

УДК621.762.5

С.М. Коновал, Т.О. Гарбуз, М.П. Беженар, докт. техн. наук,
С.А. Божко, П.А. Нагорний, кандидати технічних наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ПОРИСТОЇ І ЗЕРЕННОЇ СТРУКТУР ПРИ ДВОСТАДІЙНОМУ СПІКАННІ НАДТВЕРДИХ РСВН СИСТЕМ cBN – Al, cBN – TiB₂ (TiN) – Al

The experimentally-rated method of modeling of porous and grain structures of cubic boron nitride composites, which obtain by reactionary sintering with preimpregnation by aluminium under pressure is proposed. Possibility of process control of aluminium dispersing in a mixture at an impregnation stage under pressure is shown.

Композиційні матеріали кубічного нітриду бору (КНБ), які широко відомі основною продукцією — різальними пластинами (PCBN), в усьому світі виробляють із застосуванням техніки і технологій високого тиску. В Україні таку продукцію (киборит-1, киборит-2) виробляють за оригінальною технологією, розробленою ІНМ НАН України, в основу якої покладено спосіб реакційного спікання шихти КНБ з алюмінієм у дві стадії [1].

Згідно із зазначеним способом перша стадія спікання (попереднє просочення під тиском алюмінію, що міститься в шихті) має на меті забезпечити більший ступінь гомогенності розподілу складових шихти (cBN і Al), ніж це може бути досягнуто звичайними методами змішування шихти. Просочування під зовнішнім тиском, який створює апарат високого тиску — АВТ (при контактних кутах змочування $\Theta > 90^\circ$, коли капілярний тиск набуває від'ємних значень), виконується в тому самому АВТ, що й наступна стадія спікання, але при менших значеннях p, T -параметрів. Вимоги до останніх: забезпечення області стабільності cBN; температура повинна перевищувати температуру плавлення Al; тиск має протидіяти гідростатичному опору і від'ємному капілярному тиску. Зазвичай $p = 2,5$ ГПа, $T = 1200-1300$ К. Тривалість просочення — 20-40 с.

Очевидно, площа контактної поверхні cBN—Al_L (Al_L— розплав Al) після завершення операції просочення під тиском залежить від структури пористості, якої набуває порошкова система при досягненні p, T -параметрів просочення. Порошкова система, у свою чергу, залежить від зернистості вихідних порошків, а також від формування міжзеренних cBN—cBN контактів, які утворюються і зростають за участю дислокаційних механізмів у кристалічній ґратці cBN.

Загальна площа поверхні контакту cBN—Al_L, що досягається у процесі просочення під тиском, і гомогенний розподіл Al_L впливають на кінетику реакцій, що відбуваються на другій стадії спікання при більш високих p, T -параметрах, коли $\Theta < 90^\circ$. Управління процесом розподілу алюмінію в шихті (диспергування Al) на стадії просочення порошків cBN різної зернистості повинно як надійніше гарантувати повноту перебігу реакцій на завершальному етапі спікання і відповідно відсутність залишкового алюмінію в локальних об'ємах композиту.

Визначення основних принципів моделювання пористої і зеренної структур композитів системи cBN—Al дозволить перейти до моделювання структури композитів більш складних систем, які отримують таким самим способом реакційного спікання з Al за дві стадії, а в шихті певну долю cBN замінює тугоплавка сполука, яка так само бере участь у реакціях. У загальному випадку зернистості вихідних порошків cBN і тугоплавкої сполуки відрізняються. Моделювання пористої і зеренної структур у складних системах дасть змогу управляти фазовим складом композитів. Прогнозувати це можна за результатами нашого дослідження

системи $cBN-Al-C_d$ (алмаз), де перевага тих чи інших реакцій з утворенням подвійних і потрійних фаз залежала від співвідношення поверхні контакту $cBN-Al$ і C_d-Al , яке в першому наближенні розраховували за площею питомої поверхні вихідних порошків [2].

В представленій тут роботі моделювання структури виконували для тих систем, де нами накопичений достатній обсяг експериментальних результатів, необхідних для розрахунків. Це система $cBN-Al$ (з варіантами зернистості вихідного cBN), $cBN-Al-TiB_2$, $cBN-Al-TiN$, $cBN-Al-C_d$.

