



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.2:658.562

П.А. ВИТЯЗЬ, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Беларуси
руководитель аппарата НАН Беларуси¹
E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

В.Т. СЕНЮТЬ, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник²
E-mail: vsenyut@tut.by

В.И. ЖОРНИК, д-р техн. наук, проф.
начальник отделения технологий машиностроения и металлургии — заведующий лабораторией
наноструктурных и сверхтвердых материалов²
E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

И.В. ВАЛЬКОВИЧ
научный сотрудник²
E-mail: valigvl@rambler.ru

С.А. КОВАЛЕВА
старший научный сотрудник²
E-mail: sveta_kovaleva@tut.by

Е.И. МОСУНОВ
старший научный сотрудник²
E-mail: emosunov@rambler.ru

В.П. АФАНАСЬЕВ, д-р геол.-минерал. наук
главный научный сотрудник лаборатории литосферной мантии и алмазных месторождений³
E-mail: avp-diamond@mail.ru

¹Президиум НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

³Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 16.07.2020.

СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ И КАРБИДА КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

В статье исследованы структура, фазовый состав и физико-механические характеристики нанокompозита на основе импактных алмазов. Показано, что добавки связующего на основе SiC и Si приводят к снижению дефектности нанокompозита и повышению однородности его структуры по сравнению с материалом без добавок. При этом увеличение содержания связующего приводит также к инверсии типа структуры нанокompозита от поликристаллической до матричной. Установлено, что добавки сажи аморфной и бора влияют на измельчение структуры матрицы нанокompозита вследствие формирования вторичного мелкодисперсного наноструктурного SiC и карбида бора. Предварительная механоактивация реакционной шихты приводит к структурным изменениям в синтезированном материале по сравнению с материалом, полученным без использования механоактивации. При этом возрастает твердость образцов, полученных при сравнимых режимах синтеза, что связано как с формированием мелкозернистой структуры материала, так и с фазовым превращением лондейлита в алмаз. Анализ микротвердости и термостойкости полученных образцов материала позволяет сделать вывод, что достигнутый уровень

физико-механических параметров алмазного нанокompозита позволяет использовать его в камнеобрабатывающем инструменте для обработки пород средней твердости.

Ключевые слова: нанокompозит, синтез, импактные алмазы, высокие давления и температуры, карбид кремния, механоактивация

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-43-51>

Введение. Современное производство предъявляет к инструментам и инструментальным материалам растущие требования по обеспечению работоспособности в условиях больших скоростей резания и динамических нагрузок, интенсивного теплового и химического взаимодействия с обрабатываемыми материалами. Необходима все более высокая производительность при соблюдении точности геометрии и размеров деталей, качества их рабочих поверхностей. Наиболее полно таким требованиям отвечают инструментальные сверхтвердые материалы (СТМ) на основе алмаза и кубического нитрида бора [1].

Использование наноструктурированных микро- и шлифпорошков импактных алмазов Попигайского месторождения (Россия), имеющих кубическую и гексагональную решетки и 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 [2].

Импактные алмазы, а точнее алмаз-лонсдейлитовый абразив (АЛА), — новый вид минерального сырья, не представленный на рынке и потому пока никак не используемый. Между тем, АЛА обладает особенными технологическими свойствами, в первую очередь, абразивной способностью, в 1,5–2 раза превосходящей 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, частицы которых представляют собой монокристаллы [3].

Для того чтобы оценить рыночную перспективу импактных алмазов, необходимо, в первую очередь, 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 основе импактных алмазов для синтеза сверхтвердых нанокompозитов в широком диапазоне давлений и температур.

Постановка задачи. Поиск новых научных подходов и технологических решений, позволяющих добиться снижения себестоимости алмазных композитов и улучшения их эксплуатационных харак-

теристик, является сегодня одной из актуальных задач в области синтеза новых алмазных материалов. Исключение металлических примесей, катализирующих обратное превращение алмаз–графит, а также использование в качестве связующих компонентов микро- и нанопорошков тугоплавких соединений на основе карбидов, нитридов, боридов и др. позволяют активировать процесс спекания и существенно улучшить физико-механические характеристики синтезируемых алмазосодержащих композиционных материалов (КМ) и алмазных поликристаллов [4–6].

В качестве такой добавки может быть использован карбид кремния (SiC). Карбидокремниевые материалы обладают уникальной твердостью, уступающей только твердости алмаза и карбида бора, высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью по сравнению с другими керамическими материалами, причем SiC способен работать практически с различными кислотами и органическими веществами, за исключением плавиковой кислоты. Эти свойства вызывают большой интерес к ним, как перспективным материалам для изделий конструкционного и антифрикционного назначения [7].

Свойства карбидокремниевой керамики остаются неизменными при нагреве свыше 1400 °С. Высокое значение модуля Юнга (>400 ГПа) обеспечивает превосходную стабильность геометрических размеров. Этими свойствами обусловлено широкое применение SiC в качестве строительного материала. SiC одинаково хорошо противостоит коррозии, эрозии, абразивному и фрикционному изнашиванию, что обуславливает его применение в изделиях триботехнического назначения. По сравнению с металлами, SiC является весьма экономичным решением, обеспечивающим более длительный срок службы инструмента при работе с агрессивными, высокотемпературными средами [8].

Благодаря высокой твердости карбидокремниевую керамику применяют также для обрабатывающих инструментов [9]. 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, применять в качестве рабочих элементов камнеобрабатывающего и бурового инструмента).

