

DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.13y

УДК: 621.762:536.75

СИНТЕЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ

В.Т. Сеньют, П.А. Витязь, И.В. Валькович, А.М. Парницкий, В.А. Ржецкий

Владимир Тадеушевич Сеньют*, Петр Александрович Витязь, Игорь Владимирович Валькович,
Александр Михайлович Парницкий, Владимир Анатольевич Ржецкий

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ул Академическая, 12, Минск, Республика
Беларусь, 220072

E-mail: vsenyut@tut.by*, vitiaz@presidium.bas-net.by, valigvl@rambler.ru

Разработаны научные подходы формирования композиционных материалов типа «наноалмаз–наноструктурный SiC». Показано, что в результате вакуумной термообработки происходит графитизация наноалмазов и формирование на их поверхности наноструктурного графитоподобного покрытия. При этом уменьшение массы порошка наноалмазов после вакуумного отжига достигает 20 – 30 мас. % за счет удаления кислородсодержащих поверхностных функциональных групп, физически и химически адсорбированной воды. В соответствии с разработанной технологией химико-термическое модифицирование наноалмазов кремнием проводили путем их отжига в восстановительной атмосфере в диапазоне температур 873–1273 К в присутствии галогенидов кремния. На основе модифицированных углеродом и кремнием наноалмазов в условиях вакуумного отжига получен композиционный наноструктурный порошок наноалмаз – SiC с размером частиц от 0,1 до 5 мкм. В результате термобарического спекания модифицированного порошка в диапазоне давлений 1,0 – 2,5 ГПа на его основе формируется компактный алмазный композиционный материал, состоящий из поликристаллических алмазных зерен размером 0,2 – 0,5 мкм. При этом размер алмазных субзерен составляет 50 – 100 нм, а между крупными поликристаллическими зернами отмечается присутствие наноалмазов размером 10 – 20 нм. В результате размола синтезированных компактов получен поликристаллический алмазный микропорошок с размером частиц до 50 мкм, характеризуемый субмикро- и нанокристаллической структурой. Вследствие иерархической структуры у спеченных частиц (частица–зерно–субзерно–наноалмазный кристаллит), порошки на основе полученного материала перспективны в технологиях финишной обработки хрупких неметаллических материалов.

Ключевые слова: наноалмазы, сверхтвердые материалы, карбид кремния, модифицирование, вакуумная термообработка, высокие давления и температуры

SYNTHESIS OF COMPOSITES BASED ON SILICON-MODIFIED DETONATION NANODIAMONDS

V.T. Senyut, P.A. Vityaz, I.V. Val'kovich, A.M. Parnitsky, V.A. Rzhetsky

Vladimir T. Senyut*, Petr A. Vityaz, Igor V. Val'kovich, Alexander M. Parnitsky, Vladimir A. Rzhetskiy
Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Akademicheskaya st., 12, Minsk, 220072, Belarus
E-mail: vsenyut@tut.by*, vitiaz@presidium.bas-net.by, valigvl@rambler.ru

Scientific approaches to the formation of composite materials such as «nanodiamond-nanostructured SiC» have been developed. It is shown that, as a result of vacuum heat treatment, nanodiamonds are graphitized and nanostructured graphite-like coating forms on their surface. In this case, the reduction in the mass of the nanodiamond powder after vacuum annealing reaches 20 – 30 wt. % by removing oxygen-containing surface functional groups, physically and chemically adsorbed water. In accordance with the developed technology chemical-thermal modifying of nanodiamonds by silicon is carried out by annealing in a reducing atmosphere in the temperature range of 873–1273 K in the presence of silicon halides. On the basis of carbon and silicon modified nanodiamonds under vacuum annealing conditions a composite nanostructured powder of nanodiamond-SiC with particles of size from 0.1 to 5 μm is obtained. As a result of thermobaric sintering of the modified powder in the pressure range of 1.0 – 2.5 GPa, a compact diamond composite material consisting of polycrystalline diamond grains of 0.2 – 0.5 μm in size is formed. The size of diamond subgrains is 50 – 100 nm, and the presence of nanodiamonds measuring 10 – 20 nm is noted between large polycrystalline grains. As a result of grinding of the synthesized compacts, a polycrystalline diamond micropowder with particles of size up to 50 μm , characterized by submicron- and nanocrystalline structure is obtained. Due to the hierarchical structure of the sintered particles (particle-grain-subgrain-nanodiamond crystallite), powders based on the obtained material are promising in finishing technologies for brittle nonmetallic materials.

