

УДК 621.762.5

М. П. Беженар, д-р техн. наук¹; С. М. Коновал¹, Т. О. Гарбуз¹, кандидати техн. наук;
Я. М. Романенко, інженер¹; Н. М. Білявина², канд. фіз.-мат. наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Україна

ВПЛИВ ТИСКУ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДТВЕРДИХ PсBN МАТЕРІАЛІВ

Досліджено вплив тиску на холодне пресування і спікання порошків cBN без добавок і з добавкою 10% Al. Встановлено вплив тиску на характеристики пористої структури, фазовий склад, дефектність фаз, густину і твердість композитів.

Ключові слова: високий тиск, спікання, кубічний нітрид бору, пористість, фазовий склад, густина, твердість.

Вступ

Сучасні PсBN матеріали (полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору) – це керамічні композити з вмістом cBN від 45 до майже 100 %, призначені для точіння загартованих сталей, спецсплавів, наплавлених і напилених покриттів [1, 2].

Одержують PсBN матеріали методами порошкової металургії (спіканням порошків) з застосуванням технологій високого тиску.

Метод спікання дозволяє варіювати властивостями композитів за рахунок застосування різних добавок, Необхідність застосування високих тисків викликана тим, що cBN – фаза високого тиску, при температурах спікання (1700 К і вище) область стабільності cBN – при тисках вище 4 ГПа.

На рис. 1 показано лінію рівноваги кубічної та графітоподібної фаз [3], границі термічної активації фазових переходів $BN_{\Gamma} \leftrightarrow BN_{\text{сф}}$ [3, 4], а також області спікання порошків cBN без добавок і реакційного активованого спікання [5]. Як видно з рис. 1, високий тиск – необхідна умова спікання.

Мета даної роботи – дослідження впливу тиску на формування структури і властивостей cBN композитів, одержаних при тисках вище 1 ГПа і проаналізувати можливість одержання

PсBN матеріалів при тисках нижче 4 ГПа в області стабільності графітоподібного гексагонального нітриду бору (hBN).

Методи досліджень

Досліди проводили в сталевих (тиски 1–5 ГПа) і твердосплавних (8 ГПа) апаратах високого тиску (АВТ) [4]. В табл. 1 приведені характеристики АВТ, які використовувались при виконанні досліджень.

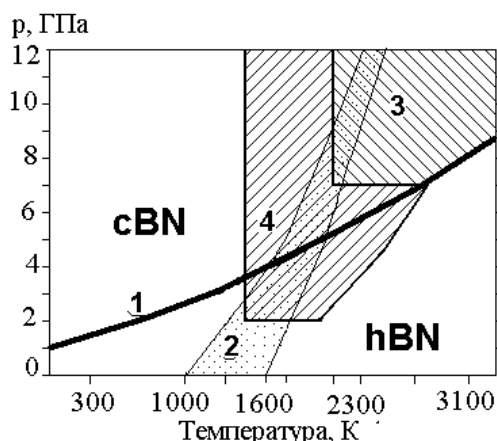


Рис. 1. p, T -діаграма спікання cBN: 1 – лінія фазової рівноваги hBN - cBN; 2 – границі термічної активації переходів hBN \rightarrow cBN, cBN \rightarrow hBN; 3 – область спікання порошків cBN без добавок; 4 – область реакційного, активованого спікання порошків cBN

Вихідні порошки cBN з розміром зерен від 1 до 100 мкм вузького діапазону зернистостей (розмір зерен в фракції відрізняється не більше ніж на 50 %). Варіанти шихти – порошок cBN без добавок та з добавкою алюмінію (10 % за масою). Методи досліджень – ртутна порометрія для визначення пористості і розміру пор; гідростатичне зважування в рідині для визначення густини; рентгеноструктурний аналіз для визначення характеристик субструктури і фазового складу; індентування пірамідою Кнупа при навантаженні 10 Н для визначення твердості.

