

**А.М. Кузей, д.т.н.**

**В.Я. Лебедев, к.т.н.**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

**С.П. Лобач, преподаватель**

**И.А. Шмулевцов, ст. преподаватель**

*Институт подготовки и повышения квалификации МЧС  
Республики Беларусь, Беларусь*

## **МЕХАНИЗМЫ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ АЛМАЗОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Методами электронной сканирующей микроскопии изучены морфологии поверхностей износа алмаза и хрустала при их алмазоабразивной обработке (шлифовании) композиционными материалами с металлической и полимерной матрицами. Показано, что, в зависимости от обрабатываемого материала (алмаз, хрусталь), вида матрицы в алмазоабразивном композиционном материале (металлическая, полимерная) и давления при шлифовании (5–15 МПа), механизм износа обрабатываемого материала претерпевает изменения. Подтверждено, что при обработке алмаза имеет место механизм износа хрупким разрушением. При обработке хрустала, в области давлений шлифования 5–15 МПа, одновременно протекают процессы износа с различными механизмами: механизмом хрупкого разрушения и адгезионным. Контактное взаимодействие металлической матрицы с поверхностью хрустала приводит к повышению температуры в зоне контакта, что вызывает в данном случае изменение агрегатного состояния обрабатываемого материала (хрустала) и его частичный перенос на поверхность матрицы композиционного материала и алмазных зерен.*

**Ключевые слова:** алмазоабразивный инструмент; композиционные материалы; износ; контактные взаимодействия; сканирующая электронная микроскопия

**Постановка проблемы.** Комплекс процессов, протекающих в зоне контакта обрабатываемого материала с материалом инструмента при абразивной (алмазоабразивной) обработке, определяет не только производительность процесса, характеристики обрабатываемой поверхности, но и требования к физико-механическим характеристикам, структуре абразивного материала. Как правило, при разработке алмазосодержащих композиционных материалов исходят из положения, что оптимум эксплуатационных показателей алмазосодержащего

композиционного материала реализуется в весьма узком, характерном для каждого обрабатываемого материала диапазоне режимов шлифования [1, 2]. Этот режим (режим «самозатачивания») достигается при таком соотношении скоростей износа матрицы композиционного материала и параметров процесса шлифования, которые обеспечивают стабильную производительность процесса [3, 4]. Стабильность процесса шлифования достигается в области скоростей износа матрицы, при которых на поверхности композиционного материала поддерживается постоянная концентрация режущих элементов (алмазных зерен), т. е. вместо изношенных зерен из матрицы выступают новые зерна [5]. Износ матрицы (связки) и композиционного материала в целом определяется условиями контактного взаимодействия алмазных зерен с обрабатываемым материалом. Увеличение производительности процесса шлифования (в режиме самозатачивания композиционного материала) может быть достигнуто повышением концентрации алмазных зерен в матрице, использованием алмазных зерен с более высокими физико-механическими показателями, изменением структуры композиционного материала и соответственным изменением параметров процесса шлифования [6, 7].

Повышение силовой составляющей процесса шлифования (скорости вращения инструмента, давления в зоне контакта) приводит к выходу из оптимального режима и снижению технико-экономических характеристик процесса [7]. Однако в некоторых случаях повышение силовых показателей позволяет увеличить производительность обработки и нивелировать различия в режимах обработки различных материалов. Следствием этого будет изменение условий контактного взаимодействия в зоне контакта инструмент–обрабатываемый материал и механизмов их износа. В этом случае механизм контактного взаимодействия будет определять производительность обработки.

**Материалы и методика экспериментов.** Объектами исследований являлись композиционные материалы, используемые при обработке алмаза и хрустала. Обработку алмаза проводили на станке ШП-3 при скорости вращения кристалла 3000 об./мин. и скорости вращения алмазного круга (1А1 200×10×5×76, АС 80/63, 150 %) 200 об./мин. Давление шлифования составляло 15 и 5 МПа. Обработку хрустала проводили на станке ШП-3 при скорости вращения алмазного круга (1ЕЕ1 200×8×10, АС 80/63, 150 %) 3000 об./мин. Давление шлифования составляло 15 и 5 МПа.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Шлифование кристаллов алмаза приводит к образованию на их поверхности характерных микрорельефов (рис. 1).

