

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.762:621.921

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-47-57>

Поступила в редакцию 01.12.2020

Received 01.12.2020

**В. Т. Сенюць***Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

## СПЕКАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

**Аннотация.** Представлены результаты исследования композиционных материалов на основе порошка алмаз-лонсдейлитового абразива (АЛА) и различных связующих (механокомпозит Fe–Ti, карбид кремния SiC). С использованием импактных алмазов и наномеханокомпозита Fe–Ti получен металл-матричный композиционный материал с мультимодальной нано- и микроуровневой структурой, характеризующийся повышенной адгезией алмазных зерен к связке. Показано, что использование импактных алмазов по сравнению с синтетическими алмазами позволяет снизить давление термобарической обработки на 30–50 % при тех же температурах спекания. Применение композитов Fe–Ti–АЛА в процессе магнитно-абразивного полирования (МАП) позволяет повысить в 1,5–2 раза скорость съема материала на основе кремния и на 30 % сократить продолжительность обработки по сравнению с ферроабразивным порошком (ФАП) на основе синтетических алмазов. Исследовано влияние добавки карбида кремния на процесс получения сверхтвердого композиционного материала импактный алмаз – SiC. Выяснено, что добавка SiC способствуют снижению дефектности материала и повышению однородности его структуры по сравнению с материалом без добавки связующего. При этом увеличение содержания SiC и Si приводит также к инверсии типа структуры сверхтвердого композита с поликристаллической на матричную. Установлено, что дополнительное использование сажи аморфной и бора влияет на измельчение структуры матрицы композиционного материала вследствие формирования карбида бора и вторичного мелкодисперсного карбида кремния.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, алмаз-лонсдейлитовый абразив, импактные алмазы, химико-термическое модифицирование, высокие давления и температуры, спекание

**Для цитирования:** Сенюць, В. Т. Получение композиционных материалов инструментального назначения на основе импактных алмазов в условиях высоких давлений и температур / В. Т. Сенюць // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 47–57. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-47-57>

**Vladimir T. Senyut***Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

## SINTERING OF COMPOSITE MATERIALS, BASED ON IMPACT DIAMONDS, UNDER HIGH PRESSURES AND TEMPERATURES FOR TOOL APPOINTMENT

**Abstract.** The article presents the results of a study of composite materials based on diamond-lonsdaleite abrasive (DLA) and various binders (Fe–Ti mechanocomposite, silicon carbide SiC). A metal-matrix composite material with a multimodal nano- and microlevel structure, characterized by increased adhesion of diamond grains to the binder, is obtained on the basis of impact diamonds and a Fe–Ti nano-mechanical composite. It is shown that the use of impact diamonds in comparison with synthetic diamonds makes it possible to reduce the pressure of thermobaric treatment by 30–50 % at the same sintering temperatures. The use of Fe–Ti–DLA composites in the process of magnetic-abrasive polishing (MAP) makes it possible to increase the removal rate of material based on silicon by 1.5–2 times and reduce the processing time by 30 % compared to ferroabrasive powder (FAP) based on synthetic diamonds. The effect of adding of silicon carbide on the process of obtaining a superhard composite material impact diamond – SiC is investigated. It is found that adding of SiC helps to reduce the defectiveness of the material and increase the homogeneity of its structure in comparison with the material without adding of a binder. In this case, an increase in the content of SiC and Si also leads to an inversion of the structure type of the superhard composite from polycrystalline to matrix. It is found that the additional use of amorphous soot and boron affects the refinement of the matrix structure of the composite material due to the formation of boron carbide and secondary finely dispersed silicon carbide.

**Keywords:** composite materials, diamond-lonsdaleite abrasive, impact diamonds, chemical-thermal modification, high pressures and temperatures, sintering

**For citation:** Senyut V. T. Sintering of composite materials, based on impact diamonds, under high pressures and temperatures for tool appointment. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no.1, pp. 47–57 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-1-47-57>

**Введение.** Традиционно задачами в области синтеза новых алмазных композиционных материалов (КМ) и поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) является повышение их физико-механических характеристик, снижение себестоимости получения, улучшение эксплуатационных параметров алмазного инструмента и расширение областей его использования [1].

Как правило, при создании алмазных материалов применяют порошки синтетического алмаза с достаточно низким порогом графитизации, обусловленным присутствием в них примесей металлов-катализаторов [2]. Другая проблема заключается в значительной хрупкости порошков синтетического алмаза, что приводит к скалыванию режущей кромки, ухудшению качества поверхности обрабатываемого материала и преждевременному выходу из строя алмазного инструмента.

Расширению диапазона технологических режимов термобарической обработки и активации процессов взаимодействия алмаза со связующими при спекании под давлением будут способствовать исключение из состава алмазных КМ и ПСТМ связующих, которые катализируют обратное превращение алмаз–графит, наряду с подготовкой поверхности алмазных порошков, а также применение термостойких микро- и нанопорошков алмаза. Это позволит получать в производственных условиях алмазные и алмазосодержащие материалы с повышенными свойствами [3].

Использование наноструктурированных порошков импактных алмазов, характеризующихся отсутствием катализаторов графитизации в качестве альтернативного алмазного сырья, предполагает существенное повышение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик алмазных материалов и инструментов на их основе [4].

Импактные алмазы, а точнее, алмаз-лонсдейлитовый абразив (АЛА) Попигайского месторождения (Россия), – новый вид минерального сырья, не представленный на рынке и потому пока никак не используемый. Между тем АЛА обладает выдающимися технологическими свойствами, прежде всего абразивной способностью, которая в 1,5–2 раза превосходит абразивную способность природных технических и синтетических алмазов. АЛА представляет собой наноразмерный поликристаллический композиционный материал на основе алмазной и лонсдейлитовой фаз, благодаря чему он имеет преимущество перед обычными алмазами, чьи частицы представляют собой монокристаллы [5].

Для того чтобы оценить рыночную перспективу импактных алмазов, необходимо провести исследования по определению наиболее перспективных направлений использования данного вида алмазного сырья, изучить его физико-механические и технологические свойства, разработать составы реакционных шихт и гомогенных смесей на его основе для синтеза сверхтвердых композитов в широком диапазоне давлений и температур.

*Цель работы* – исследование влияния технологических параметров термобарического спекания и модифицирования алмазных порошков, а также добавок связующих на структуру и свойства композиционных и поликристаллических материалов инструментального назначения на основе импактных алмазов Попигайского месторождения.

