

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.762:669.154
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-271-279>

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

П. А. Витязь¹, В. Т. Сеньют¹, М. Л. Хейфец², А. Г. Колмаков³

¹Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²ОАО «НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОСТРУКТУРНЫМ КУБИЧЕСКИМ НИТРИДОМ БОРА

Аннотация. Проведено исследование структуры и микротвердости алюминиевого сплава с добавками наноструктурного кубического нитрида бора (сBN) после обработки в условиях высоких давлений и температур. В качестве наполнителя применяли наноструктурный порошок сBN с размером первичных частиц в пределах 50–200 нм. Для повышения химического сродства наноструктурного сBN к алюминиевой матрице проведено предварительное химико-термическое модифицирование наноструктурного сBN, заключающееся в его высокотемпературной обработке (отжиге) в диапазоне температур 750–950 °С в среде алюмосодержащих соединений. Показано, что модифицирование наноструктурного нитрида бора алюминием способствует прочности удержания наполнителя в алюминиевой матрице. При этом увеличение в шихте концентрации наполнителя BN от 1,5 до 5 мас.%, а также повышение температуры обработки при фиксированном давлении способствует возрастанию микротвердости материала в 1,5–2 раза по сравнению с базовым алюминиевым сплавом без добавок модификатора. Повышение концентрации BN до 5 мас.% приводит к увеличению в материале доли более мелких конгломератов частиц (1–5 мкм), уменьшению размеров крупных включений до 10–20 мкм, при этом распределение включений из частиц BN в алюминиевой матрице более равномерное по сравнению с материалом, содержащим 1,5 мас.% сBN. С ростом температуры до 1000 °С в материале происходит рекристаллизация сBN в агрегатах с образованием его отдельных монокристаллических (поликристаллических) частиц размерами 1–10 мкм, обладающих огранкой, характерной для микрочастиц сBN.

Ключевые слова: наноструктурные материалы, алюмоматричный композит, наноструктурный кубический BN, химико-термическое модифицирование, микротвердость, высокое давление и температура

Для цитирования. Получение алюмоматричного композиционного материала, модифицированного наноструктурным кубическим нитридом бора / П. А. Витязь [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 3. – С. 271–279. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-271-279>

P. A. Vityaz¹, V. T. Senyut¹, M. L. Kheifetz², A. G. Kolmakov³

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

³A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

PRODUCTION OF ALUMO-MATRIX COMPOSITE MATERIAL MODIFIED BY NANOSTRUCTURED CUBIC BORON NITRIDE

Abstract. The structure and microhardness of an aluminum alloy with additives of nanostructured cubic boron nitride (сBN) after treatment under high pressure and temperature are investigated. A nanostructured powder of сBN with primary particles within 50–200 nm is used as a filler. A preliminary chemical-thermal modifying of the nanostructured сBN, which consists in its high-temperature annealing in the temperature range of 750–950 °C in a medium of aluminum-containing compounds, is carried out to increase the chemical affinity of the nanostructured сBN to the aluminum matrix. It is shown that the modifying of nanostructured сBN with aluminum increases the strength of the additives retention in the aluminum matrix. At the same time the increase in the concentration of BN additives from 1.5 to 5 wt.% as well as the increase in the treatment temperature at a fixed pressure promotes the increase in the microhardness of the material by a factor of 1.5 to 2 as compared with the base aluminum alloy without the addition of a modifier. An increase in the сBN concentration to 5 % by weight results in an increase in the fraction of smaller particle conglomerates (1–5 μm) in the material and in a decrease in the size of large inclusions to 10–20 μm. In this case, the distribution of BN particles in the aluminum matrix is more uniform in comparison with a material with a сBN content of 1.5 wt.%. In the material with the growth of temperature up to 1000 °C, сBN in aggregates is recrystallized with the formation of single-crystal (polycrystalline) particles with the size of 1–10 μm with faceting specific for сBN micron particles.

Keywords: nanostructured materials, alumo-matrix composite, nanostructured cubic BN, chemical-thermal modifying, microhardness, high pressure and temperature

For citation. Vityaz P. A., Senyut V. T., Kheifetz M. L., Kolmakov A. G. Production of alumo-matrix composite material modified by nanostructured cubic boron nitride. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 271–279 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-271-279>

Введение. Разработка сплавов на основе алюминия с мелкозернистой структурой, характеризующихся высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств, является актуальной задачей. В основном для создания таких материалов используют примесное модифицирование, ускоренное затвердевание и инвертирование микроструктуры заготовок, что приводит к улучшению механических и эксплуатационных свойств отливок не только из первичных, но и из более дешевых вторичных сплавов [1].