Експериментальні методики

Спінання PCBN виконували в АВТ типу КЗ (ковадло із заглибленням). Основні операції, що зумовили консолідацію порошкових систем на основі КНБ, у порядку послідовності їх у технологічному процесі двостадійного реакційного спікання такі:

1. Збирання АВТ (набивка). Ущільнення порошкової системи в робочому об'ємі АВТ досягається без застосування тиску при кімнатній температурі.

2. Холодне пресування в АВТ ($p = 2,5$ ГПа, $T = 300$ К).

3. Просочування під тиском розплавом алюмінію з шихти в АВТ ($p = 2,5$ ГПа, $T = 1200$ К, $\tau = 30$ с.). При спіканні порошків cBN без Al цей етап здійснюється за тих самих умов.

4. Завершальне спікання в АВТ, варіант перший: $p = 4,2$ ГПа, $T = 1750$ К, $\tau = 180$ с.

5. Завершальне спікання в АВТ, варіант другий: $p = 7,7$ ГПа, $T = 2300$ К, $\tau = 90$ с.

Параметри структури, які визначали після всіх етапів консолідації, і методики, що застосовували для їх визначення, такі:

Середній розмір зерен у вихідних порошках кожної компоненти шихти D_0 визначали гранулометричним аналізом на приладі фірми SESHIN з лазерним датчиком LMS-3 [3]. Величина D_0 відповідає гранично високому розміру частинок, вміст яких у пробі – 50 % за об'ємом. При одномодальному розподілі частинок за розмірами таке середнє значення практично відповідає максимуму на кривій диференціального розподілу.

Пористість консолідованих систем Π_1 (на першому етапі) визначали за масою шихти і геометричними розмірами об'єму, який вона займає в схемі збирання. $\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$ – методом ртутної порометрії і/або гідростатичного зважування [4–6].

Середній розмір частинок (зерен) у консолідованих системах D_1, D_2, D_3 і D_4 – металографічними дослідженнями на мікроскопах NEOPHOT-3 і ЭМ-200 [7–9].

Діаметр каналів між порами d_k — методом ртутної порометрії.

Методика розрахунків

Вихідний порошок кожної компоненти шихти моделювали за системою рівновеликих куль діаметром D_0 . У такій системі кількість зерен дорівнює кількості пор. Параметри системи наведені в табл. 1.

Кількість зерен в 1 г порошку

$$N [\Gamma^{-1}] = 6/(\rho_0 \pi D_0^3), \quad (1)$$

де ρ_0 — рентгенівське значення густини.

Кількість зерен в 1 cm^3 , екстрапольована на нульову пористість

$$N_0 [cm^{-3}] = 6/(\pi D_0^3). \quad (2)$$

З урахуванням реальної пористості Π

$$N_{\Pi} [cm^{-3}] = (1 - \Pi)N_0. \quad (3)$$

Таблиця 1. Характеристики вихідних порошків

Порошок	D_0 , мкм	ρ_0 , г/см ³	N , г ⁻¹	N_0 , см ⁻³
КМ 3/2	2,5	3,49	$3,5 \cdot 10^{10}$	$1,22 \cdot 10^{11}$
КМ 7/5	6,0	3,49	$2,5 \cdot 10^9$	$8,84 \cdot 10^9$
КМ 14/10	12,0	3,49	$3,2 \cdot 10^8$	$1,11 \cdot 10^9$
КМ 60/40	50,0	3,49	$4,4 \cdot 10^6$	$1,53 \cdot 10^7$
Al-80	30,0	2,70	$2,6 \cdot 10^7$	$7,07 \cdot 10^7$
TiB ₂ -3	2,2	4,52	$4,0 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^{11}$
TiN-1	0,3	5,44	$1,3 \cdot 10^{13}$	$7,07 \cdot 10^{13}$
АСМ 5/3	4,0	3,52	$8,5 \cdot 10^9$	$2,98 \cdot 10^{10}$

Так само розраховували кількість зерен кожної компоненти шихти cBN–Al і cBN–Al–"добавка", з урахуванням заданого співвідношення компонентів (табл. 2).

