

УДК 621.762:621.921.34

**В.И. ЖОРНИК**, д-р техн. наук, доц.заместитель начальника отдела технологий машиностроения и металлургии — заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов<sup>1</sup>

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

**А.М. ПАРНИЦКИЙ**младший научный сотрудник лаборатории наноструктурных сверхтвердых материалов<sup>1</sup>

E-mail: europacorp@tut.by

**В.Т. СЕНЮТЬ**, канд. техн. наукведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов<sup>1</sup>

E-mail: vsenyut@tut.by

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 09.07.2018

## МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СВЕРХТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА С БИМОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛМАЗНЫХ ПОРОШКОВ

*Представлена физическая модель процесса структурообразования поликристаллического сверхтвердого материала с бимодальной структурой на основе микро- и нанопорошков алмаза, подвергнутых предварительному модифицированию карбидообразующими элементами. Предложенные модельные представления процессов структурообразования в алмазных компактах позволяют понять механизм формирования их внутреннего строения и спрогнозировать уровень обеспечиваемых физико-механических свойств. Показано, что в процессе термобарического спекания модифицированных кремнием и бором алмазных порошков образуется высокоплотный сверхтвердый поликристаллический материал, который состоит из зерен микропорошка алмаза, по границам которого формируется связующее на основе карбидов кремния и бора, упрочненное частицами наноалмаза.*

**Ключевые слова:** физическая модель, алмазные микро- и нанопорошки, модифицирование, термобарическая обработка, бимодальная структура

**Введение.** Физико-механические свойства композиционных материалов на основе алмазных порошков существенным образом зависят от фазового состава, дисперсности и особенностей взаимодействия компонентов шихты. Как правило, спекание таких материалов проводят при высоких давлениях в области термодинамической стабильности алмаза. Наличие в сверхтвердой матрице наноструктурных тугоплавких карбидов, боридов, нитридов и др. позволяет повысить пластичность композита, затормозить процессы рекристаллизации и обратного фазового превращения «алмаз — графит».

Для прочного связывания зерен алмаза в композите необходимо, чтобы связка имела хорошую адгезию с поверхностью алмаза. Как показано в [1], смачивание алмаза наблюдается в том случае, если расплавленный металл интенсивно реагирует с углеродом и образует карбиды. Таким образом, в качестве эффективной связки при спекании алмазных поликристаллов могут выступать карбидообразующие элементы в чистом

состоянии или в составе сплава или химического соединения.

Кремний традиционно используется как активирующая спекание алмаза добавка, поскольку он обладает хорошей жидкотекучестью, в расплавленном состоянии интенсивно реагирует с углеродом с образованием тугоплавкого карбида, обладающего низким коэффициентом термического расширения и высокой твердостью. Бор обладает сродством к углероду и адсорбирует кислород, что способствует лучшей уплотняемости в процессе термобарического спекания алмаза [2]. Предполагается, что введение добавок кремния и бора в шихту на основе порошков алмаза и кубического нитрида бора (КНБ) приведет к формированию химических соединений в системе В-N-C-Si при термобарической обработке, способствующих консолидации зерен сверхтвердых материалов при более низких параметрах термобарического спекания.

Известно [3], что микротвердость и трещиностойкость сверхтвердых композитов на осно-

ве КНБ с мультимодальной структурой выше на 30–40 %, чем у материалов, спеченных из микропорошков КНБ одной зернистости. Повышенные прочностные характеристики разрабатываемого поликристаллического сверхтвердого алмазного материала при достижении высокой пластичности также могут быть реализованы за счет формирования в нем бимодальной структуры. При этом структурной основой такого композиционного материала являются микрочернистые порошки алмаза (или смеси алмаза и КНБ), а использование ультрадисперсных алмазных порошков (УДА-порошков или порошков наноалмаза) как активатора спекания направлено на формирование мелкодисперсной карбидной сетки, обеспечивающей высокую когезионную прочность алмазного композита при более низких параметрах спекания.

В связи с этим целью работы является разработка модельных представлений процесса структурообразования поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) с бимодальной структурой на основе модифицированных микро- и нанопорошков алмаза и микропорошка КНБ.

**Оборудование, методика и объекты исследования.** В качестве исходных материалов использовались порошок УДА производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск) с размером частиц 4–10 нм (ТУ РБ 28619110.001-95), модифицированный бором [4], микропорошок алмазов статического синтеза АСМ 14/10 производства ЗАИ ПО «Кристалл» (г. Гомель) с размером частиц 0,5–20 мкм (ГОСТ 9206-80), модифицированный кремнием, и микропорошок КНБ с размерами частиц 5–7 мкм. [5].

Модифицирующий отжиг алмазных порошков различных типов осуществлялся в герметичном контейнере под плавким затвором в восстановительной атмосфере диссаммиака, содержащей хлориды соответствующих соединений, в температурном интервале 800–950 °С при изотермической выдержке в течение 1–4 часов. Термобарическую обработку шихты выполняли в аппарате высокого давления (АВД) типа «наковальня с лункой» в диапазоне давлений 5,5–7,5 ГПа при температуре от 1650 до 2100 °С. Средой, передающей давление, служил контейнер из литографского камня, внутри которого помещался трубчатый графитовый нагреватель с исследуемым материалом. Для оценки давления в камере синтеза использовали метод калибровки при комнатной температуре, основанный на сопоставлении усилия пресса и давления полиморфного превращения в реперном веществе, в качестве которых использовались Вi и PbSe. Контроль температуры проводился с помощью хромель-алюмелевой и платина-платинородиевой термопар.