**Оборудование, материалы и методики исследований.** Термобарическую обработку шихты выполняли в аппарате высокого давления (АВД) типа «наковальня с лункой» при давлениях 2,5–5,5 ГПа в диапазоне температур 1200–2000 °С. Для оценки уровня давления в камере синтеза использовали метод калибровки при комнатной температуре, основанный на сопоставлении усилия пресса и давления полиморфного превращения в реперном веществе, в качестве которого применяли  $\text{Vi}$ . Контроль температуры проводили с помощью хромель-алюмелевой и платина-платинородиевой термопар.

Для управления заданными параметрами синтеза и спекания СТМ использовался контроллер, разработанный на базе РС-совместимой промышленной рабочей станции со встроенным графическим LCD-дисплеем и клавиатурой.

Рентгеновские исследования порошков выполнены на дифрактометре D8 ADVANCE (фирма Bruker) в  $\text{Cu-K}_\alpha$  излучении в автоматическом режиме съемки. Структурные исследования модифицированных алмазных порошков и спеченных композитов осуществляли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Mira (фирма Tescan) и на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU.

На атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО «МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме исследовали морфологию поверхности и излома полученных образцов. Для изучения исходных порошков и микроструктуры полученных образцов использовали оптический микроскоп Микро 200 (НПО «Планар», Беларусь).

Микротвердость наноструктурных композитов определялась на микротвердомере ПМТ-3 алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 100 г. Плотность образцов исследовали методом гидростатического взвешивания в четыреххлористом углероде. Термостойкость материала определяли по степени графитизации композита в результате его термической обработки при определенных температурах.

В качестве основы КМ применяли порошок импактных алмазов Попигайского кратера зернистостью 40–400 мкм. При получении металл-алмазного КМ был использован наноструктурный механокомпозит состава Fe – 20 % Ti [6].

Для спекания поликристаллического сверхтвердого материала алмаз – карбид кремния применяли карбид кремния SiC марки M7 с зернистостью основной фракции 7 мкм, а также микропорошок кремния Si дисперсностью менее 40 мкм. Для реакционного спекания использовали также добавки технического углерода (сажи) (ГОСТ 7885-86) и аморфного бора (ТУ 2112-001-49534204-2003) с размером частиц 5–20 мкм.

**Результаты и их обсуждение. Модифицирование порошков импактных алмазов.** На рис. 1 представлен внешний вид исследуемого порошка импактного алмаза.

В ходе проведенных исследований нами установлено, что удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) исходных порошков АЛА зернистостью от 150 до 400 мкм колеблется в пределах 0,7–0,8 м<sup>2</sup>/г. Сравнение полученных результатов с данными измерений  $S_{уд}$  порошков АСМ показало [7], что удельная поверхность импактных алмазов на порядок выше  $S_{уд}$  шлифпорошка АСМ 160/120 ( $S_{уд} = 0,06$  м<sup>2</sup>/г) и в 2–5 раз выше, чем у значительно более дисперсных микропорошков АСМ (например,  $S_{уд}$  микропорошка АСМ 14/10 – 0,42 м<sup>2</sup>/г;  $S_{уд}$  микропорошка АСМ 60/40 – 0,15 м<sup>2</sup>/г). Это свидетельствует о развитости поверхности и высокой адсорбционной способности, определяющей эффективность процесса химико-термического модифицирования данной разновидности алмазов.

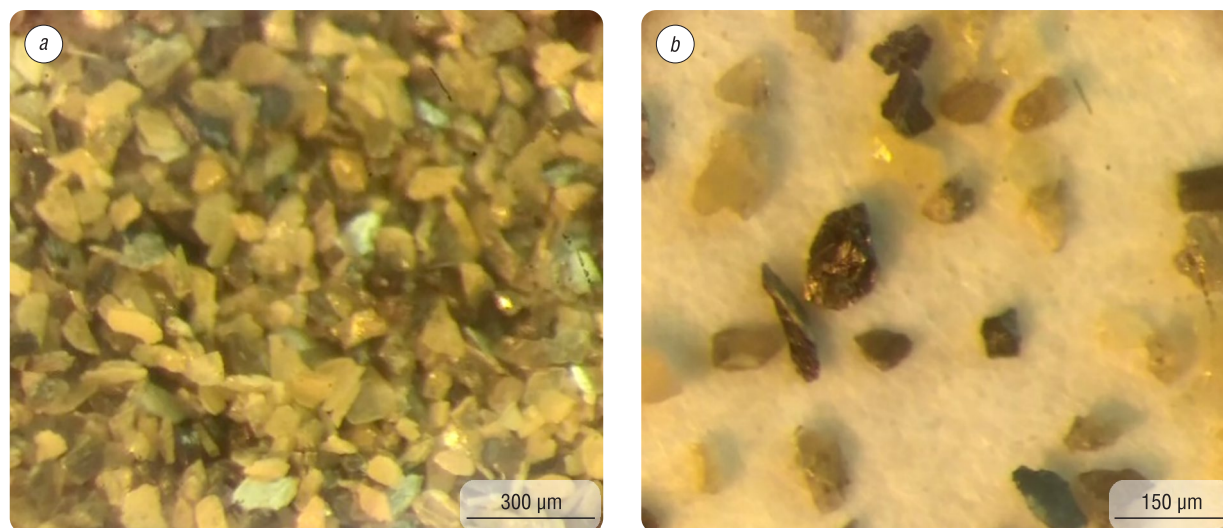


Рис. 1. Исходный порошок импактного алмаза: *a* – внешний вид порошка, *b* – отдельные зерна импактного алмаза  
Fig. 1. Initial impact diamond powder: *a* – powder appearance, *b* – individual grains of the impact diamond



Проведенный электронно-микроскопический анализ структуры АЛА (рис. 2) позволил выявить ряд характерных деталей, указывающих на специфику их роста. В частности, на поликристаллическое строение импактных алмазов указывает большое количество кристаллитов микронных размеров удлиненной или эллипсоидной формы на поверхности частиц.

Наличие значительного количества микропор на поверхности АЛА в сочетании с микротрещиноватостью отражает высокую степень ее дефектности. Размеры микропор обычно составляют единицы микрон. В целом пористый микрорельеф поверхности импактных алмазов напоминает лунный ландшафт [8].