Key words: nanodiamonds, superhard materials, silicon carbide, modification, vacuum heat treatment, high pressure and temperatures

Для цитирования:

Сенють В.Т., Витязь П.А., Валькович И.В., Парницкий А.М., Ржецкий В.А. Синтез композитов на основе модифицированных кремнием детонационных наноалмазов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 4–9

For citation:

Senyut V.T., Vityaz P.A., Val'kovich I.V., Parnitsky A.M., Rzhetsky V.A. Synthesis of composites based on silicon-modified detonation nanodiamonds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 11. P. 4–9

ВВЕДЕНИЕ

Наноалмазы (НА) отличаются уникальным сочетанием присущих алмазу высокой твердости и износостойкости с чрезвычайно высокой поверхностной активностью и структурообразующими качествами, характерными для ультрадисперсной среды. Детонационные НА являются мощным структурообразующим элементом при получении различных композиционных материалов (полимерных композитов, покрытий различного вида и назначения), основой для селективных адсорбентов и катализаторов и др. [1–3]. Отличительная черта НА детонационного синтеза от других алмазов заключается в их способности адсорбировать различные функциональные группы,

состав которых можно регулировать путем соответствующей химической или химико-термической обработки [4–6]. В отличие от крупнокристаллических алмазов, которые используются, в основном, при изготовлении абразивного или лезвийного инструмента [7], НА могут найти широкое применение при получении наноструктурных сверхтвердых композиционных материалов с повышенной трещиностойкостью, используемых в т.ч. в технологиях инженерии поверхности для финишной обработки различных материалов.

Однако применение традиционных способов прессования и спекания НА, в т.ч. в условиях высоких давлений и температур при получении наноструктурных композиционных и поликристаллических материалов оказалось малоэффек-

тивным, что обусловлено повышенным содержанием адсорбированных НА функциональных групп и примесей, а также спецификой структурного состояния исходных порошков НА [5, 8, 9].

Для эффективного спекания НА и получения на их основе наноструктурной керамики необходимо осуществлять целенаправленное модифицирование порошков НА, которое заключается в удалении с их поверхности кислородсодержащих групп и введении в реакционную шихту элементов, активирующих процесс спекания [10-11].

Известно, что добавки кремния в реакционную шихту на основе алмазных порошков приводят к образованию карбида кремния в системе углерод-кремний при термобарической обработке и способствуют спеканию алмазных материалов при более низких давлениях [12, 13].

Цель работы – синтез композиционных материалов на основе НА после их вакуумного отжига, модифицирования кремнием и спекания, изучение структуры полученных композиционных наноматериалов.

Исходные материалы и методики исследований

В качестве исходных материалов использовали очищенный от примесей и неалмазных форм углерода порошок наноалмазов детонационного синтеза производства НП ЗАО «Синта» (г. Минск) с размером частиц 4-10 нм и удельной поверхностью $S_{уд}$ 350 м²/г.

Модифицирование НА проводили путем их отжига в условиях вакуума и в восстановительной атмосфере. Методом химико-термической обработки проводили модифицирование порошков наноалмазов кремнием, который применяют в качестве активной добавки при получении композиционных материалов на основе алмаза [7, 14]. Термобарическую обработку НА осуществляли в аппарате высокого давления типа «наковальня с лункой» в диапазоне давлений 1,0-2,5 ГПа, в условиях, соответствующих области термодинамической стабильности как графита, так и алмаза.

Исследование структуры наноалмазных порошков проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с разрешающей способностью 1,7 нм (при 30 кВ) и 2,0 нм (при 20 кВ). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) проводилась с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 с ускоряющим напряжением в диапазоне 20 – 150 кВ.

