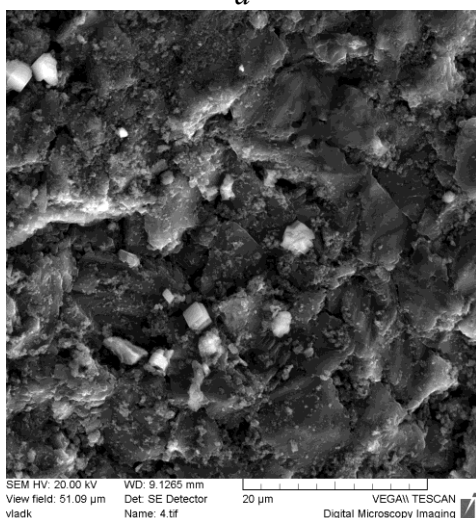
Травление композиционного материала в растворе кислот и расплаве нитратов изменяет морфологию поверхностного слоя поликристаллов алмаза (рис. 4).



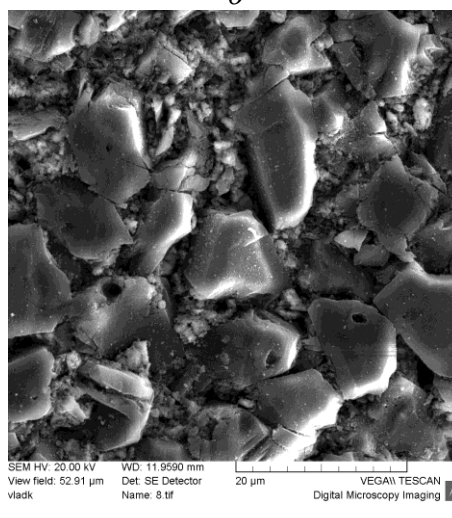
а



б



в



з

Рис. 4. Морфология поверхности поликристаллов алмаза после травления в растворе кислот (а, б) и расплава нитратов (в, з): а – боковая поверхность поликристалла; б – поверхность площадки износа; в – поверхность исходного поликристалла; з – поверхность площадки износа поликристалла

На боковых поверхностях поликристаллов продукты износа в форме отдельных частиц и агломератов сохраняются на поверхности между алмазными зернами, в углублениях между ними и в трещинах на алмазных зернах (рис. 4, *а*).

На площадках износа поликристаллов продукты износа стали образуют прослойки между алмазными зернами, заполняют углубления между зернами (рис. 4, *б*). На поверхности алмазных зерен выявляются борозды, ориентированные в направлении обработки, с округлыми кромками (рис. 4, *б*).

Последующие травления поликристаллов в расплаве нитратов калия, натрия приводят к образованию на их поверхности характерных микрорельефов (рис. 4, *в, з*). В исходном состоянии микроструктура поликристалла представляет собой совокупность крупных (5–10 мкм) и мелких (0,5–3 мкм) зерен, расположенных между крупными (рис. 4, *в*).

Микроструктура поверхностного слоя поликристаллов после обработки стали представляет собой композицию из крупных (5–10 мкм) алмазных зерен, выступающих из основы, состоящей из мелких (0,5–1,0 мкм). На поверхности крупных зерен присутствуют плоские площадки с микротрещинами, углублениями (рис. 4, *з*).

### **Обсуждение результатов**

Эксплуатационные характеристики алмазобразивного инструмента задаются уже на этапе его проектирования (форма, размеры, концентрация алмазных зерен в композиционном материале, размер и форма алмазосодержащего композиционного материала и т. д.) и корректируются технологическими режимами изготовления [1]. Наряду с этими показателями существуют и показатели, которые связаны с режимами обработки, свойствами обрабатываемого материала. Принято считать (и это подтверждено практикой), что оптимум эксплуатационных характеристик инструмента достигается тогда, когда износ матрицы композиционного алмазосодержащего материала компенсирует износ (затупление, разрушения режущих вершин, гребней) алмазных зерен и снижения их концентрации в поверхностном слое [2]. Морфология поверхности композиционного материала с монокристаллами алмаза свидетельствует о том, что при данных режимах обработки матрица изнашивается с большей скоростью, чем оптимальная: большая часть монокристаллов выступает над матрицей (на 0,3–0,5 своего диаметра), а часть выкрошилась из матрицы (рис. 1, *а*). В свою очередь «износ» монокристаллов протекает не монотонно, а резко: скалыванием значительных объемов либо разрушением магистральными трещинами и выкрашиванием осколков монокристалла (рис. 1, *в, з*). Преимущественный износ монокристаллов алмаза по механизму хрупкого разрушения усиливает абразивное воздействие продуктов износа на матрицу композиционного материала, ускоряя ее износ. Изнашивание гранул поликристалла (по морфологическим признакам) протекает по смешенному механизму, в который вносят вклад хрупкое разрушение и абразивный износ (рис. 1, *д*).