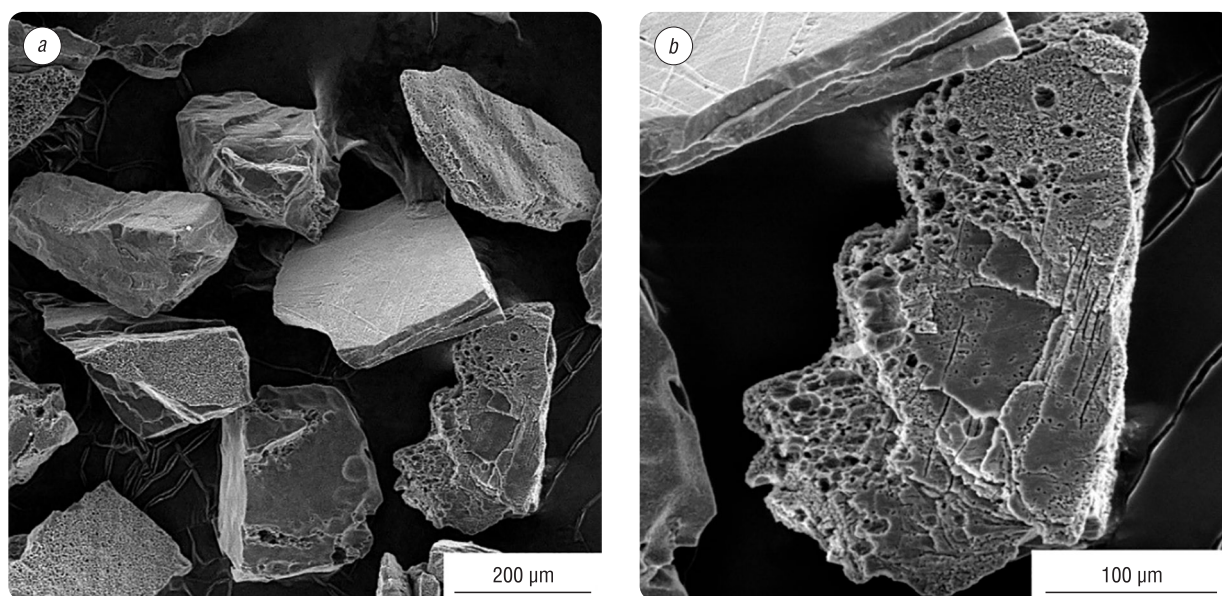


Рис. 2. Морфология частиц и структура поверхности импактных алмазов: *a* – морфологические типы зерен, *b* – структура поверхности отдельного зерна

Fig. 2. Particle morphology and the surface structure of the impact diamonds: *a* – morphological types of grains, *b* – surface structure of an individual grain

Был разработан процесс химико-термического модифицирования порошков импактного алмаза кремнием и титаном, заключающийся в отжиге порошков в восстановительной атмосфере диссаммиака, содержащей хлориды соответствующих соединений в температурном интервале 750–950 °С [7].

Схема процесса модифицирования порошка импактного алмаза кремнием и титаном представлена на рис. 3.

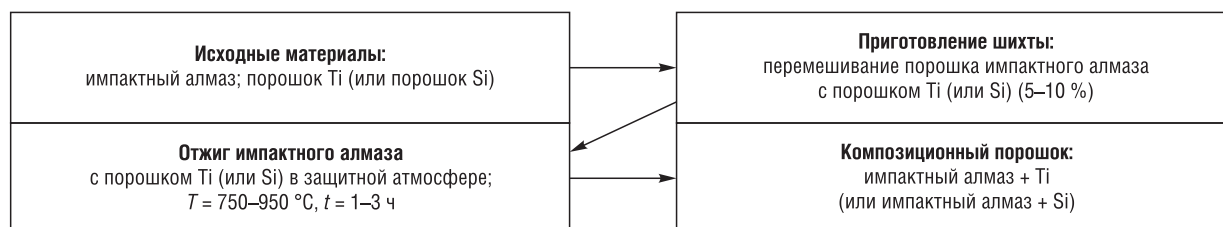


Рис. 3. Технологическая схема получения модифицированных титаном и кремнием порошков импактного алмаза

Fig. 3. Technological scheme for the preparation of impact diamond powders modified with titanium and silicon

На рис. 4 показаны порошки импактного алмаза после модифицирования титаном и кремнием.

В результате модифицирования титаном на поверхности и в микропорах алмазных зерен формируется покрытие островкового типа на основе титана и оксида титана с размером частиц 50–100 нм, которые в свою очередь образуют агломераты 2–10 мкм.

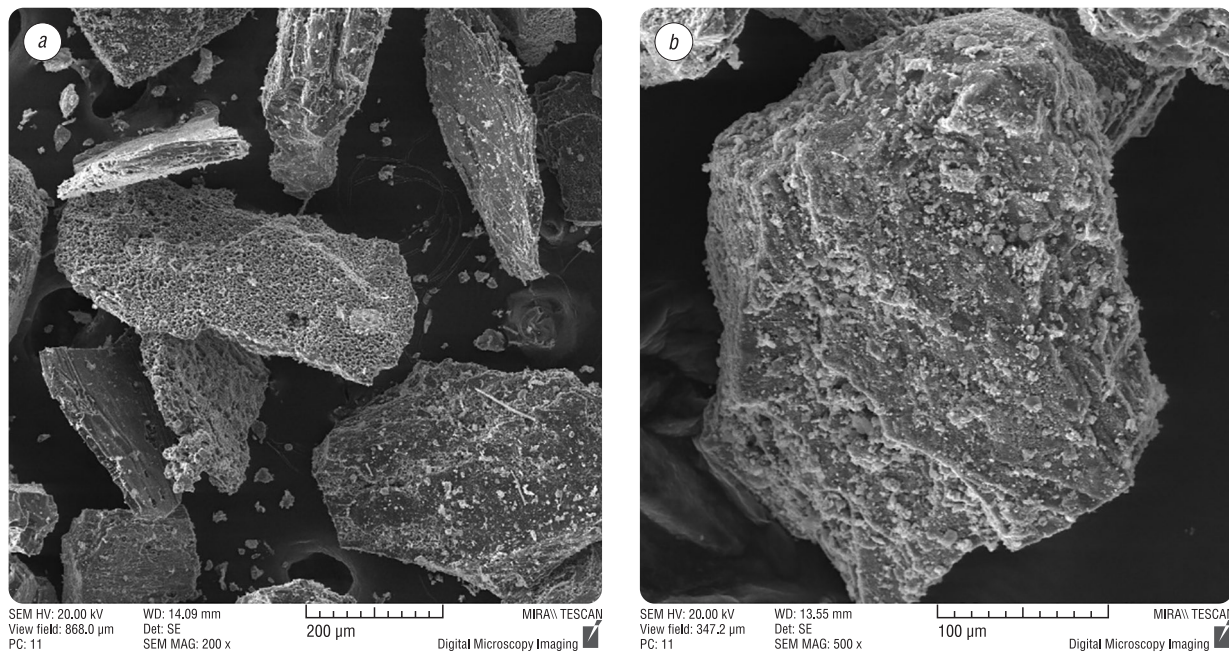


Рис. 4. Порошки импактного алмаза после модифицирования: *a* – импактные алмазы с покрытием на основе титана, *b* – отдельная частица алмаза с кремниевым покрытием