Внешний вид порошков исследовали на оптическом микроскопе «Микро-200» (ПО «Планар», г. Минск) при увеличениях в диапазоне х 50–1000. Рентгеновские исследования порошков выполнены на дифрактометре фирмы «Bruker» D8 ADVANCE в CuK_{α} -монохроматизированном из-

лучении в автоматическом режиме съемки. На атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 (ОДО «МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме исследовали морфологию поверхности и излома полученных образцов.

Измерения микротвердости по Виккерсу спеченных компактов проводили на микротвердомере "Micromet-II" фирмы «Buehler» (Швейцария) при нагрузке 200 г. Измельчение спеченных образцов материала осуществляли в планетарной мельнице АГО-2 (Россия).

Модифицирование наноалмазов.

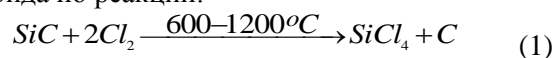
Вакуумная термообработка наноалмазов

Один из методов изменения фазового состава поверхности НА заключается в их вакуумной термообработке, в результате которой происходит графитизация НА и формирование на их поверхности наноструктурного графитоподобного покрытия [15-18]. В результате отжига порошка НА в вакууме при давлении 10^{-2} мм рт.ст. при температуре 1173 К цвет НА изменяется с зеленоватого на черный, что свидетельствует о появлении графита, регистрируемого методом рентгеноструктурного анализа. О графитизации алмаза в данных условиях отжига может свидетельствовать также снижение плотности прессовок из порошка НА с 1,4 до 1,2 г/см³. Параметр решетки НА после отжига остается без изменения ($a = 0,3562$ нм). По данным ПЭМ порошок состоит из беспористых агрегатов НА размером около 100 нм. В процессе отжига с поверхности частиц порошка удаляются функциональные группы, адсорбированная и хемосорбированная вода, а также кислород, стимулирующий процесс графитизации алмаза. Уменьшение массы порошка после отжига достигает 20 – 30 мас. % за счет удаления кислородсодержащих поверхностных функциональных групп, физически и химически адсорбированной воды.

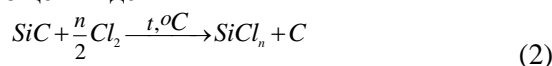
Химико-термическое модифицирование наноалмазов

В проводимых исследованиях осуществляли химико-термическое модифицирование НА кремнием путем их отжига в восстановительной атмосфере в диапазоне температур 873-1273 К в присутствии галогенидов кремния [19].

Для модифицирования порошков НА кремнием в контейнер помещали насыщающий источник – высокодисперсный карбид кремния. В результате реакции хлорирования обеспечивается частичное или полное удаление кремния из состава карбида по реакции:



или в общем виде



Далее, в результате разложения нестабильных хлоридов кремния $SiCl_n$ происходит выделение кремния и его адсорбция на поверхности частиц алмаза.

На рис. 1 представлены ПЭМ изображения порошка НА после модифицирования кремнием и вакуумного отжига. По данным полуколичественного фазового анализа содержание кремния на порошке НА после модифицирования составило 5-7%.

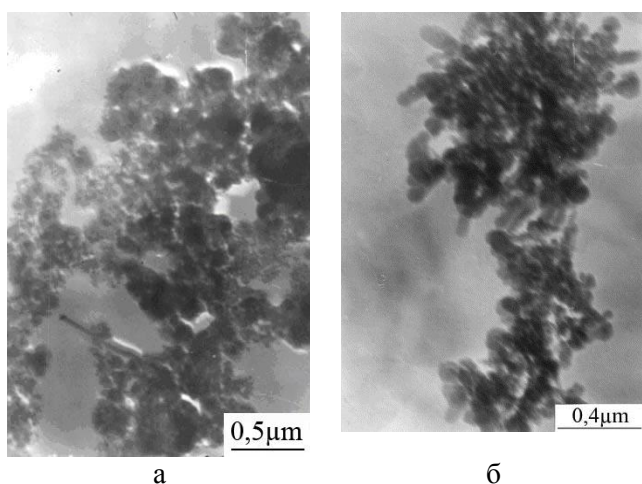


Рис. 1. ПЭМ изображения наноалмазов после модифицирования кремнием (а) и вакуумной термообработки (б)
Fig. 1. TEM images of nanodiamonds after modifying with silicon (a) and vacuum heat treatment (б)