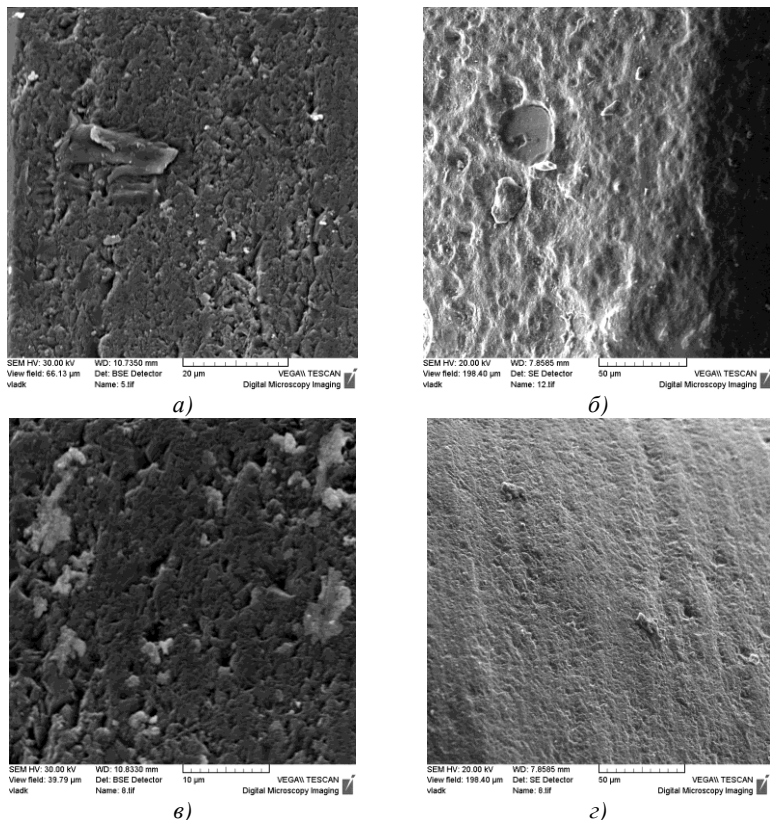


Рис. 1. Морфология поверхности кристаллов алмаза. Обработка композиционным материалом: а, б – с металлической матрицей; в, г – с полимерной матрицей.

Давление шлифования, МПа: а, в – 15; б, г – 5

Морфология поверхности кристаллов алмаза определяется силовыми параметрами обработки и составом используемого алмазосодержащего материала.

При высоких (15 МПа) давлениях шлифования на поверхности алмаза формируются грубые микрорельефы, образованные углублениями различной формы и размеров (рис. 1). На поверхности кристаллов алмаза, обработанных композиционным материалом с металлической матрицей, присутствуют частицы с иной морфологией, чем морфология поверхности алмаза (рис. 1, а). на поверхности кристалла алмаза, обработанного при низком (5 МПа) давлении, частицы с подобной морфологией отсутствуют (рис. 1, г). Однако на

поверхности кристаллов алмаза, обработанных при давлениях 15 и 5 Мпа, присутствуют частицы, морфологически связанные с поверхностью алмаза (рис. 1, а, з). Подобные частицы присутствуют и на поверхности кристаллов алмаза, обработанных композиционным материалом с полимерной матрицей (рис. 1, б, в). В отличие от кристаллов алмаза, обработанных композиционным материалом с металлической матрицей, в последнем случае частицы на поверхности кристаллов алмаза расположены, в основном, в углублениях микрорельефа (рис. 1, б, в).

Анализ состава частиц, присутствующих на поверхности кристаллов алмаза, обработанных композиционным материалом с металлической матрицей, показал, что в их составе присутствуют медь, никель, т. е. элементы, являющиеся компонентами матрицы (табл. 1, 2).