Добавление микро- и наноструктурных тугоплавких частиц в качестве примесных модификаторов позволяет эффективно изменять структуру алюминиевых сплавов, способствует ее измельчению и повышению механических и триботехнических характеристик алюмоматричных композиционных материалов (КМ) [2]. Широкое применение для этих целей также получили углеродные наноматериалы (углеродные нанотрубки, фуллерены, ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза) [3].

Постановка задачи. Для улучшения взаимодействия тугоплавких микро- и наночастиц с алюминиевым расплавом, повышения равномерности их распределения в матрице предлагаются различные способы. Так, в [4–6] приведен достаточно эффективный подход создания армирующих наноструктурированных композиционных полифункциональных тугоплавких керамических наполнителей на основе нитрида бора и оксида кремния. Описанные в данных работах принципы получения армирующих тугоплавких наполнителей заключаются в целенаправленном формировании на исходных микро- и нанопорошках реакционно-активных элементов, в результате чего на поверхности наполнителей *in situ* образуются тугоплавкие соединения в нанодисперсном состоянии, обладающие химическим сродством к алюминиевой матрице. Их использование позволяет эффективно диспергировать структурные составляющие силуминов и ведет к существенному повышению физико-механических и триботехнических характеристик КМ.

В то же время условия, при которых происходит формирование композита, оказывают существенное влияние на структуру и свойства как матрицы, так и керамического наполнителя [7, 8]. В [9–11] показано, что применение поверхностно-модифицированных наноструктурных порошков алмаза, кубического нитрида бора, шунгита, оксида алюминия в сочетании с обработкой в условиях высоких давлений и температур существенно повышают физико-механические и эксплуатационные характеристики КМ различного назначения (композиционных сверхтвердых материалов, алюмоматричных КМ). Исходя из проведенных исследований авторами данной работы сделаны выводы, что наилучшие сочетания структурных характеристик и прочностных показателей образцов КМ обеспечивает их комплексная обработка, включающая модифицирование адгезионно-активным компонентом в сочетании с обработкой в условиях высоких давлений и температур.

Кроме того, использование нанопорошков кубического нитрида бора, обладающих высокой энергией направленных химических связей и, как следствие, высокой твердостью, химической стойкостью в агрессивных средах, низким коэффициентом термического расширения [12], будет способствовать повышению физико-механических и эксплуатационных свойств разрабатываемых материалов.

Целью настоящей работы является изучение совместного влияния добавок наноструктурного кубического BN (сBN), давления и температуры на структуру и механические характеристики (микротвердость) алюмоматричного композиционного материала Al–BN.

Исходные материалы, оборудование, методики проведения экспериментов. Основой сплава послужила алюминиевая пудра (толщина лепестка пудры составила 0,2–0,5 мкм, а средний линейный размер не превысил 30 мкм). В качестве наполнителя применяли наноструктурный порошок сBN с размером первичных частиц в пределах 50–200 нм, которые в свою очередь

образуют агрегаты до 0,5–2 мкм (рис. 1). Порошки были получены на основе механоактивированного микропорошка гексагонального BN и характеризуются высокой удельной поверхностью до 20–25 м²/г [13, 14].

Для повышения химического сродства наноструктурного cBN к алюминиевой матрице было выполнено предварительное химико-термическое модифицирование наноструктурного cBN, заключавшееся в его высокотемпературной обработке (отжиге) в диапазоне температур 750–950 °С в среде алюмосодержащих соединений (галогенидов алюминия) [15]. На рис. 2 показан порошок наноструктурного cBN после модифицирования алюминием.

Термобарическую обработку полученной реакционной шихты в контейнерах осуществляли в аппарате высокого давления (АВД) «наковальня с лункой» при давлении 2,5 ГПа в диапазоне температур 600–1100 °С в течение 30 с. Нагрев образцов производили путем прямого пропускания электрического тока через шихту, находящуюся в условиях квазигидростатического сжатия под высоким давлением. На полученных компактных образцах были приготовлены шлифы, которые затем исследовали методами оптической микроскопии, атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии. Микротвердость измерялась на микротвердомере Micromet-II (фирма Vuehler, Швейцария) алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 50 г.