В результате повторного спекания в вакууме модифицированного кремнием порошка НА были получены агрегаты частиц наноалмазов различной морфологии, обладающие абразивной способностью (рис. 1, б). Размер полученных агрегатов частиц находится в пределах от 0,1 до 5 мкм. Кроме алмаза, в полученном порошке отмечается наличие карбида кремния (α -SiC), который образуется в процессе взаимодействия кремния и углерода в условиях вакуумного отжига.

Термобарическое спекание

После вакуумного отжига на модифицированных кремнием нанопорошках алмазов формируется покрытие из наноструктурного карбида кремния (α -SiC), которое способствует защите алмазных частиц от графитизации [20]. Последующее спекание композиционного наноструктурного порошка алмаз – SiC проводили в аппарате высокого давления с матрицами из быстрорежущей стали Р6М5 в диапазоне давлений 1,0-2,5 ГПа.

Структура излома композиционного материала из наноалмазов после вакуумного отжига, модифицирования кремнием и спекания под давлением показана на рис. 2 а.

Поверхность материала не имеет видимых пор и несплошностей, гладкая «заплавшая» по-

верхность излома образца свидетельствует о высокодисперсной структуре спеченного композита. Размер регистрируемых с помощью АСМ поликристаллических алмазных зерен находится в основном в пределах 0,5 мкм, а размер субзерен составляет 50-100 нм. Между крупными поликристаллическими зернами можно отметить также присутствие скоплений зерен размером 10-20 нм.

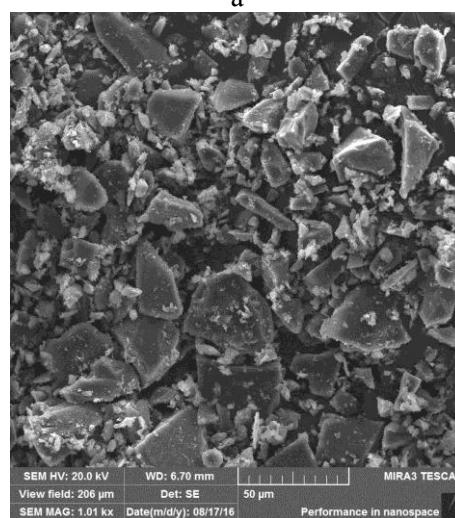
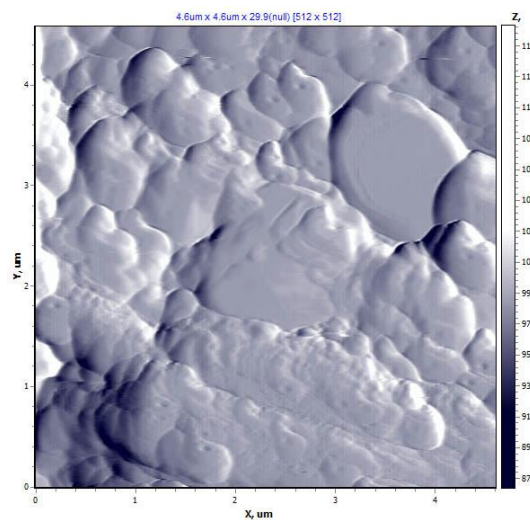


Рис. 2. Структура полученного поликристаллического алмазного материала после химико-термического модифицирования кремнием, вакуумного отжига и спекания под давлением (а); внешний общий вид продуктов размола спеченного материала
Fig. 2. The structure of the resulting polycrystalline diamond material after chemical-thermal modification by silicon, vacuum annealing and pressure sintering (a); external general view of the grinding products of the sintered material

В алмазной матрице наблюдаются как отдельные зерна карбида кремния SiC размером до 1 мкм с хорошо сформированными границами, так и прослойки SiC, расположенные между зернами алмаза. На поверхности излома материала

присутствуют следы пластической деформации зерен – пачки плоскостей скольжения и дефекты упаковок.

