

УДК 666.3:539.53

П.В. Мазур¹, О.О. Васільєв¹, В.Б. Муратов¹, Т.О. Прихна², П.П. Барвіцький², В.В. Гарбуз¹,
В.В. Картузов¹

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України²

КОМПОЗИЦІЙНА КЕРАМІКА НА ОСНОВІ ДОДЕКАБОРИДУ ТА НІТРИДУ АЛЮМІНІЮ

У роботі отримано керамічний композит $AlB_{12}-AlN$ із суміші нанокристалічних додекабориду та нітриду алюмінію, який має твердість від 19-20 ГПа для кераміки з 25% AlN до 16 ГПа для кераміки з 75% AlN; міцність на згин становить 270-370 МПа, тріщиностійкість – близько 4 МПа·м^{1/2}. Показано, що введення 25% мас. нітриду алюмінію дозволяє знизити температуру гарячого пресування AlB_{12} на понад 200 °С.

Ключові слова: додекаборид алюмінію, нітрид алюмінію, керамічний композит, механічні властивості

П.В. Мазур¹, А.А. Васильєв¹, В.Б. Муратов¹, Т.О. Прихна², П.П. Барвицкий², В.В. Гарбуз¹,
В.В. Картузов¹

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹

Інститут сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины²

КОМПОЗИЦИОННАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ДОДЕКАБОРИДА И НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

В работе получен керамический композит $AlB_{12}-AlN$ из смеси нанокристаллических додекаборида и нитрида алюминия, который имеет твердость от 19-20 ГПа для керамики с содержанием 25% AlN до 16 ГПа для керамики с 75% AlN; прочность на изгиб составляет 270-370 МПа, трещиностойкость – около 4 МПа·м^{1/2}. Показано, что введение 25% мас. нитрида алюминия позволяет снизить температуру горячего прессования AlB_{12} на более чем 200 °С.

Ключевые слова: додекаборид алюминия, нитрид алюминия, керамический композит, механические свойства

P.V. Mazur¹, O.O. Vasiliev¹, V.B. Muratov¹, T.O. Prikhna², P.P. Barvitsky², V.V. Garbuz¹,
V.V. Kartuzov¹

I.M. Frantsevich Institute for Problems of Material Sciences NAS of Ukraine¹

V.M. Bakul Institute of Superhard Materials NAS of Ukraine²

COMPOSITE CERAMICS, BASED ON ALUMINUM DODECABORIDE AND NITRIDE

Ceramic composite $AlB_{12}-AlN$ has been prepared in this work from the mixture of nanocrystalline aluminum dodecaboride and nitride by hot pressing. Nanoscale nature of the powders allowed to develop a scheme of AlB_{12} purification and preparation of various compositions by admixture into initial mix of 25% AlB_{12} and 75% AlN. Hardness of the ceramics decreases with increasing AlN content from 19-20 GPa for the ceramics with 25% AlN to 16 GPa for the ceramics with 75% AlN. Bending strength and fracture toughness is approximately similar with values of 270-370 MPa and about 4 MPa·m^{1/2} respectively for all the specimens. Phase composition of the material has been shown to be sensitive to the oxygen content in the surroundings. Addition of over 25% of AlN into AlB_{12} leads to the reduction of the temperature of hot pressing by more than 200 °C, which is attributed to the influence of both AlN and nanoscale size of the powders.

Keywords: aluminum dodecaboride, aluminum nitride, ceramic composite, mechanical properties

Вступ. Додекаборид алюмінію AlB_{12} є представником цілого класу сполук, у яких бор утворює дванадцятиатомні структурні формування у вигляді правильних ікосаєдрів. Найбільш відомим серед ікосаєдричних сполук бору є карбід бору B_4C ($B_{12}C_3$). Він має широкий спектр застосувань, від броні високого класу та зносостійких композитів, де важливою є висока твердість, до засобів радіаційного захисту (металокерамічні композити) [1] та контролю ядерної реакції у атомних реакторах(компактна кераміка) [2].