Цель работы — разработка процесса получения нанокompозитов инструментального назначения

на основе импактных алмазов и SiC в условиях высоких давлений и температур и изучение их структуры и свойств.

Исходные материалы и методики исследований.

В качестве основы нанокompозитов использовали порошок импактных алмазов Попигайского кратера зернистостью 100/63 мкм.

В качестве связующего применяли SiC марки M7 с зернистостью основной фракции 7 мкм, а также микропорошок кремния 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.

Термобарический синтез нанокompозитов проводили в аппарате высокого давления (АВД) типа «наковальня с лункой» при давлении 5,5 ГПа в диапазоне температур 1500–2000 °С в течение 30–60 с.

Изучение шлифов синтезированных нанокompозитов осуществляли на оптическом микроскопе «Микро-200» (ОАО «Планар», Беларусь). Морфологию поверхности и излома спеченных образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО «МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме. Рентгеновские исследования порошков выполнены на дифрактометре фирмы Bruker D8 ADVANCE в Cu-K α излучении в автоматическом режиме съемки. Микротвердость нанокompозитов определялась на микротвердомере ПМТ-3 алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 100 г.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания в 4-хлористом углеводе. Термостойкость материала определяли по степени графитизации композита в результате его термической обработки при определенных температурах.

Экспериментальная часть. Перед спеканием импактные алмазы механически дробили в стальной пресс-форме и затем просеивали через сито с размером ячейки 40 мкм. Далее формировали реакционную шихту на основе импактных алмазов и SiC путем их перемешивания в баночном смесителе с добавками (кремния, бора, а также сажи аморфной). После перемешивания в шихту добавляли связующее на основе 10-процентного водного раствора поливинилового спирта и прессовали образцы высотой 6 мм и диаметром 4,5 мм, которые отжигали при температуре 120 °С в течение 1 ч.

Спекание образцов осуществляли в специальных контейнерах на основе CaCO₃, которые размещались в аппарате высокого давления.

В результате термобарической обработки реакционной шихты были синтезированы образцы в виде цилиндрических компактов высотой $h = 5$ мм и диаметром $\varnothing = 3,5\text{--}4,0$ мм (рисунок 1). Исследовали структурные особенности образцов с различной концентрацией импактных алмазов: 50, 60, 70, 80 и 100 об.%.

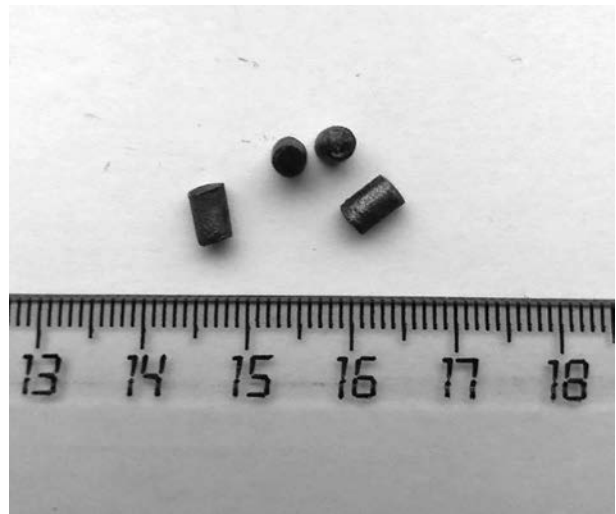


Рисунок 1 — Внешний вид образцов нанокompозита на основе импактных алмазов и SiC
Figure 1 — External view of nanocomposite samples based on impact diamonds and SiC

На рисунке 2 представлена структура поверхности шлифов образцов, спеченных с различной концентрацией импактных алмазов.

Анализ поверхности шлифов спеченных алмазных КМ показал, что введение добавок SiC и Si способствует снижению дефектности (визуально уменьшается количество крупных несплошностей в виде раковин и пор) и повышению однородности структуры КМ по сравнению с материалом без добавок (см. рисунок 2 *a–d*). Увеличение содержания связующего приводит также к инверсии типа структуры КМ от поликристаллической (без связки или с относительно небольшим ее содержанием, см. рисунок 2 *a–c*) до матричной (содержание АЛА составляет 45–60 об.%, см. рисунок 2 *d–f*).

Также показано, что добавка сажи аморфной влияет на измельчение структуры матрицы материала вследствие формирования вторичного мелкодисперсного карбида кремния при реакционном спекании, см. рисунок 2 *e–f*. При этом улучшается однородность структуры композита вследствие снижения в нем доли свободного кремния (см. рисунок 2 *c, e*). Добавки бора приводят к дополнительному диспергированию структуры связки, но при этом, вероятно, из-за образования карбида бора возрастает хрупкость материала.

На рисунке 3 представлены изображения поверхности изломов спеченных алмазных нанокompозитов, полученные методом АСМ.