Таблица 1

*Состав частиц на поверхности кристаллов алмаза.  
Давление шлифования 15 МПа*

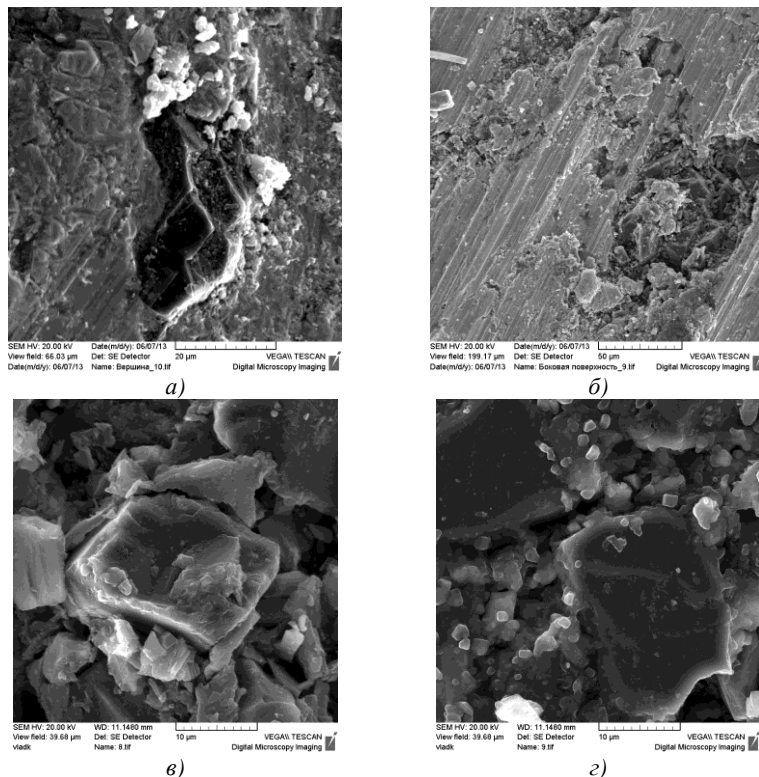
Элемент	C	O	Si	Cl	Ni	Cu	Итог
C1, масс. %	56,29	30,27			9,88	3,56	100,00
C2, масс. %	64,57	9,69				25,74	100,00
C3, масс. %		26,55	4,12	14,09	14,21	41,04	100,00
Макс.	64,57	30,27	4,12	14,09	14,21	41,04	
Мин.	56,29	9,69	4,12	14,09	9,88	3,56	

Таблица 2

*Состав частиц на поверхности кристаллов алмаза.  
Давление шлифования 5 МПа*

Элемент	C	O	Si	Ni	Cu	Итого
C, масс. %	56,79	25,36	0,01	8,16	9,67	100,00

Контактное взаимодействие кристаллов алмаза с композиционными материалами приводит к образованию на их поверхности характерных микрорельефов (рис. 2). Эти рельефы отражают закономерности взаимодействия двух поверхностей в динамических условиях.



*Рис. 2. Морфология поверхностей композиционных материалов с металлической (а, б) и полимерной (в, г) матрицей, образующихся при обработке кристаллов алмаза.*

*Давление при шлифовании, МПа: а, в – 15; б, г – 5*

Морфология поверхности композиционных материалов с металлической матрицей после шлифования кристаллов алмаза с давлением 15 МПа сглажена. Алмазные зерна разрушены, на них присутствует материал матрицы в форме пленок и округлых частиц. Такие частицы присутствуют и в углублениях микрорельефа матрицы (рис. 2, а).

Шлифование кристалла алмаза при пониженном давлении (5 МПа) приводит к формированию микрорельефа, представляющего собой совокупность борозд и царапин, ориентированных в направлении шлифования. На поверхности матрицы и в углублениях, оставшихся от разрушенных алмазных зерен, присутствуют округлые частицы, некоторые из них морфологически связаны с матрицей. Часть

округлых частиц расположена в бороздах на поверхности матрицы и на поверхности разрушения алмазных зерен (рис. 2, б).

В отличие от кристаллов алмаза, шлифование хрусталя приводит к образованию на поверхности развитых микрорельефов (рис. 3). Микрорельефы, образующиеся на поверхности хрусталя при обработке при давлении 5 МПа композиционным материалом с металлической матрицей, представляют собой совокупность острых граней, выступов, впадины между которыми заполнены продуктами износа. Продукты износа состоят из округлых частиц и частиц осколочной формы (рис. 3, б). Увеличение давления шлифования (до 15 МПа) приводит к сглаживанию острых кромок на гранях и выступах микрорельефа (рис. 3, а).

Шлифование хрусталя композиционным материалом с полимерной матрицей приводит к образованию на его поверхности сглаженных волнистых микрорельефов (рис. 3, в, г).

Обработка хрусталя приводит к формированию на поверхности композиционных материалов микрорельефов различной морфологии (рис. 4). Шлифование хрусталя композиционным материалом с металлической матрицей при повышенном (15 МПа) давлении шлифования приводит к разрушению и выкрашиванию из матрицы алмазных зерен. В оставшихся впадинах присутствуют продукты износа в виде частиц различной морфологии, в том числе округлой формы (рис. 4, а). Отдельные округлые частицы морфологически связаны с матрицей. На поверхности алмазных зерен присутствуют продукты износа в форме островковых пленок и округлых частиц, морфологически связанных с поверхностью алмаза (рис. 4, а).