Образование на поверхности гранул поликристаллического алмаза плоских площадок износа с бороздами, ориентированными в направлении обработки, указывает на абразивный характер износа (рис. 1, *б*). Однако, в микроскопическом масштабе износ обеспечивают механизмы хрупкого разрушения и абразивного износа (рис. 1, *д*). Превалирующим в макроскопическом масштабе механизмом износа гранул поликристаллического алмаза является механизм абразивного износа. В отличие от монокристаллов алмаза, механизм хрупкого разрушения локализован алмазным зерном (структурным элементом гранул и поликристаллического алмаза): трещина, зародившаяся в алмазном зерне, не распространяется на соседние зерна и транскристаллитного разрушения гранулы не

происходит. Выкрашивание отдельных блоков из нескольких зерен можно рассматривать как хрупкое разрушение гранул при ударном воздействии.

Снижение режущей способности алмазного круга с монокристаллами алмаза при обработке стали происходит при уменьшении числа монокристаллов на периферийной поверхности сегментов (рис. 2, а). Морфология поверхности матрицы композиционного материала, а именно присутствие на ее поверхности округлых и вытянутых в направлении обработки гребней с округлыми вершинами, указывает на высокую температуру в зоне фрикционного контакта. О высокой температуре в зоне фрикционного контакта при обработке стали кругами с монокристаллами и гранулами поликристаллического алмаза можно судить по цвету и форме частиц износа, удаляемых с поверхности стали [3]. Тепловыделение в зоне фрикционного контакта, обусловленное процессами трения, изменяет механизм износа композиционного материала.

Превалирующим механизмом износа алмазосодержащего композиционного материала становится адгезионный. Повышение температуры в зоне фрикционного контакта, адгезионный механизм износа, динамическая (ударная) составляющая контактного взаимодействия алмазосодержащего композиционного материала со сталью и приводят к увеличению скорости износа матрицы, снижению прочности закрепления монокристаллов и их выкрашиванию из матрицы. Подобный характер взаимодействия выражен в меньшей степени при обработке стали композиционным материалом с гранулами поликристаллического алмаза (рис. 2, б; 3). Присутствие в матрице композиционного материала продуктов износа в форме округлых частиц и агломератов из них, перенос обрабатываемого материала и поверхность гранулы указывают на высокую (1700–1800 К) температуру в зоне фрикционного контакта и на поверхности композиционного материала (рис. 3). Пленки из продуктов износа стали расположены преимущественно между алмазными зернами и на площадках износа гранул (рис. 3).

Борозды на площадках износа гранул являются характерным признаком протекания абразивного износа. Однако, округлая форма борозд, вершин гребней между ними указывает и на пластическую деформацию поверхностного слоя поликристалла несмотря на «зерненную» его структуру (рис. 3, в, 4, б). Формирование поверхности износа с подобной морфологией возможно при высокой температуре в зоне фрикционного контактного взаимодействия. Образование на площадках износа гранул рельефа, характерного для протекания абразивного износа, можно связать с абразивными действиями обломков, либо выкрашиванием из гранулы алмазных зерен.

Воздействие раствора кислот не приводит к полному удалению продуктов износа стали с поверхности гранул поликристаллов (рис. 4, а, б). На их месте возникает слой иного состава (рис. 4, а, б). Последующее воздействие расплава нитратов на гранулы поликристаллов также сопровождаются изменением морфологии поверхности площадок износа: часть зерен сохранила свои размеры и форму, и несмотря на износ выступают над остальными, меньшими по размерам, которые образуют прослойки между ними (рис. 4). Прослойки меньших по размеру зерен образовались на участках гранул над пленками продуктов износа стали (рис. 3, а, б; 4, а, б).

Формирование подобных структур на площадках износа гранул поликристаллов алмаза при воздействии раствора кислот и расплава нитратов, морфология поверхностей износа гранул указывает на то, что износ композиционного материала протекает следующим образом. Фрикционное воздействие алмазосодержащего композиционного материала со



сталью приводит к тепловыделению и повышению температуры в зоне контакта. При перемещении поверхности гранулы в вязком с высокой температурой приповерхностном слое частицы железа внедряются в впадины микрорельефа и поверхность алмазных зерен (рис. 3, а). Последующие контакты гранулы со сталью снова повышают температуру ее поверхности, сопровождаются перемещением железа в вязко-пластичном состоянии в впадинах микрорельефа и по поверхности частиц алмаза. Перемещение пленок железа в вязко-пластическом состоянии в условиях динамических воздействий сопровождается их взаимодействием с алмазом, разрушением алмазных зерен и выкрашиванием их из гранул. В условиях высоких (1675–1775К) температур в зоне фрикционного контакта твердость алмаза снижается и воздействие вязко-пластической массы из продуктов износа (железо, осколки алмазных зерен) приводит к износу гранул и образованию на их поверхности микрорельефов, характерных как для абразивного, так и адгезионного механизмов износа (рис. 3, в; 4, з) [4]. Меньшую скорость износа части алмазных зерен чем остальных можно связать с различной твердостью алмаза в зависимости от их ориентации в направлении обработки [2].