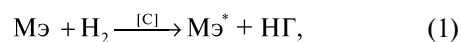
Критериями качества спекаемых композитов являлись микротвердость и трещиностойкость

исследуемых образцов, определяемые с помощью микротвердомера ПМТ-3. Измерения микротвердости осуществлялись по ГОСТ 9450-76 при нагрузке 200 г. Погрешность измерений составляла ±5 %. Определение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , характеризующего трещиностойкость спеченных композитов, выполнялось в соответствии с [6].

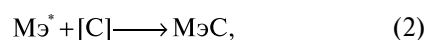
**Обсуждение полученных результатов.** Процесс модифицирования микропорошков алмаза кремнием, аналогично работам [5, 7, 8], проводили путем их высокотемпературного отжига в парах кремнийсодержащих соединений. В основу технологии модифицирования положен процесс химико-термической обработки в атмосфере диссоциированного аммиака с участием галогенида (хлорирующего реагента). Механизм транспортных реакций при этом включает в себя несколько стадий: обработку модифицирующего элемента (Мэ) галогенидом (НГ); транспорт Мэ к поверхности осаждения; адсорбцию Мэ и водорода на поверхности; химическую реакцию между адсорбированными веществами (Мэ + Н<sub>2</sub>) с НГ; диффузию модифицирующего элемента в глубь алмазного зерна, частицы.

Стадийность протекания газотранспортных реакций с участием хлорирующего реагента можно представить следующим образом:

- хлорирование модифицирующего элемента по схеме  $M\ddot{e} + H\dot{G} \rightarrow M\ddot{e}G + H_2$ ;
- транспорт и адсорбция Мэ и Н<sub>2</sub> на поверхность осаждения (алмаза);
- реакция замещения между адсорбированными веществами



а процесс карбидообразования протекает по реакции присоединения:



где Мэ — модифицирующий элемент покрытия (Si, В); НГ — галогенид (в данном случае НСl); [С] — зерна, частицы алмаза (поверхность осаждения); Мэ\* — атомарный модифицирующий элемент, формирующий покрытие на поверхности алмаза.

Проведенные исследования [7, 8] позволили обосновать высокую эффективность процессов, основанных на газофазном осаждении из хлорсодержащих сред карбидообразующих элементов. Реализация процесса модифицирования может осуществляться в электропечи без применения дорогостоящего вакуумного оборудования с возможностью получения высококачественных покрытий из широкого круга карбидообразующих элементов, базирующегося на образовании химических соединений в системе «алмаз — материал покрытия». На поверхности модифицированного алмазного порошка при термомодеформационной обработке образуется карбидная пленка.

Модель формирования поликристаллического композиционного сверхтвёрдого материала (ПКСТМ) состава «модифицированный кремнием микропорошок алмаза + кубический нитрид бора» (АСМ(Si) + КНБ) может быть рассмотрена исходя из этапов технологии, представленной на рисунке 1.

В процессе модифицирования микропорошков алмаза кремнием последний адсорбируется на поверхности алмазных зерен в виде частиц каплевидной формы размерами 100–200 нм, которые в процессе роста объединяются в пленку, частично либо полностью покрывающую алмаз (рисунок 2).

Последующее термобарическое спекание модифицированного кремнием алмазного микропорошка проводилось при давлении 5,5 ГПа и различных температурах. Спеченный композиционный материал характеризуется однородной структурой, при этом связка в виде прослоек карбида кремния равномерно распределена между алмазными зёрнами и имеет хорошую адгезию с поверхностями частиц алмаза, пор на поверхности излома не наблюдается (рисунок 3).

Однако увеличение продолжительности изотермической выдержки и повышение температуры спекания образцов приводит к росту зерна и графитизации алмаза, что проявляется в некотором снижении трещиностойкости и микротвёрдости (таблица 1).

Получение беспористого поликристаллического материала на основе микропорошка алмаза возможно при использовании больших давлений (более 8 ГПа), однако это не всегда экономически оправдано, поскольку в этом случае достаточно быстро выходит из строя оснастка АД. Для повышения физико-механических характеристик поликристаллического материала необходимо, с одной стороны, добиваться повышения плотности исходной заготовки (прессовки), а с другой — интенсифицировать процесс уплотнения при относительно невысокой температуре спекания.

Одним из технологических приемов, позволяющих добиться лучшей уплотняемости и спекаемости алмазного материала, является использование добавок наноалмазов (УДА) в исходную

