

19. Концепция развития самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как области научно-технического прогресса, / Ред. Мержанов А. Г. – Черноголовка: Территория, 2003. – 368 с.
20. Masaki Ozawa, Eiji Osawa. Carbon Blacks as the Source Materials for Carbon Nanotechnology // Carbon Nanotechnology / Dai, L. (Ed.), Chapt. 6. – Elsevier: Dordrecht, 2006. – P. 127–151.
21. A novel high surface area spherical carbon from cassava starch / Dingfeng Jin, Xiao Yang, Ming Zhang et al. // Materials Letters. – 2011. – N 119. – P. 262–264.
22. Елецкий, А. В., Искандарова, И. М., Книжник, А. А., Красиков, Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. – 2011. – 181. – № 3. – С. 233–268.
23. Ferrari A. C., Basko D. M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene // Nature nanotechnology. – 2013. – 8. – N 4. – P. 235–246.
24. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide / S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner et al. // Carbon. – 2007. – 45. – N7. – P. 1558–1565.
25. Руднев Б. И., Повалихина О. В. Наноструктуры частиц дизельной сажи // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2015. – 36. – С. 86–93.

Поступила 26.06.17

УДК 621.891.923

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

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Университет гражданской защиты, г. Минск, Беларусь

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

## **ИЗНОС КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА «АЛМАЗОАБРАЗИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ – БЕТОН»**

*Исследованы механизмы износа алмазоабразивного композиционного материала при резании бетона. Показано, что в условиях резания повышается температура (до 1200–1700 К) в зоне фрикционного контакта кристаллов алмаза с бетоном. Это приводит к внедрению продуктов износа в устья микротрещин на поверхности кристалла и образованию нарушенного поверхностного слоя, в котором зарождаются магистральные трещины, разрушающие кристалл. Таким образом, ведущему механизму износа кристаллов алмаза – хрупкому разрушению – сопутствуют механизмы усталостного разрушения и адгезионного изнашивания.*

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, износ, хрупкое разрушение, адгезионное изнашивание, алмаз, алмазоабразивный композиционный материал, бетон, резание.

Эксплуатационные характеристики алмазоабразивного инструмента в первом приближении зависят от соотношения скорости износа кристаллов алмаза и матрицы композиционного материала (связки). Преимущественный износ связки приводит к увеличению высоты вершин алмазных кристаллов над связкой, снижению прочности сцепления с связкой и выкрашиванию их из связки [1]. В области близких скоростей износа кристаллов алмаза и связки, когда композиционный материал изнашивается в режиме «самозатачивания», износ кристаллов алмаза определяет эксплуатационные характеристики инструмента. Основными

механизмами износа кристаллов алмаза при алмазообразивной обработке являются хрупкое разрушение и абразивный износ. Адгезионный и диффузионный механизмы износа преобладают при обработке вязких материалов [2, 3]. Однако износ кристаллов алмаза и ведущий механизм их износа зависят от изменения температурно-силовых режимов алмазообразивной обработки. Изменение этих условий в зоне фрикционного контакта способно изменять ведущий механизм износа и влиять на эксплуатационные характеристики инструмента и производительность алмазообразивной обработки.

В настоящей работе методами электронной сканирующей микроскопии изучены морфология и микроструктура поверхностей износа монокристаллов алмаза (АС 180) фракции 500/400 мкм после эксплуатации в алмазном инструменте 1A1 PSS 300x40x3. В качестве матрицы алмазосодержащего композиционного материала использовали сплав на основе системы Fe – Cu (10 мас. %) – Ni (20 мас. %). Концентрация кристаллов алмаза в композиционном материале составляла 50 %.

Микроструктуру кристаллов алмаза выявили их обработкой в расплаве из нитратов калия и натрия (40 мас. %) при температуре 775 К в течение 20, 40, 60 мин.