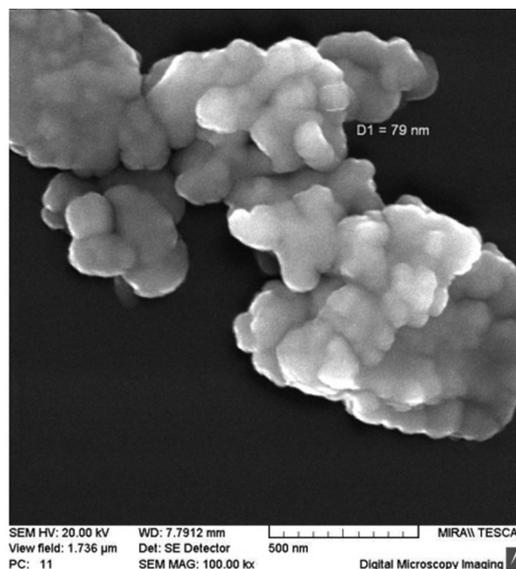


Рис. 1. Изображение наноструктурного порошка cBN
Fig. 1. The image of the nanostructured powder of cBN

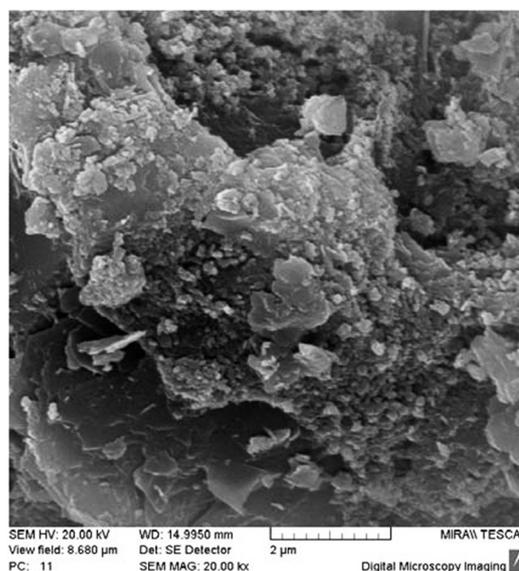


Рис. 2. Изображение наноструктурного порошка cBN
после модифицирования алюминием
Fig. 2. The image of the nanostructured powder of cBN
after modifying with aluminum

Для количественного описания структуры изломов полученных алюминиевых композитов использовали оригинальную методику мультифрактальной параметризации структур [16, 17]. Как показала обработка изображений структур, наиболее информативными мультифрактальными характеристиками являются обобщенные энтропии (размерности) Реньи D_{100} , которые позволяют оценить термодинамические условия формирования изучаемых структур, а также эффективные количественные характеристики их однородности f_{100} и упорядоченности Δ_{100} [18, 19]. Большие значения D_{100} соответствуют более неравновесным условиям формирования структур, а наибольшие значения f_{100} отвечают более равномерному распределению единичных элементов рассматриваемой структуры в евклидовом пространстве, охватывающем эту структуру. Увеличение Δ_{100} для исследуемой серии структур показывает, что в них становится больше периодической составляющей.

Экспериментальная часть. Наноструктурный порошок cBN после модифицирования алюминием (в результате с алюминиевым покрытием) добавляли в количестве 1,5 и 5 мас.% в алюминиевую пудру, после чего проводили перемешивание в баночном смесителе до образования гранул.

На рис. 3 представлен внешний вид гранул из шихты на основе алюминиевой пудры с добавкой 5 мас.% наноструктурного порошка кубического BN, модифицированного Al, после перемешивания в смесителе в течение 2 ч.

Далее из приготовленных шихт развешивали навески массой 2 г, которые засыпали в специальный прессованный контейнер из литографского камня для последующего спекания под давлением. В процессе спекания были получены цилиндрические образцы диаметром 20 мм, которые затем полировались по торцам.

В результате металлографических исследований поверхности шлифов КМ, полученных с добавкой 1,5 мас.% модифицированного алюминием наноструктурного порошка cBN, было установлено, что структура КМ достаточно неоднородна: частицы BN собраны в конгломераты от 1 до 20–30 мкм, расположенные по границам зерен алюминия (рис. 4). Связь включений BN с матрицей в КМ, полученных при более низкой температуре 600 °С, недостаточно прочная, что вызывает выкрашивание частиц BN из матрицы при механических воздействиях. Возрастание температуры до 800 °С увеличивает прочность удержания наполнителя в алюминиевой матрице и выкрашивания частиц BN при приготовлении шлифа не происходит.

Было установлено, что повышение концентрации BN до 5 мас.% приводит к увеличению в материале доли более мелких конгломератов частиц (1–5 мкм), уменьшению размеров крупных включений до 10–20 мкм, при этом распределение включений из частиц BN в алюминиевой матрице более равномерное по сравнению с материалом, содержащим 1,5 мас.% BN (рис. 5).

