

А.М. Кузей, д.т.н., доц.
ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
В.Е. Бабич, к.т.н., доц.
Филиал ИППК УГЗ МЧС Беларуси

Исследование износа рабочих поверхностей алмазного инструмента при ликвидации чрезвычайных ситуаций в зонах разрушения строительных конструкций

Исследованы механизмы износа алмазного инструмента при ликвидации чрезвычайных ситуаций связанных с разрушением строительных конструкций резании бетонных конструкций. Установлено, что в условиях резания температура в зоне фрикционного контакта кристаллов алмаза с бетоном повышается до 1700К. 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: износ; хрупкое разрушение; адгезионное изнашивание; алмаз; алмазообразивный композиционный материал; бетон; резание.

Разрушение зданий и сооружений являются, как правило, следствием возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий, совершения террористических актов или воздействия современных средств поражения в ходе военных действий и т.д. (рис. 1). Ликвидация чрезвычайных ситуаций связанных с разрушением зданий и сооружений, представляет собой сложный процесс, включающий организационные и технические вопросы.



а



б

Рис. 1. Разрушение зданий результате взрыва газа (а) и землетрясения (б)

Довольно часто приходится выполнять спасательные работы в условиях хаотичного нагромождения строительных материалов и конструкций, обломков технологического оборудования, санитарно-технических устройств, мебели, домашней утвари, камней.

Спасение людей, оказавшихся под завалами, во многом зависит от оперативной работы спасателей-пожарных и от взаимодействия между органами управления сил, привлекаемых к работам в зоне чрезвычайной ситуации, различными поисково-спасательными формированиями и службами обеспечения. Большое значение имеют степень подготовленности поисково-спасательных формирований, наличие необходимых средств спасения, применяемые спасательные технологии.

Значительный объем работ по разборке строительных конструкций выполняется с использованием гидравлического, пневматического и инструмента с мотоприводом. При этом, наиболее используемым доступным является инструмент с мотоприводом, а именно бензорез [1]. Данный вид инструмента отличается удобством, мобильностью и эффективностью. В качестве рабочего органа в бензорезе выступает алмазно-отрезной (алмазообразивный) круг.

Эксплуатационные характеристики алмазообразивного инструмента в первом приближении зависит от соотношения скоростей 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 [2]. В области близких скоростей износа кристаллов алмаза и связки, когда износ композиционного материала происходит в

режиме «самозатачивания» износ кристаллов алмаза определяет эксплуатационные характеристики инструмента. Основными механизмами износа кристаллов алмаза при алмазобразивной обработке является хрупкое разрушение и абразивный износ. Адгезионный и диффузионный механизмы износа являются преобладающими при обработке вязких материалов [3, 4, 11]. Однако, износ кристаллов алмаза и ведущий механизм их износа зависит от изменения температурно-силовых режимов алмазобразивной обработки. Изменение этих условий в зоне фрикционного контакта способно изменять ведущий механизм износа и влиять на эксплуатационные характеристики инструмента и производительность процесса алмазобразивной обработки.

В работе методами электронной сканирующей микроскопии изучена морфология и микроструктура поверхностей износа монокристаллов алмаза (AC 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 150 отн. %.

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

Результаты экспериментов. Исследования морфологий износа сегментов алмазосодержащих композиционных материалов показали, что концентрация кристаллов алмаза на периферийной поверхности сегментов значительно меньше чем на боковых поверхностях сегментов. Морфология поверхностей кристаллов на периферийной и боковых поверхностях сегментов также различаются. На боковых поверхностях сегментов большая часть кристаллов алмаза сохранили исходную форму. 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. 2 а). На поверхности кристаллов, сохранивших исходную форму, образовались микротрещины, сколы и вырывы (рис. 2 а). Продукты износа обрабатываемого материала (бетона) присутствуют на поверхности кристалла алмаза расположенных как на боковых, так и на периферийных поверхностях сегментов. На поверхности связки присутствуют борозды, ориентированные в направлении обработки, и углубления, в которых находятся частицы продуктов износа бетона (рис. 2 а, б, в).

