

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

Влияние микроструктуры алмазосодержащего композиционного материала на режущую способность инструмента при шлифовании монокристалла алмаза

Методами электронной сканирующей микроструктуры, рентгеновского анализа изучено влияние структуры алмазосодержащих композиционных материалов на режущую способность инструмента при круглом шлифовании монокристаллов алмаза. Показано, что использование в качестве прекурсора связующего оксид-гидроксидные стекла с температурой начала растекания 570-590 К приводит к формированию пленок расплава на поверхности частиц карбида кремния и алмаза при 600-630 К и содержании стекла в шихте 10 об. %. Преобразование пленок оксид-гидроксидные стекла в оксидное протекает при 700-775 К в процессе спекания композиционного материала.

В зависимости от объемного содержания стекла в шихте, пористости компакта выделено три типа структуры композиционных материалов: объемный каркас из плакированных стеклом частиц алмаза и карбида кремния с порами в местах множественных соединений; каркас из плакированных стеклом частиц алмаза и карбида кремния с порами из стекла в местах множественных соединений; матрица из стекла и расположенными в ней частицами алмаза, карбида кремния и порами. Максимальную режущую способность инструмента при круглом шлифовании алмаза обеспечивает композиционный материал со структурой первого типа.

Ключевые слова: алмазобразивный инструмент; композиционные материалы; износ; контактные взаимодействия; сканирующая электронная микроскопия.

Эксплуатационные показатели алмазобразивного инструмента определяются множеством факторов: конструкции инструмента, режима обработки, физико-механических характеристик алмазосодержащего композиционного материала [1, 2]. Установлены четкие зависимости между физико-механическими характеристиками алмазосодержащих композиционных материалов и режущей способностью инструмента на их основе [2-4]. В меньшей степени изучено влияние структуры алмазосодержащего композиционного материала на режущую способность инструмента.

Физико-механические характеристики алмазосодержащих композиционных материалов с металлическими, полимерными, стеклянными связующими возможно варьировать в достаточно широких диапазонах путем введения различных по составу и размерам наполнителей. Структуру алмазосодержащих композиционных материалов варьировать путем создания различных архитектур из алмазных зерен и частиц наполнителей. В работе методами электронной микроскопии, рентгеновского анализа изучено влияние структуры алмазосодержащих композиционных материалов на режущую способность инструмента со стеклянным связующим.

Объектами исследования являлись алмазосодержащие композиционные материалы системы карбид кремния – алмаз - стекло. В качестве связующего использовали прекурсор стекла $0,1\text{Na}_2\text{O}\cdot 0,2\text{K}_2\text{O}\cdot 0,25\text{ZnO}\cdot 0,35\text{P}_2\text{O}_5\cdot 0,1\text{NaBF}_4\cdot 0,1\text{H}_2\text{O}$.

Алмазосодержащие композиционные материалы получали в виде дисков диаметром 30 мм и высотой 5 мм и алмазобразивного инструмента формы 1A1 200*10*5*76. Концентрация алмазного порошка фракции 40/28 мкм в композиционном материале составляла 35 об. %. Режущую способность алмазобразивных композиционных материалов определяли при круглом шлифовании заготовок из синтетического алмаза массой 0,5-0,6 карат. Скорость вращения алмазной заготовки при шлифовании составляла 2000 об/мин, алмазобразивного круга – 200 об./мин. Давление при шлифовании – 3 МПа. Алмазосодержащие композиционные материалы получали спеканием брикетов из порошков прекурсора стекла фракции -50мкм, карбида кремния фракции 20/14 мкм и алмазного порошка фракции 40/28 мкм. Брикеты получали холодным прессованием шихты по схеме «до упора». Пористость брикетов составляла 10, 20, 30 об. %.

Результаты экспериментов. Структура композиционных материалов систем карбид кремния – алмазные зерна – связующее (оксидное стекло) определяется концентрацией связующего и концентрацией пор. В отличие от процессов изготовления алмазосодержащих композиционных материалов в которых в качестве связующего используются порошки легкоплавких стекол, при использовании оксид-гидратных стекол связующее – (оксидное стекло) – образуется в процессе спекания компакта. Синтез оксидных стекол из прекурсора (оксид-гидроксидного стекла) протекает в достаточно широком температурном интервале – с 630 до 775 К. При 430-660 К оксид-гидроксидное стекло

находится в жидком состоянии, при 675 К в виде суспензии. Гомогенизация суспензии и образование расплава протекает при 700-775 К (рисунок 1). Подобный механизм синтеза оксидного стекла позволяет формировать связующее в форме пленок на поверхности частиц сверхтвердых материалов и наполнителей, а также обеспечивает заполнение связующим пор в местах множественных стыков частиц.