Ефективний розмір пор d у компактах з порошків КНБ після кожної технологічної операції розраховували за формулою, що моделює процеси в пористій системі, при яких ущільнення не супроводжується коагуляцією пор і збираючою рекристалізацією, тобто кількість пор, як і у вихідному стані порошкової системи, дорівнює кількості зерен, тому виконується співвідношення $(d_i/D_i)^3 = \Pi_i/(1-\Pi_i)$ або

$$d_i = D_i \left(\frac{\Pi_i}{1 - \Pi_i} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

де Π_i , D_i – пористість і діаметр зерна cBN після i -ї технологічної операції; $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

Таблиця 2. Варіанти шихти і співвідношення кількості зерен її складових

Компоненти шихти (відношення по масі)	$N_{\text{cBN}}:N_{\text{Al}}: N_{\text{доб}}$	ΣN , г ⁻¹
КМ 3/2+Al(-80) (9:1)	12000:1	$3,15 \cdot 10^{10}$
КМ 7/5+Al(-80) (9:1)	870:1	$2,25 \cdot 10^9$
КМ 14/10+Al(-80) (9:1)	110:1	$2,91 \cdot 10^8$
КМ 60/40+Al(-80) (9:1)	3:2	$6,56 \cdot 10^6$
КМ 14/10+TiB ₂ (-3)+Al(-80) (8:1:1)	100:1500:1	$4,26 \cdot 10^9$
КМ 3/2+TiN(-1)+Al(-80) (74:16:10)	10000:800000:1	$2,11 \cdot 10^{12}$
КМ 7/5+АСМ 5/3+Al(-80) (85:5:10)	820:160:1	$2,55 \cdot 10^9$

Діаметр міжзеренних контактів розраховували за формулою

$$D_{\text{cBN-cBN}} = D_i \sqrt{D_{\text{эф}}^2 - 1}, \quad (5)$$

де $D_{\text{эф}} = \left(\frac{1 - \Pi_i}{1 - \frac{\pi}{6}} \right)^{1/3}$

Тиск Лапласа в пористому середовищі визначали за формулою $p_L = \frac{2\sigma_{\text{тр}}}{d_k}$, де $\sigma_{\text{тр}}$ – поверхневий натяг на границі "конденсована фаза — газ"; d_k – діаметр каналу пори. При контактній взаємодії порошкової системи з рідкою фазою величину капілярного тиску p_L обумовлює діаметр каналу пори і поверхневий натяг на границі "конденсована фаза-рідина", який

визначається кутом змочування Θ і поверхневим натягом рідкої фази σ_{pr} . Капілярний тиск на границі конденсована фаза — рідина" дорівнює:

$$p_L = \frac{4\sigma_{\text{pr}} \cos\Theta}{d_k}. \quad (6)$$

Поверхневий натяг алюмінію $\sigma_{\text{pr}} = 0,915 \text{ Дж/м}^2$ [10]. При $T = 1273 \text{ К}$, $p = 2,5 \text{ ГПа}$: $\Theta_{\text{сBN-Al}} > 140^\circ$ [11]; $\cos\Theta \rightarrow -1$.

Результати моделювання та їх аналіз

Порошок сBN. Еволюцію пористої і зеренної структур при спіканні однокомпонентної шихти — порошку сBN — аналізували на порошках різної зернистості. Експериментальні дані по еволюції загальної пористості (табл. 3), розміру зерен (табл. 4) і розміру каналів між порами (табл. 5) базуються на нових і опублікованих [4-7] результатах.

Як засвідчили результати експериментів, ущільнення порошків сBN зернистістю від КМ 5/3 до КМ 40/28 при їх пресуванні в АВТ при $T = 300 \text{ К}$ корелює з рівнянням Бальшина: $\Pi = 1 - (p/A)^n$, де Π — пористість, p — тиск, A і n — коефіцієнти. При цьому була встановлена залежність "A" від зернистості сBN, а останнє рівняння дістало вигляду: $\Pi = 1 - (p/120)^{0,13} D_0^{0,039}$ [4]. Як бачимо з даних табл. 3, така закономірність зберігається в ширшому інтервалі зернистостей — від КМ 3/2 до КМ 60/40. При цьому, зменшення загальної пористості в порошках з більшим розміром зерен спостерігалось не тільки при холодному пресуванні, а й на всіх операціях — від набивки до завершального спікання.