Микрорельефы, присутствующие на поверхности композиционного материала с металлической матрицей после шлифования хрусталя при давлении шлифования 5 МПа, подобны микрорельефам, образующимся при более высоком (15 МПа) давлении шлифования. В углублениях матрицы, оставшихся после разрушения алмазных зерен, находятся продукты износа в виде частиц осколочной, округлой форм; поверхность матрицы сглажена, на ней находятся округлые выступы, морфологически связанные с матрицей (рис. 4, б).

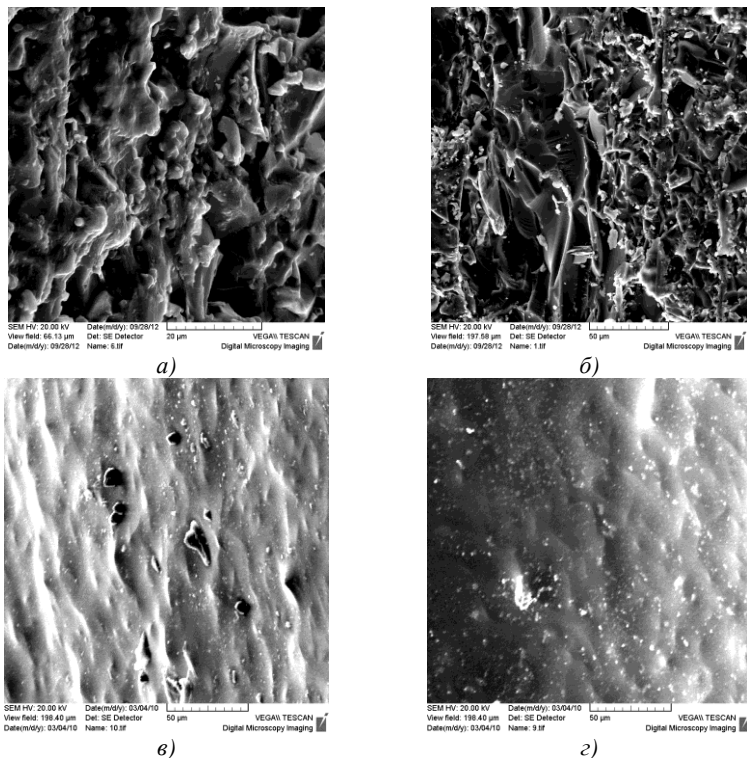


Рис. 3. Морфология поверхностей хрусталя. Обработка композиционным материалом с металлической (а, б) и полимерной (в, г) матрицей. Давление при шлифовании, МПа: а, в – 15; б, г – 5

После обработки хрусталя композиционным материалом с полимерной матрицей на его поверхности формируется микрорельеф, особенностью которого является выступание алмазных зерен и частиц карбида кремния из связующего (рис. 4, в, г). Продукты износа в виде округлых, пластинчатых и бесформенных частиц находятся в углублениях микрорельефа. Алмазные зерна и частицы карбида кремния изношены в незначительной степени, на их поверхности отсутствуют площадки износа.

Механизмы изнашивания материалов при алмазоабразивной обработке определяются физико-химическими, физико-механическими характеристиками контактирующих материалов, а также динамическими, силовыми параметрами взаимодействия в зоне контакта. При алмазоабразивной обработке, как правило, реализуются следующие механизмы износа: абразивный, диффузионный, хрупкое

разрушение [8]. В реальных процессах алмазообразивной обработки износ осуществляется по нескольким механизмам. Характер морфологии поверхности кристаллов алмаза после алмазообразивной обработки указывает, что износ алмаза протекает по механизму хрупкого разрушения. Об этом свидетельствуют характерные микрорельефы, образованные острыми вершинами и ребрами (рис. 1, а, б). Однако присутствие на поверхности кристаллов алмаза цепочек из углублений дает основания считать, что износ поверхности алмаза происходит и по механизму абразивного износа [9].