Микроструктура композиционных материалов с 10 и 20 об. % пор и 40, 30 об. % связующего (стекла) представляет собой матрицу стекла в которой расположены частицы карбида кремния и алмаз. Поры расположены преимущественно в местах множественных стыков частиц. Увеличение объема пор в композиционном материале до 20 об. % не изменяет микроструктуры композиционного материала, содержащего 40 об. % связующего (рисунок 2, б). Снижение объемного содержания связующего до 30 об. % при объемном содержании пор 20 об. % приводит к изменению микроструктуры композиционного материала. Частицы алмаза и карбида кремния объединены в объемный каркас прослойками стекла, расположенными преимущественно на поверхности частиц алмаза и карбида кремния. Снижение объемного содержания связующего в композиционном материале до 20 об. % приводит к снижению толщины и площади пленок связующего на поверхности частиц алмаза и карбида кремния (рис. 3).

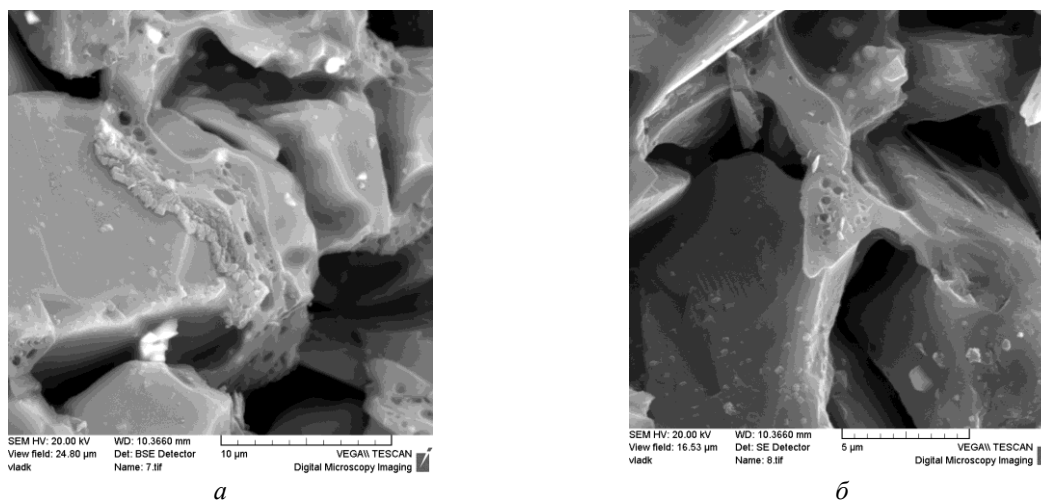


Рис. 1. Морфология поверхности разрушения композиционного материала карбид кремния – алмаз – оксидное стекло. Концентрация стекла – 10 об. %. Пористость композиционного материала 30 об.%. Температура спекания 675 К, длительность спекания 1 ч
а – нагрев прекурсора стекла 1 ч; б – нагрев прекурсора стекла 2 ч

Микроструктура композиционных материалов карбид кремния – алмаз – стекло определяется содержанием в композиционных материалах связующего, наполнителя и пор (рисунки 2, 3).

Структура композиционных материалов карбид кремния – алмаз – стекло, содержащих 20 об. % связующего и 10 об. % пор, представляет собой компакт из частиц карбида кремния, алмаза, плакированных стеклом (рисунок 3, а). Увеличение объемной доли пор в композиционном материале приводит к нарушению сплошности пленок стекла на поверхности частиц алмаза и карбида кремния (рисунок 3, б, в). При содержании пор в композиционном материале 20 и 30 об. % его структуру можно представить как каркас из связанных между собой пленками стекла частиц алмаза и карбида кремния (рисунок 3, б, в).

Твердость композиционных материалов, в основном, определяется концентрацией стекла и слабо зависит от содержания пор при концентрации стекла 40, 30 об. %. Твердость композиционных материалов с 40 об. % стекла составляет 107 HRB при содержании пор 10 об. % и 103 HRB при содержании пор 20 об. %. При концентрации связующего в композиционном материале 30 об. % его твердость при 10 об. % пористости составляет 96 HRB и 93 HRB, соответственно, при пористости 20 об. %.