Таблиця 3. Загальна пористість на різних етапах консолідації порошків сBN (експеримент)

Порошок	Загальна пористість за етапами — Π				
	1	2	3	4	5
КМ 3/2	0,50	0,373	0,238	0,130	0,037
КМ 7/5	0,48	0,352	0,215	0,118	0,026
КМ 14/10	0,47	0,330	0,202	0,098	0,025
КМ 60/40	0,45	0,296	0,143	0,092	0,023

Таблиця 4. Середній розмір зерен на різних етапах консолідації порошків сBN (експеримент)

Порошок	Середній розмір зерен сBN за етапами — D , мкм				
	D_0	1	2	3	4
КМ 3/2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
КМ 7/5	6,0	6,0	6,0	6,0	5,2
КМ 14/10	12	12	9,8	9,8	8,5
КМ 60/40	50,0	50,0	14,7	14,7	12,2

На етапі зборки АВТ розмір зерен порошків сBN кожної зернистості зберігався ($D_1 = D_0$). На етапі холодного пресування зерна значно руйнувалися тільки в порошку КМ 60/40, незначно — в КМ 14/10, в інших зерна не руйнувалися ($D_2 = D_1$). Такий же розмір зерен зберігався в усіх порошках на наступному етапі при підвищенні температури до 1200 К ($D_3 = D_2$). Подальше незначне зменшення розміру зерен ($D_4 \leq D_3$) може бути пов'язано з активацією дислокаційних механізмів спікання.

За даними табл. 3 і 4 розраховували ефективний діаметр пор (табл. 6) і діаметр міжзеренних контактів (табл. 7).

Таблиця 5. Діаметр каналів між порами на різних етапах консолідації порошків cBN (експеримент) і капілярний тиск на границі cBN–Al_L

Порошок	Діаметр каналів між порами за етапами — d_k , мкм			$p_{L(cBN-Al)}$, МПа
	1	2	3	
КМ 3/2	2,1	0,29	0,06	–61
КМ 7/5	4,8	0,47	0,09	–41
КМ 14/10	9,5	0,72	0,11	–33
КМ 60/40	39,0	2,00	0,15	–24

Таблиця 6. Ефективний діаметр пор на різних етапах консолідації порошків cBN (розрахунок)

Порошок	Ефективний діаметр пор за етапами — d , мкм			
	1	2	3	4
КМ 3/2	2,5	2,1	1,7	0,28
КМ 7/5	5,8	4,9	3,9	1,60
КМ 14/10	11,5	7,7	6,2	2,40
КМ 60/40	47	11	8,1	3,60

Таблиця 7. Діаметр міжзеренних контактів на різних етапах консолідації порошків cBN (розрахунок)

Порошок	Діаметр міжзеренних контактів за етапами — $D_{cBN-cBN}$, мкм			
	1	2	3	4
КМ 3/2	Точковий контакт	1,10	1,50	1,92
КМ 7/5		2,82	3,74	4,04
КМ 14/10		4,89	6,22	6,61
КМ 60/40		7,93	10,1	9,50

Результати експериментів і розрахунків (див. табл. 3—7) дають загальне уявлення про еволюцію пористої і зерненої структур на всіх етапах консолідації порошків cBN у процесі їх спікання в АВТ. Особливості структури, що формується в однокомпонентній шихті (cBN) на третьому етапі, слід урахувати при моделюванні процесів у двокомпонентній шихті (cBN–Al) з вихідними порошками cBN такої самої зернистості. Зокрема, це збереження відкритої пористості (у КМ 60/40 вона на межі із закритою), розмір зерен перевищує розмір пор в 1,5—1,8 раза, а розмір каналів між порами — на два порядки величини.

Шихта cBN–Al і трикомпонентні склади шихти. Пористість, що характеризує консолідацію шихти з 10 % Al, а також шихти з Al і добавками тугоплавких сполук, послідовно на всіх етапах спікання подана в табл. 8—10.

Порівняння даних табл. 3 і 8 ілюструє вплив Al у шихті на її ущільнення на всіх етапах спікання. На перших двох цьому сприяють реологічні властивості системи [12], на четвертому етапі — реакційна взаємодія з Al. Тенденція впливу зернистості cBN на ущільнення зберігається такою самою, як у шихті без Al.