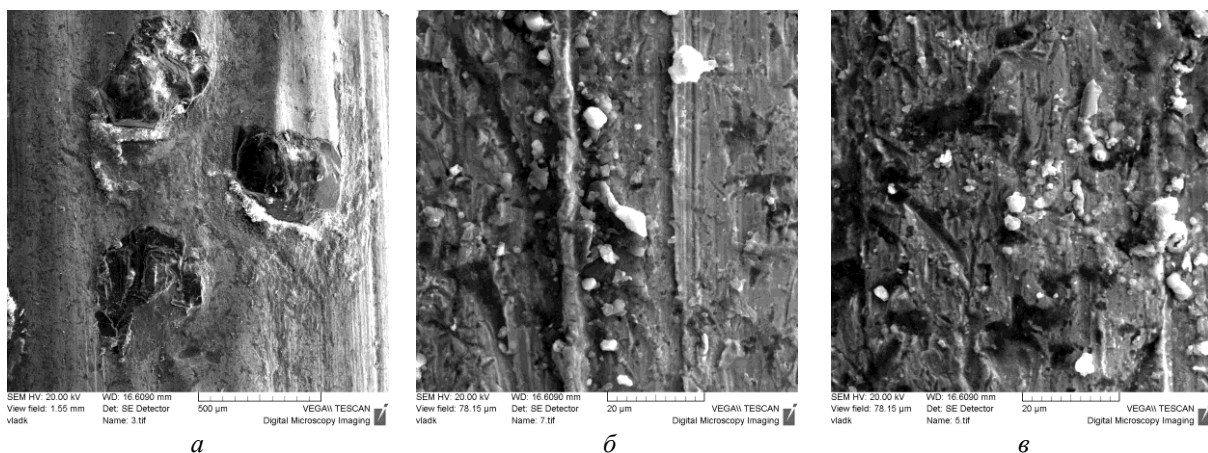


Рис. 2. Морфология поверхностей износа композиционных материалов

Воздействие расплава нитратов калия-натрия на алмаз приводит к растворению слоя на его поверхности и с образованием ямок и фигур травления, которые отсутствовали на поверхности исходных кристаллов алмаза.

Фигуры травления представляют собой канавки, углубления различной формы, совокупность углублений и канавок.

Увеличение длительности воздействия расплава нитратов натрия-калия на поверхности кристаллов алмаза, усиливает контрастность фигур травления и увеличивает их размеры (рис. 3). В структуре фигур травления выявляются частицы иных фаз, некоторые из этих частиц морфологически связаны с поверхностью кристаллов алмаза (рис. 2).

После 60 минутного воздействия расплава нитратов, на поверхности кристаллов алмаза, глубина и размер ямок травления увеличиваются, размеры фигур травления увеличиваются (рис. 3). На поверхностях ямок и фигур травления присутствуют частицы иной фазы (рис. 3). Эти частицы представляют собой агломераты из нескольких частиц и имеют достаточно сложный состав (табл. 1).

Обсуждение результатов. Морфология боковых и периферийных поверхностей сегментов отличается: на периферийных поверхностях большая часть алмазных кристаллов разрушена; их число меньше, чем на боковых поверхностях. На боковых поверхностях сегментов большая часть алмазных кристаллов, несмотря на сколы, сохраняют исходную форму (рис. 2 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. Композиционный материал на периферийной поверхности сегментов контактирует с твердым бетоном, а на боковых поверхностях с деструктурированным бетоном в виде псевдожидкой среды находящейся под гидростатическим давлением [5, 10].