Fig. 4. Impact diamond powders after modifying: *a* – impact diamonds with titanium-based coating, *b* – a single particle of diamond coated with silicon

Кремниевое покрытие также представляет собой пленку на основе агломерированных частиц кремния размером 1–3 мкм, равномерно распределенных на поверхности зерен импактного алмаза. Степень покрытия зерен при этом ниже, чем в случае порошков наноалмазов детонационного синтеза [9], однако выше, чем для порошка синтетического алмаза [7, 10].

**Исследование влияния высоких температур на фазовый состав порошка импактного алмаза.** Рентгеноструктурный анализ исходного порошка импактного алмаза (фракция 200–400 мкм) показал, что порошок АЛА содержит фазу кубического алмаза в количестве до 76 об.%, фазу лонсдейлита – до 24 об.% (рис. 5, *a*).

После отжига в атмосфере аргона при температуре 1300 °С фазовый состав порошка следующий: алмаз кубический – до 58 об.%, лонсдейлит – до 38 об.%, графит – 4 об.% (рис. 5, *b*). Полученный результат свидетельствует о высокой термической стабильности импактного алмаза по сравнению с другими видами наноалмазов детонационного и динамического синтеза [11].

**Получение металло-матричного композиционного материала АЛА – механокомпозит Fe – 20 % Ti.** Нами изучена возможность получения наноструктурного алмазосодержащего материала путем спекания импактных алмазов с металлическим связующим на основе наноструктурного механокомпозита Fe – 20 % Ti [6]. Термобарическую обработку порошка импактных алмазов выполняли при давлениях 1,5–4,5 ГПа в АД типа «трапеция» в диапазоне температур 1250–1450 °С. В результате термобарического спекания получены компактные цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 8 мм. Данные о составах шихты и режимах спекания представлены в табл. 1. На рис. 6 приведена структура спекенного КМ импактный алмаз – механокомпозит Fe – 20 % Ti. На рис. 6, *a* показано отдельное зерно импактного алмаза в металлической матрице. Также в структуре материала наряду с крупными алмазными зернами наблюдаются мелкие (1–10 мкм) частицы алмаза, которые образовались в результате дробления под давлением крупных алмазов (рис. 6, *b*), что дополнительно способствует дисперсному упрочнению матрицы.

Микротвердость металлической матрицы, измеренная при нагрузке 100 г, в полученном материале составляет от 4,7 до 8,0 ГПа, микротвердость отдельных зерен АЛА в спекенных образцах – в пределах 17,5–30,0 ГПа при пористости менее 1 %.

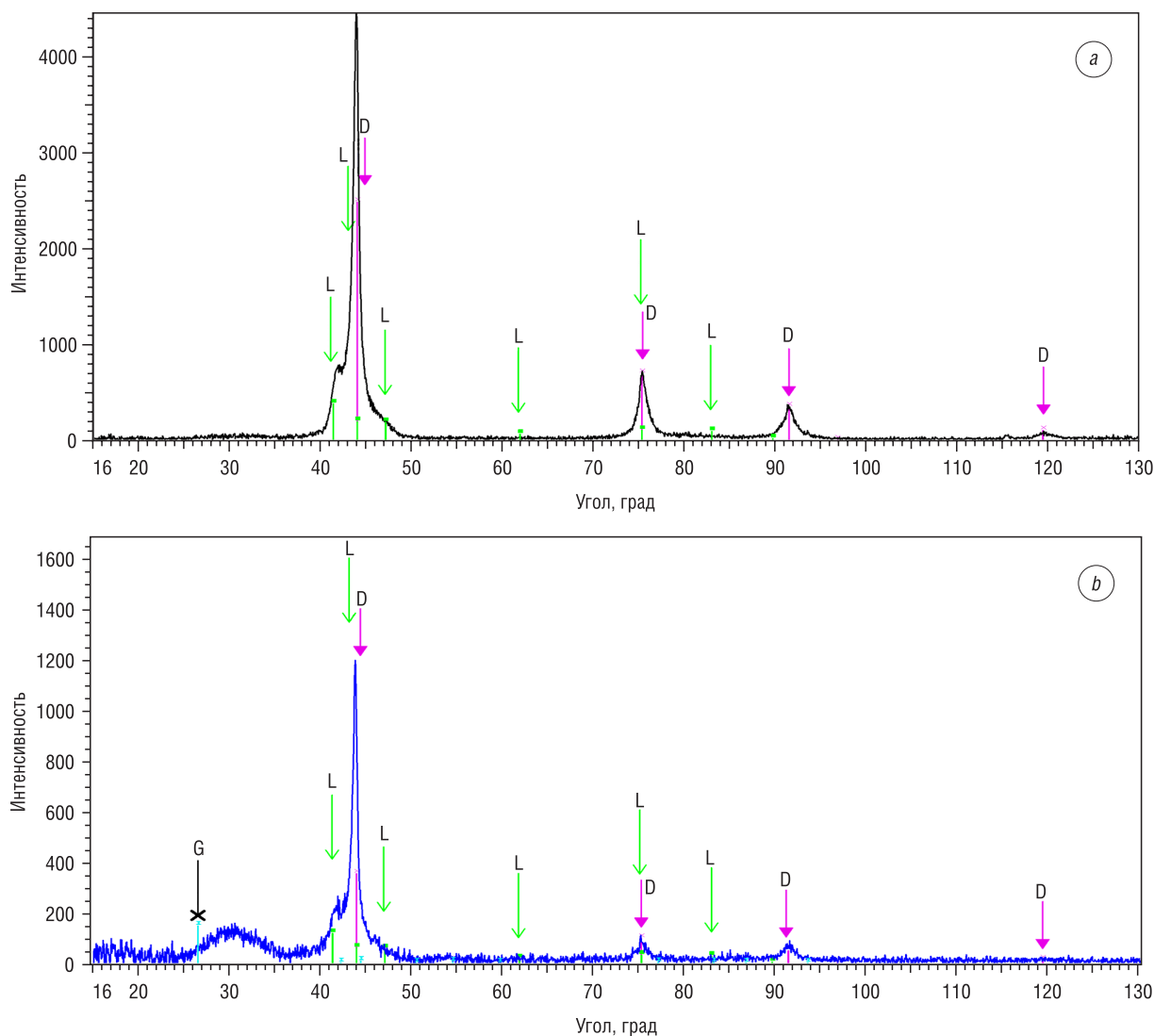


Рис. 5. Дифрактограмма порошка АЛА: *a* – исходный порошок АЛА, *b* – порошок АЛА после отжига в атмосфере аргона при температуре 1300 °С; L – лонсдейлит, D – кубический алмаз