В композиционных материалах, содержащих 20 об. % связующего, твердость зависит от объемного содержания пор. При содержании пор 10, 20, 30 об. % твердость композиционных материалов составляет 88, 75 и 67 HRB, соответственно. Подобный характер изменения твердости композиционных материалов, а также их микроструктура показывают, что при концентрации связующего 40, 30 об. % частицы алмаза и карбида кремния формируют объемный каркас в котором свободный объем в местах множественных стыков частиц заполнен стеклом. Причиной близких значений твердости композиционных материалов, несмотря на различия их составов и пористости, является тот факт, что связующее расположено в форме пленок на поверхности частиц алмаза и карбида кремния. В результате формирования такой структуры значительная часть стекла находится в местах стыков частиц и в свободных пространствах множественных стыков (порах), а не в форме дисперсных частиц.

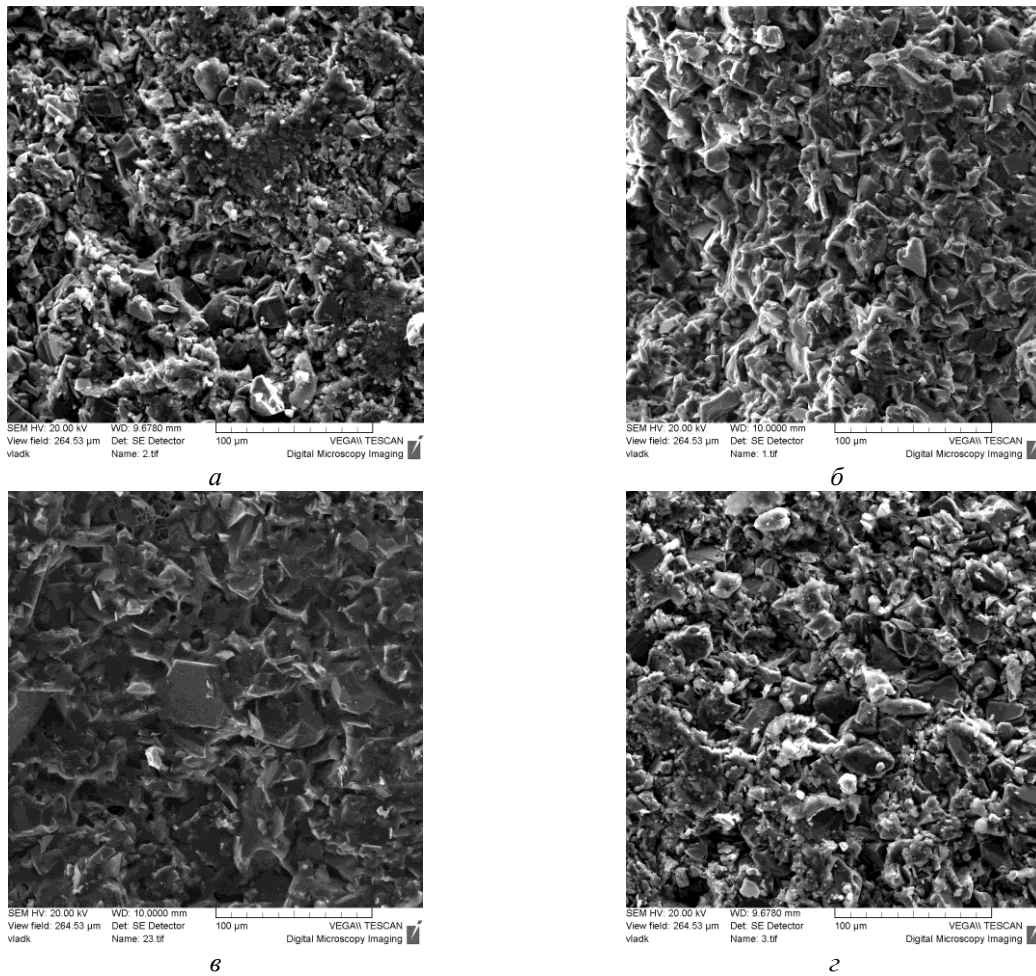
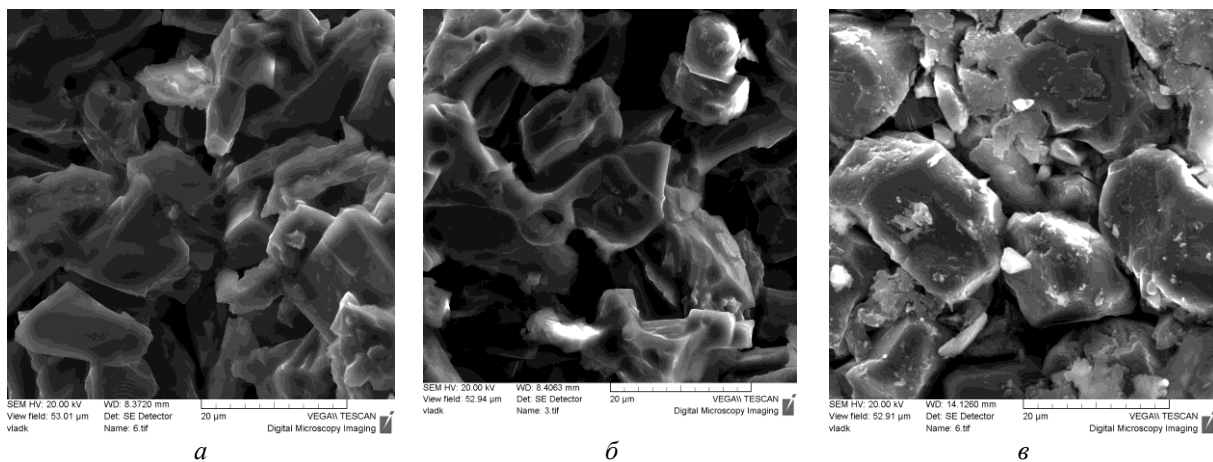