Карбід бору, будучи зручним рішенням з точки зору вартості вихідного матеріалу, не завжди є оптимальним з погляду функціональних властивостей та технології виробництва кінцевого продукту. Так його погана механічна стійкість під динамічним навантаженням є відомим недоліком при застосуванні у якості балістичного захисту [3], а високі показники твердості матеріал демонструє лише при малих навантаженнях (до 50 Н). Вміст бору – ключова величина у застосуваннях, пов'язаних із радіаційним захистом – не є найвищим серед сполук бору. Поряд з тим, компактування методом гарячого пресування вимагає температур, які сягають понад 2200 °С[4], що поряд із суттєвими енергетичними затратами веде до швидкого зношування графітної оснастки гарячого пресу. Це у значній мірі нівелює економічні переваги, зумовлені порівняно низькою вартістю вихідного порошку карбіду бору.

Додекаборид алюмінію AlB_{12} , раціональний спосіб синтезу якого був нещодавно розроблений авторами цієї роботи в ІІМ НАН України (спосіб проходить етап патентування), має перспективи усунути деякі із зазначених недоліків B_4C . При порівняннях величинах твердості [4] додекаборид алюмінію не має високотемпературних поліморфних форм і тому, ймовірно, буде мати кращу стійкість при динамічному навантаженні. Вміст бору у додекабориді алюмінію найвищий серед сполук бору, що вказує на його перспективи у атомній енергетиці.

Однак, проблема компактування для додекабориду алюмінію не лише не втрачає актуальності, але набуває додаткових ускладнень. Високі температури компактування, зумовлені високою термічною стійкістю та низькою рухливістю ікосаедрів, характерні для усіх ікосаедричних сполук, включно із додекаборидом алюмінію. Але, на відміну від міцного ковалентного зв'язку атомів вуглецю та бору у структурі B_4C , алюміній пов'язаний із ікосаедрами B_{12} набагато слабше і вже при помірних за мірками карбіду бору температурах існує небезпека термічної дисоціації AlB_{12} та вивільнення алюмінію. Вирішення цих проблем пов'язане із пошуком та розробкою композицій на основі додекабориду алюмінію, які б дозволяли зберегти високі механічні показники кінцевого матеріалу та одночасно задовольнити умови безпечного компактування додекабориду алюмінію.

Проміжна стадія згаданого способу синтезу додекабориду алюмінію передбачає отримання суміші додекабориду алюмінію та нітриду алюмінію AlN . Компоненти цієї суміші, внаслідок особливостей процесу синтезу, являють собою нанорозмірні кристали рівномірно розподілені один в одному на рівні гомогенізації, який складно досягнути механічним перемішуванням порошків. З іншого боку, нітрид алюмінію, в силу простої вюрцитоподібної структури та більш іонного (більш рухливого) характеру зв'язку, може забезпечити достатній рівень дифузії матеріалу при спіканні за температур віддалених від температури плавлення (подібна для обох матеріалів – $2200\text{ }^\circ\text{C}$), особливо в умовах підвищеного тиску при гарячому пресуванні.

Композит $AlB_{12}-AlN$, у разі успішного отримання, може поєднувати високу твердість ікосаедричних сполук бору та низку корисних якостей, притаманних для нітриду алюмінію. Зокрема, очікується, що він буде володіти підвищеною теплопровідністю, яка є бажаним фактором у напрямках застосування, де тепловідвід є критичним: від регулюючих стрижнів ядерних реакторів до сучасних гальмівних систем на транспортних засобах.

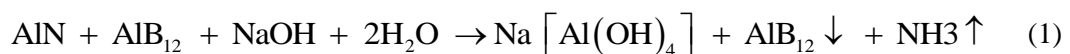
Мета даної роботи, в світлі перспектив використання композиційної кераміки на основі додекабориду та нітриду алюмінію, окреслених вище, полягала у отриманні композиту $AlB_{12}-AlN$, вивченні його механічних властивостей та їх залежності від співвідношення компонентів кераміки.

Матеріали та методики. Для синтезу вихідної суміші додекабориду та нітриду алюмінію були використані доступні для придбання промислові порошок алюмінію марки ПА-1 та нітрид бору Запорізького заводу абразивних матеріалів. Загальний вміст кисню у сировині не перевищував $0,5\%$ за масою.

Синтез вихідної суміші здійснювали взаємодією алюмінію у з нітридом бору із забезпеченням безкисневого середовища в умовах вакуумного термічного синтезу. Продукт взаємодії містив близько 75% за масою нітриду алюмінію та 25% додекабориду алюмінію. Вміст кисню, зумовлений його наявністю у сировині, не перевищував $0,5\%$. Середній діаметр частинок AlB_{12} , досліджений за методом БЕТ та рентгенівською дифракцією, становив $50-150\text{ нм}$, нітриду алюмінію за рентгенівською дифракцією – близько 50 нм .