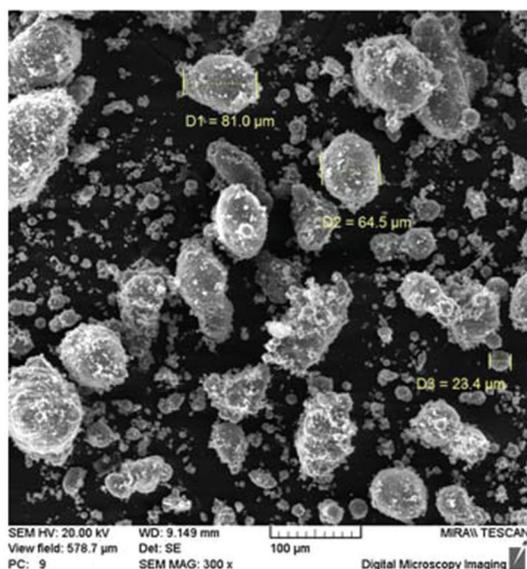


Рис. 3. Общий вид гранул из реакционной шихты (алюминиевая пудра + 5 мас.% наноструктурного порошка cBN + Al)

Fig. 3. The general view of the granules from the reaction mixture (aluminum powder + 5 wt.% of the nanostructured powder of cBN + Al)

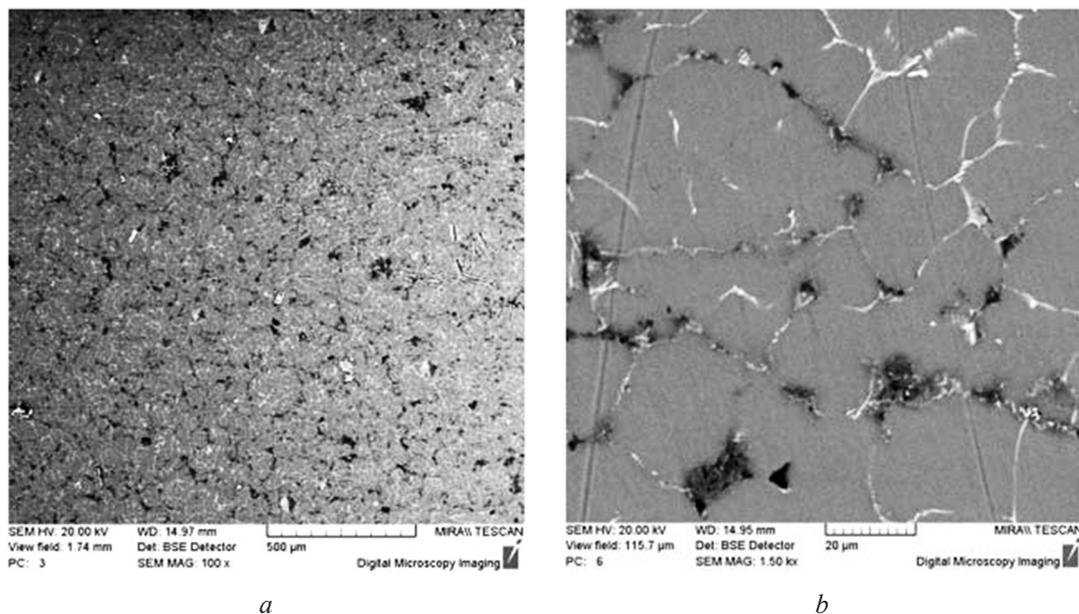


Рис. 4. Структура композиционного материала на основе алюминия, модифицированного добавкой наноструктурного порошка cBN+Al после термобарической обработки. Содержание добавки 1,5 мас. %: *a* – $\times 100$ (без травления); *b* – $\times 1500$

Fig. 4. The structure of the composite material based on aluminum modified with the addition of the nanostructured powder of cBN + Al after thermobaric treatment. The content of the additive is 1.5 wt. %: *a* – $\times 100$ (without etching); *b* – $\times 1500$

С дальнейшим ростом температуры до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в материале с различным содержанием cBN (1,5–5 мас. %) происходит рекристаллизация cBN в агрегатах с образованием его отдельных монокристаллических (поликристаллических) частиц размерами 1–10 мкм, обладающих огранкой, которая характерна для микрочастиц cBN (рис. 6).

При этом, как показал металлографический анализ, размеры зерен алюминия в случае термообработки при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически не увеличиваются по сравнению с материалом, полученным