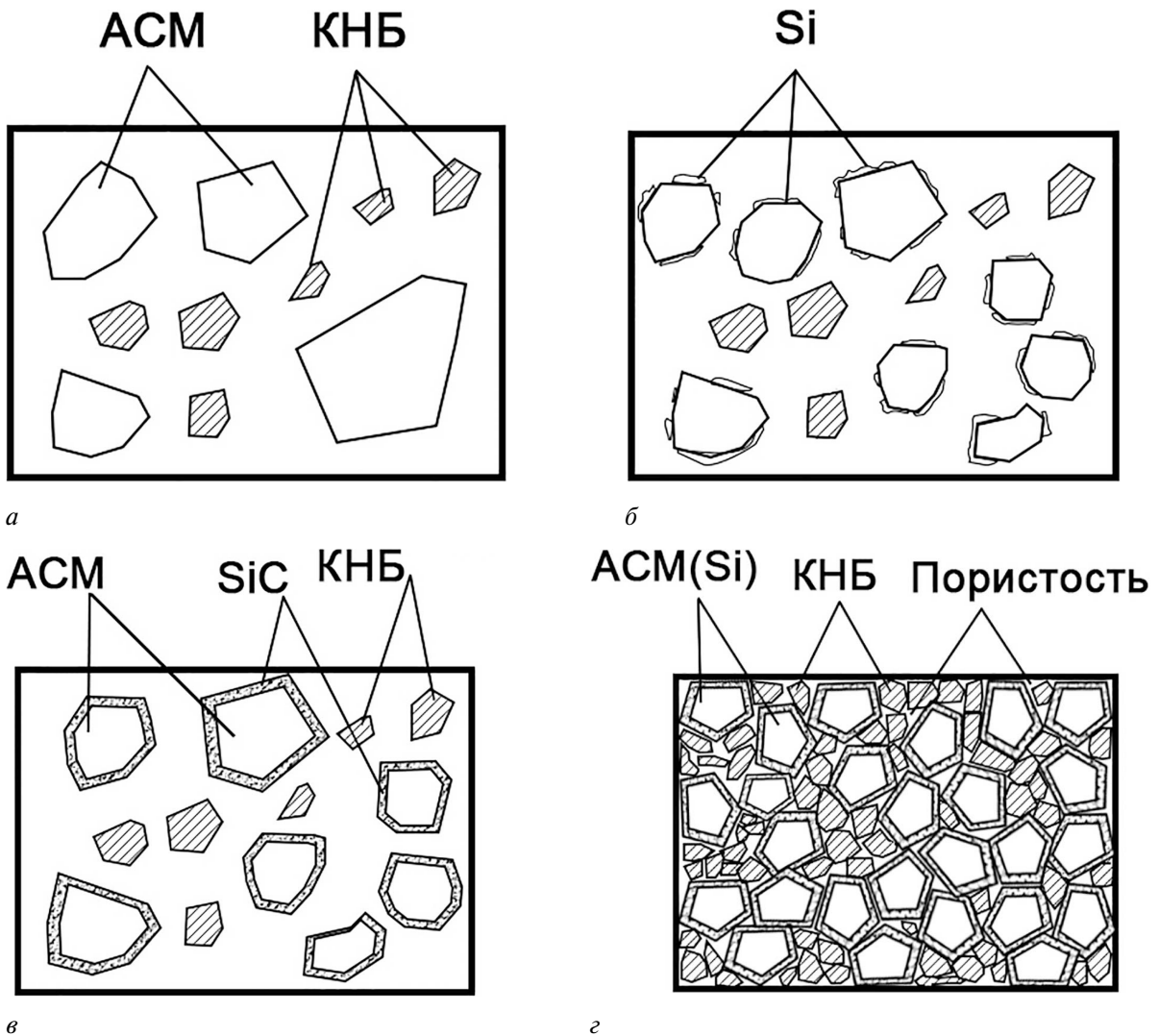
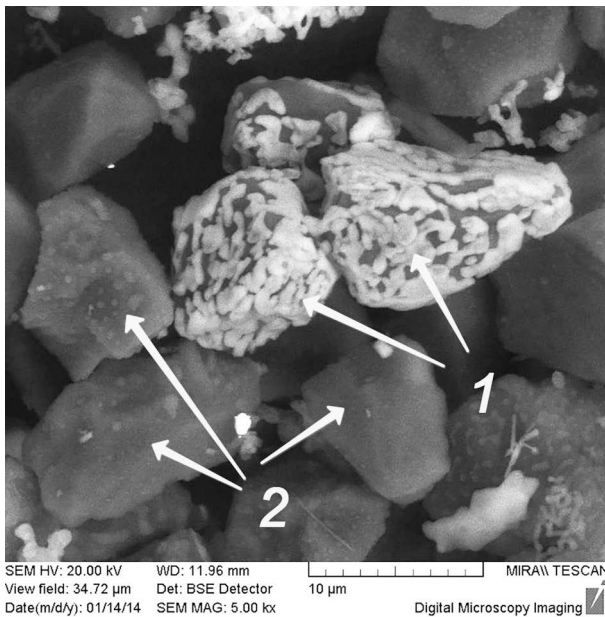
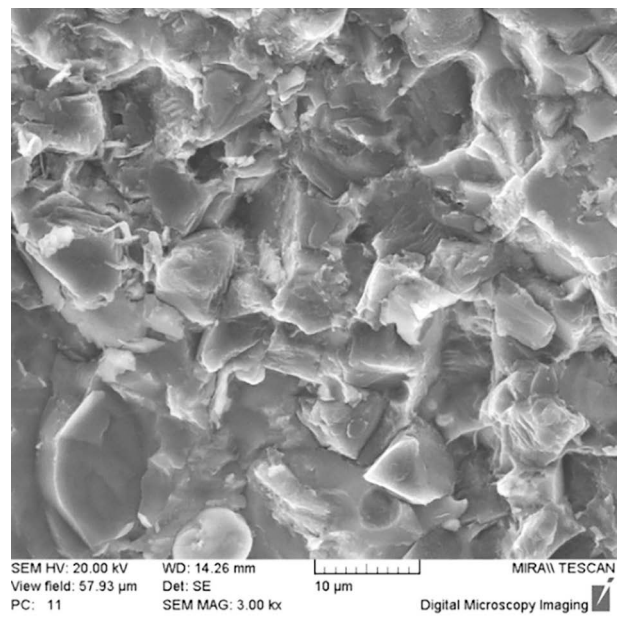


Рисунок 1 — Стадийность процесса формирования структуры композита состава АСМ(Si) + КНБ: а — исходные порошки АСМ и КНБ; б — химико-термическое модифицирование алмаза карбидом кремния; в — формирование пленки SiC на поверхности алмаза; г — спеченный ПКСТМ состава АСМ(Si) + КНБ



**Рисунок 2** — Внешний вид алмазных зерен АСМ 14/10 после модифицирования кремнием: 1 — зерна, покрытые кремнием; 2 — зерна без кремниевого покрытия