Механізми впливу на ущільнення інших добавок подібні. На перших двох етапах тільки нітрид титану гальмує ущільнення, що пояснюється реологічними властивостями порошку TiN з розміром зерен близьким до нанодіапазону. Висока когезійна активність порошків такої дисперсності сприяє утворенню конгломератів із закритою пористістю, які частково успадковуються структурою композиту після завершальної стадії спікання.

Таблиця 8. Пористість порошкових систем, що містять сBN, на різних етапах їх консолідації (експеримент)

Компоненти шихти (відношення по масі)	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄
КМ 3/2+Al(-80) (9:1)	0,43	0,332	0,180	0,021
КМ 7/5+Al(-80) (9:1)	0,42	0,266	0,144	0,015
КМ 14/10+Al(-80) (9:1)	0,41	0,235	0,118	0,014
КМ 60/40+Al(-80) (9:1)	0,40	0,136	0,062	0,012
КМ 14/10+TiB ₂ (-3)+Al(-80) (8:1:1)	0,40	0,225	0,104	0,009
КМ 3/2+TiN(-1)+Al(-80) (74:16:10)	0,44	0,335	0,155	0,018
КМ 7/5+АСМ5/3+Al(-80) (85:10:5)	0,42	0,252	0,128	0,007

Таблиця 9. Параметри пористої і зеренної структури після просочення під тиском шихти сBN+10% Al

Марка сBN	П	d, мкм	d _к , мкм	D _{сBN} , мкм	D _{сBN-сBN} , мкм	D _{Al} , мкм	D _{Al-Al} , мкм
КМ 3/2	0,180	1,7	0,06	2,5	1,40	1,7	0,06
КМ 7/5	0,144	3,9	0,09	6,0	3,55	3,9	0,09
КМ 14/10	0,118	6,2	0,11	9,8	6,03	6,2	0,11
КМ 60/40	0,062	8,1	0,15	14,7	9,71	8,1	0,15

Таблиця 10. Параметри пористої і зеренної структур після просочування під тиском шихти на основі сBN і Al з добавками тугоплавких сполук і алмазу

Компоненти шихти	П	d _к , мкм	D _{доб} , мкм	D _{сBN} , мкм	D _{сBN-сBN} , мкм	D _{Al} , мкм
КМ 14/10+TiB ₂ (-3)+Al(-80)	0,104	0,06	2,2	9,8	5,43	3,2
КМ 3/2+TiN(-1)+Al(-80)	0,155	0,03	0,3	2,5	1,18	0,9
КМ 7/5+АСМ5/3+Al(-80)	0,128	0,09	4	6,0	3,38	3,9

Диборид титану значимо активує ущільнення на останньому етапі (П₄ < 1 %), що пояснюється участю TiB₂ в реакційній взаємодії з компонентами шихти [13]. Такий самий ефект і подібний механізм, що його забезпечує, спостерігаємо в шихті з алмазом [2].

Ущільнення порошкової системи сBN—Al на третьому етапі визначається такими особливостями:

— просочування йде з точкових джерел Al, локально розташованих в об'ємі шихти (див. табл. 2);

— від'ємний капілярний тиск у каналах між порами (див. табл. 5) значно менший від гідростатичного тиску (2,5 ГПа), тобто не перешкоджає просочуванню;

— об'ємний вміст Al_L становить 0,126, що менше об'єму пор (див. табл. 3).

Зазначені особливості приводять до того, що на стадії просочування під тиском формується структура полікристалу, в якій матричною фазою є сBN (з певною пористістю), а локальні об'єми двофазного безпористого матеріалу (сBN+Al) створюють структуру перколяції.

Структуру, сформовану на стадії просочування під тиском (див. табл. 9), моделювали суперпозицією двох структур: однофазного пористого сBN з параметрами П₃, D₃, d₃, d_{к3}, (за даними табл. 3—6) і безпористого двофазного матеріалу (сBN—Al) з тим же розміром зерен сBN і розміром зерен диспергованого Al та контактів D_{Al-Al}, що відповідають розміру пор і

каналів (див. табл. 5, 6). Діаметр контактів $D_{\text{cBN-cBN}}$ розраховували за (5), де до об'єму пор Π_3 з табл. 8 додавали об'єм пор, заповнених алюмінієм, $V_{\text{Al}} = 0,126(1-\Pi_3)$.