Также в аналогичных условиях спекали под давлением немодифицированный порошок НА, в который добавляли 25 мас. % порошка кремния с размером частиц менее 1 мкм. В этом случае спеченный материал характеризуется гетерогенной структурой. На поверхности шлифа наблюдаются области, обогащенные кремнием в виде прожилок и включений размером 10-100 мкм, находящихся в матрице из спеченных НА.

Измерения микротвердости спеченных при одних и тех же параметрах спекания под давлением образцов на основе наноалмазов с добавками кремния и наноалмазов, модифицированных кремнием, показали, что в последнем случае микротвердость материала выше в 2-2,5 раза и достигает значений 20-25 ГПа.

Повышение микротвердости материала на основе модифицированных наноалмазов связано с более полным протеканием реакции образования SiC, наличие которого на поверхности наноалмазов препятствует их графитизации, а также благодаря более совершенной и гомогенной структуре синтезированного материала.

Далее полученный в виде компактов материал механически измельчали до состояния порошка в планетарной мельнице. В результате размола компактов получен композиционный порошок наноалмаз – SiC, характеризующийся наличием в нем частиц двух морфологических типов различной дисперсности (рис. 2 б). В основном продукты размола представлены достаточно крупными (5-50 мкм) частицами осколочного типа. Другой тип частиц – агрегаты неправильной формы, размер которых в основном находится в пределах от 0,2 до 1 мкм. Благодаря наличию

иерархической структуры у спеченных частиц обоих типов (частица – зерно – субзерно – наноалмазный кристаллит), порошки на основе полученного материала перспективны в технологиях финишной и суперфинишной обработки хрупких неметаллических материалов для оптики, микроэлектроники, лазерной техники.

ВЫВОДЫ

Разработан процесс комплексного модифицирования НА, заключающийся в их термовакуумной обработке и химико-термическом модифицировании, которое включает отжиг в восстановительной атмосфере в присутствии галогенидов кремния. В результате повторного вакуумного спекания модифицированного кремнием порошка НА на его основе получены агрегаты частиц НА различной морфологии размером от 0,1 до 5 мкм, содержащих карбид кремния (α -SiC) и обладающих абразивной способностью.

Спекание модифицированных кремнием порошков НА в диапазоне давлений 1,0-2,5 ГПа позволяет получить компактный материал на основе НА с субмикро- и нанокристаллической структурой, содержащий SiC в виде зерен и межзеренных прослоек, равномерно распределенных в алмазной матрице. Микротвердость полученного материала в 2-2,5 раза выше микротвердости материала на основе смеси немодифицированных НА и субмикроро порошка кремния, спеченного при одинаковых давлениях и температурах.

На основе синтезированных компактов получен алмазный порошок с нанокристаллической структурой, содержащий частицы осколочного типа размером до 50 мкм и частицы в виде агрегатов неправильной формы размером до 1 мкм.

Статья издана при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-03-20012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. СПб.: СПбГПУ. 2003. 344 с.
2. Витязь П.А., Жорник В.И., Кукареко В.А., Комаров А.И., Сенють В.Т. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками. Минск: Беларус. наука. 2011. 522 с.
3. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. СПб.: НПО «Профессионал». 2011. 536 с.
4. Витязь П.А., Жорник В.И., Ильющенко А.Ф., Сенють В.Т., Комаров А.И., Корженевский А.П., Ивахник А.В. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. Минск: Беларус. наука. 2013. 381 с.
5. Даниленко В.В. Синтез и спекание алмазов взрывом. М.: Энергоатомиздат. 2003. 272 с.
6. Kulakova I.I. Chemistry of nanodiamond surface. *Phys. Solid State*. 2004. V. 46. N 4. P. 621-628. DOI: 10.1134/1.1711440.