Присутствие на поверхности кристалла алмаза обломков алмазных зерен, внедренных в нее, показывает, что при больших (15 МПа) давлениях шлифования алмазные зерна внедряются в кристалл (рис. 1, а). Внедрение вершин алмазных зерен в кристалл алмаза приводит к образованию приповерхностного дефектного (трещиноватого) слоя [10]. Последующие удары вершин алмазных зерен снижают прочность приповерхностного слоя алмаза. Помимо обломков алмазных зерен на поверхности кристаллов алмаза присутствуют частицы материала матрицы (табл. 1, 2). Материал матрицы в форме пленок присутствует и на поверхности алмазных зерен композиционного материала (рис. 2, а, б). Образование пленок из материала матрицы на поверхности алмазных зерен в композиционном материале, сглаженных микрорельефов на поверхности матрицы, присутствие на поверхности композиционного материала округлых частиц указывает на контактное взаимодействие матрицы с обрабатываемым кристаллом. Это взаимодействие приводит к повышению температуры в зоне контакта. В свою очередь, рост температуры в зоне контакта обуславливает изменение механизма взаимодействия двух материалов. В наибольшей степени повышение температуры в зоне контакта влияет на композиционный материал: матричный материал переносится на алмазные зерна и поверхность кристалла алмаза.



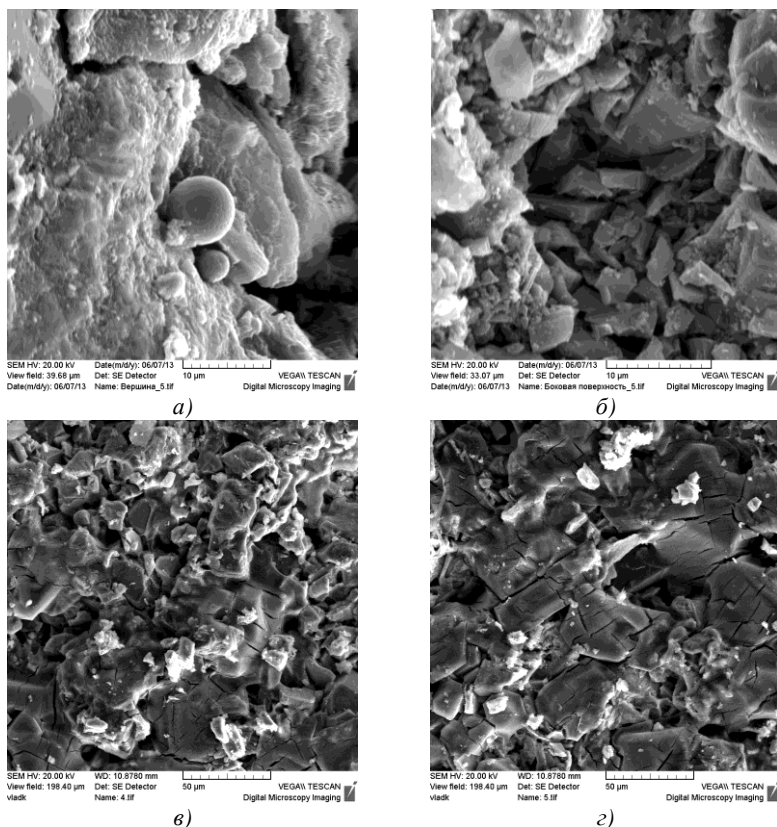


Рис. 4. Морфология поверхностей композиционных материалов с металлической (а, б) и полимерной (в, г) матрицей после обработки хрусталя. Давление шлифования, МПа: а, в – 15; б, г – 5

Перенос материала матрицы на алмазные зерна и поверхность кристалла алмаза приводит к изменению условий взаимодействия в зоне контакта. Можно показать, что проявлением этого изменения является различная морфология поверхности износа алмазных зерен в композиционных материалах с металлической и полимерной матрицами (рис. 1, 2). В композиционных материалах с полимерной матрицей после обработки кристалла алмаза на алмазных зернах образуются плоские площадки износа (рис. 1). Полимерная матрица, в отличие от металлической, менее прочная, и перенос матричного материала на поверхность кристалла не сопровождается тепловым эффектом. Влияние давления обработки проявляется частично, как образование отдельных сколов на плоских площадках износа (рис. 2, в,

з). Перенос материала матрицы на алмазные зерна и поверхность кристалла алмаза приводит также к увеличению удельных нагрузок на алмазные зерна и их разрушению.

Морфология поверхностей износа хрустала и композиционного материала с металлической матрицей также свидетельствует о повышении температуры в зоне контакта хрустала с композиционным материалом (рис. 3, 4). Однако, в отличие от кристаллов алмаза, контактные взаимодействия хрустала с поверхностью композиционного материала приводят к изменению агрегатного состояния хрустала: в поверхностном слое хрустала стекло переходит в пластичное, вязко-пластичное состояние. Оценка температуры на поверхности хрустала в зоне контакта дает величину 1075–1275 К. Вследствие этого изменяется морфология поверхностей износа: вместо острых кромок и плоских граней в зоне контакта образуются округлые сплоченные кромки и выступы (рис. 3, а).