**Рисунок 3** — Морфология излома композита состава АСМ(Si) + КНБ после спекания при следующих режимах:  $T = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 5,5\text{ ГПа}$ ;  $t = 15\text{ с}$  [9]

реакционную шихту. Введение в состав исходной шихты, содержащей частицы микропорошков алмаза, добавки в виде нанопорошков алмаза, характеризующейся высокой удельной поверхностью и поверхностной энергией, а также модифицирование микро- и нанопорошков алмаза карбидообразующими элементами, позволяет снизить уровень режимов спекания (температура, давление, продолжительность) и сформировать более мелкодисперсную структуру поликристаллического сверхтвёрдого материала с повышенными физико-механическими характеристиками (плотность, твердость, трещиностойкость) [4, 10]. Использование наноалмазов (УДА) детонационного синтеза, обладающих высокой удельной поверхностью и повышенным количеством дефектов, также способствует лучшей спекаемости разрабатываемого материала [11].

Модифицирование УДА-порошка может реализовываться методом химико-термической обработки путем его отжига в защитной или вос-

становительной атмосфере с диффузионным насыщением поверхностного слоя частиц порошка различными элементами из газовой фазы. Для изменения структурно-фазового состава поверхности наноалмазов может применяться также высокотемпературный отжиг в условиях вакуума [12].

Приведенные в работах [13, 14] результаты исследований, а также данные других авторов, например [15], показывают, что модифицирование УДА-порошка в ряде случаев позволяет повысить его прессуемость, что способствует повышению свойств поликристаллических алмазных материалов, получаемых спеканием под давлением. В частности, показано, что модифицирование УДА-порошка бором наиболее эффективно с точки зрения улучшения его прессуемости, повышения стойкости против графитизации при спекании в условиях высоких давлений и температур. В данной работе химико-термическую обработку УДА-порошка проводили в атмосфере паров трихлорида бора при температуре  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Транс-

**Таблица 1** — Режимы спекания и свойства ПКСТМ состава АСМ(Si) + КНБ

Режим термобарической обработки			Показатели качества	
Температура спекания, $^{\circ}\text{C}$	Давление, ГПа	Продолжительность спекания, с	Коэффициент трещиностойкости, $K_{1c}$ , МПа $\cdot$ м $^{1/2}$	Микротвердость, ГПа
1800	5,5	15	5,6	51,2
1900	5,5	15	5,8	53,4
2000	5,5	15	5,4	55,2
2000	5,5	30	5,6	54,2
2100	5,5	15	5,4	52,2

порт элементов осуществлялся через газовую фазу с последующим разложением на поверхности наноалмазов трихлорида бора. В процессе спекания под давлением бор взаимодействует с углеродом с образованием карбида бора, который является высокотвердым тугоплавким химическим соединением и может служить связующим для алмазной керамики на основе УДА. Использование модифицированных УДА-порошков позволяет добиться равномерного распределения образовавшихся тугоплавких карбидов в спеченном материале. Кроме того, вследствие своих каталитических свойств бор, также как и металлы-катализаторы, снижает  $P$ -,  $T$ -условия фазового превращения «графит — алмаз», но при этом термостойкость таких поликристаллов существенно выше.

Схематично процесс формирования ПКСТМ состава «модифицированный кремнием микропорошок алмаза + модифицированный бором на-

ноалмаз» (АСМ(Si) + УДА(В)) можно представить состоящим из следующих этапов (рисунок 4):

1. Предварительная подготовка алмазных порошков (возможны рассеивание, сушка, аттриционная обработка и др.).

2. Химическое модифицирование алмазных порошков с формированием карбидных пленок на поверхности алмаза.

На стадии газовой фазы химического модифицирования осуществляется удаление с поверхности частиц влаги, кислородсодержащих соединений, а также нанесение на поверхность частиц активаторов спекания и компонентов связующего. Модифицирование осуществляется в атмосфере дисаммиака или эндогаза в диапазоне температур 800–950 °С, продолжительность выдержки на заданной температуре составляет 2–4 часа.

Для модифицирования порошков алмаза в качестве карбидообразующих элементов использу-