На АСМ-изображениях видно, что зерна алмаза в спеченном материале имеют слоистую структуру, характерную для морфологии кристаллов импактного апографитового алмаза (параморфоз импактитов). Также в кристаллах алмаза хорошо различимы полосы (полосчатая структура), сформированные двойниками деформации. Структура спеченных нанокompозитов, содержащих импактные алмазы без добавок, характеризуется достаточно высокой субмикро- и микропористостью,

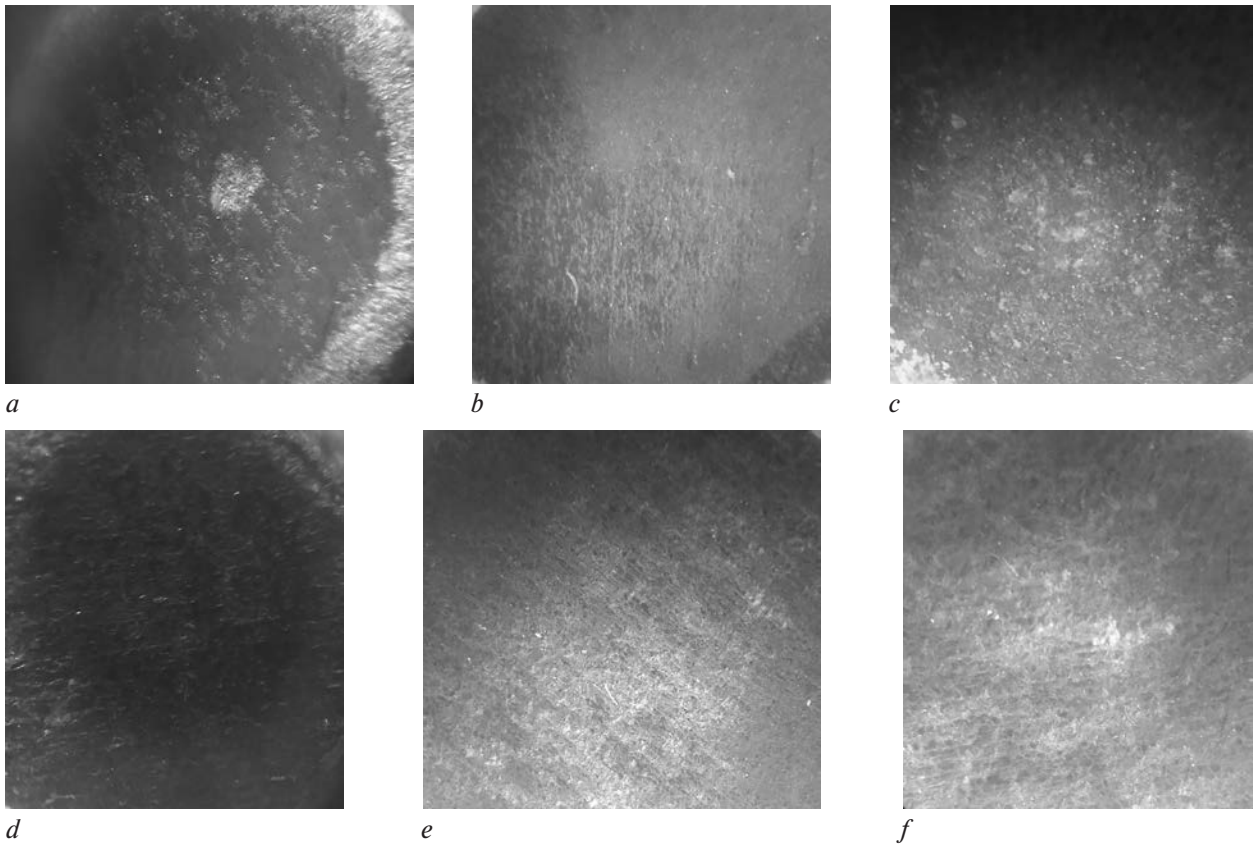


Рисунок 2 — Поверхность образцов нанокompозитов, спеченных под давлением 5,5 ГПа при температуре 1750 °С и времени 40 с, после шлифовки на алмазном круге AC4-AC6 125/100: *a* — АЛА 100 об.%; *b* — АЛА 80 об.%, SiC 17,5 об.%, Si 2,5 об.%; *c* — АЛА 70 об.%, SiC 16,24 об.%, Si 3,36 об.%; *d* — АЛА 60 об.%, SiC 36,6 об.%, Si 5,3 об.%; *e* — АЛА 45 об.%, SiC 45 об.%, Si 4 об.%, сажа 6 об.%; *f* — АЛА 45 об.%, SiC 45 об.%, Si 3,5 об.%, сажа 5,5 об.%, бор 1 об.%, $\times 50$

Figure 2 — Surface of nanocomposite samples sintered at a pressure of 5.5 GPa at a temperature of 1,750 °C and a time of 40 s, after grinding on a diamond ring AC4-AC6 125/100: *a* — diamond-lonsdaleite abrasive (DLA) 100 vol.%; *b* — DLA 80 vol.%, SiC 17.5 vol.%, Si 2.5 vol.%; *c* — DLA 70 vol.%, SiC 16.24 vol.%, Si 3.36 vol.%; *d* — DLA 60 vol.%, SiC 36.6 vol.%, Si 5.3 vol.%; *e* — DLA 45 vol.%, SiC 45 vol.%, Si 4 vol.%, soot 6 vol.%; *f* — DLA 45 vol.%, SiC 45 vol.%, Si 3.5 vol.%, soot 5.5 vol.%, boron 1 vol.%, $\times 50$

точечными и протяженными межзеренными (зернограничными) дефектами в виде несплошностей (щелей) и каверн.