Таблиця 1. Характеристики апаратів високого тиску, які використовувались при виконанні досліджень

Тип АВТ	Матеріал вставки блок-матриці	Експлуатаційні характеристики			Максимальні розміри полікристалів КНБ			
		Тиск, ГПа	Температура, К	Об'єм ЯВТ, см ³	D, мм	H, мм	V, см ³	V _п /V _{явт}
Тороїд-20	ВК6	7,7	2300	1,7	8,5	4,5	0,25	0,15
КЗ-35	ВК6	4,2	1750	11	14,0	10,0	2,0	0,16
КЗ-55	Інструментальна сталь	4,2	1750	43	27,0	15,0	8,5	0,20

Результати та їх обговорення

Послідовність технологічних операцій при одержанні PсBN композитів наступна: пресування порошків cBN (шихти) в АВТ при кімнатній температурі, тиск 1 – 8 ГПа; нагрівання при високому тиску (температура 750–2300 К); охолодження до температур 300–500 К; зняття тиску.

На першому етапі (пересування при кімнатній температурі) відбувається ущільнення порошків, часткове крихке руйнування, пластична деформація. В табл. 2 приведені визначені методом ртутної порометрії залежності пористості, відносної питомої поверхні та середнього ефективного діаметру каналів між порами від тиску при холодному пресуванні порошків cBN марок КМ 5/3 та КМ 60/40 [6], а в табл. 3 – розраховані за даними табл. 2 середній розмір пор, середній розмір зерна і кількість зерен в одиниці маси в залежності від тиску пресування при кімнатній температурі.

Таблиця 2. Залежність пористості, відносної питомої поверхні та середнього ефективного діаметру каналів між порами від тиску при холодному пресуванні порошків cBN

Марка cBN	Тиск пресування, ГПа						
	10 ⁻²	1	2	3	4	5	8
	Пористість стисненого брикету cBN, %						
КМ 5/3	55	43	39	36	32	30	26
КМ 60/40	42	34	30	26	23	21	16
	Середній розмір каналів між порами в стисненому брикеті cBN, мкм						
КМ 5/3	0,8	0,6	0,45	0,35	0,3	0,28	0,25
КМ 60/40	-	-	-	2,0	1,4	1,0	0,4
	Відносна питома поверхня порошку, відн. од.						
КМ 5/3	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3
КМ 60/40	1,0	2,0	3,3	3,7	3,9	4,1	4,3

Таблица 3. Залежність середнього діаметру пор, середнього розміру зерна і кількості зерен в одиниці маси від тиску при холодному пресуванні порошків сBN

Марка сBN	Тиск пресування, ГПа						
	10 ⁻²	1	2	3	4	5	8
	Середній розмір пор в стисненому брикеті сBN, мкм						
КМ 5/3	4,3	3,7	3,4	3,0	2,6	2,3	2,2
КМ 60/40	45	20	11,5	9,5	8,6	7,8	7,0
	Середній розмір зерна сBN, мкм						
КМ 5/3	4,0	4,0	4,0	3,64	3,33	3,08	3,08
КМ 60/40	50	25	15,2	13,5	12,8	12,2	11,6
	Кількість зерен сBN, %						
КМ 5/3	100	100	100	133	173	219	219
КМ 60/40	100	800	3600	5100	6000	6900	8000

Дані табл. 3 одержані в результаті наступних розрахунків.

Розрахунок ефективного розміру пор (d) в компактах з порошків сBN після кожної технологічної операції виконували за формулою, що моделює процеси в пористій системі, при яких ущільнення не супроводжується коагуляцією пор і збираючою рекристалізацією, тобто кількість пор, як і в вихідному стані порошкової системи, дорівнює кількості зерен, тому виконується співвідношення $(d_i/D_i)^3 = P_i/(1-P_i)$; або $d_i = D_i \cdot \left(\frac{P_i}{1-P_i} \right)^{1/3}$, тут D – розмір зерна сBN,

P – пористість брикету.

При розрахунку середнього розміру зерна сBN і кількості зерен сBN в одиниці маси вважали, що зерна мають форму кулі, тому використовували наступні формули: поверхня частинки (кулі) $S = \pi d^2$; об'єм частинки $V = \frac{1}{6} \pi d^3$; питома поверхня частинки $S_{\text{спес}} = \frac{S}{V} = \frac{6}{d}$;

діаметр частинки $d = \frac{6}{S_{\text{спес}}}$; кількість частинок в одиниці об'єму $[V]$ $N = \frac{6[V]}{\pi d^3}$.