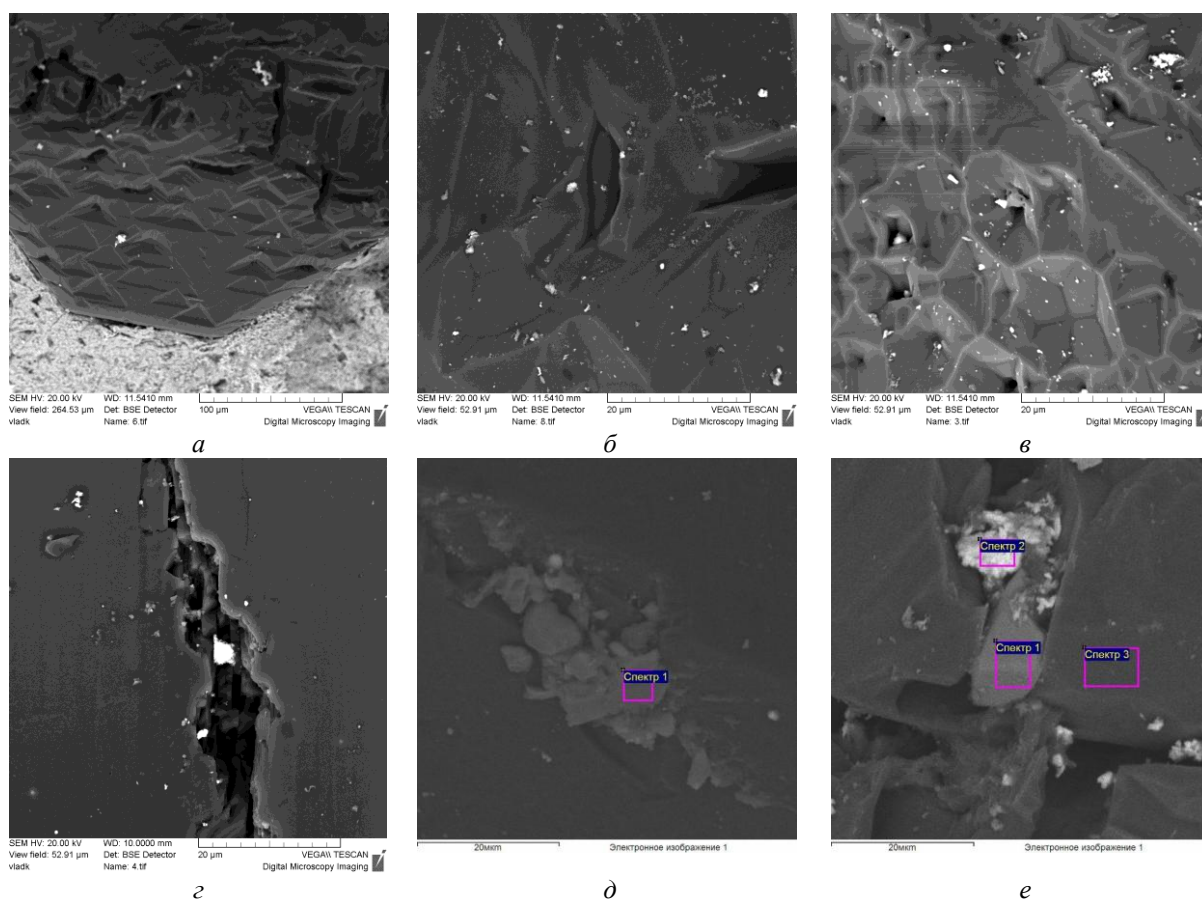


Рис. 3. Микроструктура кристаллов алмаза. Травление при 775 К в течение 60 мин
а, б – боковая поверхность сегмента;
в, г, д, е – периферийная поверхность сегмента

Таблица 1
Элементный состав (масс. %) участков поверхности кристаллов. Спектры № 1, 2, 3
соответствуют рис. 3 е, спектр 3 – рис. 3 д

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

Воздействие этой среды на композиционный материал приводит к преимущественному износу связки, обнажению и выкрашиванию кристаллов алмаза из связки. В этих условиях основным механизмом износа связки должен быть абразивный износ. На поверхности связки (как на боковых, так и на периферийных поверхностях сегментов) присутствуют царапины, ориентированные в направлении обработки (рис. 2 б, в). Помимо царапин, на поверхности связки находятся продукты износа округлой формы, участки с гладкой поверхностью, участки вырывов, заполненные продуктами износа бетона (рис. 2 б, в). Присутствие округлых частиц износа, участков связки с гладкой поверхностью указывает на

высокую температуру поверхности связки. Увеличение температуры в зоне фрикционного контакта связки со ступком диспергированного бетона изменяет механизм её износа: наряду с абразивным механизмом, износ происходит также по механизму механического изнашивания [6, 11].

Повышение температуры в зоне фрикционного контакта маскирует характерные признаки абразивного изнашивания. На периферийных поверхностях сегментов, связка также имеет характерные признаки (округлые частицы, участки с гладкой поверхностью) указывающие на ее высокую (до 1700 К) температуру. Однако, условия фрикционного контакта с бетоном на периферийных поверхностях сегментов более жесткие, морфология поверхностей износа кристаллов алмаза указывает на динамический, ударный характер их взаимодействия с бетоном.

Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза является характерной для механизма хрупкого разрушения [3, 6]. Образование фигур травления на поверхности кристаллов алмаза, сохранивших исходную форму, изменение размеров и формы последних при увеличении длительности воздействия травителя (т.е. при увеличении толщины слоя растворившегося алмаза) показывает, что разрушение (хрупкое) кристалла происходит вследствие образования и развития сети дефектов в поверхностном слое кристалла. Множественные соударения поверхности кристалла алмаза с бетоном, особенно при переходе от участка цементного камня к граниту, приводят к периодическому возникновению, в местах соударений напряжения сжатия-растяжения. По мере увеличения числа соударений, в приповерхностном слое алмаза, возникают локальные области напряжений, а затем сеть микротрещин. Подобный механизм разрушения кристалла алмаза имеет место при внедрении в него алмазного индентора [7]. Воздействие травителя на поверхность алмаза приводит к образованию ямок травления и фигур травления. Ямки травления возникают в местах выхода дислокаций на поверхность [8]. Форма ямок травления определяется кристаллографическим индексом плоскости кристалла алмаза. Присутствие ямок травления в канавках травления и среди скоплений канавок травления показывает, что образование таких канавок связано с преимущественным растворением дефектных участков поверхности алмаза.

Образования на поверхности кристаллов алмаза, в результате воздействия травителя, единичных и множественных канавок травления может быть связано с преимущественным растворением устьев микротрещин, а также участков с повышенным уровнем напряжений (растяжения), предшествующих образованию микротрещин. Присутствие в ямках травления и канавках травления частиц, отличающихся по составу и морфологии от алмаза, показывает, что образование канавок травления происходит в результате преимущественного растворения устьев микротрещин – на это указывает состав частиц, которые представляют собой агломераты, состоящие из продуктов износа бетона и связки (табл. 1). Присутствие 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. 3).

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 и при растворении напряженных областей, на которых устья трещин еще не раскрыты.

Морфология поверхностей износа кристаллов алмаза, морфология и характер ее изменения при увеличении длительности травления, показывает, что износ кристаллов алмаза происходит в несколько стадий.

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

Накопление в приповерхностном слое дефектов в форме отдельных микротрещин приводит к образованию нарушенного слоя из объемной сети микротрещин. Плотность микротрещин в дефектном слое различна. Морфологически эта стадия представлена отдельными сколами на поверхности граней или ребрах кристаллов алмаза. Износ кристаллов алмаза на этой стадии протекает по механизму хрупкого разрушения.

Формирование нарушенного слоя протекает в условиях фрикционного контакта кристаллов с бетоном, продуктами износа бетона и связки с высокими температурами до 1700К. Присутствие продуктов износа, в том числе и связки, в устьях микротрещин можно рассматривать как проявление одной из стадий адгезионного механизма износа, когда продукты износа внедряются в поверхность кристалла с высокой, (большей чем температура плавления основных компонентов связки) температурой. Повышение температуры поверхности кристалла, образование нарушенного

приповерхностного слоя, внедрение продуктов износа в поверхность кристалла и в устья микротрещин приводят к развитию трещин и множественным сколам превращающих кристалл в обломок. Морфологически эта стадия представлена кристаллами с одним, или множественными сколами и обломками кристаллов. 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.

Заключение. Морфологии поверхностей износа композиционных материалов на боковых и периферийных поверхностях сегментов показывают, что эксплуатационные характеристики алмазобразивного 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 температур 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 (100-200 мкм) осколки. Такое проявление механизма хрупкого разрушения обусловлено действием предшествующих ему стадий – усталостному разрушению и адгезионному износу.

Список использованной литературы:

1. *Теребнев В.В.* Пожарно-техническое вооружение. Устройство и применение / *В.В. Теребнев, Н.И. Ульянов, В.А. Грачев.* – М.: Центр Пропаганды, 2007. – 328 с.
2. *Семко М.Ф.* Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / *М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, М.Г. Ходаровский.* – Харьков: Вища школа, 1978. – 232 с.
3. *Лоладзе Т.Н.* Трибология процесса шлифования и вопросы совершенствования алмазного инструмента / *Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава* // Синтетические алмазы. – 1974. – № 6. – С. 40–42.
4. Поверхностная прочность материалов при трении / *Б.И. Костецкий* и др.; под ред. *Б.И. Костецкого.* – Киев: Техника, 1976. – 292 с.
5. *Сидорко А.А.* Компьютерное моделирование контактного взаимодействия твердосплавных инденторов с разрушающейся горной породой при высоких скоростях соударений / *А.А. Сидорко, С.И. Шестаков* // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – Киев: Изд. ИСМ, 2015. – С. 89–91.
6. *Терентьев В.Ф.* Усталость металлов / *В.Ф. Терентьев, С.А. Кораблева.* – М.: Наука, 2015. – 480 с.
7. *Семенова Тян-Шанская А.С.* Исследование сопротивления алмаза износу при шлифовании / *А.С. Семенова Тян-Шанская* // Новые направления развития алмазной обработки: труды ВНИИАлмаз. – М., 1981. – С. 117–122.
8. *Пиеничнов Ю.П.* Выявление тонкой структуры кристаллов / *Ю.П. Пиеничнов.* – М.: Metallurgija, 1974. – 528 с.
9. *Галицкий В.Н.* Алмазобразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали / *В.Н. Галицкий, А.В. Курищук, В.А. Муровский.* – К.: Наукова Думка, 1986. – 144 с.
10. *Грабченко А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / *А.И. Грабченко.* – Харків: Вища школа, 1975. – 184 с.
11. *Изнашивание монокристаллов алмаза* / *А.М. Бочаров, А.Ф. Климович, А.С. Старовойтов, В.В. Снежков.* – Мн.: Белорусская наука, 1996. – 144 с.

References:

1. Terebnev, V.V., Ul'janov, N.I. and Grachev, V.A. (2007), *Pozharno-tehnicheskoe vooruzhenie. Ustrojstvo i primenenie*, Centr Propagandy, Moskva, 328 p.
2. Semko, M.F., Grabchenko, A.I. and Hodarovskij, M.G. (1978), *Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdyh materialov*, Vishha shkola, Har'kov, 232 p.
3. Loladze, T.N. and Bokuchava, G.V. (1974), «Tribologija processa shlifovanija i voprosy sovershenstvovanijaalmaznogo instrumenta», *Sinteticheskie almazy*, No. 6, pp. 40–42.
4. Kosteckij, B.I. and others (1976), *Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii*, in Kosteckij, B.I. (ed.), *Tehnika*, Kiev, 292 p.
5. Sidorko, A.A. and Shestakov, S.I. (2015), «Komp'juternoe modelirovanie kontaktnogo vzaimodejstvija tverdosplavnih indentorov s razrushajushhejsja gornoj porodoj pri vysokih skorostjah soudarenij», *Porodorazrushajushhij i metalloobratyvajushhij instrument – tehnika i tehnologija ego izgotovlenija i primenenija*, Izd. ISM, Kiev, pp. 89–91.
6. Terent'ev, V.F. and Korableva, S.A. (2015), *Ustalost' metallov*, Nauka, Moskva, 480 p.
7. Semenova Tjan-Shanskaja, A.S. (1981), «Issledovanie soprotivlenija almaza iznosu pri shlifovanii», *Novye napravlenija razvitija almaznoj obrabotki: trudy VNIAlmaz*, Moskva, pp. 117–122.
8. Pshenichnov, Ju.P. (1974), *Vyjavlenie tonkoj struktury kristallov*, Metallurgija, Moskva, 528 p.

9. Galickij, V.N., Kurishhuk, A.V. and Murovskij, V.A. (1986), *Almazoabrazivnyj instrument na metallicheskih svjazkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali*, Naukova Dumka, Kiev, 144 p.
10. Grabchenko, A.I. (1975), *Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej almaznogo shlifovanija*, Vishha shkola, Harkiv, 184 p.
11. Bocharov, A.M., Klimovich, A.F., Starovojtov, A.S. and Snezhkov, V.V. (1996), *Iznashivanie monokristallov almaza*, Belorusskaja nauka, Minsk, 144 p.

Кузей Анатолий Михайлович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси.

Научные интересы:

- алмазно-абразивная обработка;
- процессы контактного взаимодействия;
- композиционные материалы.

E-mail: anatkuzei@mail.ru.

Бабич Виталий Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь.

Научные интересы:

- алмазно-абразивная обработка;
- магнитно-абразивная обработка;
- алмазно-отрезной инструмент.

E-mail: rimmatimurnazar@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 29.09.2017.