REFERENCES

1. Dolmatov V.Yu. Ultradispersed diamonds of detonation synthesis. Production, properties, and application. SPb.: St. Petersburg State University. 2003. 344 p. (in Russian).
2. Vityaz P.A., Zhornik V.I., Kukareko V.A., Komarov A.I., Senyut V.T. Modification of materials and coatings by nanosized diamond-containing additives. Minsk: Belarus. nauka. 2011. 522 p. (in Russian).
3. Dolmatov V.Yu. Detonation nanodiamonds. Production, properties, applications. SPb.: NPO Professional. 2011. 536 p. (in Russian).
4. Vityaz P.A., Zhornik V.I., Il'yushchenko A. F., Senyut V.T., Komarov A.I., Korzhenevsky A.P., Ivakhnik A.V. Nanodiamonds of detonation synthesis: preparation and application. Minsk: Belarus. nauka. 2013. 381 p. (in Russian).
5. Danilenko V.V. Explosure synthesis and sintering of diamonds. M.: Energoatomizdat. 2003. 272 p. (in Russian).
6. Kulakova I.I. Chemistry of nanodiamond surface. *Phys. Solid State*. 2004. V. 46. N 4. P. 621-628. DOI: 10.1134/1.1711440.

7. **Богатырева Г.П., Гриценко Э.И., Гурвич Р.А.** Инструменты из сверхтвердых материалов. М.: Машиностроение. 2005. 555 с.
8. **Vitiaz P.A., Senyut V.T.** Compaction of nanodiamonds produced under detonation conditions and properties of composite and polycrystalline materials made on their basis. *Phys. Solid State*. 2004. V. 46. N 4. P.764-766. DOI: 10.1134/1.17114.
9. **Бочечка А.А.** Особенности строения нанодисперсных алмазных порошков и их консолидации при воздействии высоких давлений и температур (обзор). *Сверхтверд. мат-лы*. 2003. № 5. С. 3-10.
10. **Витязь П.А., Сенють В.Т., Маркова Л.В., Гамзелева Т.В., Хейфец М.Л.** Структурные особенности углеродных композитов на основе спеченных модифицированных наноалмазов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 7. С. 40-44.
11. **Назарчук С.Н., Бочечка А.А., Гаврилова В.С., Романко Л.А., Белявина Н.Н., Александрова Л.И., Ткач В.Н., Кузьменко Е.Ф., Заболотный С.Д.** Поликристаллический композиционный материал алмазкарбид вольфрама. *Сверхтверд. мат-лы*. 2011. № 1. С. 3-17. DOI: 10.3103/S1063457611010011.
12. **Шульженко А.А., Воронин Г.А., Осипов А.С.** Патент РФ № 1729086. 1995.
13. **Сенють В.Т., Жорник В.И., Парницкий А.М., Валькович И.В.** Изучение структуры поликристаллов на основе алмазных микропорошков после модифицирования карбидообразующими элементами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 8. С. 60-63.
14. **Витязь П.А., Грицук В.Д., Сенють В.Т.** Синтез и применение сверхтвердых материалов. Минск: Беларус. наука. 2005. 359 с.
15. **Vul A.Ya.** Characterization and physical properties of UNCD particles. *Ultrananocrystalline diamond: synthesis, properties and applications*. Ed. by O. Shenderova. William Andrew Publishing. 2006. 600 p. DOI: 10.1016/B978-081551524-1.50014-7.
16. **Витязь П.А., Сенють В.Т., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Клименко С.А.** Синтез алмазных наноструктурных материалов на основе наноалмазов. *Докл. НАН Беларуси*. 2012. Т. 56. № 6. С. 87-91.
17. **Витязь П.А., Хейфец М.Л., Сенють В.Т., Колмаков А.Г.** Синтез поликристаллических алмазных материалов на основе детонационных наноалмазов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 7. С. 105-108.
18. **Даниленко В.В.** Оценка влияния на термостойкость детонационных алмазов размера частиц и степени их связности. *Сверхтверд. мат-лы*. 2009. № 4. С. 11-20.
19. **Сенють В.Т.** Влияние модифицирования наноалмазов на структурные характеристики спеченных на их основе в условиях высоких давлений и температур сверхтвердых композитов. *Вестн. ПГУ. Сер. В. Пром-ть. Прикладн. науки. Машиновед. и машиностр.* 2014. № 3. С. 43-52.