Подобная морфология поверхности хрустала (и композиционного материала) указывает на адгезионный механизм износа [8, 10]. Хотя этот механизм износа по морфологическим признакам поверхности хрустала (и композиционного материала) можно отнести к адгезионному, и данный механизм имеет место, при данном режиме обработки реализуется более сложный механизм износа. Адгезионный механизм износа реализуется на начальной стадии взаимодействия, когда увеличение температуры в зоне контакта приводит к взаимной адгезии двух контактирующих материалов. Далее при изменении агрегатного состояния хрустала имеет место перенос псевдожидкого слоя с поверхности хрустала. Этот механизм контактного взаимодействия имеет место и при меньших давлениях шлифования (5 МПа), когда основным механизмом износа является хрупкое разрушение (рис. 3, б).

Таким образом, анализ морфологий поверхностей износа алмаза, хрустала, композиционных материалов показывает, что механизм износа определяется характером взаимодействия двух материалов и их физико-механическими характеристиками.

**Вывод.** Характер изменения морфологии поверхностей износа алмаза, хрустала, композиционных материалов с металлической и полимерной матрицами показывает, что контактное взаимодействие двух материалов определяет механизм их износа. Контактное взаимодействие композиционных материалов с алмазом и хрусталем приводит к повышению температуры на их поверхности. Следствием этого является перенос матричных материалов на поверхность алмаза, хрустала, изменение механизмов износа.

Характерный для обработки хрупких материалов механизм хрупкого разрушения в различной степени, в зависимости от режимов обработки, заменяется адгезионным механизмом износа. Одной из его стадий является изменение агрегатного состояния обрабатываемого материала и удаление его в форме капель.

### Список использованной литературы:

1. *Захаренко И.П.* Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / *И.П. Захаренко.* – К. : Наукова думка, 1991. – 300 с.
2. Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента / Под ред. *Т.В. Веденева.* – Пенза : ППИ, 1991. – 78 с.
3. *Чеповецкий И.Х.* Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / *И.Х. Чеповецкий.* – К. : Наукова думка, 1988. – 225 с.
4. *Пащенко А.А.* Инструмент из сверхтвердых материалов на керамических связках / *А.А. Пащенко.* – К. : Наукова думка, 1980. – 143 с.
5. *Мишинаевский Л.А.* Износ алмазных кругов / *Л.А. Мишинаевский.* – К. : Наукова думка, 1982. – 192 с.
6. *Лавриненко В.И.* Электрошлифование инструментальных материалов / *В.И. Лавриненко.* – К. : Наукова думка, 1993. – 155 с.
7. *Гавриш А.П.* Высокие технологии при шлифовании магнитомягких сплавов / *А.П. Гавриш, Л.А. Солдатенко* // Резание и инструмент. – ХГТУ, 1997. – № 57. – С. 24–28.
8. *Федоров А.И.* Физические процессы при обработке алмаза / *А.И. Федоров, А.И. Малышев, В.Н. Козлов.* –Тбилиси, 1971. – С. 76–89.
9. *Лоладзе Т.Н.* Износ алмаза и алмазных кругов / *Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучаева.* – М., 1967. – 232 с.
10. Семёнова-Тян-Шанская А.С. Исследование сопротивления износу при шлифовании / *А.С. Семенова-Тян-Шанская* // Новое направление развития алмазной обработки : тр. ВНИИАлмаз. – М., 1981. – 102 с.

КУЗЕЙ Анатолий Михайлович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь.

Научные интересы:

– алмазоабразивный инструмент;

– композиционные материалы с металлическими, полимерными матрицами.

Тел.: +375–17–2637190.

Email: anatkuzei@mail.ru.

ЛЕБЕДЕВ Владимир Яковлевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь.

Научные интересы:

– алмазоабразивный инструмент;

– композиционные материалы с металлическими, полимерными матрицами.

Тел.: +375–17–2637190.

Email: fti\_lebedev@mail.ru.

ЛОБАЧ Сергей Петрович – преподаватель, Институт подготовки и повышения квалификации МЧС Республики Беларусь, Беларусь.

Научные интересы:

– алмазоабразивная обработка материалов.

ШМУЛЕВЦОВ Игорь Александрович – старший преподаватель, Институт подготовки и повышения квалификации МЧС Республики Беларусь, Беларусь.

Научные интересы:

– алмазоабразивная обработка материалов.

Статья поступила в редакцию 12.06.2015