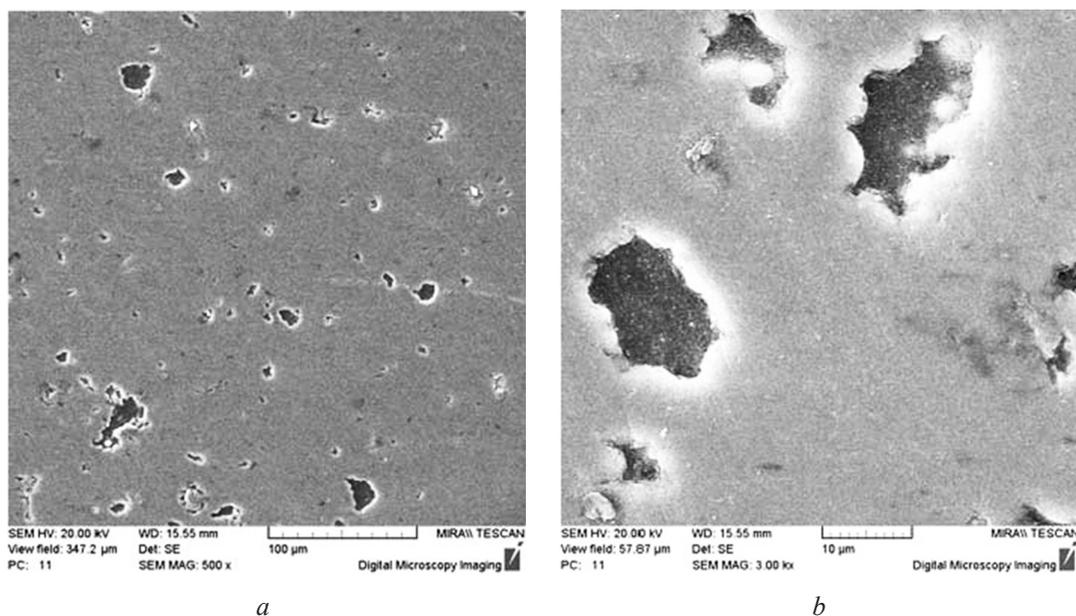


Рис. 5. Структура композиционного материала на основе алюминия, модифицированного добавкой cBN после термобарической обработки. Содержание добавки 5 мас. %: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 3000$ (без травления)

Fig. 5. The structure of the composite material based on aluminum modified with the addition of cBN after thermobaric treatment. The content of the additive is 5 wt. %: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 3000$ (without etching)

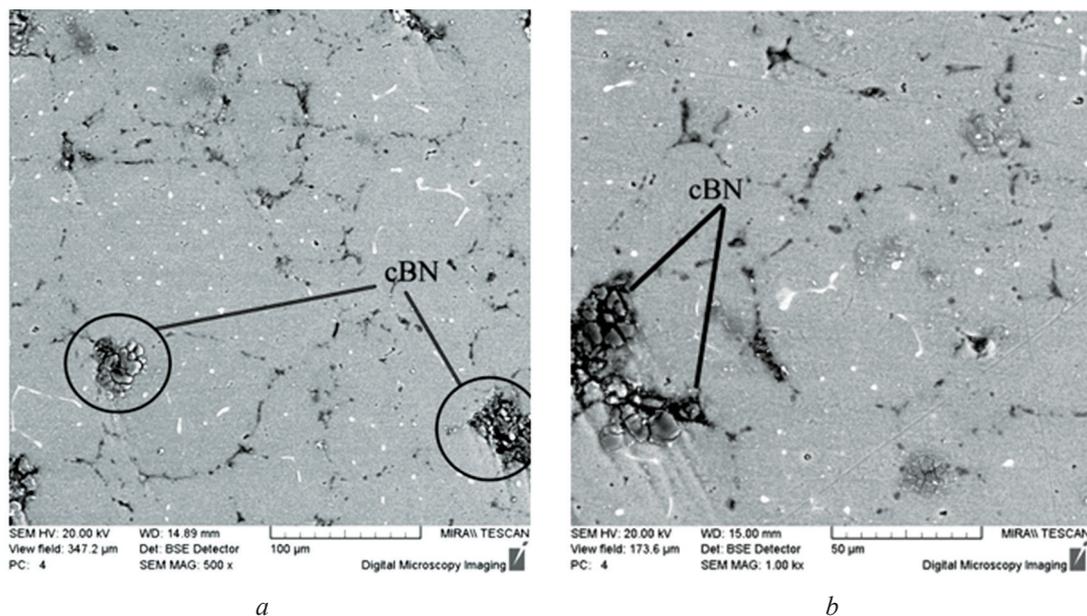


Рис. 6. Образование микронных частиц cBN в результате рекристаллизации наноструктурного cBN в алюминиевой матрице в ходе термобарической обработки. Концентрация добавки наноструктурного cBN 1,5 мас.%. *a* – $\times 500$; *b* – $\times 1000$ (без травления)

Fig. 6. Formation of micron particles of cBN as a result of recrystallization of nanostructured cBN in the aluminum matrix during thermobaric treatment. The concentration of nanostructured cBN additive is 1.5 wt.%. *a* – $\times 500$; *b* – $\times 1000$ (without etching)

при температурах 650–700 °С (10–30 мкм), что можно объяснить как влиянием высокого давления и малой длительности спекания, так и модифицирующим воздействием наполнителя на структуру композита.