#### **Результаты экспериментов**

Результаты исследования морфологий износа сегментов алмазосодержащих композиционных материалов показали, что концентрация кристаллов алмаза на периферийной поверхности сегментов значительно меньше чем на боковых поверхностях сегментов (рис. 1 а, б). Морфология поверхностей кристаллов на периферийной и боковых поверхностях сегментов также различаются (рис. 1 в, г). На боковых поверхностях сегментов большая часть кристаллов алмаза сохранила исходную форму (рис. 1 б). На ребрах и гранях кристаллов образовались дефекты в виде сколов и трещин, однако исходная форма кристаллов не нарушена и кристаллы выступают над связкой.

На периферийных сегментах большая часть кристаллов разрушена и обломки кристаллов не выступают над связкой (рис. 1, г). На поверхности кристаллов, сохранивших исходную форму, образовались микротрещины, сколы и вырывы. Продукты износа обрабатываемого материала (бетона) присутствуют на поверхности кристаллов алмаза, расположенных как на боковых, так и периферийных поверхностях сегментов. На поверхности связки наблюдались борозды, ориентированные в направлении обработки, и углубления с частицами продуктов износа бетона (рис. 1, г, д).

Воздействие расплава нитратов калия-натрия на алмаз приводит к растворению слоя на его поверхности и образованию ямок и фигур травления, не наблюдавшихся на поверхности исходных кристаллов алмаза (рис. 2).

Фигуры травления представляют собой канавки, углубления различной формы, а также совокупность углублений и канавок (рис. 2).

При увеличении длительности воздействия расплава нитратов натрия-калия на поверхности кристаллов алмаза усиливается контрастность фигур травления и увеличиваются их размеры (рис. 3, 4). В структуре фигур травления выявляются частицы других фаз, некоторые из них морфологически связаны с поверхностью кристаллов алмаза (рис. 3, а, б, 4).

После часового воздействия расплава нитратов на поверхности кристаллов алмаза глубина и размер ямок травления, а также размеры фигур травления увеличиваются (рис. 4). На поверхностях ямок и фигур травления находятся частицы другой фазы (рис. 4). Эти частицы представляют собой агломераты из нескольких частиц с довольно сложным составом (см. таблицу).

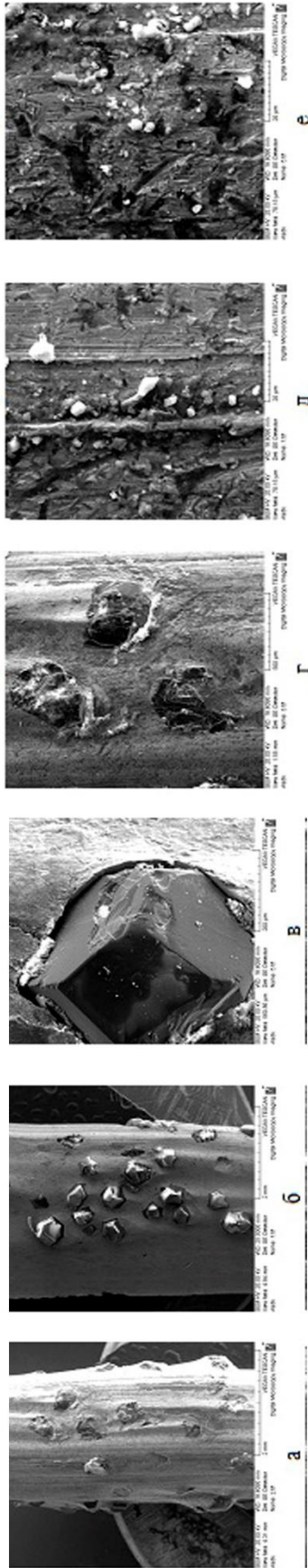


Рис. 1. Морфология поверхности износа композиционных материалов: а, в, д – боковая поверхность сегмента; б, г, е – периферийная поверхность сегмента