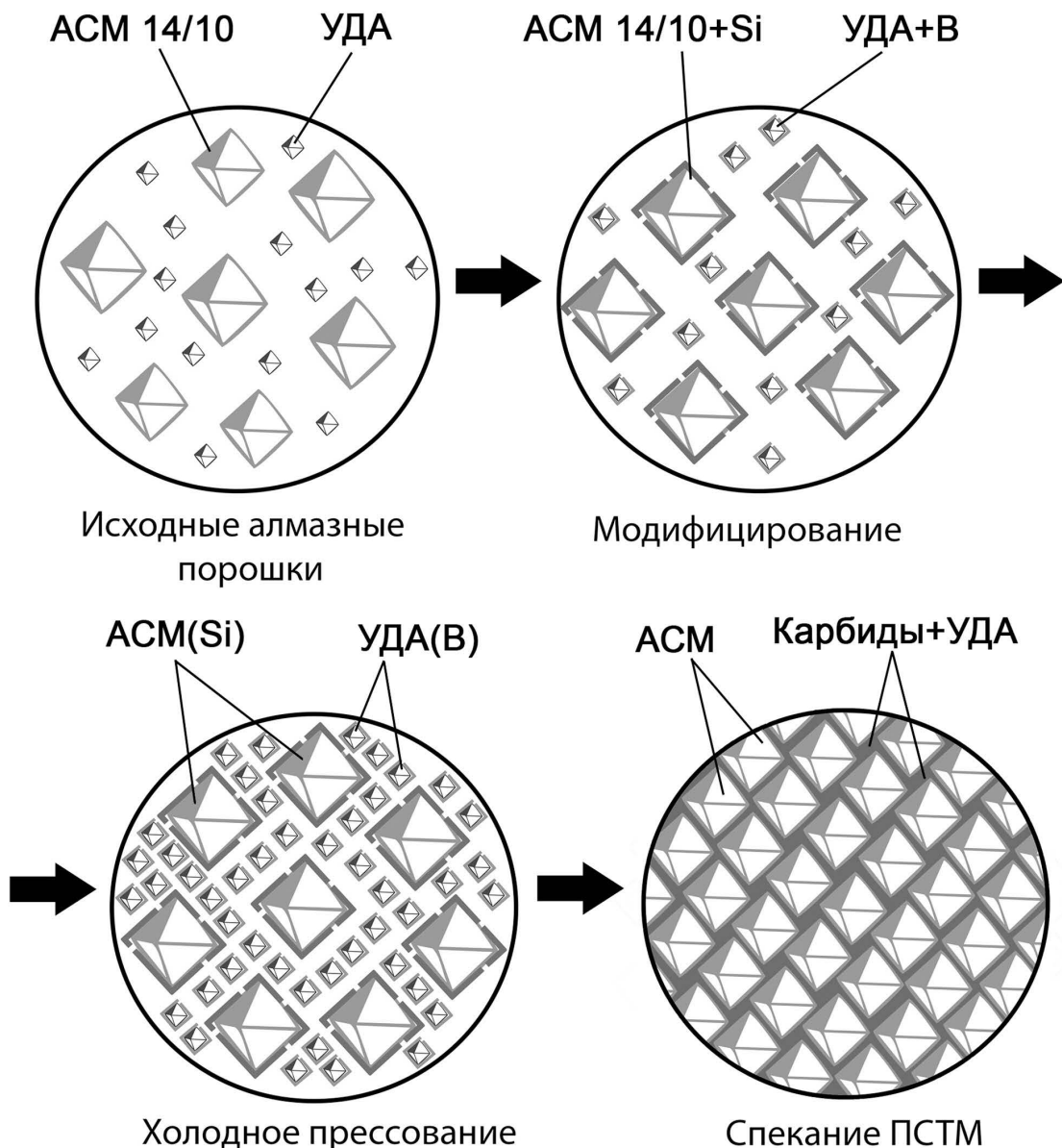


Рисунок 4 — Структурная схема процесса формирования ПКСТМ состава АСМ(Si) + УДА(В)

ются бор и кремний в количестве 10–15 масс.%, при этом для микроразмерного алмазного порошка осуществляется модифицирование поверхности частиц кремнием, а для наноразмерного — бором.

3. Приготовление смеси модифицированных микро- и нанопорошков алмаза и холодное прессование заготовок для термобарического спекания.

Смешивание модифицированных алмазных микро- и нанопорошков в определенных пропорциях (концентрация добавки УДА-порошка составляет 17–22 масс.%) производят в смесителе. Затем из полученной шихты осуществляют развешивание навесок исходя из размеров заготовок, прессуют заготовки необходимой формы и размеров. Давление холодного прессования составляет 200–250 МПа.

4. Термобарическая обработка прессовки из модифицированных микро- и нанопорошков алмаза в условиях высоких давлений и температур.

В процессе термобарического спекания в диапазоне температур 1875–1925 °С при давлении 6,2–6,7 ГПа происходит образование прочных межзеренных связей в алмазосодержащем композите за счет процессов пластической деформации материала, химического взаимодействия карбидообразующих элементов с углеродом и образования мелкодисперсной карбидной сетки, что проявляется, в частности, в повышении механических характеристик поликристаллов.

Посредством реализации предложенного механизма структурообразования при спекании ПКСТМ состава АСМ(Si) + УДА(B), возможно улучшение структурного совершенства алмаза, непосредственный контакт отдельных микрозерен алмаза друг с другом и повышение показателей микротвердости HV и трещиностойкости  $K_{Ic}$ .

Исследования образцов композитов, полученных термобарическим спеканием, методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа показали, что они имеют мелкозернистую структуру, на границах микрозерен алмаза присутствуют частицы УДА(B) (рисунок 5), которые располагаются в карбидной сетке.

Исследования физико-механических свойств спеченных композитов показали, что наиболее высокий уровень микротвердости ( $HV = 63,0$  ГПа) и трещиностойкости (коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic} = 9,2$  МПа·м<sup>1/2</sup>) имеет композит с содержанием УДА(B) в количестве 20 масс.%, спеченный при температуре  $T = 1900$  °С под давлением  $P = 6,5$  ГПа в течение  $t = 20$  с (таблица 2).

Полученный композиционный материал характеризуется однородной структурой, при этом связка в виде прослоек равномерно распределена между алмазными зернами и имеет хорошую адгезию с поверхностями частиц алмаза [16].

Таким образом, исследования показывают, что взаимодействие частиц АСМ с кремнием и УДА

с бором носит диффузионный характер. При спекании под высоким давлением между исходными алмазными компонентами и модифицирующими элементами протекает процесс реакционной диффузии с образованием карбидных соединений в зоне контактов частиц. Образующиеся химические соединения обеспечивают прочное сцепление микрозерен алмаза и УДА с частицами модификатора и частиц модификатора между собой. Вместе с тем следует отметить, что химическое взаимодействие зерен алмаза и модификатора протекает в очень тонких приконтактных слоях, не затрагивая основного объема микрозерен алмаза, и без его графитизации, что обеспечивает высокие физико-механические характеристики композита.