Рис. 2. Морфология поверхностей разрушения композиционных материалов карбид кремния – алмаз – стекло

а – концентрация связующего 40 об. %, пор – 8 об. %; б – концентрация связующего 40 об. %, пор – 20 об. %; в – концентрация связующего 30 об. %, пор – 10 об. %; г – концентрация связующего 30 об. %, пор – 20 об. %



*Рис. 3. Морфология поверхностей разрушения композиционных материалов системы карбид кремния – алмаз – стекло. Концентрация связующего 20 об. %
а – объемное содержание пор в композиционном материале 10 об. %;
б – объемное содержание пор в композиционном материале 20 об. %;
в – объемное содержание пор в композиционном материале 30 об. %*

Снижение содержания связующего (до 20 об. %) и увеличение пористости приводит к снижению содержания стекла в местах множественных стыков между частицами. Следствием этого, в свою очередь, является снижение прочности и площади контактов между частицами, и снижение твердости композиционного материала.

Режущая способность композиционных материалов (инструмента формы 1А1 200 x 10 x 5 x 76) с 40 об. % связующего и 10, 20 об. % пористостью составляет 0,0018; 0,0032 карат/мин и 0,0039; 0,0064 карат/мин для композиционного материала с 30 об. % связующего, соответственно. Режущая способность композиционных материалов с 20 об. % связующего и пористостью 10, 20, 30 об. % составляет 0,0011; 0,0022; 0,036 карат/мин.

Низкие значения режущей способности композиционных материалов с 40 и 30 об. % связующего обусловлены износостойкостью связующего. Морфология поверхностей износа композиционных материалов с 40 и 20 об. % связующего показывает, что в композиционных материалах с 40 об. % связующего поверхность сглажена. На поверхности композиционных материалов присутствуют участки матрицы, структура которых представляет собой плоские частицы карбида кремния и алмаза, окруженные прослойками связующего (рис. 4, а). Лишь на отдельных участках поверхности композиционных материалов присутствуют открытые поры (рис. 4). Изнашивание связки на этих участках протекает вследствие хрупкого разрушения прослоек связующего.