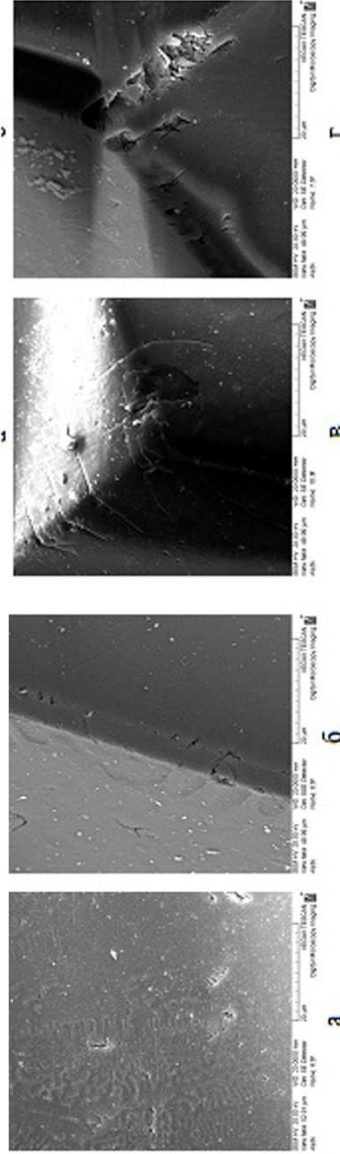


Рис. 2. Микроструктура кристаллов алмаза (травление при температуре 775К в течение 20 мин): а, б – боковая поверхность сегмента; в, г – периферийная поверхность сегмента

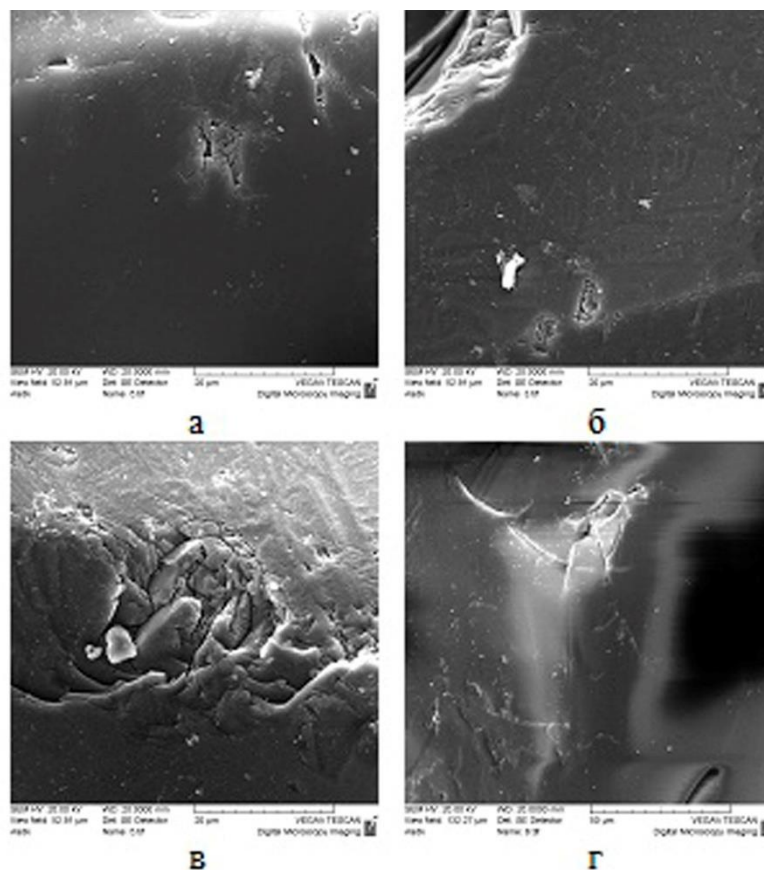


Рис. 3. Микроструктура кристаллов алмаза (травление при температуре 775 К в течение 40 мин): а, б – боковая поверхность сегмента; в, г – периферийная поверхность сегмента