Fig. 5. Diffraction pattern of DLA powder: *a* – initial DLA powder, *b* – DLA powder after annealing in an argon atmosphere at the temperature of 1300 °C; L – lonsdaleite, D – cubic diamond

Т а б л и ц а 1. Состав шихты, режимы получения и свойства композиционного материала на основе импактных алмазов с добавками наномеханокомпозита Fe – 20 %Ti

Table 1. Composition of the charge, the production modes and properties of the composite material, based on impact diamonds with additions of Fe – 20 % Ti nano-mechanical composite

Состав шихты, мас.%							Режим получения			Свойства композита			
TiN	TiB <sub>2</sub>	Fe–20%Ti	Импакт-алмаз	Si	Ti	B	<i>P</i> , ГПа	<i>T</i> , °С	<i>t</i> , с	Пористость, %	Термостойкость, °С	Твердость матрицы HV, ГПа	Твердость СТМ HV, ГПа
–	15	45	35	5,0	–	–	2,5	1250	45	Менее 1	~ 1270	6,6	22
–	–	50	50	–	–	–	2,5	1450	30	Менее 1	~ 1260	7,0	30
10	–	40	50	–	–	–	2,5	1300	45	Менее 1	~ 1200	8,0	24
–	15	40	40	–	5	–	2,5	1350	50	Менее 1	~ 1260	7,7	27
–	–	55	42	1,5	–	1,5	2,5	1350	60	Менее 1	~ 1260	4,7	17,5

На основании анализа свойств образцов можно сделать вывод, что достигнутый уровень физико-механических параметров КМ позволяет использовать его в абразивном инструменте для финишной обработки высокотвердых материалов [12].



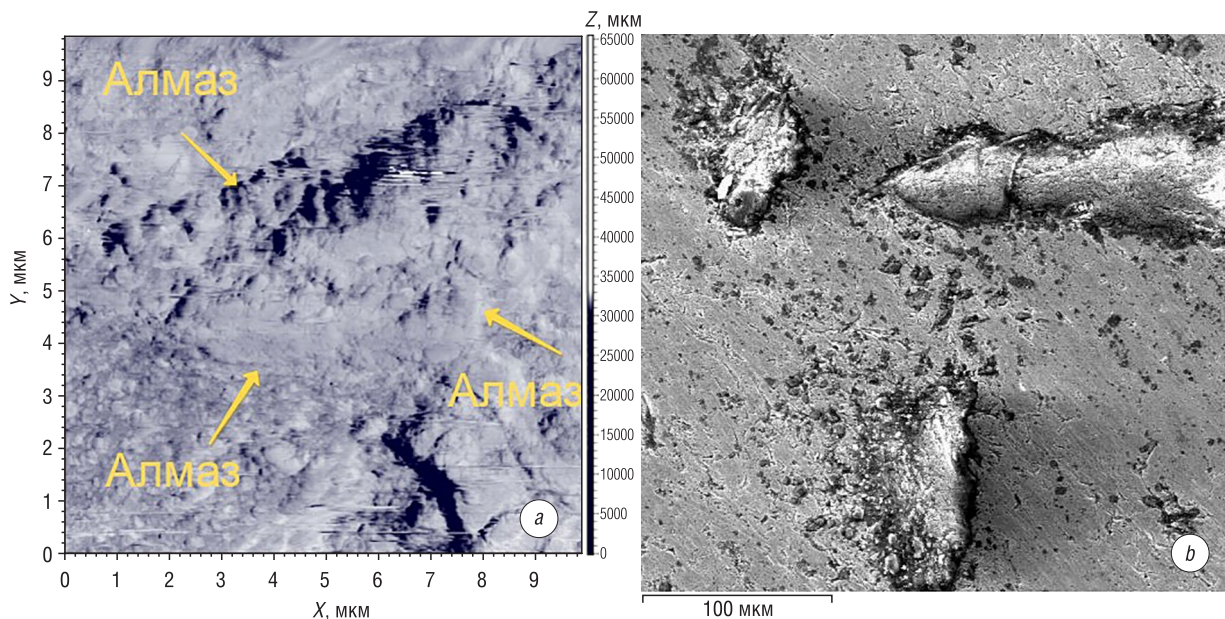


Рис. 6. АСМ-топография излома (а) и СЭМ шлифа поверхности (b) материала импактный алмаз 50 об.% – связка (Fe – 20 % Ti) 50 об.%. Давление спекания 2,5 ГПа

Fig. 6. AFM-topography of the fracture (a) and the SEM of the surface section (b) of the material impact diamond 50 % vol. – binder (Fe – 20 % Ti) 50 % vol. The sintering pressure of 2.5 GPa

**Технологические испытания композиционного материала импактный алмаз – механокомпозит Fe – 20 % Ti.** На основе спеченных образцов путем их механического диспергирования и дальнейшего размол в планетарной мельнице был получен ферроабразивный порошок (ФАП), состоящий из гранул размером 5–50 мкм.

Для проведения сравнительных испытаний абразивных свойств был также получен ФАП, в котором в качестве абразива применялся порошок синтетического алмаза АСМ 20/14. Полученные абразивные составы использовали для магнитно-абразивного полирования (МАП) кремниевых пластин [12]. Данные сравнительных испытаний приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сравнительные испытания ФАП на основе механокомпозита Fe – 20 % Ti с добавлением импактных алмазов и синтетических алмазов

Table 2. Comparative tests of FAP based on Fe – 20 % Ti mechanocomposite with the addition of impact diamonds and synthetic diamonds

Характеристика композиционного порошка		Обрабатываемый материал	Удельный съём материала, мг/мин	Стойкость, мин
Fe–Ti/импактный алмаз	5/50	Кремний	35,4	> 30
Fe–Ti/синтетический алмаз	5/50	Кремний	17,8	14

Из полученных данных видно, что абразивный состав на основе импактных алмазов при магнитно-абразивной обработке пластин кремния обладает более высокой (в 1,5–2 раза) абразивной способностью и более высокой (более чем в 2 раза) стойкостью (или временем эксплуатации) по сравнению с составом на основе алмаза АСМ.