Снижение температуры спекания с введением бора в состав УДА-порошка можно связать с изменением фазового состава материала и активацией процесса спекания. По-видимому, давление порядка 6,5 ГПа и выше вызывает пластическую деформацию алмазных микропорошков, модифицированных кремнием, а высокие температуры повышают степень пластической деформации материала. Поэтому основной механизм спекания алмазных порошков в этом случае можно представить как процесс образования межзеренных связей в пластически деформированных зернах алмаза, скрепленных прочной карбидной сеткой.

**Заключение.** На основе анализа процессов химико-термического модифицирования микроразмерных порошков (АСМ) алмаза кремнием и наноразмерных алмазных порошков (УДА) бором с учетом химических превращений, а также особенностей уплотнения порошковых композиций предложены модельные представления процессов

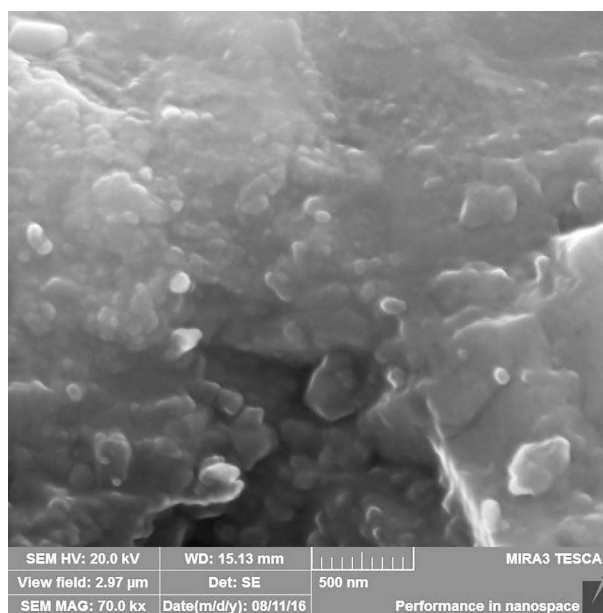


Рисунок 5 — Морфология поверхности ПКСТМ АСМ 14/10(Si) + УДА(B) после термобарической обработки (режим обработки:  $T = 1900$  °С;  $P = 6,5$  ГПа;  $t = 20$  с [14])

Таблица 2 — Режимы спекания и свойства ПКСТМ состава АСМ(Si) + УДА(В)

$C_{\text{УДА(В)}}$ , масс. %	Режим термобарической обработки			Показатели качества композита	
	Температура спекания, °С	Давление, ГПа	Продолжительность спекания, с	Трещиностойкость, $K_{Ic}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>	Микротвердость, ГПа
0	1900	6,0	15	5,8	52,3
10	1650	5,5	15	6,5	56,2
15	1700	6,0	15	7,1	58,2
15	1800	6,5	20	8,5	59,6
20	1900	6,5	20	9,2	63,0
25	1950	7,0	30	6,6	60,2
25	1800	7,5	25	7,0	55,9
30	1800	6,0	30	6,7	52,5
35	1750	6,0	20	6,3	55,2

структурообразования в компактах различного состава (АСМ(Si) + КНБ, АСМ(Si) + УДА(В)), позволяющие понять механизм формирования их внутреннего строения и спрогнозировать уровень обеспечиваемых физико-механических свойств, выявить взаимосвязь между микроструктурой полученного материала и его физико-механическими характеристиками. В частности, показано, что структура композита АСМ(Si) + КНБ представляет собой материал, в котором связка в виде прослоек карбида кремния равномерно распределена между зёрнами алмаза и КНБ и имеет хорошую адгезию с поверхностями частиц СТМ. Для композита на основе шихты состава АСМ(Si) + УДА(В) давление выше 6,5 ГПа активует процесс спекания порошка за счет пластической деформации алмазных микрозёрен, высокая температура увеличивает степень его пластической деформации, а карбидообразующие элементы позволяют снизить параметры  $P$ -,  $T$ -обработки. При этом образование прямых межзёренных связей происходит при взаимодействии друг с другом пластически деформированных зёрен микропорошка АСМ(Si).

Порошок наноалмаза УДА(В) служит активатором спекания алмазного микропорошка, улучшает физико-механические свойства композиционного материала за счет более прочного связывания зёрен алмазного микропорошка. Модифицирование алмазных микро- и нанопорошков карбидообразующими элементами дает возможность образовывать межзёренные связи в композиционном материале при более низких давлениях и температурах. Показано, что достижение высоких значений  $HV$  и  $K_{Ic}$  обусловлено мелкозернистой однородной структурой полученного материала с равномерным распределением прослоек связки между алмазными зёрнами.

Предложена схема получения композиционных алмазных материалов с повышенными физико-механическими свойствами на основе термобарического спекания композиции, содержащей предварительно модифицированные карбидообразующими элементами микро- и нанопорошки алмаза, с формированием в процессе спекания бимодальной структуры композита, включающей пространственный каркас из микроразмерных частиц алмаза, обеспечивающих прочностные характеристики и функциональные свойства композиционного материала на макроуровне, и упрочненную наноалмазными частицами карбидную сетку с высокой прочностью соединения на границе «микроалмаз — карбид», обуславливающую когезионную прочность спеченного композита на микроуровне.