Отриману суміш додекабориду алюмінію та нітриду бору піддавали хімічній обробці з метою виділення чистого AlB_{12} для подальшого приготування сумішей з різним співвідношенням AlB_{12} та AlN . Хімічні властивості утворених сполук дещо різняться в кислотно-основному плані. Встановлено, що нанорозмірний стан підсилює різницю властивостей порошків. Це дало можливість розробити регламент хімічної обробки вихідної шихти з метою селективного вилучення складових порошків.

Вилучення AlB_{12} проведено шляхом лужного розкладу AlN згідно рівнянню хімічної реакції:



Для приготування сумішей із різним співвідношенням компонентів вихідний продукт взаємодії домішували отриманим внаслідок хімічної очистки додекаборидом алюмінію відповідно до табл. 1

Суміші №№1-3 піддавали розмелу у планетарному млині в ацетоні протягом 4 годин із застосуванням твердосплавних (ВК) мелючих тіл. Такий режим помелу вибраний з врахуванням твердості додекабориду алюмінію і застосовувався з метою рівномірного розподілу доданого додекабориду у вихідній суміші (суміш №1), а також для руйнування агломератів AlB_{12} , які утворюються при хімічній обробці. Відділення розмелених сумішей від ацетону здійснювали висушуванням на повітрі. Чистий додекаборид алюмінію (суміш №4) піддавали розмелу протягом 15 хв для руйнування агломератів.

Таблиця 1

Вихідні суміші додекабориду та нітриду алюмінію		
№ суміші	Вміст AlB_{12} , % мас.	Вміст AlN , % мас.
1	25	75
2	50	50
3	75	25
4	100	–

Підготовлені суміші піддавали гарячому пресуванню з контролем за усадкою під тиском 30 МПа. Для ізоляції компактованого матеріалу від графіту пресформи та пуансонів та зниження тертя, оснастку покривали порошком гексагонального нітриду бору. Температури пресування для різних зразків становили 1800-2080 °С. Компактовані зразки кераміки отримували у вигляді штапиків розміром 5x5x36 мм.

Отримані композиційні матеріали були піддані ряду атестаційних досліджень. Контроль повноти компактування здійснювали за пористістю, отриманою шляхом вимірювання густини пікнометричним методом та порівняння її із теоретичною густиною для конкретного матеріалу, виходячи із теоретичної густини 2,54 та 3,16 г·см⁻³ для AlB_{12} та AlN відповідно. Фазовий склад матеріалів після пресування визначали за даними рентгенівської дифракції, отриманими на дифрактометрі ДРОН-УМ1 в монохроматичному випромінюванні $Cu K_{\alpha}$ в діапазоні кутів 2θ від 10-18 до 77-80° (залежно від зразка). Аналіз дифрактограм виконували за допомогою програмного забезпечення PowderCell 2.4, яке включає засоби повнопрофільного аналізу Рітвельда [5].

Випробування механічних властивостей отриманих композитів включали дослідження мікротвердості міцності на згин та тріщиностійкості. Мікротвердість за методом Вікерс вимірювали на мікротвердомірі Innovatest Falcon 509 з навантаженням на індентор 10Н для зразків №2 та №3, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 500 Н для зразка №3 і 50 Н для зразка №4. Міцність на згин була виміряна на приладі Plastics Bending Tester AS-102. Тріщиностійкість розраховували за емпіричною формулою, запропонованою Евансом та Чарльзом у [6]:

$$K_{IC} = 0,16(c/a)^{-1,5} (H_V a^{0,5}),$$

де c – середня довжина тріщин у вершинах відбитку у випробуванні твердості, мкм; a – половина середньої довжини відбитка при випробуванні твердості, мкм; H_V – твердість за методом Вікерс, ГПа.