Также установлено, что при данных условиях спекания в материале, в целом, сохраняется морфология алмазных зерен, характерная для исходных зерен импактного алмаза. Добавление связующего (SiC+Si) способствует снижению дефектности

материала вследствие уменьшения количества непосредственных контактов между алмазными зернами и срастания алмазных зерен с карбидокремниевой матрицей в процессе их спекания. При этом при заданных условиях термобарического спекания в материале (матрице на основе SiC и алмазе) не происходит укрупнения зеренной структуры за счет рекристаллизации.

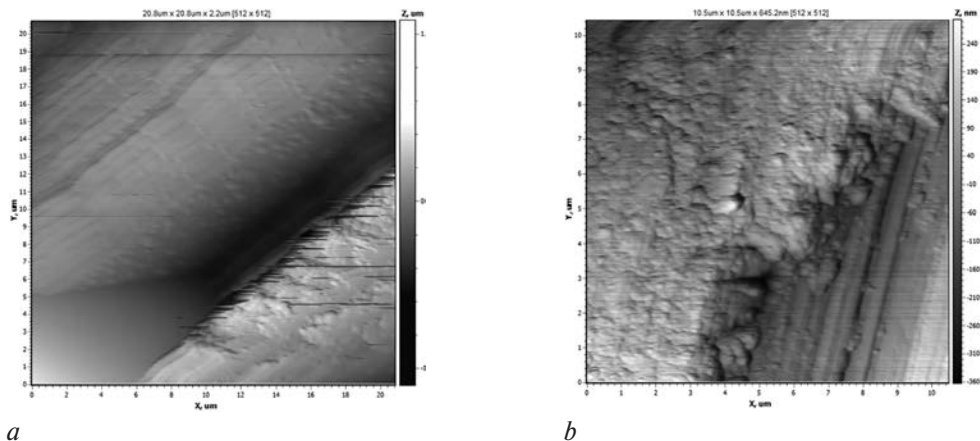


Рисунок 3 — Атомно-силовая микроскопия поверхности излома спеченных образцов: *a* — АЛА 100 об.%; *b* — АЛА 60 об.%, SiC 36,6 об.%, Si 5,3 об.%; **Figure 3** — Atomic force microscopy of the fracture surface of sintered samples: *a* — DLA 100 vol.%; *b* — DLA 60 vol.%, SiC 36.6 vol.%, Si 5.3 vol.%

В таблице 1 приведены составы, режимы синтеза и физико-механические характеристики полученных сверхтвердых наноконкомпозитов.

Анализ микротвердости и термостойкости полученных образцов материала позволяет сделать вывод, что достигнутый уровень физико-механических свойств алмазного наноконкомпозита позволяет использовать его в камнеобрабатывающем инструменте для обработки пород средней твердости [10].

Исследование влияние механоактивации на структуру и свойства наноконкомпозита. Изучали также влияние предварительной механоактивации (МА) порошка импактных алмазов и шихты на их основе на структурные характеристики материала после термобарического спекания.

Механическую активацию проводили в планетарной шаровой мельнице (ПШМ) «Активатор-2S» (г. Новосибирск, Россия), имеющей следующие технические характеристики: скорость вращения водила (импеллера)/барабана — 1090/2220 об/мин; объем барабана (камеры) — 250 см³; масса порошка/шаров — 10/200 г; энергонапряженность — 7 Вт/г.

На рисунке 4 показана структура поверхности шлифов образцов АЛА после МА и термобарического спекания.

Анализ поверхности алмазных КМ после МА и термобарического спекания АЛА и/или реакционной шихты на его основе показал существенное улучшение структуры спеченного материала. Так, для материала на основе 100% АЛА наблюдается отсутствие крупных макропор, его микропористость также существенно ниже. Дисперсность структуры КМ состава АЛА 60 об.%, SiC 36,6 об.%, Si 5,3 об.% также выше, чем для материала этого же состава, не прошедшего МА.

На АСМ изображениях рисунка 5 *a* видно, что после МА и термобарической обработки не наблюдается крупных зерен АЛА в спеченном КМ. В основном, структура КМ со связкой (см. рисунок 5 *b*) представлена зернами АЛА микронных размеров (в основном 3–5 мкм и менее) с четко выраженной субструктурой; частицы связки так-

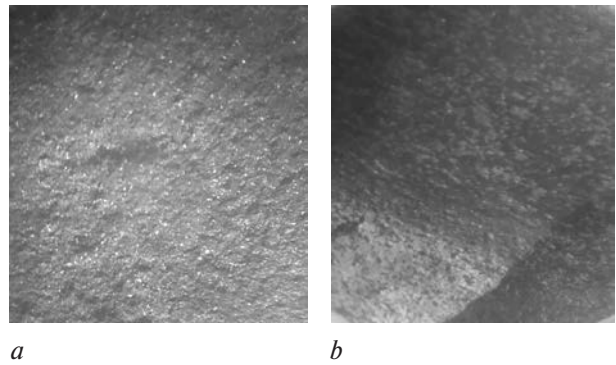


Рисунок 4 — Поверхность шлифованных образцов КМ после МА и термобарического спекания под давлением 5,5 ГПа, температуре 1750 °С и времени 40 с: *a* — АЛА 100 об.%; *b* — АЛА 60 об.%; SiC 36,6 об.%; Si 5,3 об.%; ×50

Figure 4 — Surface of ground samples of composite materials after mechanical activation and thermobaric sintering at a pressure of 5.5 GPa, a temperature of 1,750 °C and a time of 40 s: *a* — DLA 100 vol.%; *b* — DLA 60 vol.%; SiC 36.6 vol.%; Si 5.3 vol.%; ×50

же имеют размеры менее 1 мкм. В структуре материала присутствуют микро- и субмикропоры, но их количество существенно ниже, чем в КМ из не механоактивированной шихты.