#### Список литературы

1. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз — карбид кремния / В.Н. Ковалевский [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 5. — С. 8–14.
2. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А. Агеев [и др.]; под ред. А.Е. Беляева, Р.В. Конаковой. — Харьков: ИСМА, 2010. — 532 с.
3. Производство наноструктурных инструментальных материалов на основе кубического нитрида бора / П.А. Витязь [и др.] // Вісн. Житомирського державного технологіч. ун-ту. Сер.: Технічні науки. — 2017. — № 2(80). — С. 34–38.
4. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 381 с.
5. Структурные особенности алмазных порошков после поверхностного модифицирования активаторами спекания / П.А. Витязь [и др.] // Вестн. Витебского гос. технологіч. ун-та. — 2016. — № 1(30). — С. 62–73.
6. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) сверхтвердых материалов, твердых сплавов, инструментальных и кон-

- струкционных керамик при статическом нагружении: методич. рекомендации МР 232-87. — М. ВНИИММАШ, 1987. — 33 с.
7. Сенють, В.Т. Сверхтвердый композиционный материал на основе алмазов после модифицирования кремнием / В.Т. Сенють, В.А. Ржецкий, А.М. Парницкий // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 14-го междунар. науч.-техн. семинара, Свалаява, 24–28 февр. 2014 г. — Киев, 2014. — С. 210–212.
  8. Получение композитов на основе алмазного микропорошка, модифицированного Si / В.Т. Сенють [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 11-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2014. — С. 263–264.
  9. Парницкий, А.М. Математическое моделирование технологического процесса синтеза алмазных ПСТМ инструментального назначения / А.М. Парницкий, В.И. Жорник, В.Т. Сенють // Механика машин, механизмов и материалов. — 2017. — № 2(39). — С. 73–78
  10. Синтез композиционных материалов на основе наноалмазов, модифицированных кремнием / В.Т. Сенють [и др.] // Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология: тезисы 11-ой междунар. конф., Троицк, 29 мая–1 июня 2018 г. — М., 2018. — С. 414–416.
  11. Витязь, П.А. Состояние и перспективы использования наноалмазов детонационного синтеза в Белоруссии / П.А. Витязь // Физика твердого тела. — 2004. — Т. 46, вып. 4. — С. 591–595.
  12. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенють. — Минск, Беларус. навука, 2005. — 359 с.
  13. Парницкий, А.М. Особенности получения поликристаллических сверхтвердых материалов на основе нано- и микропорошков алмаза и кубического нитрида бора в условиях высоких давлений и температур / А.М. Парницкий // Молодежь в науке — 2014: прил. к журн. «Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». Сер. физ.-мат. наук / Нац. акад. наук Беларусі, Совет молодых ученых НАН Беларусі; редкол. серии физ.-мат. наук: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2015. — № 2. — С. 36–42.
  14. Изучение морфологии поверхности нано- и микропорошков алмаза после их модифицирования карбидообразующими элементами / В.Т. Сенють [и др.] // Наноструктурные материалы — 2016: Беларусь–Россия–Украина: НАНО–2016: материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 нояб. 2016 г. / ред. совет: П.А. Витязь (пред.) [и др.]. — Минск, 2016. — С. 101–103.
  15. Долматов, В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В.Ю. Долматов. — СПб: Проффессионал, 2011. — 536 с.
  16. Парницкий, А.М. Сверхтвердый композиционный материал полученный методом термобарического спекания на основе модифицированных нано- и микропорошков алмаза / А.М. Парницкий // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 мая 2018 г. / Нац. акад. наук Беларусі [и др.]; редкол.: А.Ф. Ильюшенко (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2018. — С. 242–245.

ZHORNIK Victor I., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Deputy Head of the Department of Technologies of Mechanical Engineering and Metallurgy — Head of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials<sup>1</sup>

E-mail: zhornik@inmash.basnet.by

PARNITSKY Alexander M.

Junior Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials<sup>1</sup>

E-mail: europacorp@tut.by

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

Leading Researcher of the Laboratory of Nanostructured and Superhard Materials<sup>1</sup>

E-mail: vsenyut@tut.by

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 09 July 2018.

## MODEL REPRESENTATIONS OF THE PROCESS OF STRUCTURE FORMATION OF POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIAL WITH A BIMODAL STRUCTURE BASED ON MODIFIED DIAMOND POWDERS

*A physical model of the process of structure formation of a polycrystalline superhard material is presented with a bimodal structure based on diamond micro- and nanopowders after their preliminary modification by carbide-forming elements. Proposed model representations of the processes of structure formation in diamond compacts make it possible to understand the mechanism of formation of their internal structure and forecast the level of the provided physical and mechanical properties. It is shown that during the thermobaric sintering of diamond powders modified by silicon and boron, a high-density superhard polycrystalline material is formed, which consists of grains of diamond micropowder, along the edges of which a binder is formed on the basis of boron and silicon carbides and is hardened with nanodiamond particles.*