**Получение сверхтвёрдого композиционного материала АЛА–SiC.** Использование в качестве связующих компонентов порошков тугоплавких соединений на основе карбидов, нитридов, боридов и др. позволяет активировать процесс спекания и существенно улучшить физико-механические характеристики синтезируемых ПСТМ [3, 13].

В качестве такой добавки перспективно использование карбида кремния SiC, который обладает высокими твердостью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью, а также сравнимым с алмазом температурным коэффициентом линейного расширения [14].

Благодаря высокой твердости карбидокремниевую керамику применяют также для обрабатывающих инструментов [15]. Применение SiC в качестве модифицирующей добавки (связки) при спекании импактных алмазов позволит повысить износостойкость алмазной керамики, улучшить эксплуатационные характеристики изделий на ее основе, расширить область использования таких материалов (например, применение в качестве рабочих элементов камнеобрабатывающего и бурового инструмента).

Термобарическое спекание композитов импактный алмаз (АЛА) – карбид кремния проводили в АД типа «елочка» при давлении 5,5 ГПа в диапазоне температур 1550–2000 °С в течение 30–60 с. Перед спеканием импактные алмазы дробили в стальной пресс-форме и затем просеивали через сито с размером ячейки 40 мкм. Далее формировали реакционную шихту на основе импактных алмазов, карбида кремния и кремния путем их смешивания в баночном смесителе. Также готовили реакционные шихты на основе импактных алмазов, карбида кремния и кремния с дополнительным введением бора и сажи аморфной. Затем в подготовленные шихты различных составов добавляли связующее на основе 10%-ного водного раствора поливинилового спирта и прессовали заготовки высотой 6 мм и диаметром 4,5 мм, которые отжигали при температуре 120 °С в течение 1 ч.

В результате термобарической обработки прессованных заготовок были получены образцы в виде цилиндрических компактов высотой  $h = 5$  мм и диаметром  $\varnothing = 3,5–4,0$  мм. Исследовали структурные особенности спеченных образцов материала с концентрацией импактных алмазов от 45 до 100 об.%.

В результате исследования поверхности шлифов образцов установлено, что введение карбида кремния и кремния способствует уменьшению количества дефектов и несплошностей в виде раковин и пор и формированию более однородной структуры материала. При этом увеличение содержания добавки приводит к инверсии типа структуры материала от поликристаллической (с преобладанием межзеренной связи типа «алмаз–алмаз», рис. 7, *a*) до матричной (алмазные зерна находятся в матрице на основе карбида кремния, рис. 7, *b*, *c*).

В то же время добавки сажи аморфной и бора способствуют измельчению структуры карбидокремниевой матрицы вследствие формирования вторичного мелкодисперсного SiC при реакционном спекании (рис. 7, *b*, *c*). При этом улучшается однородность структуры композита по причине снижения в нем количества несвязанного кремния. Добавка бора также приводит к некоторому охрупчиванию материала из-за образования карбида бора  $B_4C$ .

На рис. 8 представлены АСМ изображения излома поверхности образцов сверхтвердого материала АЛА–SiC.

Анализ структуры спеченных образцов в целом показал, что в заданных условиях термобарического спекания в материале сохраняется морфология алмазных зерен, характерная для импактного алмаза. На рис. 8, *a* видно, что зерна АЛА в спеченном материале обладают выраженной слоистой (деформационной) структурой, характерной для кристаллов импактного апографитового алмаза.



Рис. 7. Поверхность образцов композитов, спеченных под давлением 5,5 ГПа при температуре 1750 °С и в течение 40 с, после шлифовки на алмазном круге AC4-AC6 125/100: *a* – АЛА 60 об.%, SiC 36,6 об.%, Si 3,4 об.%; *b* – АЛА 45 об.%, SiC 45 об.%, Si 4 об.%, сажа 6 об.%; *c* – АЛА 45 об.%, SiC 45 об.%, Si 3,5 об.%, сажа 5,5 об.%, В (бор) 1 об.%;  $\times 50$

Fig. 7. Surface of the composite specimens sintered under the pressure of 5.5 GPa at the temperature of 1750 °C and the time of 40 s, after grinding on the diamond wheel AC4-AC6 125/100: *a* – DLA 60 vol.%, SiC 36.6 vol.%, Si 3.4 vol.%; *b* – DLA 45 vol.%, SiC 45 vol.%, Si 4 vol.%, soot 6 vol.%; *c* – DLA 45 vol.%, SiC 45 vol.%, Si 3.5 vol.%, soot 5.5 vol.%, B (boron) 1 vol.%;  $\times 50$



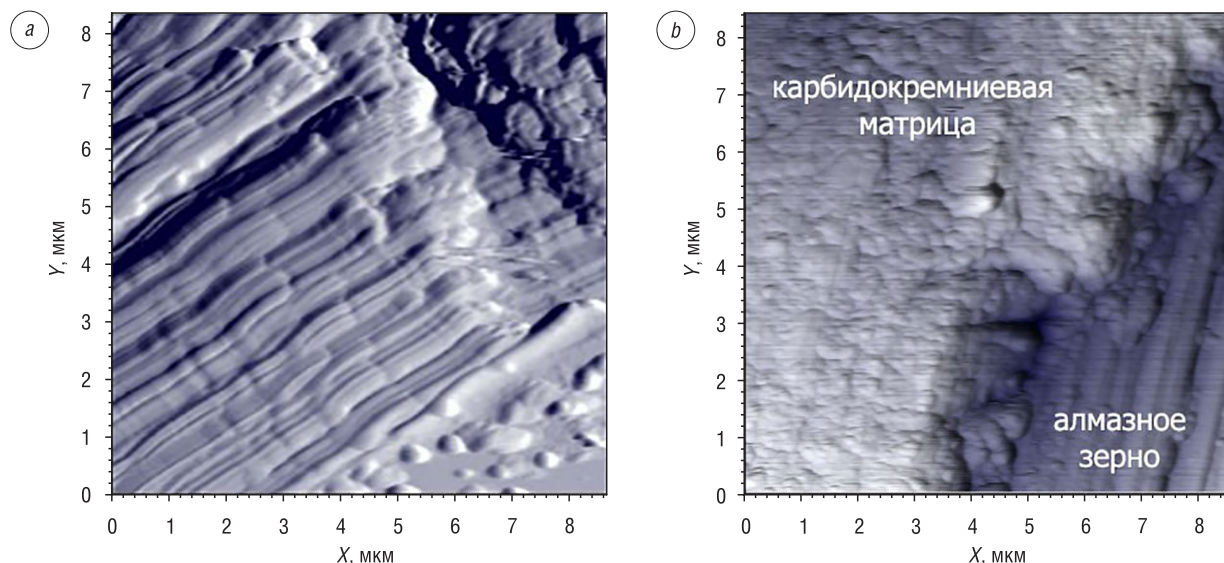


Рис. 8. АСМ поверхности излома спеченных образцов: *a* – АЛА 100 об.%; *b* – АЛА 60 об.%, SiC 36,6 об.%, Si 3,4 об.%  
 Fig. 8. AFM of the sintered samples fracture surface: *a* – DLA 100 vol.%; *b* – DLA 60 vol.%, SiC 36.6 vol.%, Si 3.4 vol.%