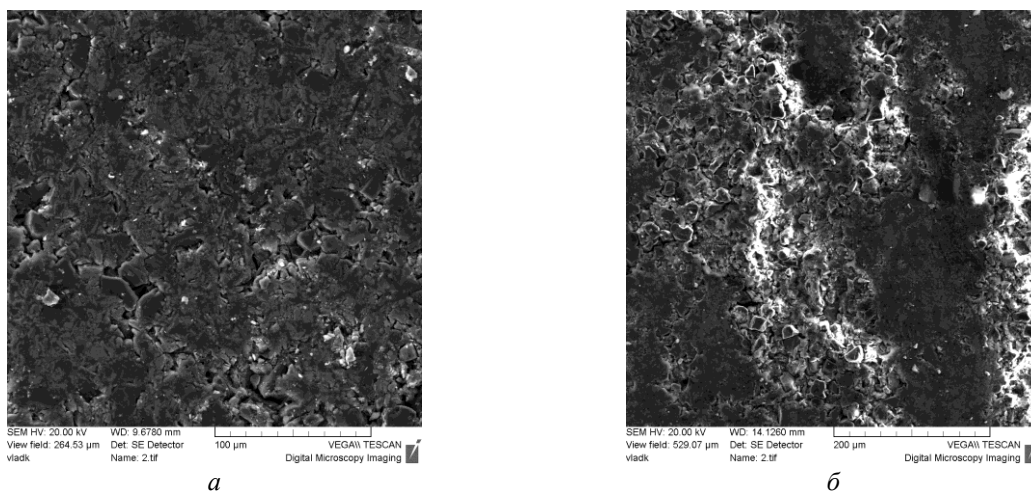


Рис. 4. Морфология поверхностей износа композиционных материалов карбид кремния – алмаз – стекло
 а – концентрация связующего 40 об. %, пор – 20 об. %;
 б – концентрация связующего 20 об. %, пор – 20 об. %

Снижение содержания связующего в композиционных материалах до 20 об. % изменяет морфологию поверхностей износа. Значительную часть поверхности композиционных материалов с 20 об. % связующего занимают участки с развитым микрорельефом, образованным выкрошившимися из связующего частицами карбида кремния и алмаза (рисунок 4, б). Присутствие площадок износа на поверхности частиц карбида кремния и сколов на поверхности прослоек связующего показывает, что износ композиционного материала происходит по механизму хрупкого разрушения и абразивного износа связки. Увеличение режущей способности инструмента с композиционными материалами, содержащими 20 об. % связующего пористостью 10, 20 об. % вызвано снижением площади занимаемой прослойками связующего. Резкое увеличение режущей способности у композиционного материала (инструмента с композиционным материалом) с 20 об. % связующего и 30 об. % пор может быть связано со снижением прочности связи между частицами карбида кремния и алмаза и, как результат, быстрым разрушением композиционного материала. Следствием этого является обнажение и выступание на поверхность новых алмазных зерен вместо частично изношенных. Алмазные зерна преимущественно выкрашиваются из связки, а не разрушаются и изнашиваются в результате воздействия обрабатываемого материала (алмаза). Удельный расход алмаза при обработке монокристаллов алмаза абразивным инструментом с композиционными материалами содержащими 20 об. % связующего при пористости 10, 20, 30 об. % составил 53, 60 и 78 карат/карат соответственно. Увеличение значений режущей способности коррелирует со значениями удельного расхода алмаза. Поэтому можно полагать, что увеличение пористости с 20 до 30 об. % не сопровождается преимущественным выкрашиванием алмазных частиц из матрицы.

Характер изменения режущей способности алмазосодержащих композиционных материалов при шлифовании кристаллов алмаза показывает, что композиционный материал, структура которого

представляет собой матрицу из связующего, в которой расположены частицы алмаза, карбида кремния (и поры) имеет наибольшую износостойкость и наименьшую режущую способность.

Композиционный материал, структура которого представляет частицы карбида кремния и алмаза, объединенные в объемный каркас прослойками связующего, в местах стыков частиц, имеет наименьшую износостойкость и наибольшую режущую способность и наибольший удельный расход алмаза. Композиционные материалы, структура которых представляет объемный каркас из частиц карбида кремния и алмаза, в котором свободные пространства, образованные множественными стыками между частицами, частично заполнены связующим, имеет меньшую режущую способность и меньший удельный расход алмаза, чем композиционный материал в котором свободные пространства в местах множественных стыков представляют собой поры.

Композиционные материалы с каркасной структурой формируются при концентрации связующего 10–20 об.% и содержания пор 20–30 об.% (рис. 3). Снижении концентрации связующего с 40 об. % до 20 об.% изменяет морфологию поверхностей разрушения и износа композиционных материалов (рис. 3, 4). Композиционные материалы с 30 и 40 об. % связующего разрушаются преимущественно по прослойкам связующего с 25 об. % связующего по контактными мостикам между частицами (рис. 3). Морфологии поверхностей износа композиционных материалов показывают, что износ композиционного материала с 25 об. % связующего происходит вследствие хрупкого разрушения контактных мостиков между частицами алмаза и карбида кремния после износа и разрушения частиц алмаза (рис. 4). Формирование композиционных алмазосодержащих материалов с каркасной структурой обеспечивает прочное закрепление алмазных частиц за счет образования множества контактных мостиков с частицами карбида кремния, что приводит к преимущественному изнашиванию алмазных зерен и повышению режущей способности.