**Keywords:** physical model, diamond micro- and nanopowders, modification, thermobaric treatment, bimodal structure



## References

- Kovalevskiy V.N., Gordeev S.K., Korchagina S.B., Fomikhina I.V., Zhuk A.E. Strukturnoobrazovanie karbidokremnievyy matritsy v kompozitsii almaz – karbid kremniya [Structurization of a carbide-silicon matrix in a diamond-silicon carbide composition]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and technical ceramics], 2005, no. 5, pp. 8–14.
- Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S., Kiselev V.S., Konakova R.V., Lebedev A.A., Milenin V.V., Okhrimenko O.B., Polyakov V.V., Svetlichnyy A.M., Cherednichenko D.I. *Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye* [Silicon carbide: technology, properties, application]. Kharkov, ISMA Publ., 2010. 532 p.
- Vityaz P.A., Senyut V.T., Kheyfets M.L., Moskalenko A.N., Zakorzhevskiy V.V. Proizvodstvo nanostrukturnykh instrumentalnykh materialov na osnove kubicheskogo nitrida bora [Manufacture of nanostructured tool materials based on cubic boron nitride]. *Visnik Zhitomirskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki* [Zhytomyr Ivan Franko state university journal. Series: Technical sciences], 2017, no. 2(80), pp. 34–38.
- Vityaz P.A., Ilyushchenko A.F., Zhornik V.I. *Nanoalmazy detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primeneniye* [Nanodiamonds of detonation synthesis: production and application]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ, 2013. 381 p.
- Vityaz P.A., Senyut V.T., Zhornik V.I., Parnitskiy A.M., Gamzeleva T.V. Strukturnye osobennosti almaznykh poroshkov posle poverkhnostnogo modifitsirovaniya aktivatorami spekaniya [Structural features of diamond powders after surface modification by sintering activators]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk State Technological University], 2016, no. 1(30), pp. 62–73.
- Methodological recommendations MR 232-87. *Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy materialov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) sverkhverdykh materialov, tverdykh splavov, instrumentalnykh i konstruktsionnykh keramik pri staticheskom nagruzhenii* [Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of materials. Determination of fracture resistance (fracture toughness) characteristics of superhard materials, hard alloys, tool and structural ceramics under static loading]. Moscow, Russian Research Institute of Standardization and Certification in Mechanical Engineering Publ., 1987. 33 p.
- Senyut V.T., Rzhetskiy V.A., Parnitskiy A.M. Sverkhverdydy kompozitsionnyy material na osnove almazov posle modifitsirovaniya kremniem [A superhard composite based on diamond after silicon modification]. *Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: materialy 14 Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar* [Proc. 14th International Scientific and Technical Seminar “Modern problems of production and repair in industry and transport”]. Svaliava, Kiev, 2014, pp. 210–212.
- Senyut V.T., Valkovich I.V., Parnitskiy A.M., Markova L.V., Gamzeleva T.V. Poluchenie kompozitov na osnove almaznogo mikroporoshka, modifitsirovannogo Si [The preparation of composites based on a diamond micropowder modified with Si]. *Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka: materialy 11 Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. 11th International Scientific and Technical Conference “New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding”]. Minsk, 2014, pp. 263–264.
- Parnitskiy A.M., Zhornik V.I., Senyut V.T. Matematicheskoe modelirovaniye tekhnologicheskogo protsessa sinteza almaznykh PSHM instrumentalnogo naznacheniya [Mathematical modeling of PSHM diamond synthesis technological process for tool purpose]. *Mekhanika mashin. mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 2(39), pp. 73–78.
- Senyut V.T., Vityaz P.A., Valkovich I.V., Parnitskiy A.M., Rzhetskiy V.A. Sintez kompozitsionnykh materialov na osnove nanoalmazov, modifitsirovannykh kremniem [Synthesis of composite materials based on nanodiamonds modified with silicon]. *Uglerod: fundamentalnye problemy nauki, materialovedeniye, tekhnologiya: tezisy 11 Mezhdunar. konf.* [Proc. 11th International Conference “Carbon: fundamental science problems, materials science, technology”]. Troitsk, Moskva, 2018, pp. 414–416.
- Vityaz P.A. Sostoyaniye i perspektivy ispolzovaniya nanoalmazov detonatsionnogo sinteza v Belorussii [State and prospects of using detonation synthesis nanodiamonds in Belarussia]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2004, vol. 46, no. 4, pp. 591–595.
- Vityaz P.A., Gritsuk V.D., Senyut V.T. *Sintez i primeneniye sverkhverdykh materialov* [Synthesis and application of superhard materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2005. 359 p.
- Parnitskiy A.M. Osobennosti polucheniya polikristallicheskikh sverkhverdykh materialov na osnove nano- i mikroporoshkov almaza i kubicheskogo nitrida bora v usloviyakh vysokikh davleniy i temperatur [Features of the preparation of polycrystalline superhard materials based on nano- and micropowders of diamond and cubic boron nitride under high pressure and temperature conditions]. *Molodezh v nauke – 2014: pril. k zhurn. “Vesti Natsyyanalnay akademii navuk Belarussii”. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk* [Youth in science – 2014. Appendix of the journal “Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus”. Physics and Mathematics Series]. Minsk, 2015, no. 2, pp. 36–42.
- Senyut V.T., Zhornik V.I., Valkovich I.V., Parnitskiy A.M., Rzhetskiy V.A., Markova L.V., Gamzeleva T.V. Izuchenie morfologii poverkhnosti nano- i mikroporoshkov almaza posle ikh modifitsirovaniya karbidobrazuyushchimi elementami [The study of the morphology of the surface of nano- and micropowders of diamond after their modification with carbide-forming elements]. *Nanostrukturnyye materialy – 2016: Belarussiya–Rossiya–Ukraina: materialy V Mezhdunar. nauch. konf.* [Proc. 5th International Scientific Conference “Nanostructured materials – 2016: Belarussiya–Russia–Ukraine”]. Minsk, 2016, pp. 101–103.
- Dolmatov V.Yu. *Detonatsionnyye nanoalmazy. Poluchenie, svoystva, primeneniye* [Detonation nanodiamonds. Obtaining, properties, application]. Saint-Petersburg, Professional Publ, 2011. 536 p.
- Parnitskiy A.M. Sverkhverdydy kompozitsionnyy material poluchenny metodom termobaricheskogo spekaniya na osnove modifitsirovannykh nano- i mikroporoshkov almaza [A superhard composite material obtained by thermobaric sintering on the basis of modified nano- and micropowders of diamond]. *Novyye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka: materialy 13 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. 13th International Scientific and Technical Conference “New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding”]. Minsk, 2018, pp. 242–245.