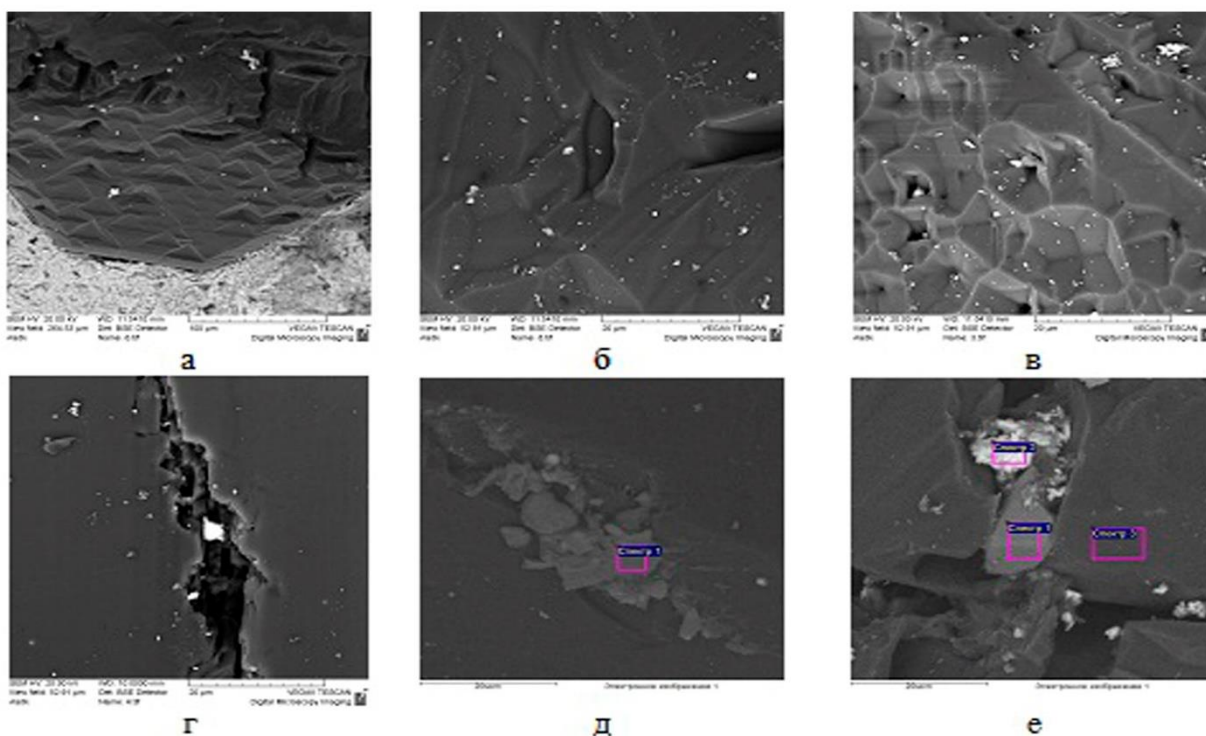


Рис. 4. Микроструктура кристаллов алмаза (травление при температуре 775 К в течение 60 мин): а, б – боковая поверхность сегмента; в, г, д, е – периферийная поверхность сегмента

**Элементный состав (масс. %) участков поверхности кристаллов. Спектры 1–3  
соответствуют рис. 4, е, спектр 4 – рис. 4, д**

Спектр	C	O	Al	K	Ca	Fe	Cu	Ni	Итог
1	70,83	23,77	5,17	0,00	0,03	0,04	–	0,17	100,00
2	50,91	20,45	–	–	–	0,99	27,64	–	100,00
3	100,00	–	–	–	–	–	–	–	100,00
4	54,01	30,38	14,77	–	–	0,53	0,18	0,13	100,00

**Обсуждение результатов**

Морфология боковых и периферийных поверхностей сегментов различная: на периферийных поверхностях большинство алмазных кристаллов разрушены; их меньше, чем на боковых поверхностях. На боковых поверхностях сегментов исходная форма большинства алмазных кристаллов несмотря на сколы сохраняется (рис. 1, а, б). Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза указывает на различия механизма износа композиционного материала на боковых и периферийных поверхностях сегментов, что связано с условиями фрикционного контакта периферийных и боковых поверхностей сегментов с бетоном. На периферийной поверхности сегментов композиционный материал контактирует с твердым бетоном, на боковых – с деструктурированным бетоном в виде псевдожидкой среды, находящейся под гидростатическим давлением [4].