Структуру при консолідації шихти інших складів моделювали із застосуванням викладених вище принципів і використанням параметрів $N_{\Pi}[\text{см}^{-3}]_{\text{cBN}}$, $N_{\Pi}[\text{см}^{-3}]_{\text{Al}}$, $N_{\Pi}[\text{см}^{-3}]_{\text{доб}}$ (див. табл. 2 і формулу (3)). Співвідношення кількості зерен кожної компоненти шихти при їх гомогенному розподілі в шихті дає підстави визначати розмір пор (див. формулу (4)) за розміром найбільш дисперсної компоненти, у наведених далі прикладах — це добавки TiN, TiB₂, C_d. Експериментальні результати — загальна пористість (див. табл. 8) та успадкування розміру зерен D_0 зазначених вище добавок на всіх етапах, крім завершального спікання.

Зазначимо, що для TiN, TiB₂, C_d, як і для cBN, при $p = 2,5$ ГПа, $T = 1200$ К контактні кути змочування алюмінієм $\Theta > 90^\circ$. Отже, просочування відбувається під впливом зовнішнього гідростатичного тиску.

Максимальне від'ємне значення капілярного тиску в контактні Al_L з найбільш дисперсним серед інших порошком TiN становить $-0,12$ ГПа, тобто не перешкоджає просоченню під тиском 2,5 ГПа за умови, що всі пори відкриті. Параметри структури після просочення наведені в табл. 10.

Діаметр зерен алюмінію D_{Al} (див. табл. 9 і 10) ілюструє можливості диспергування вихідного порошку алюмінію з гомогенним його розподілом у шихті, що досягаються просоченням під тиском, коли контактні кути змочування твердих компонентів шихти розплавом алюмінію $\Theta > 90^\circ$.

Вихідні зерна алюмінію мають діаметр 30 мкм, захисна плівка Al₂O₃ на їх поверхні, як відомо, не перевищує 5–10 нм, що відповідає вмісту 0,1 % Al₂O₃ у вихідному порошку. При диспергуванні на операції просочування під тиском зростає питома поверхня Al, плівка Al₂O₃ розривається і в зонах ювенільного контакту Al_L з поверхнею cBN і тугоплавких сполук стає можливим розтікання ($\Theta < 90^\circ$), як наслідок — хімічна взаємодія з киснем, адсорбованим поверхнею пор (табл. 11). Такий механізм активує зростання контактів між зернами твердих фаз і реакційну взаємодію їх з алюмінієм на подальших етапах (табл. 12).

Таблиця 11. Кількість Al₂O₃ у диспергованих порошках Al для різних варіантів шихти

Шихта (відношення компонентів по масі)	D_{Al} , мкм	σ_{Al} , м ² /Г	Al ₂ O ₃ , %	N_{Al} (до/після диспергації)
КМ 3/2+Al(-80) (9:1)	1,7	1,31	1,8	1:5500
КМ 7/5+Al(-80) (9:1)	3,9	0,57	0,8	1:460
КМ 14/10+Al(-80) (9:1)	6,2	0,36	0,5	1:115
КМ 60/40+Al(-80) (9:1)	8,1	0,27	0,4	1:51
КМ 14/10+TiB ₂ (-3)+Al(-80) (8:1:1)	3,2	0,69	0,9	1:820
КМ 3/2+TiN(-1)+Al(-80) (74:16:10)	0,9	2,47	3,0	1:37000
КМ 7/5+АСМ 5/3+Al(-80) (85:10:5)	3,9	0,57	0,8	1:460

Таблиця 12. Параметри пористої і зеренної структур після реакційного спікання ($p = 4,2$ ГПа, $T = 1750$ К, $\tau = 180$ с.) композитів cBN

Шихта (відношення компонентів по масі)	Π	d , мкм	D_{cBN} , мкм
КМ 3/2+Al(-80) (9:1)	0,021	0,28	2,4
КМ 7/5+Al(-80) (9:1)	0,015	1,6	5,0
КМ 14/10+Al(-80) (9:1)	0,014	2,4	8,2
КМ 60/40+Al(-80) (9:1)	0,012	3,6	11,8
КМ 14/10+TiB ₂ (-3)+Al(-80) (8:1:1)	0,009	0,9	8,2
КМ 3/2+TiN(-1)+Al(-80) (74:16:10)	0,018	0,2	2,4
КМ 7/5+АСМ5/3+Al(-80) (85:10:5)	0,007	1,1	5,0

Висновки

1. Запропоновано експериментально-розрахунковий спосіб моделювання пористої і зеренної структур композитів кубічного нітриду бору, які отримують двостадійним реакційним спіканням із попереднім просоченням алюмінієм під зовнішнім тиском в АВТ при від'ємних значеннях капілярного тиску.