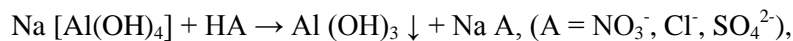
Результати та обговорення. Властивості вихідних порошків, такі як чистота, розмір частинок, розподіл частинок за розмірами та їх морфологія, є ключовими технологічними аспектами синтезу керамічного композиту AlB_{12} - AlN . Іншим критичним фактором є вартість порошків. Доступні у літературі способи синтезу порошку додекабориду алюмінію передбачають отримання або багатофазних продуктів у яких оксид алюмінію є одним із компонентів (його масова частка становить десятки відсотків) або кількості додекабориду є настільки незначними, що дослідження його властивостей викликає ускладнення [7]. Без сумніву, отримання керамік на його основі в такому разі є надзвичайно складним завданням – кількості чистого додекабориду алюмінію є надто малими, а матеріалам із суміші із оксидом буде характерна висока крихкість останнього. Потрібно відмітити, що розроблені також способи синтезу додекабориду алюмінію із простих речовин [8,9], однак їх економічні перспективи значно ускладнені високою ціною елементарного бору. Ситуація із нітридом алюмінію дещо простіша, – він давно доступний для виробництва масивних виробів – але способи його синтезу не вирізняються ані простотою, ані низькою вартістю[10]. З двох масових способів виробництва, прямого нітрування алюмінію та

карботермічного відновлення оксиду алюмінію з подальшим нітруванням, перший потребує домелу порошку, а другий має високу вартість.

Спосіб синтезу суміші додекабориду алюмінію, розроблений авторами цієї роботи, передбачає використання порівняно недорогих матеріалів, порошоків алюмінію та нітриду бору, та передбачає отримання порошоків у нанокристалічному стані. У такому разі суміш порошоків є оптимальною для подальшого гарячого пресування.

Нанокристалічний характер порошоків шихти має й іншу суттєву перевагу – значною мірою інертні з точки зору кислотно-основної взаємодії у крупнокристалічному стані AlB_{12} та AlN у нанокристалічному стані піддаються хімічній обробці, що дозволяє розробити способи виділення чистих компонентів. Реалізації розділення сприяють деякі відмінності у характері кислотно-основної взаємодії компонентів синтезованої суміші. Ця особливість була використана в даній роботі для отримання чистого додекабориду алюмінію для приготування збагачених ним сумішей.

Принципово зазначені хімічні особливості шихти дозволяють здійснювати і інші напрямки розділення, а саме $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ взаємодією розчинних продуктів реакції (1) із сильними кислотами, та AlN відмиванням розчином нітратної кислоти із вихідної шихти:



Ці способи розділення наразі знаходяться в розробці і не використовувались у даній роботі.

Екзотермічний характер процесу синтезу вихідної шихти та особливості реалізації хімічної очистки ведуть до агломерації вихідних нанорозмірних кристалітів додекабориду та нітриду алюмінію в частинки, що можуть сягати мікронних розмірів. При компактуванні такі агломерати ведуть себе як окремі частинки, нівелюючи переваги нанокристалічних порошоків. Руйнування агломератів можна здійснювати шляхом ультразвукової обробки або розмелу. Вибір на користь розмелу в даній роботі пов'язаний із необхідністю якісної гомогенізації сумішей №2 та №3, приготованих додаванням до вихідної шихти чистого додекабориду алюмінію, а також низькою продуктивністю лабораторних ультразвукових диспергаторів.

Додекаборид алюмінію – класичний надтвердий матеріал. Тому при його розмелі необхідно було мінімізувати намел внаслідок його абразивної дії. Використання куль зі сплаву ВК дозволило звести кількість домішок до мінімуму, однак повністю уникнути забруднення шихти матеріалом мелючих тіл не вдалося, що можна бачити із результатів рентгенівських досліджень фазового складу після пресування (табл. 2) – борид вольфраму присутній у всіх зразках, які були піддані тривалому розмелу і є продуктом взаємодії матеріалу мелючих тіл із додекаборидом алюмінію. На нашу думку, зазначені домішки суттєвим чином не вплинули на результати оцінок властивостей керамік, зроблених у даній роботі.

Властивості отриманих зразків керамічного композиту подані у табл. 2 (номер зразка відповідає номеру суміші). Як видно із таблиці, додавання до додекабориду алюмінію нітриду алюмінію сприяє зниженню температури компактування на понад 200 °С із досягненням повного компактування, що є принципово важливим для довговічності експлуатації графітної оснастки обладнання, особливо при серійному виробництві продукції. Важливо відмітити, що температура гарячого пресування чистого додекабориду алюмінію є суттєво нижчою від такої для карбіду бору (2240 °С), зокрема і через активацію спікання за рахунок нанорозміру частинок порошку.