На рисунке 6 *a, b* представлены рентгенограммы исходного порошка импактного алмаза АЛА и этого же порошка после механоактивации в планетарной мельнице. Фазовый и полуквантитативный анализ дифрактограмм выполнен в программном обеспечении EVA в объеме картотеки PDF-2 (Powder Diffraction File, International Centre for Diffraction Data).

Полуквантитативный анализ выполнен методом сравнения интенсивностей отражений пиков, сравниваемых фаз свободных от наложений. В случае наложения отражений от разных фаз, учитывается величина наложений за счет их разделения. Определение параметров кристаллической решетки, размеров кристаллитов выполнено в программном обеспечении TOPAS.

В процессе МА происходит снижение размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и алмаза, и лонсдейлита, уменьшается интенсивность

Таблица 1 — Состав шихты, режимы получения и свойства сверхтвердого наноконкомпозита на основе импактного алмаза и карбида кремния
Table 1 — Mixture composition, production modes and properties of superhard nanocomposite based on impact diamond and silicon carbide

№ п/п	Состав шихты, об.%					Режимы синтеза			Свойства наноконкомпозита			
	АЛА	SiC	Si	B	сажа	<i>P</i> , ГПа	<i>T</i> , °C	<i>t</i> , с	Пористость, %	Термостойкость, °C	Твердость матрицы HV, ГПа	Твердость СТМ HV, ГПа
1	100	—	—	—	—	5,5	1550	45	менее 5	~1240	—	32
2	90	10	—	—	—	5,5	1650	30	—	~1250	16	30
3	80	15	5	—	—	5,5	1700	45	—	~1260	18	65
4	70	20	10	—	—	5,5	1850	50	менее 1	~1270	22	55
5	60	37,5	—	1	1,5	5,5	1950	60	—	~1230	25	48,5
6	50	47,5	—	1,5	1	5,5	2000	45	—	~1200	27	40
7	50	47	—	1,5	1,5	5,5	2000	50	—	~1200	25	38
8	50	40	8	1	1	5,5	1900	60	—	~1240	24	45

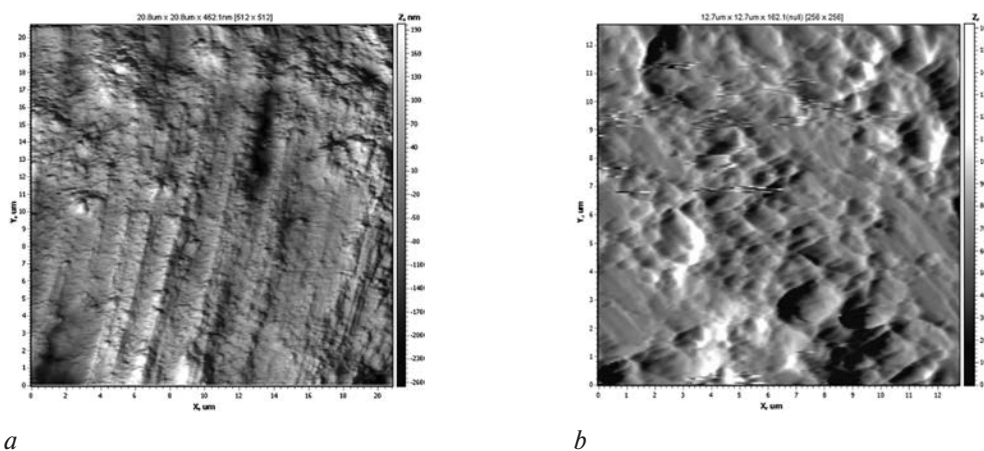


Рисунок 5 — Атомно-силовая микроскопия поверхности излома образцов после МА и спекания под давлением:

a — АЛА 100 об.%; *b* — АЛА 60 об.%; SiC 36,6 об.%; Si 5,3 об.%

Figure 5 — Atomic force microscopy of the fracture surface of samples after mechanical activation and pressure sintering:

a — DLA 100 vol.%; *b* — DLA 60 vol.%; SiC 36.6 vol.%; Si 5.3 vol.%

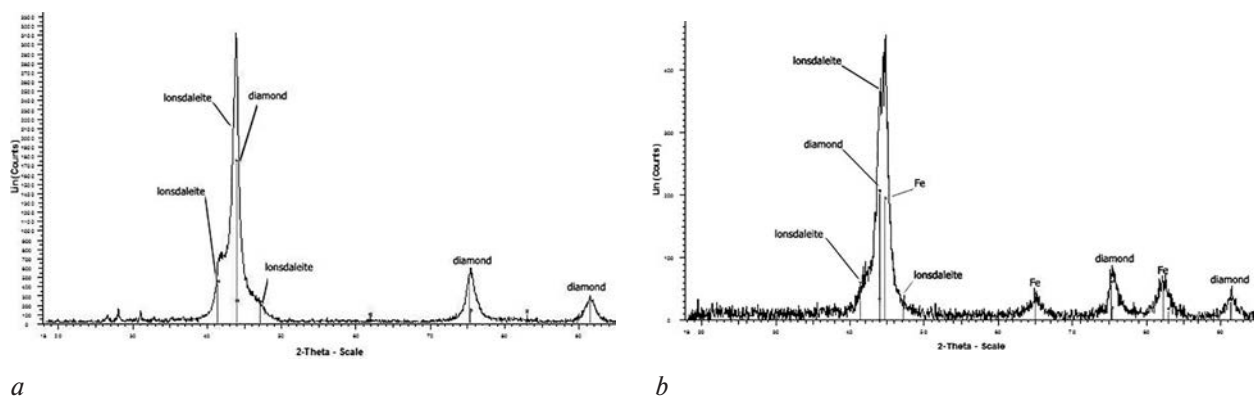


Рисунок 6 — Рентгенограмма порошка импактного алмаза до (*a*) и после (*b*) МА

Figure 6 — X-ray image of impact diamond powder before (*a*) and after (*b*) mechanical activation

линий алмаза и лонсдейлита (вследствие их диспергирования) по сравнению с интенсивностью линий и размерами ОКР алмаза и лонсдейлита в АЛА в состоянии поставки.

Результаты рентгеноструктурного анализа порошка импактных алмазов в состоянии поставки следующие. Фазовый состав: кубический алмаз — 66,1 об.%; гексагональный алмаз (лонсдейлит) — 33,9 об.%. Период кристаллической решетки кубического алмаза $a = 3,571 \text{ \AA}$, размер кристаллитов $L_c = 152 \text{ \AA}$.

Период кристаллической решетки гексагонального алмаза (лонсдейлита) $a = 2,502 \text{ \AA}$, $c = 4,144 \text{ \AA}$, размер кристаллитов $L_c = 80 \text{ \AA}$.

Результаты рентгеноструктурного анализа порошка импактных алмазов после механической активации в планетарной мельнице приведены ниже. Фазовый состав полученного материала: кубический алмаз — 38,2 об.%, гексагональный алмаз (лонсдейлит) — 21,8 об.%, железо (Fe) — 40,0 об.%. Период кристаллической решетки кубического алмаза: $a = 3,511 \text{ \AA}$, размер кристаллитов $L_c = 130 \text{ \AA}$. Период кристаллической решетки гексагонального алмаза (лонсдейлита): $a = 2,517 \text{ \AA}$, $c = 4,127 \text{ \AA}$, размер кристаллитов $L_c = 90 \text{ \AA}$. Период кристаллической решетки

Fe — $a = 2,869 \text{ \AA}$, размер кристаллитов Fe — $L_c = 60 \text{ \AA}$.

На рисунке 7 представлена рентгенограмма КМ состава АЛА+SiC+Si после механоактивации в планетарной мельнице и термобарического спекания.

Был выполнен анализ фазового состава КМ после термобарического спекания: алмаз — 13,4 об.%; алмаз (лонсдейлит) — 14,2 об.%; SiC — 29,1 об.%; Si — 3,2 об.%; оксид кремния (SiO_2) — 15,7 об.%; Fe — 24,5 об.%.
 Fe — $a = 2,869 \text{ \AA}$, размер кристаллитов Fe — $L_c = 60 \text{ \AA}$.

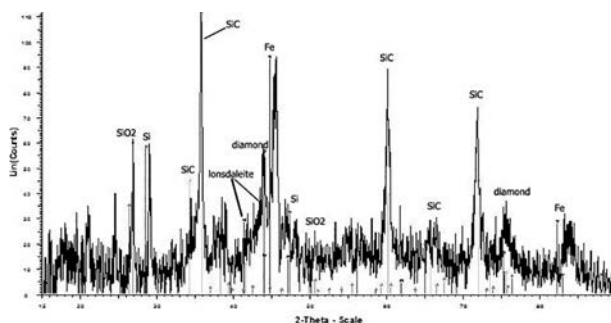


Рисунок 7 — Фазовый анализ компакта из смеси порошков импактного алмаза, кремния, карбида кремния после МА и термобарического спекания

Figure 7 — Phase analysis of a compact made from a mixture of powders of impact diamond, silicon, and silicon carbide after mechanical activation and thermobaric sintering

Таблица 2 — Состав шихты, режимы получения и свойства композиционного материала
Table 2 — Mixture composition, production modes and properties of the composite material

№ п/п	Состав шихты, об. %				Режимы получения			Свойства композита			
	Импактный алмаз	SiC	Si	B	P , ГПа	T , °C	t , с	Пористость, %	Термостойкость, °C	Твердость матрицы HV, ГПа	Твердость СТМ HV, ГПа
1	80	17,5	2,5	—	5,5	1900	60	менее 1	~1270	19,3	62,7
2	70	16,3	3,36	—	5,5	1900	60	менее 1	~1270	18,9	52,9
3	60	36,6	5,3	1	5,5	1900	60	менее 1	~1270	22,0	49,5

При этом снижение интенсивности линий лонсдейлита в процессе термобарического спекания обусловлено его метастабильностью и частичным переходом в алмаз (см. рисунок 6 а и рисунок 7).

После МА и спекания осуществляли измерения твердости образцов.

Было синтезировано 3 группы экспериментальных образцов в количестве 20 шт. каждая в виде цилиндрических компактов высотой $h = 5-6$ мм и диаметром $\varnothing = 3,5-4,0$ мм. Средние значения контролируемых параметров каждой группы образцов и режимы их получения представлены в таблице 2.