2. Показано, що в композитах системи cBN–Al без добавок у шихті та з добавками тугоплавких сполук на всіх етапах консолідації шихти загальна пористість зменшується, а розмір пор збільшується при зростанні розміру зерен основної компоненти вихідної шихти (cBN).

3. На етапі просочування алюмінієм під тиском досягається диспергування Al з гомогенним розподілом його у структурі. Ступінь диспергування можна спрямовано змінювати шляхом вибору зернистості основної складової шихти, а також кількістю і дисперсністю добавок.

Література

1. Пат. 25281А, Україна, МКИ С04В35/5831. Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору / М.В. Новіков, О.О. Шульженко, М.П. Беженар, С.А. Божко. - Заявл. 21.07.97, Опубл. 25.12.98, бюл. № 6.
2. Беженар М.П., Божко С.А., Білявіна Н.М. та ін. Фазовий склад композитів, отриманих реакційним спіканням в системі кубічний нітрид бору—алмаз—алюміній при високому тиску // Сверхтв. Материалы. — 2007.— № 6. — С. 27-37.
3. Лошак М.Г. Экспертиза и диагностика сверхтвердых материалов и твердых сплавов // Инструментальный світ. — 2002. — № 2. — С. 38-40.
4. Андреев О.Н., Беженарь Н.П. Холодное прессование порошков кубического нитрида бора при высоких давлениях // Сверхтвердые материалы. — 1991. — № 1. — С. 6-11.
5. Беженарь Н.П., Андреев О.В., Товстоган В.М. Влияние условий спекания на некоторые характеристики поликристаллов КНБ // Поликристаллические материалы на основе синтетического алмаза и кубического нитрида бора. — Киев: ИСМ АН УССР.— 1990. — С.35-47.
6. Беженар М.П. Густина полікристалів кубічного нітриду бору і її залежність від умов спікання порошків // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 8. – Киев: ИСМ НАНУ, 2005. – С. 115-121.
7. Кебко В.П., Беженарь Н.П. Формирование микроструктуры поликристаллов в процессе спекания порошков КНБ // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 2. - С. 14-17.
8. Олейник Г.С., Беженар Н.П., Даниленко Н.В. Эволюция деформационной субструктуры VN_{сф} в процессе термобарического спекания // Сверхтвердые материалы. - 1999. - № 6.- С. 44-51.
9. Беженар Н.П., Шульженко А.А., Божко С.А., Олейник Г.С. Спекание поликристаллических материалов на основе кубического нитрида бора из субмикронных порошков, содержащих фракции нанодиапазона // Физика и техника высоких давлений. – 2007. – т. 17. - № 1. - С. 21-31.
10. Свойства элементов: Справочник. В 2 ч. Ч.1. Физические свойства / Под ред. Г.В. Самсонова. - М.: Металлургия, 1976.- 600 с.
11. Беженар М.П., Логінова О.Б., Божко С.А. Вплив інших фаз в полікристалах VN_{сф} на їх змочування алюмінієм // Сверхтвердые материалы.- 1998. - № 5. - С. 60-61.
12. Беженар М.П., Божко С.А. Реологічні характеристики процесу спікання порошків КНБ при високому тиску // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 8. – Киев: ИСМ НАНУ, 2005. – С. 173-179.

13. Гарбуз Т. О., Криштова О. В., Беженар М. П., та ін. Фізико-хімічна взаємодія в системах $cBN-TiB_2-Al$, $cBN-ZrN-Al$ при спіканні під високим тиском і властивості одержаних композитів// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – Вып. 10. – Киев: ИСМ НАНУ, 2007. – С. 320-327.
14. Беженар Н.П., Божко С.А., Гарбуз Т.А. и др. Особенности кристаллической структуры диборида титана, образующегося в сверхтвердых композитах системы $cBN - Al - TiB_2$ // Сверхтвердые материалы. — 2008. — № 3. — С. 87-90.

Поступила 12.06.08