Добавление связующего (SiC + Si) способствует снижению межзеренных точечных и протяженных дефектов в материале из-за уменьшения количества контактов «алмаз–алмаз» и срастания алмазных зерен с карбидокремниевой матрицей при спекании. Следует также отметить, что при заданных условиях термобарического спекания в матрице и в алмазе не наблюдается рекристаллизационного роста зерен.

В табл. 3 приведены составы, режимы синтеза и физико-механические характеристики сверхтвердого материала АЛА–SiC.

Т а б л и ц а 3. Состав шихты, режимы получения и свойства сверхтвердого композита на основе импактного алмаза АЛА и SiC

T a b l e 3. Composition of the charge, the production modes and properties of the superhard composite, based on impact diamond DLA and SiC

Состав шихты, об.%					Режимы синтеза			Свойства нанокompозита			
АЛА	SiC	Si	B	сажа	<i>P</i> , ГПа	<i>T</i> , °C	<i>t</i> , с	пористость, %	термостойкость, °C	твёрдость матрицы HV, ГПа	твёрдость СТМ HV, ГПа
100	–	–	–	–	5,5	1550	45	Менее 5	~ 1240	–	32
90	10,0	–	–	–	5,5	1650	30	–	~ 1250	16	30
80	15,0	5	–	–	5,5	1700	45	–	~ 1260	18	65
70	20,0	10	–	–	5,5	1850	50	Менее 1	~ 1270	22	55
60	37,5	–	1,0	1,5	5,5	1950	60	–	~ 1230	25	48,5
50	47,5	–	1,5	1,0	5,5	2000	45	–	~ 1200	27	40
50	47,0	–	1,5	1,5	5,5	2000	50	–	~ 1200	25	38
50	40,0	8	1,0	1,0	5,5	1900	60	–	~ 1240	24	45

Результаты исследований физико-механических параметров сверхтвердого композиционного материала АЛА–SiC показывают перспективность его использования в качестве режущих вставок для металлообрабатывающего и бурового инструмента [16]. Другое перспективное направление дальнейших исследований – использование дробленых спеков при создании алмазных композиционных материалов типа Твесал и Славутич.

**Заключение.** Показано, что удельная поверхность импактных алмазов зернистостью от 150 до 400 мкм на порядок выше удельной поверхности порошка алмазов АСМ 160/120 и в 2–5 раз превышает удельную поверхность микропорошков АСМ 60/40 и АСМ 14/10. В результате использования метода химико-термического осаждения получены модифицированные титаном и кремнием

порошки импактного алмаза, которые предполагается использовать для спекания алмазных сверхтвердых композитов и поликристаллов инструментального назначения.

На основе импактных алмазов и наномеханокомпозита Fe – 20 % Ti разработан ФАП для обработки кремниевых пластин, обладающий более высокой (в 1,5–2 раза) абразивной способностью и более высокой (более чем в 2 раза) стойкостью по сравнению с ФАП, в котором использовались синтетические алмазы АСМ 20/14.

Показано, что введение в состав реакционной шихты добавок карбида кремния и кремния способствует снижению дефектности и повышению однородности структуры спеченного поликристаллического сверхтвердого материала по сравнению с материалом, полученным без добавок связующего. Увеличение содержания связующего приводит также к инверсии типа структуры сверхтвердого материала от поликристаллической к матричной. Разработанный сверхтвердый материал АЛА–SiC перспективен для использования в металло- и камнеобработке.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках отдельного проекта научных исследований НАН Беларуси «Разработка инновационных технологий получения инструмента из высокоизносостойких материалов с использованием поликристаллических наноструктурированных импактных алмазов Попигойского месторождения».

### Acknowledgments

The work was carried out as part of a separate research project of the National Academy of Sciences of Belarus “Development of innovative technologies for producing tools from highly wear-resistant materials using polycrystalline nanostructured impact diamonds from the Popigai deposit”.

### Список использованных источников

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С.А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С.А. Чижика, М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
2. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенюць. – Минск: Беларус. навука, 2005. – 359 с.
3. Получение методом термобарического спекания композитов на основе алмаза и КНБ, модифицированных Si и SiC / В.Т. Сенюць [и др.] // Порошковая металлургия: респ. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. навука, 2015. – Вып. 38. – С. 142–150.
4. Шумилова, Т.Г. Разновидности импактных алмазов и механизмы их образования / Т.Г. Шумилова // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология: сб. тез. докл. 11-й Междунар. конф., Троицк, 29 мая – 1 июня 2018 г. – М.: Троицк: Тривант, 2018. – С. 548–549.
5. Афанасьев, В.П. Попигойские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий / В.П. Афанасьев, Н.П. Похиленко // Инноватика и экспертиза. – 2013. – Вып. 1 (10). – С. 8–15.
6. Морфологические характеристики механохимически полученных композитов Fe/Ti / Т.Ф. Григорьева [и др.] // Расплавы. – 2016. – № 3. – С. 269–276.
7. Структурные особенности алмазных порошков после поверхностного модифицирования активаторами спекания / П.А. Витязь [и др.] // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2016. – № 1 (30). – С. 62–73.
8. Осовецкий, Б.М. Микро- и наночастицы поверхности импактных алмазов / Б.М. Осовецкий, О.Б. Наумова // Вестн. Пермского ун-та. – 2014. – № 2. – С. 8–18.
9. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.
10. Изучение структуры поликристаллов на основе алмазных микропорошков после модифицирования карбидообразующими элементами / В.Т. Сенюць [и др.] // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 60–63. <https://doi.org/10.6060/tcct.20165908.21y>
11. Impact diamonds: Types, properties, and uses / V. Afanasiev [et al.] // Proc. of 14<sup>th</sup> Int. Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), Belgorod, 24–27 Sept. 2019. – Belgorod: V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2019. – P. 179–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_41)
12. Синтез наноструктурного алмаз-лонсдейлитного инструментального композита для абразивной обработки / П.А. Витязь [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. ОИМ НАН Беларуси. – Минск, 2019. – Вып. 8. – С. 352–356.
13. Витязь, П.А. Наноструктурные композиционные материалы инструментального назначения на основе кубического нитрида бора / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць, В.И. Жорник // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Т. 2. – Гл. 14. – С. 254–277.
14. Влияние армирующих добавок и температуры силицирования на структуру и некоторые свойства реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск: Беларус. навука, 2015. – Вып. 38. – С. 132–141.
15. Состояние и перспективы работ по карбидокремниевой керамике в Институте порошковой металлургии / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: под ред. А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 193–200.
16. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.