Вследствие воздействия указанной среды на композиционный материал наблюдается преимущественный износ связки, обнажение и выкрашивание кристаллов алмаза из связки. В таких условиях основным механизмом износа связки должен быть абразивный износ. На поверхности связки (как на боковых, так и периферийных поверхностях сегментов) наблюдаются царапины, ориентированные в направлении обработки (рис. 1, д, е). Помимо царапин на поверхности связки находятся продукты износа округлой формы, участки с гладкой поверхностью, заполненные продуктами износа бетона участки вырывов (рис. 1, д, е). Наличие округлых частиц износа, участков связки с гладкой поверхностью указывает на высокую температуру поверхности связки. С повышением температуры в зоне фрикционного контакта связки со сгустком диспергированного бетона изменяется механизм ее износа: наряду с абразивным механизмом износ происходит также по механизму механического изнашивания [5].

При повышении температуры в зоне фрикционного контакта характерные признаки абразивного изнашивания маскируются. На периферийных поверхностях сегментов связка также имеет характерные признаки (округлые частицы, участки с гладкой поверхностью), указывающие на ее высокую температуру (1200–1700 К). Однако, условия фрикционного контакта с бетоном на периферийных поверхностях сегментов более жесткие (рис. 1, а, б). Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза указывает на динамический ударный характер их взаимодействия с бетоном.

Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза характерна для механизма хрупкого разрушения [2, 5]. Образование фигур травления на поверхности кристаллов алмаза, сохранивших исходную форму, изменение размеров и формы последних при увеличении длительности воздействия травителя (т. е. увеличении толщины слоя растворившегося алмаза) свидетельствует о том, что кристалл разрушается (хрупкое разрушение) вследствие образования и развития сети дефектов в его поверхностном слое. Множественные соударения поверхности кристалла алмаза с бетоном, особенно при переходе от участка цементного камня к граниту, приводят к периодическому возникновению в местах соударения напряжения сжатия–растяжения. По мере увеличения количества соударений в приповерхностном слое алмаза сначала возникают локальные области напряжения, а затем сеть микротрещин. Подобный

механизм разрушения кристалла алмаза наблюдается при внедрении в него алмазного индентора [6]. При воздействии травителя на поверхности алмаза образуются ямки травления и фигуры травления (рис. 2–4). Ямки травления возникают в местах выхода дислокаций на поверхность [7]. Форма ямок травления определяется кристаллографическим индексом плоскости кристалла алмаза. Наличие ямок в канавках травления и скоплений канавок травления свидетельствует о том, что образование таких канавок связано с преимущественным растворением дефектных участков поверхности алмаза.

Образование на поверхности кристаллов алмаза в результате воздействия травителя единичных и множественных канавок травления может обуславливаться преимущественным растворением устьев микротрещин, а также участков с повышенным уровнем напряжения (растяжения), предшествующих образованию микротрещин. Наличие в ямках и канавках травления частиц, отличающихся по составу и морфологии от алмаза, означает, что канавки травления образуются в результате преимущественного растворения устьев микротрещин – на это указывает состав частиц, которые представляют собой агломераты, состоящие из продуктов износа бетона и связки (см. таблицу). Содержание таких частиц в приповерхностном слое кристаллов алмаза может быть связано с их внедрением в устья микротрещин. После растворения слоя алмаза эти частицы оказываются на поверхности микротрещин (рис. 4).