І додекаборид алюмінію, і нітрид алюмінію мають достатньо високі значення констант термічної дисоціації за температур компактування, використаних у даній роботі. Це вимагає особливого підходу при гарячому пресуванні кераміки на їх основі. Температури компактування повинні забезпечувати ефективну усадку, але бути достатньо низькими для максимального зниження виділення алюмінію у вільному стані. Такий тонкий контроль температурного режиму не завжди вдається забезпечити. Про це свідчить наявність оксиду алюмінію та нітриду бору у зразках №№1-3, які утворюються внаслідок взаємодії продуктів дисоціації між собою з утворенням BN , так і з киснем оточення з утворенням Al_2O_3 . Ефекти від процесів дисоціації можна нівелювати ізоляцією системи від впливу оточення. За умови щільного прилягання пуансонів до графітної пресформи, нітрид бору, який використовується у якості ізоляційного матеріалу та твердої змазки при гарячому пресуванні, одночасно відіграє роль ефективного "сторожа" компактованої шихти (зразок №4). У разі, якщо екранування кисневмісного оточення (атмосфери повітря у випадку класичного гарячого пресування) відбувається не ефективно, алюміній, який

виділяється внаслідок дисоціації компонентів шихти, швидко взаємодіє із киснем з утворенням оксиду алюмінію, що може призводити до неконтрольованої зміни фазового складу пресовок. Тому якість графітної оснастки при отриманні композитів на основі AlB_{12} та AlN , на відміну від компактування оксидних систем або, наприклад, карбіду бору, є критичною для отримання якісного продукту. Безумовно, процес можна було б здійснювати на спеціальному обладнанні – гарячому пресі з контрольованою атмосферою або вакуумом. Але його використання веде до суттєвих технологічних ускладнень і може розглядатись лише як дослідницька альтернатива.

Таблиця 2

Температури гарячого пресування та основні властивості керамік на основі додекабориду та нітриду алюмінію

№ зразка	Температура пресування, °С	Фазовий склад, % мас.	Пористість, %	Твердість $H_{V,10Н}$, МПа	$\sigma_{зг}$, МПа	$K_{1С}$, МПа·м ^{1/2}
1	1850	$AlN - 81,68$ $AlB_{12} - 3,12$ $Al_2O_3 - 7,19$ $BN - 7,19$ $WB_2 - 0,75$	< 1	16-17	270-300	–
2	1820	$AlN - 44,03$ $AlB_{12} - 35,88$ $Al_2O_3 - 12,73$ $BN - 6,86$ $WB_2 - 0,86$	< 0,5	17-18	280-300	–
3	1820	$AlN - 23,41$ $AlB_{12} - 52,65$ $Al_2O_3 - 11,19$ $BN - 11,47$ $WB_2 - 1,28$	~ 0	19-20	300-370	3,8±0,5
4	2080	$AlB_{12} - 98$ $BN - 2$	~0	23-24	285	4,2±0,5

Кераміка на основі чистого додекабориду алюмінію має найвищі значення твердості серед досліджених зразків і є співставною із показниками для карбіду бору, отриманого гарячим пресуванням[4]. При додаванні нітриду алюмінію спостерігається чітка закономірність до зниження значень твердості. Однак, її значення при максимальному вмісті нітриду бору (зразок №1) залишається достатнім для розгляду цієї кераміки у якості матеріалу балістичного захисту, абразивних систем та ін. При цьому міцність на згин та тріщиностійкість залишаються практично незмінними та мають достатньо високі значення.

Часто твердість матеріалу, виміряна при низьких навантаженнях різко знижується при його зростанні. Навантаження при проникненні ударника у кераміку може сягати декількох тисяч ньютон, і поведінку надтвердих матеріалів в таких умовах складно прогнозувати на основі даних отриманих при суттєво нижчих навантаженнях. Тому залежність твердості матеріалу від навантаження є важливою характеристикою при використанні керамічних матеріалів у якості балістичного захисту.

Для зразка №3, який можна вважати найбільш перспективним з точки зору поєднання технологічних переваг та високих механічних показників, було здійснено дослідження залежності твердості від навантаження на індентор в тесті Вікерс. Результати дослідження подані на рис.1, який демонструє виняткову здатність кераміки AlB_{12} - AlN до збереження значень твердості при підвищених навантаженнях.