Из полученных данных видно, что предварительная механоактивация шихты приводит к структурным изменениям в синтезированном материале по сравнению с материалом, полученным без использования механоактивации. При этом также возрастает твердость полученных при сравнимых режимах синтеза образцов, что связано как с формированием мелкозернистой структуры, так и с фазовым превращением лонсдейлита в алмаз.

Выводы. В результате проведенной работы было показано, что введение в состав реакционной шихты добавок карбида кремния и кремния способствует снижению дефектности и повышению однородности структуры синтезированного материала по сравнению с нанокompозитами, полученными без добавок. Увеличение содержания связующего приводит к инверсии типа структуры нанокompозита от поликристаллической к матричной.

Добавка сажи аморфной влияет на измельчение структуры матрицы КМ вследствие формирования вторичного мелкодисперсного SiC в процессе реакционного спекания под давлением. При этом улучшается однородность структуры КМ вследствие снижения доли свободного кремния в материале. Добавки бора приводят к дополнительному диспергированию структуры связи, но при этом возрастает хрупкость материала из-за образования карбида бора.

Показано, что в ходе термобарического спекания при давлении 5,5 ГПа в температурном интервале 1500–2000 °C в карбидокремниевой матрице и алмазе не происходит укрупнения зеренной структуры вследствие рекристаллизации.

Предварительная механоактивация приводит к структурным изменениям как в исходной реакционной шихте, так и в синтезированном на ее основе материале, по сравнению с КМ, полученном из не механоактивированной шихты. В процессе МА происходит уменьшение размеров ОКР как алмаза, так и лонсдейлита вследствие их диспергирования по сравнению с ОКР указанных фаз АЛА в исходном состоянии.

Установлено, что материал, синтезированный из реакционной шихты после МА, обладает более высокой твердостью по сравнению с нанокompозитами, полученными при одинаковых режимах термобарической обработки из шихты, не прошедшей механоактивацию. Это связано как с формированием более мелкозернистой структуры нанокompозита, так и с фазовым превращением лонсдейлита в кубический алмаз в зернах АЛА.

Анализ значений микротвердости и термостойкости полученных образцов позволяет сделать вывод, что достигнутый уровень физико-механических параметров алмазного нанокompозита позволяет использовать его в камнеобрабатывающем инструменте для обработки пород средней твердости.

Список литературы

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Г.П. Богатырева [и др.]; под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2014. — 607 с.
2. Витязь, П.А. Алмазные и углеродсодержащие композиционные материалы и покрытия: получение, свойства, применение / П.А. Витязь, В.Т. Сенють, В.П. Афанасьев // Материалы II Междунар. конф. молодых ученых, работающих в области углеродных материалов: сб. тез. докл., г. Москва, г. Троицк, 29–31 мая 2019 г. — М., 2019. — С. 74–75.
3. Афанасьев, В.П. Попигайские 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.
4. Получение методом термобарического спекания композитов на основе алмаза и КНБ, модифицированных Si и SiC / В.Т. Сенють [и др.] // Порошковая металлургия. — Минск: Беларус. навука. — 2015. — Вып. 38. — С. 142–150.
5. Жорник, В.И. Модельные представления процесса структурообразования поликристаллического сверхтвердого материала с бимодальной структурой на основе модифицированных алмазных порошков / В.И. Жорник, А.М. Парницкий, В.Т. Сенють // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 3(44). — С. 83–91.
6. Synthesis of nanostructured composite material based on nanodiamonds modified by silicon / V.T. Senyut [et al.] // Materials

- Today: Proceedings. — 2018. — Vol. 5, Iss. 12. — Part 3. — Pp. 26 018–26 024.
7. Влияние армирующих добавок и температуры силицирования на структуру и некоторые свойства реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / А.Ф. Ильюшенко [и др.] // Порошковая металлургия. — Минск: Беларуская навука. — 2015. — Вып. 38. — С. 132–141.
 8. Состояние и перспективы работ по карбидокремниевой керамике в Институте порошковой металлургии / А.Ф. Ильюшенко [и др.] // Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени; под ред А.Ф. Ильюшенко [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2017. — С. 193–200.
 9. Витязь, П.А. Синтез поликристаллических сверхтвердых материалов из модифицированных наноалмазов / П.А. Витязь, В.Т. Сеньют, М.Л. Хейфец // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2016. — № 3. — С. 5–10.
 10. Берлин, Ю.Я. Обработка строительного декоративного камня: учеб. пособие для профтехучилищ / Ю.Я. Берлин, Ю.И. Сычев, И.Я. Шалаев. — Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1979. — 232 с.

VITYAZ Petr A., D. Sc. in Eng., Prof., Academician of the NAS of Belarus

Head of the Apparatus of the NAS of Belarus¹

E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

SENYUT Vladimir T., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher²

E-mail: vsenyut@tut.by

ZHORNİK Viktor I., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department of Mechanical Engineering and Metallurgy — Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials²

E-mail: zhornik@inmash.bas-net.by

VALKOVICH Igor V.

Researcher²

E-mail: valigvl@rambler.ru

KOVALIOVA Svetlana A.

Senior Researcher²

E-mail: sveta_kovaleva@tut.by

MOSUNOV Evgeniy I.