Заключение. Микроструктура алмазосодержащих композиционных материалов, микроструктура пленок связующего на поверхности частиц алмаза и карбида кремния показывают, что образование пленок на поверхности частиц происходит при смачивании и растекании расплава оксид-гидроксидного стекла по их поверхности в процессе нагрева до температур спекания. Низкая температура начала растекания оксид-гидроксидного стекла в отличие от оксидного, выделение паров воды обеспечивают формирование пленок стекла на частицах и контактных мостиков между ними при невысокой (10 об. %) концентрации стекла в шихте. Преимущественное расположение пленок стекла на частицах и стыках между ними, несмотря на высокое (20–30 об. %) содержание пор обеспечивает прочное закрепление частиц алмаза в композиционных материалах с каркасной структурой благодаря множественным контактам с лакированными частицами карбида кремния.

Список использованной литературы:

1. *Захаренко И.П.* Алмазные инструменты и процессы их обработки / *И.П. Захаренко.* – Киев : Техніка, 1980. – 215 с.
2. *Галицкий В.Н.* Алмазообразивный 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.
3. *Грabcенко А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / *А.И. Грabcенко.* – Харків : Вища школа, 1975. – 184 с.
4. Изнашивание монокристаллов алмаза / *А.М. Бочаров, А.Ф. Климович, А.С. Старовойтов, В.В. Снежков.* – Мн. : Белорусская наука, 1996. – 144 с.
5. *Кизиков Э.Д.* Алмазометаллические композиции / *Э.Д. Кизиков, Е.Б. Верник, Н.С. Кошевой.* – Киев : Техніка, 1988. – 135 с.
6. Получение, свойства и применение порошков алмаза и кубического нитрида бора / *В.Б. Шитило, Е.В. Звонарев, А.М. Кузей* и др. ; под ред. *П.А. Витязя.* – Минск : Бел. наука, 2003. – 385 с.
7. *Sanusz K.* Theoretical analysis of stone sawing with diamonds / *K.Sanusz* // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2002. – Vol. 123. – С. 146–154.
8. *Вествуд А.* Разрушение твердых тел / *А.Вествуд.* – М. : Металлургия, 1967. – 520 с.
9. *Танович Л.* Процессы, возникающие при обработке керамики / *Л.Танович* // *Вісник Житомирського державного технологічного університету.* – 2003. – № 2 (26). – С. 175–178.
10. *Паценко А.А.* Инструмент из сверхтвердых материалов на керамических связках / *А.А. Паценко, Б.М. Емельянов, Ф.Г. Рубан.* – Киев : Наукова думка, 1978. – С. 143.

References:

1. *Zaharenko, I.P.* (1980), *Almaznye instrumenty i processy ih obrabotki*, Tehnika, Kiev, 215 p.
2. *Galickij, V.N., Kurishhuk, A.V. and Murovskij, V.A.* (1986), *Almazoabrazivnyj instrument na metallicheskih svyazkah dlja obrabotki tverdogo splava i stali*, Naukova Dumka, Kiev, 144 p.
3. *Grabchenko, A.I.* (1975), *Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej almaznogo shlifovanija*, Vishha shkola, Harkiv, 184 p.
4. *Bocharov, A.M., Klimovich, A.F., Starovojtov, A.S. and Snezhkov, V.V.* (1996), *Iznashivanie monokristallov almaza*, Belorusskaja nauka, Minsk, 144 p.

5. Kizikov, Je.D., Vernik, E.B. and Koshevoj, N.S. (1988), *Almazometallicheskie kompozicii*, Tehnika, Kiev, 135 p.
6. Shipilo, V.B., Zvonarev, E.V., Kuzej, A.M. and others (2003), *Poluchenie, svojstva i primeneniye poroshkov almaza i kubicheskogo nitrida bora*, in Vitjaz', P.A. (ed.), Bel. nauka, Minsk, 385 p.
7. Sanusz, K. (2002), «Theoretical analysis of stone sawing with diamonds», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, pp. 146–154.
8. Vestvud, A. (1967), *Razrusheniye tverdyh tel*, Metallurgija, Moskva, 520 p.
9. Tanovich, L. (2003), «Processy, vznikajushhie pri obrabotke keramiki», *Visnik Zhitomir'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 2 (26), pp. 175–178.
10. Pashhenko, A.A., Emel'janov, B.M. and Ruban, F.G. (1978), *Instrument iz sverhtverdyh materialov na keramicheskikh svyazkah*, Naukova dumka, Kiev, pp. 143.

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 филиал «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.