Полученный композиционный материал обладает микротвердостью, превышающей микротвердость алюминиевого сплава без введения cBN, сравнимой с алюмоматричным КМ Al + шунгит, и уступает КМ на основе Al с добавкой корунда Al_2O_3 [20]. При этом рост концентрации добавки и температуры обработки от 600 до 800 °С приводит к увеличению микротвердости материала. Так, микротвердость КМ, содержащего 1,5 мас.% добавки наноструктурного cBN, полученного при температуре 650 °С, равна 300–320 МПа, при температуре 800 °С – 400–410 МПа, при температуре 1000 °С – 380–390 МПа. Значения микротвердости образцов КМ, содержащих 5 мас.% добавки наноструктурного cBN, после термобарической обработки при температурах 650, 800 и 1000 °С равны соответственно 330–340, 420–430 и 390–400 МПа.

Снижение значений микротвердости КМ, сформированного при температуре 1000 °С, связано с протеканием рекристаллизационных процессов в BN, которые сопровождаются ростом частиц с образованием cBN микронных размеров.

В ходе проведенной мультифрактальной параметризации структур изломов КМ установлено, что показатель однородности структуры f_{100} образцов с добавкой 1,5 мас.% BN по сравнению с исходными образцами алюминиевого сплава без добавок не изменяется. При этом наблюдается некоторый рост периодической составляющей в структуре, что находит отражение в увеличении показателя упорядоченности Δ_{100} . Отмечено некоторое повышение значения показателя D_{100} , что может быть связано с большей прочностью этих образцов вследствие их мелкозернистости (появление разрушающей трещины происходит при больших значениях напряжения и скорости ее роста выше, чем в других образцах). Сходный эффект наблюдался для высокопрочных материалов [21].

Закключение. Разработана технология получения наноструктурного модификатора алюминиевых сплавов на основе наноструктурного cBN, включающая химико-термическую обработку наполнителя (cBN) в восстановительной атмосфере в среде галогенидов алюминия при диапазоне температур 750–950 °С. Получены образцы наноструктурных модификаторов алюминиевых сплавов cBN+Al, представляющие агрегаты размером 0,5–2 мкм и состоящие из частиц 50–200 нм.

Введение модификаторов в алюминиевую матрицу стабилизирует рост зерен алюминия при термобарической обработке в пределах 10–30 мкм и приводит к повышению микротвердости материала в 1,5–2 раза по сравнению с базовым алюминиевым сплавом без добавок модификатора.

Увеличение температуры термообработки материала с содержанием наноструктурного cBN в пределах 1,5–5 мас.% под давлением 2,5 ГПа до 1000 °С приводит к рекристаллизации cBN с образованием отдельных монокристаллических (поликристаллических) частиц cBN размерами 1–10 мкм. При этом наблюдается снижение микротвердости материала.

Дальнейшее повышение механических характеристик алюмоматричного материала Al-(cBN+Al) связано с оптимизацией технологических режимов термообработки, а также введением добавок-ингибиторов, препятствующих агломерации и рекристаллизации наноструктурного cBN.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований – Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № T18P-183.

Acknowledgements

The work was supported by the grant of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research – Russian Foundation for Fundamental Research for the project № T18P-183.

Список использованных источников

1. Марукович, Е. И. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск: Беларус. навука, 2009. – 192 с.
2. О модифицировании литых алюмоматричных композиционных материалов тугоплавкими наноразмерными частицами / Т. А. Чернышова [и др.] // *Металлы*. – 2009. – № 1. – С. 79–87. <https://doi.org/10.1134/S0036029509010121>
3. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 522 с.
4. Аспекты создания наноструктурированных композиционных модификаторов для сплавов алюминия / П. А. Витязь [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларусі*. – 2011. – Т. 55, № 5. – С. 91–96.
5. Трибологические свойства поршневого сплава, армированного микро- и ультрадисперсными керамическими частицами / А. Т. Волочко [и др.] // *Трение и износ*. – 2011. – Т. 32, № 2. – С. 183–191. <https://doi.org/10.3103/S1068366611020127>
6. Новые технические решения при создании композитов на основе эвтектических силуминов / А. И. Комаров [и др.] // *Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. ОИМ НАН Беларусі, Минск, 30–31 окт. 2008 г / Объедин. машиностр. ин-т НАН Беларусі; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]*. – Минск, 2008. – С. 459–463.
7. Научно-технические основы применения процессов СВС для создания литых алюмоматричных композиционных сплавов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами / А. П. Амосов [и др.] // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2013. – № 8. – С. 3–10.
8. Применение процессов СВС для получения *in situ* алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана: обзор / А. П. Амосов [и др.] // *Изв. высш. учеб. заведений. Цвет. металлургия*. – 2016. – № 1. – С. 39–49. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>
9. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.
10. Formation of aluminum-schungite composite material under pressure / P. A. Vityaz [et al.] // *Eurasian Phys. Tech. J.* – 2016. – Vol. 13, № 1 (25). – P. 35–39.
11. Спекание в условиях высоких давлений алюмоматричных композитов, модифицированных шунгитовым углеродом и корундом / П. А. Витязь [и др.] // *Вестн. науки и образования Северо-Запада России*. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 55–65.
12. Голубев, А. С. Нитрид бора. Структура, свойства, получение / А. С. Голубев, А. В. Курдюмов, А. Н. Пилянкевич. – Киев: Наук. думка, 1987. – 200 с.
13. Витязь, П. А. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения / П. А. Витязь, В. Т. Сенюць // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2015. – № 3. – С. 60–76.
14. Исследование структурных особенностей нитрида бора после механоактивации в атриторе и планетарной мельнице с последующим спеканием в условиях высоких давлений и температур / В. Т. Сенюць [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2016. – Т. 24, № 2. – С. 169–175. <https://doi.org/10.15372/KhUR20160208>
15. Витязь, П. А. Наноструктурные композиционные материалы инструментального назначения на основе кубического нитрида бора / П. А. Витязь, В. Т. Сенюць, В. И. Жорник // *Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / А. В. Алифанов [и др.]; под ред. В. В. Клубовича*. – Витебск: Беларусь, 2017. – Т. 2. – Гл. 14. – С. 254–277.
16. Встовский, Г. В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г. В. Встовский, А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин. – Ижевск: Науч.-изд. центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 116 с.
17. Технологии конструктивных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя, К. А. Солнцева. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 283 с.