Таким образом, образование при растворении поверхности алмаза канавок травления вызвано преимущественным растворением устьев микротрещин. Однако ветвистая форма канавок, их расположение вблизи микросколов на поверхности кристаллов алмаза дает основания считать, что канавки травления образовались также при растворении напряженных областей, на которых устья трещин еще не раскрыты (рис. 2, а, б; 3, а, б).

Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза, морфология и характер ее изменения при увеличении длительности травления показывают, что кристаллы алмаза изнашиваются в несколько стадий.

Множественные соударения кристаллов алмаза с компонентами бетона приводят к периодическому возникновению в приповерхностном слое областей напряжения, зарождению в них микротрещин, и затем образованию сети микротрещин. Морфологически эта стадия представлена отдельными канавками травления на границах и ребрах кристалла (рис. 2, а, б). Образование на поверхности кристаллов алмаза микротрещин, трещин, микросколов и микровыворотов можно рассматривать как износ, проходящий по механизму усталостного разрушения, хотя по морфологическим признакам он соответствует механизму хрупкого разрушения.

С накоплением в приповерхностном слое дефектов в форме отдельных микротрещин образуется нарушенный слой из объемной сети микротрещин. Плотность микротрещин в дефектном слое различна. Морфологически эта стадия представлена отдельными сколами на поверхности граней или ребрах кристаллов алмаза (рис. 2, в, 3, в). Износ кристаллов алмаза на этой стадии происходит по механизму хрупкого разрушения.

Нарушенный слой формируется при фрикционном контакте кристаллов с бетоном, продуктами износа бетона и связки с высокими температурами (1200–1700 К). Содержание продуктов износа, в том числе связки, в устьях микротрещин можно рассматривать как проявление одной из стадий адгезионного механизма износа, когда продукты износа внедряются в поверхность кристалла с высокой температурой (превышающей температуру плавления основных компонентов связки). Повышение температуры поверхности кристалла, образование нарушенного приповерхностного слоя, внедрение продуктов износа в поверхность кристалла и устья микротрещин приводят к развитию трещин и множественным сколам превращающих кристалл в обломок (рис. 1, а, в). Морфологически эта стадия представлена кристаллами с одним, или множественными сколами и обломками кристаллов (рис. 1, в). Основным механизмом износа кристалла на этой стадии является хрупкое разрушение.

Таким образом, ведущему механизму износа кристаллов алмаза – хрупкому разрушению – сопутствуют механизмы усталостного разрушения и адгезионного изнашивания.

### **Выводы**

Морфология поверхностей износа композиционных материалов на боковых и периферийных поверхностях сегментов свидетельствует о том, что эксплуатационные характеристики алмазоабразивного инструмента также определяются механизмом износа кристаллов алмаза на периферийной поверхности сегментов.

Показано, что износ кристаллов алмаза по механизму хрупкого разрушения приводит к тому, что кристаллы разрушаются до затупления вершин и граней. Ресурс кристалла алмаза как единичного режущего инструмента вследствие его разрушения снижается задолго до фактического изнашивания режущих кромок. Разрушение кристалла алмаза на несколько крупных обломков обусловлено механизмами фрикционного взаимодействия с бетоном. Образование нарушенного поверхностного слоя в условиях повышения температуры в зоне фрикционного контакта приводит к внедрению продуктов износа в устья микротрещин. В результате на поверхности кристалла формируется дефектный слой, в котором зарождаются магистральные трещины, разрушающие кристалл на крупные осколки (100–200 мкм). Такое проявление механизма хрупкого разрушения обусловлено действием предшествующих ему стадий – усталостному разрушению и адгезионному износу.