## References

1. Klimentko S. A., Kopeikina M. Yu., Lavrinenko V. I., Maiboroda V. S., Akulovich L. M., Levin M. L., Kheifets M. L., Khudoley A. L., Chizhik S. A., Chizhik S. A., Kheifets M. L. (eds.) *Surface Finishing in the Production of Parts*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 376 p. (in Russian).
2. Vityaz P. A., Gritsuk V. D., Senyut' V. T. *Synthesis and Application of Superhard Materials*. Minsk, Belarusskaya nauka Publ., 2005. 359 p. (in Russian).
3. Senyut' V. T., Zhornik V. I., Valkovich I. V., Parnitsky A. M., Kovaleva S. A., Mosunov E. I., Markova L. V., Gamzeleva T. V. Obtaining by thermobaric sintering of composites based on diamond and CBN, modified with Si and SiC. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015, iss. 38, pp. 142–150 (in Russian).
4. Shumilova T. G. Varieties of impact diamonds and mechanisms of their formation. *Uglerod: fundamental'nyye problemy nauki, materialovedeniye, tekhnologiya: sbornik tezisev dokladov 11-i Mezhdunarodnoi konferentsii, Troitsk, 29 maya – 1 iyunya 2018 g.* [Carbon: fundamental problems of science, materials science, technology: Collection of abstracts of the 11<sup>th</sup> International Conference, Troitsk, May 29 – June 1, 2018]. Moscow, Troitsk, Trovant Publ., 2018, pp. 548–549 (in Russian).
5. Afanasiev V. P., Pokhilenko N. P. Popigai Impact Diamonds: New Russian Raw Materials for Existing and Future Technologies. *Innovatika i ekspertiza = Innovation and Expertise*, 2013, iss. 1 (10), pp. 8–15 (in Russian).
6. Grigorieva T. F., Kovaleva S. A., Kiseleva T. Yu., Vosmerikov S. V., Devyatkina E. T., Pastukhov E. A., Lyakhov N. Z. Morphological characteristics of mechanochemically obtained Fe/Ti composites. *Rasplavy = Melts*, 2016, no. 3, pp. 269–276 (in Russian).
7. Vityaz P. A., Senyut' V. T., Zhornik V. I., Parnitsky A. M., Gamzeleva T. V. Structural features of diamond powders after surface modifying with sintering activators. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2016, no. 1 (30), pp. 62–73 (in Russian).
8. Osovetsky B. M., Naumova O. B. Micro- and nanoforms of the surface of impact diamonds. *Vestnik Permskogo universiteta = Bulletin of Perm University*, 2014, no. 2, pp. 8–18 (in Russian).
9. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Il'yushchenko A. F., Senyut' V. T., Komarov A. I., Korzhenevskii A. P., Ivakhnik A. V., Vityaz P. A. (ed.). *Nanodiamonds of Detonation Synthesis: Preparation and Application*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 381 p. (in Russian).
10. Senyut V. T., Zhornik V. I., Parnitsky A. M., Valkovich I. V. Study of the structure of polycrystals based on diamond micropowders after modification with carbide-forming elements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2016, vol. 59, iss. 8, pp. 60–63 (in Russian). <https://doi.org/10.6060/tcct.20165908.21y>
11. Afanasiev V., Pokhilenko N., Eliseev A., Gromilov S., Ugapieva S., Senyut V. Impact diamonds: Types, properties, and uses. *Proc. of 14<sup>th</sup> Int. Congress on Applied Mineralogy (ICAM-2019), Belgorod, 24–27 Sept. 2019*. Belgorod, V. G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2019, pp. 179–182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_41)
12. Vityaz P. A., Senyut' V. T., Zhornik V. I., Valkovich I. V., Parnitsky A. M., Kovaliova S. A., Afanasiev V. P. Synthesis of nanostructural diamond-lonsdelite tool composite for abrasive treatment. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov Ob'edinennogo instituta mashinostroeniya Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Actual issues of mechanical engineering: collection of scientific papers of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2019, iss. 8, pp. 352–356 (in Russian).
13. Vityaz P. A., Senyut' V. T., Zhornik V. I. Nanostructured composite materials of tool appointment based on cubic boron nitride. Alifanov A. V., Vityaz P. A., Volochko A. T., Garbachevskii V. V., Glezer A. M., Govor G. A. et al. Klubovich V. V. (ed.). *Promising Materials and Technologies*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2017, vol. 2, chapter 14, pp. 254–277 (in Russian).
14. Ilyushchenko A. F., Osipov V. A., Zvonarev E. V., Vitko J. A., Babura D. V. Influence of reinforcing agents and siliconization temperature on the structure and certain properties of reaction-bonded ceramics based on silicon carbide. *Poroshkovaya metallurgiya: respublikanskii sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015, iss. 38, pp. 132–141 (in Russian).
15. Ilyushchenko A. F., Mironovich G. A., Osipov V. A., Zvonarev E. V. State and prospects of work on silicon carbide ceramics at the Powder Metallurgy Institute. Ilyushchenko A. F. et al. (eds.) *Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi: vyzovy vremeni* [Powder Metallurgy in Belarus: Challenges of the Time]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 193–200 (in Russian).
16. Bogatyreva G. P., Burykin V. V., Gargin V. V., Gurvich R. A., Devin L. N., Dub S. N. et al. Novikov N. V., Klimentko S. A. (eds.) *Superhard Material Tools*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 608 p. (in Russian).

## Информация об авторе

Сенютъ Владимир Тадеушевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vsenyut@tut.by

## Information about the author

Vladimir T. Senyut – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus. (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vsenyut@tut.by