18. Колмаков, А. Г. Использование положений системного подхода при изучении структуры, особенностей пластической деформации и разрушения металлов / А. Г. Колмаков // *Металлы*. – 2004. – № 4. – С. 98–107.
19. Особенности деформации и разрушения композиционного материала на основе высокопрочной мартенситно-старяющей стали с быстрозакаленным поверхностным слоем из сплава Co69Fe4Cr4Si12B11 / М. А. Севостьянов [и др.] // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – № 3. – С. 28–35.
20. High pressure sintering of aluminum-matrix composites modified with shungite carbon and corundum [Electronic resource] / P. A. Vityaz [et al.] // EPMA. Lightweight MMCs. Proceedings. 2016. – P. 3296211-1–3296211-6. – Mode of access: <https://www.epma.com/publications/euro-pm-proceedings/product/world-pm2016-lightweight-mmcs> – Date of access: 15.10.2017.
21. Анализ минералов шунгита на микро- и мезоструктурных уровнях после обработки в условиях высоких температур и давлений / А. Г. Колмаков [и др.] // *Изв. высш. учеб. заведений. Химия и химическая технология*. – 2013. – Т. 56, вып. 5. – С. 23–26.

References

1. Marukovich E. I., Stetsenko V. Yu. *Modifying of alloys*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2009. 192 p. (in Russian).
2. Chernyshova T. A., Kobeleva L. I., Kalashnikov I. E., Bolotova L. K. Modification of cast aluminum-matrix composite materials by refractory nanoparticles. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2009, no. 1, pp. 79–87. <https://doi.org/10.1134/S0036029509010121>
3. 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, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 522 p. (in Russian).
4. Vityaz P. A., Komarov A. I., Komarova V. I., Shipko A. A., Senyut' V. T. Creation of nanostructured composite modifiers for aluminium alloys. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2011, vol. 55, no. 5, pp. 91–96 (in Russian).
5. Volochko A. T., Komarov A. I., Komarova V. I., Senyut' V. T., Shipko A. A., Izobello A. Yu. Tribological behavior of piston alloy reinforced by micro- and ultradispersed ceramic particles. *Journal of Friction and Wear*, 2011, vol. 32, no. 2, pp. 183–191. <https://doi.org/10.3103/S1068366611020127>
6. Komarov A. I., Senyut' V. T., Shipko A. A., Tainova A. A., Volochko A. T., Izobello A. Yu. New technical solutions for composites based on eutectic siluminines. Vysotskii M. S. et al. (eds.) *Innovatsii v mashinostroenii: sbornik nauchnykh trudov 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii OIM NAN Belarusi, Minsk, 30–31 oktyabrya 2008 g.* [Innovations in mechanical engineering: proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, October 30–31, 2008]. Minsk, The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2008, pp. 459–463 (in Russian).
7. Amosov A. P., Nikitin V. I., Nikitin K. V., Ryazanov S. A., Ermoshkin A. A. Scientific and technical principles of application of self-propagating high-temperature synthesis processes for production of cast aluminum matrix composite alloys, reinforced discretely by ceramic nanoparticles. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2013, no. 8, pp. 3–10 (in Russian).
8. Amosov A. P., Luts A. R., Latuhin E. I., Ermoshkin A. A. Application of SHS processes for the production of *in situ* aluminum matrixcomposites discretely reinforced with nanosized titanium carbide particles. Review. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Proceedings of Higher Schools. Nonferrous Metallurgy*, 2016, no. 1, pp. 39–49 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>
9. Vityaz P. A., Zhornik V. I., Il'yushchenko A. F., Senyut' V. T., Komarov A. I., Korzhenevskii A. P., Ivakhnik A. V. *Nanodiamonds of detonation synthesis: preparation and application*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 381 p. (in Russian).
10. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Senyut V. T., Heyfets M. L., Chernyak I. N., Kolmakov A. G., Klimenko S. A. Formation of aluminum-schungite composite material under pressure. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2016, vol. 13, no. 1(25), pp. 35–39.
11. Vityaz P. A., Il'yushchenko A. F., Senyut' V. T., Kheifets M. L., Chernyak I. N., Kusin R. A., Zhegzdrin D. I. Sintering of aluminum-matrix composites modified with shungite carbon and corundum in conditions of high pressure. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii = Journal of Science and Education of North-West Russia*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 55–65 (in Russian).