*Досліджено механізми зносу алмазоабразивного композиційного матеріалу при різанні бетону. Показано, що в умовах різання підвищується температура (до 1200–1700 К) в зоні фрикційного контакту кристалів алмазу з бетоном. Це призводить до впровадження продуктів зносу в гирла мікротріщин на поверхні кристала і утворення порушеного поверхневого шару, в якому зароджуються магистральні тріщини, що руйнують кристал. Таким чином, основний механізм зносу кристалів алмазу – крихке руйнування – супроводжується механізмами втомного руйнування і адгезійного зношування.*

***Ключові слова:** контактна взаємодія, знос, крихке руйнування, адгезійне зношування, алмаз, алмазоабразивний композиційний матеріал, бетон, різання.*

### **THE WEAR OF DIAMOND CRYSTALS UNDER CONDITIONS OF FRICTIONAL CONTACT «DIAMOND-ABRASIVE COMPOSITE – CONCRETE»**

*Mechanisms of wear of diamond-abrasive composite under the cutting of concrete are investigated. It is shown that in the cutting conditions, the temperature in the zone of frictional contact between diamond crystals and concrete rises up to 1200–1700 K. This leads to the introduction of wear products into the mouth of micro-cracks on the surface of the crystal and the formation of a disturbed surface layer in which the main cracks that destroy the crystal are nucleated. Thus, the leading mechanism for the wear of diamond crystals, namely brittle fracture, is accompanied by mechanisms of endurance failure and adhesive wear.*

***Key words:** Contact interaction, wear, brittle fracture, endurance failure, adhesion wear, diamond, diamond-abrasive composite, concrete, cutting.*

### **Литература**

1. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходаровский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Х.: Выща шк., 1978. – 232 с.
2. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. Трибология процесса шлифования и вопросы совершенствования алмазного инструмента // Синтетические алмазы. – 1974. – № 6. – С. 40–42.
3. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий и др.; под ред. Б. И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 292 с.

4. Сидорко А. А., Шестаков С. И. Компьютерное моделирование контактного взаимодействия твердосплавных инденторов с разрушающейся горной породой при высоких скоростях соударений // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – К.: – Изд-во ИСМ им. И. Н. Бакуля НАН Украины. – 2015. – С. 89-91.
5. Терентьев В. Ф., Кораблева С. А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 480 с.
6. Семенова Тянь-Шанская А. С. Исследование сопротивления алмаза износу при шлифовании // Новые направления развития алмазной обработки: тр. ВНИИАлмаз. – М.: 1981. – С. 117–122.
7. Пшеничнов Ю. П. Выявление тонкой структуры кристаллов – М.: Металлургия, 1974. – 528 с.

Поступила 26.06.17

УДК 671.152

С. А. Мазанаева, бакалавр<sup>1</sup>, А. В. Ножкина, д-р техн. наук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, РФ

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт природных, синтетических алмазов и инструмента», г. Москва, РФ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЮВЕЛИРНОЙ ВСТАВКИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ НРНТ

*В работе представлены результаты исследования процесса механической обработки синтетических кристаллов алмаза с целью изготовления ювелирных вставок. Проанализированы морфологические характеристики кристалла, на основании которых приведен теоретический расчет выхода годного продукта с использованием компьютерного моделирования. Экспериментально определены убыль массы и скорости процесса механической обработки алмаза на различных технологических операциях.*

**Ключевые слова:** алмаз, ювелирная вставка, огранка, морфология.

Целью работы является исследование изготовления ювелирных вставок из ограненных синтетических алмазов, так как изготовление практически не исследовано, хотя объемы производства синтетических алмазов, пригодных для изготовления ювелирных изделий, достигли масштабов промышленного производства. Задачи исследования:

- определить морфологические особенности синтетических алмазов, выращенных методом НРНТ;
- теоретически определить оптимальный выход годного проукта при изготовлении ювелирных вставок ограненных синтетических алмазов;
- экспериментально определить потери массы на каждой технологической операции и выход годного продукта.

Методика исследования морфологии кристаллов синтетических алмазов до механической обработки заключалась в определении формы, дефектности и цвета, в соответствии с требованиями качества, применяемыми к природным алмазам [2]. Результаты исследования качества синтетических алмазов, полученных методом НРНТ и предназначенных для изготовления ювелирной вставки представлены в табл. 1 и 2.