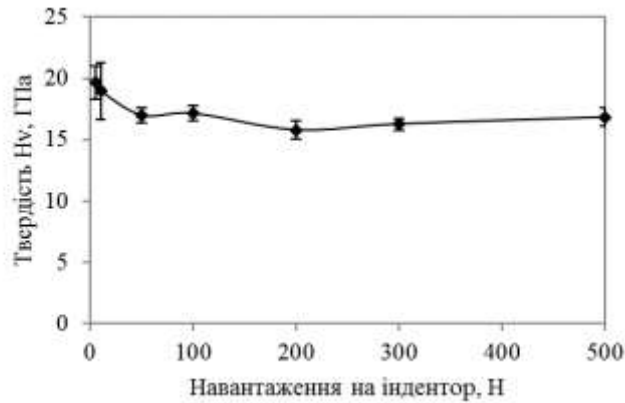


Рис. 1. Залежність твердості зразка №3 від навантаження на індентор в тесті Вікерс.

Відмітимо, що при збільшенні навантаження від одиниць до сотень ньютон твердість зразка №3 інтенсивно знижується до близько 16 ГПа, але при подальшому зростанні вона залишається практично сталою. Це надає суттєві переваги даній кераміці у порівнянні з, наприклад, карбідом бору, для якого зростання навантажень понад 100 Н часто призводить до руйнування матеріалу в зоні інденатації.

Висновки. У роботі отримано керамічний композит $\text{AlB}_{12}\text{-AlN}$ з різним співвідношенням компонентів та досліджено деякі його механічні властивості, важливі для використання матеріалу в якості матеріалу з високою твердістю: твердість, міцність на згин та тріщиностійкість. При збільшенні масової частки нітриду алюмінію у композиті, матеріал демонструє зниження твердості від 23-24 ГПа для чистого додекабориду до 16 ГПа для кераміки з 75% AlN зі збереженням міцності на згин та тріщиностійкості. Мінімальна твердість для даного матеріалу є задовільною для його використання в засобах балістичного захисту, абразивних системах та ін.

Показано, що введення 25% мас. нітриду алюмінію дозволяє знизити температуру гарячого пресування на понад 200 °С з помірним пониженням твердості відносно чистого AlB_{12} , що є важливим для збільшення терміну експлуатації графітної оснастки гарячого пресу. Для встановлення оптимального з точки зору поєднання високих механічних характеристик та низької температури компактування доцільними є додаткові дослідження в області низького (< 25% мас.) вмісту в композиті нітриду алюмінію.

Подяка. Робота виконана за сприяння програми NATO Science for Security and Peace в межах проекту G985070 "New Shock-Resisting Ceramics: Computer Modelling, Fabrication, Testing"

Список використаних джерел:

1. Shirvanimoghaddam K. et al. Boron carbide reinforced aluminium matrix composite: Physical, mechanical characterization and mathematical modelling // Mater. Sci. Eng. A. – 2016. Vol. 658. – P. 135–149.
2. C.Subramanian, A.K.Suri. Development of Boron-based materials for nuclear applications // Technol. Dev. Artic. – 2010. № 313. – P. 14–22.
3. Domnich V. et al. Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress // J. Am. Ceram. Soc. – 2011. Vol. 94, No. 11. – P. 3605–3628.
4. Барвицький П.П. и др. Структура и свойства материалов на основе $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ // Вісник національного технічного університету "ХП" Механіко-технологічні системи та комплекси. 2016. – №. 50. – С. 14–22.
5. McCusker L.B. et al. Rietveld refinement guidelines // J. Appl. Crystallogr. – 1999. Vol. 32, No. 1. – P. 36–50.
6. Evans A.G., Charles E.A. Fracture Toughness Determinations by Indentation // J. Am. Ceram. Soc. – 1976. Vol. 59, No 7–8. – P. 371–372.
7. Кислый П.С. и др. Бориды алюминия / ред. Новиков Н.В. Киев: Наукова думка, 1990. 192 с.
8. Koroglu A., Thompson D.P. In vacuo production of $\alpha\text{-AlB}_{12}$, $\text{C}_4\text{AlB}_{24}$, $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ and $\text{Al}_3\text{B}_4\text{C}_2$ powders // J. Eur. Ceram. Soc. 2012. – Vol. 32, No 12. – P. 3501–3507.
9. Dongshan W. et al. Preparation and Characterization of AlB_{12} Powder // J. Chinese Ceram. Soc. – 2008. Vol. 36, No. 10. – P. 2–8.
10. Ramisetty M., Sastri S., Kashalikar U. Manufacturing of aluminum nitride powder for advanced applications // Am. Ceram. Soc. Bull. – 2014. Vol. 93, No 6. – P. 28–31.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017