12. Golubev A. S., Kurdyumov A. V., Pilyankevich A. N. *Boron nitride: structure, properties, production*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 200 p. (in Russian).
13. Vityaz P. A., Senyut' V. T. Synthesis and application of nanostructural superhard materials of tool appointment. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 3, pp. 60–76 (in Russian).
14. Senyut' V. T., Kovaleva S. A., Gamzeleva T. V., Grigor'eva T. F. Investigation of the structural features of boron nitride after mechanical activation in attritor and planetary mill followed by agglomeration at high pressure and temperature. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 169–175 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/KhUR20160208>
15. Vityaz P. A., Senyut' V. T., Zhornik V. I. Nanostructured composite materials of tool appointment based on cubic boron nitride. Alifanov A. V., Vityaz P. A., Volochko A. T., Garbachevskii V. V., Glezer A. M., Govor G. A. et al. Klubovich V. V. (ed.). *Promising materials and technologies. Vol. 2, chapter 14*. Vitebsk, Belarus' Publ., 2017. Pp. 254–277 (in Russian).

16. Vstovskii G. V., Kolmakov A. G., Bunin I. Zh. *Introduction to multifractal parameterization of materials structures*. Izhevsk, Scientific and Publishing Center “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2001. 116 p. (in Russian).
17. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Kheifetz M. L., Chizhik S. A., Solntsev K. A., Kolmakov A. G., Alymov M. I., Barinov S. M. *Technologies of constructional nanostructured materials and coatings*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2011. 283 p. (in Russian).
18. Kolmakov A. G. Using the provisions of the system approach in studying the structure, the features of plastic deformation and the destruction of metals. *Metally = Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, no. 4, pp. 98–107 (in Russian).
19. Sevost'yanov M. A., Kolmakov A. G., Molokanov V. V., Zabolotnyi V. T., Umnov P. P., Kurakova N. V. Features of deformation and fracture of a composite material based on high-strength martensitic-aging steel with a rapidly quenched surface layer of the Co69Fe4Cr4Si12B11 alloy. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2010, no. 3, pp. 28–35 (in Russian).
20. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. Ph., Senyut V. T., Kheifez M. L., Charniak I. N., Kusun R. A., Zhehdryn D. I. High pressure sintering of aluminum-matrix composites modified with shungite carbon and corundum. *EPMA. Lightweight MMCs. Proceedings. 2016*. Pp. 3296211-1–3296211-6. Available at: <https://www.epma.com/publications/euro-pm-proceedings/product/world-pm2016-lightweight-mmcs> (Accessed 15 October 2017).
21. Kolmakov A. G., Vityaz P. A., Kheifets M. L., Senyut' V. T. Analysis of schungite minerals on micro- and mesostructural levels after treatment at conditions of high pressures and temperatures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2013, vol. 56, iss. 5, pp. 23–26 (in Russian).

Информация об авторах

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси, главный научный сотрудник, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

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

Хейфец Михаил Львович – доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси, главный научный сотрудник, ГНПО «Центр» Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail

Колмаков Алексей Георгиевич – член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, заместитель директора, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (Ленинский пр., 49, 119991, Москва, Российская Федерация). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru

Information about the authors

Pyotr A. Vityaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

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

Mikhail L. Kheifetz – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Academician-Secretary of the Department of Physical-Engineering Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), Head Researcher, State Scientific and Production Association «Center» of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: mlk-z@mail

Alexey G. Kolmakov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, D. Sc. (Engineering), Deputy Director, A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (49, Leninsky Ave., 119991, Moscow, Russian Federation). E-mail: kolmakov@imet.ac.ru