Senior Researcher²

E-mail: emosunov@rambler.ru

AFANASYEV Valentin P., D. Sc. in Geology and Mineralogy

Chief Researcher of the Laboratory of Lithospheric Mantle and Diamond Deposits³

E-mail: avp-diamond@mail.ru

¹Presidium of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia

Received 16 July 2020.

SYNTHESIS OF THE NANOCOMPOSITE BASED ON IMPACT DIAMONDS AND SILICON CARBIDE UNDER CONDITIONS OF HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE

The article studies the structure, phase composition and physicomechanical characteristics of the nanocomposite based on impact diamonds. It is shown that the additions of a binder based on SiC and Si lead to reduction of the defectiveness of the nanocomposite and increase in the uniformity of its structure compared to the material without additives. Moreover, increase in the binder content also leads to the inversion of the structure type of the nanocomposite from polycrystalline to matrix. It is established that the addition of amorphous carbon black and boron affects the refinement of the nanocomposite matrix structure due to the formation of secondary fine-dispersed nanostructured SiC and boron carbide. Preliminary mechanical activation of the reaction mixture leads to structural changes in the synthesized material in comparison with the material obtained without the use of mechanical activation. In this case, the hardness of the samples obtained under comparable synthesis modes

increases, which is associated both with the formation of a fine-grained structure of the material and with the phase transformation of lonsdaleite to diamond. An analysis of the microhardness and heat resistance of the obtained samples makes it possible to conclude that the achieved level of physicomechanical parameters of the diamond nanocomposite allows it to be used in a stone-processing tool for treating medium hard rocks.

Keywords: nanocomposite, synthesis, impact diamonds, high pressure and temperature, silicon carbide, mechanical activation

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-4-53-43-51>

References

1. Bogatyreva G.P., et al. *Instrumenty iz sverkhтвердых материалов* [Tools made of superhard materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2014. 607 p. (in Russ.).
2. Vityaz P.A., Senyut V.T., Afanasyev V.P. Almaznye i uglerodso-dержashchie kompozitsionnye materialy i pokrytiya: poluchenie, svoystva, primeneniye [Diamond and carbon-containing composite materials and coatings: production, properties, application]. *Materialy 2 Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchennykh, rabotayushchikh v oblasti uglerodnykh materialov* [Proc. 2nd International conference of young scientists working in the field of carbon materials]. Moscow, Troitsk, 2019, pp. 74–75 (in Russ.).
3. Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P. Popigayskie impaktnye almazy: novoe rossiyskoe syre dlya sushchestvuyushchikh i budushchikh tekhnologiy [Popigay impact diamonds: new Russian raw materials for existing and future technologies]. *Innovatics and expert examination*, 2013, iss. 1(10), pp. 8–15 (in Russ.).
4. Senyut V.T., Zhornik V.I., Valkovich I.V., Parnitsky A.M., Kovaliova S.A., Mosunov E.I., Markova L.V., Gamzeleva T.V. Poluchenie metodom termobaricheskogo spekaniya kompozitov na osnove almaza i KNB, modifitsirovannykh Si i SiC [Obtaining by the method of thermobaric sintering composites based on diamond and CBN modified with Si and SiC]. *Powder Metallurgy*, 2015, iss. 38, pp. 142–150 (in Russ.).
5. Zhornik V.I., Parnitsky A.M., Senyut V.T. Modelnye predstavleniya protsessa strukturoobrazovaniya polikristallicheskogo sverkhтвердого материала s bimodalnoy strukturoy na osnove modifitsirovannykh almaznykh poroshkov [Model representations of the process of structure formation of polycrystalline superhard material with a bimodal structure based on modified diamond powders]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 3(44), pp. 83–91 (in Russ.).
6. Senyut V.T., Vityaz P.A., Valkovich I.V., Parnitsky A.M., Rzhetsky V.A. Synthesis of nanostructured composite material based on nanodiamonds modified by silicon. *Materials today: proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 12, part 3, pp. 26018–26024.
7. Ilyushchenko A.F., Osipov V.A., Zvonarev E.V., Vitko Zh.A., Babura D.V. Vliyaniye armiruyushchikh dobavok i temperatury na strukturu i nekotorye svoystva reaktsionno-svyazannoy keramiki na osnove karbida kremniya [Influence of reinforcing agents and siliconization temperature on the structure and certain properties of reaction-bonded ceramics based on silicon carbide]. *Powder Metallurgy*, 2015, iss. 38, pp. 132–141 (in Russ.).
8. Ilyushchenko A.F., Mironovich G.A., Osipov V.A., Zvonarev E.V. Sostoyaniye i perspektivy rabot po karbidokremnievoy keramike v Institute poroshkovoy metallurgii [State and prospects of work on silicon carbide ceramics at the Institute of Powder Metallurgy]. *Powder metallurgy in Belarus: challenges of time*, 2017, pp. 193–200 (in Russ.).
9. Vityaz P.A., Senyut V.T., Kheifetz M.L. Sintez polikristallicheskikh sverkhтвердых материалов iz modifitsirovannykh nanoalmazov [Synthesis of polycrystalline superhard materials from modified nanodiamonds]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 3, pp. 5–10 (in Russ.).
10. Berlin Yu.Ya., Sychev Yu.I., Shalaev I.Ya. *Obrabotka stroitel'nogo dekorativnogo kamnya* [Processing of construction and decorative stone]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1979. 232 p. (in Russ.).