### **Заключение**

Различие в абразивной способности композиционных материалов с монокристаллами и гранулами поликристаллического алмаза нельзя в полной мере связывать с их структурой. Износ монокристаллов и гранул поликристаллического алмаза при обработке бетона протекает по механизму хрупкого разрушения. Износ монокристаллов происходит их разрушением магистральными трещинами, гранул поликристаллического алмаза – хрупким разрушением алмазных зерен и скалыванием отдельных алмазных зерен от гранул. В большей степени абразивная способность композиционных материалов определяется масштабным фактором – размером режущего элемента. Увеличение размеров режущего элемента алмазосодержащего композиционного материала (сегмента) изменяет характер взаимодействия обрабатываемого материала с матрицей, снижая скорость ее износа, и одновременно обеспечивает большую прочность его закрепления в матрице.

Характерным проявлением влияния масштабного фактора на режущую способность композиционного материала является обработка стали: несмотря на перенос частиц стали на поверхность композиционного материала гранулы поликристаллического алмаза обрабатывают сталь, в отличие от монокристаллов алмаза.

*Досліджено абразивну здатність композиційних матеріалів з монокристалами і гранулами полікристалічного алмаза. Визначено знос монокристалів і гранул полікристалічного алмаза при обробці бетону і сталі. Знос монокристалів супроводжується руйнуванням магистральними тріщинами гранул полікристалічного алмаза – крихким руйнуванням алмазних зерен і відколюванням окремих алмазних зерен від гранул. Більшою мірою абразивна здатність композиційних матеріалів визначається масштабним фактором – розміром ріжучого елемента. Збільшення розмірів ріжучого елемента алмазовмісного композиційного матеріалу змінює характер взаємодії оброблюваного матеріалу з матрицею, знижуючи швидкість її зносу, і одночасно забезпечує більшу міцність його закріплення в матриці.*

**Ключові слова:** алмазоабразивний інструмент, композиційні матеріали, знос, контактні взаємодії.

A. M. Kuzei, V. E. Babich, V. G. Kudrichkiy

**INFLUENCE OF MACROSTRUCTURE OF DIAMOND-CONTAINING COMPOSITE  
MATERIALS ON CUTTING CAPACITY OF THE TOOL**

*The abrasive ability of composite materials with monocrystals and granules of polycrystalline diamond is investigated. The wear of monocrystals and granules of polycrystalline diamond when processing concrete and steel is defined. The wear of monocrystals is followed by destruction the main cracks, granules of polycrystalline diamond – fragile destruction of diamond grains and a skalyvaniye of separate diamond grains from granules. More, the abrasive ability of composite materials is defined by a large-scale factor – the size of the cutting element. Increase in the sizes of the cutting element of diamond-bearing composite material changes the nature of interaction of the processed material with a matrix, reducing the speed of its wear, and at the same time provides the big durability of his fixing in a matrix.*

**Key words:** diamond abrasive tool, composite materials, wear, contact interactions.

**Литература**

1. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография. – Каменецкое: ДГТУ, 2016. – 529 с.
2. Епифанов В. И., Песина А. Я., Зыков Л. В. Технология обработки алмазов в бриллианты: Учебник для сред. проф. техн. училищ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1982 – 350 с.
3. Гуляев А. П. Металловедение. Учебник для вузов – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986 – 544 с.
4. Mokbel A. A., Maksoud, T. M. A. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique // J. Mater. Process. Technol. – 2000. – 101. – N 1–3. – P. 292–297.

Поступила 29.06.18

**References**

1. Lavrinenko, V. I. & Solod, V. Yu. (2016) *Instrumenty iz sverkhтвердых материалов v tekhnologiiakh abrazivnoi i fiziko-tekhnicheskoi obrabotki [Tools from superhard materials in the technologies of abrasive and physicotchnical processing]*. Kamenets: DGTU [in Russian].
2. Epifanov, V. I., Pesina, A. Ya., & Zykov, L. V. (1982) *Tekhnologiya obrabotki almazov v brillianty [Technology of diamond processing in diamonds]*. Moscow: [in Russian].
3. Gulyaev, A.P. Metal science. Textbook for high schools [Metallovedeniye. Uchebnik dlya vuzov] . Moscow: [in Russia].
4. Mokbel, A. A., & Maksoud, T. M. A. (2000). Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. *J. Mater. Process. Technol., Vol. 101, 1–3, 292–297.*