20. **Ковалевский В.Н., Гордеев С.К., Корчагина С.Б., Фомихина И.В., Жук А.Е.** Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции алмаз – карбид кремния. *Огнеупоры и технич. керамика*. 2005. № 5. С. 8-14.
7. **Bogatyreva G.P., Gritsenko Eh.I., Gurvich R.A.** Tools from superhard materials. M.: Mashinostroenie. 2005. 555 p. (in Russian).
8. **Vitiaz P.A., Senyut V.T.** Compaction of nanodiamonds produced under detonation conditions and properties of composite and polycrystalline materials made on their basis. *Phys. Solid State*. 2004. V. 46. N 4. P. 764-766. DOI: 10.1134/1.17114.
9. **Bochekha A.A.** Peculiarities of structure of nanodispersed diamond powders and their consolidation under effect of high pressures and temperatures (a review). *Supertverdye Mater*. 2003. N 5. P. 3-10 (in Russian).
10. **Vityaz P.A., Senyut V.T., Markova L.V., Gamzeleva T.V., Heiyfets M.L.** Structure peculiarities of carbon nanocomposites on basis of sintered modified nanodiamonds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*. 2015. V. 58. N 7. P. 40-44 (in Russian).
11. **Nazarchuk S.N., Bochekha A.A., GavriloVA V.S., Romanko L.A., Belyavina N.N., Alexandrova L.I., Tkach V.N., Kuz'menko E.F., Zabolotny S.D.** Polycrystalline composite material diamond - tungsten carbide. *Supertverdye Mater*. 2001. N 1. P. 3-17 (in Russian). DOI: 10.3103/S1063457611010011.
12. **Shul'zhenko A.A., Voronin G.A., Osipov A.S.** RF Patent N 1729086. 1995. (in Russian).
13. **Senyut V.T., Zhornik V.I., Parnitsky A.M., Val'kovich I.V.** Studying of polycrystals structure based on diamond micropowders after modifying by carbide-forming elements. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*. 2016. V. 59. N 8. P. 60-63 (in Russian).
14. **Vityaz P. A., Gritsuk V.D., Senyut' V.T.** Synthesis and application of superhard materials. Minsk: Belarus. nauka. 2005. 359 p. (in Russian).
15. **Vul A.Ya.** Characterization and physical properties of UNCD particles. *Ultrananocrystalline diamond: synthesis, properties and applications*. Ed. by O. Shenderova. William Andrew Publishing. 2006. 600 p. DOI: 10.1016/B978-081551524-1.50014-7.
16. **Vityaz P.A., Senyut V.T., Kheifetz M.L., Kolmakov A.G., Klimenko S.A.** Synthesis of diamond nanostructured materials on the basis of nanodiamonds. *Dokl. NAN Belarus*. 2012. V. 56. N 6. P. 87-91 (in Russian).
17. **Vityaz P.A., Kheifetz M.L., Senyut V.T., Kolmakov A.G.** Synthesis of polycrystalline diamond materials on basis of detonation nanodiamonds. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol*. 2013. V. 56. N 7. P. 105-108 (in Russian).
18. **Danilenko V.V.** Assessment of the effect of the particle size and the degree of particle connectivity on the thermostability of detonation diamonds. *Supertverdye Mater*. 2009. N 4. P. 11-20 (in Russian).
19. **Senyut' V.T.** The effect of nanodiamond modification on the structural characteristics of superhard composites sintered on their basis under high pressure and temperature conditions. *Vestn. PGU. Ser. V. Prom-t'. Priklad. Nauki. Mashinoved. i Mashinostr.* 2014. N 3. P. 43-52 (in Russian).
20. **Kovalevsky V.N., Gordeev S.K., Korchagina S.B., Fomikhina I.V., Zhuk A.E.** Structurization of a silicon carbide matrix in a diamond-silicon carbide composition. *Ogneupory i Tekhnich. Keramika*. 2005. N 5. P. 8-14 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.06.2018
Принята к опубликованию 08.10.2018

Received 15.06.2018
Accepted 08.10.2018