Аналіз даних табл. 2 і 3 дозволяє зробити наступні висновки:

При пресуванні порошків сBN пористість і розмір пор закономірно зменшуються зі збільшенням тиску пресування. В брикетах, спресованих з крупних порошків сBN пористість нижча, а розмір пор більший, ніж в брикетах, спресованих з дрібних порошків. Зміну густини спресованих брикетів зі зміною тиску пресування і розміру зерен вихідних порошків можна описати степеневою функцією виду $\rho = a p^m d^n$, де ρ – густина брикета, p – тиск пресування, d – розмір зерен вихідного порошку сBN, a , m і n – сталі. Для порошків сBN з розміром зерен від 1 до 100 мкм і тисків пресування від 1 до 10 ГПа формулу можна записати у вигляді $\rho = 54 p^{0,13} d^{0,04}$, тут ρ в %, p в ГПа, d в мкм.

Збільшення тиску пресування призводить до збільшення питомої поверхні порошку сBN, що пов'язано з дробленням порошку [4]. Крупні порошки дробляться інтенсивніше, початок дроблення настає при менших тисках. Середній розмір зерен сBN закономірно зменшується зі збільшенням тиску пресування, відповідно зростає кількість зерен в одиниці маси порошку. Якщо для порошку КМ 5/3 при тиску пресування 8 ГПа середній розмір зерна зменшується в 1,3 рази, то для порошку КМ 60/40 – в 4,3 рази. Інтенсивність дроблення можна показати і розрахувавши скільки зерен буде у порошку після пресування при тиску 8 ГПа 100 зерен вихідного порошку; для КМ 5/3 маємо 219 зерен, тобто з одного зерна вихідного маємо 2 після

пресування; для КМ 60/40 маємо 8000 зерен, тобто з одного зерна вихідного маємо 80 після пресування, інтенсивність дроблення порошку КМ 60/40 в 40 раз вища, ніж КМ 5/3.

Для безпосереднього контролю за процесом холодного ущільнення використана методика, заснована на вимірюванні електричного опору вміщеного в робочий об'єм АД порошку сBN, попередньо покритого тонким шаром графіту за методикою [7]. В табл. 4 приведена залежність відносного електроопору порошку від тиску пресування.

Таблиця 4. Залежність відносного електроопору порошку сBN, покритого плівкою графіту, від тиску пресування

Марка сBN	Тиск, ГПа											
	0,1	0,5	0,8	1,0	1,3	1,7	2,5	3,5	4,2	5,5	6,5	8,0
	Електроопір стисненого брикету, відн. од.											
КМ 5/3	-	-	1,1	1,05	1,03	1,01	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08
КМ 60/40	1,08	1,0	1,2	1,35	1,45	1,8	2,0	2,2	2,35	2,4	2,43	2,45

Аналіз даних табл. 4 дозволяє стверджувати, що при холодному пресуванні порошку сBN, покритого тонкою плівкою графіту (до 0,02 мкм) збільшення електроопору пов'язано з дробленням порошків сBN, мінімальний електроопір відповідає початку дроблення, для порошку КМ 5/3 це 2,5 ГПа, для КМ 60/40 – 0,5 ГПа. Підвищення електроопору для крупних порошків значно більше, ніж для дрібних, це корелює зі збільшенням питомої поверхні порошків і інтенсивності дроблення.

Спінання порошків сBN без добавок при тисках до 7 ГПа і температурах вище 1200 К супроводжується незворотнім фазовим переходом сBN → hBN, такі полікристали мають низьку твердість і міцність через високий вміст hBN і значну пористість [8]. І тільки при тисках вище 7 ГПа і температурі вище 2100 К можливо одержати практично безпористі високотверді однофазні полікристали сBN [8, 9].

При пресуванні порошків сBN розмір каналів між порами закономірно зменшуються зі збільшенням тиску пресування. В зразках, спресованих з крупних порошків сBN розмір каналів між порами більший, ніж в зразках з дрібних порошків. В табл. 5 приведені середні розміри каналів між порами в зразках сBN, одержаних при різних температурах, в залежності від тиску спікання. При температурах спікання 750 К і 1200 К характер зміни розміру каналів між порами зі збільшенням тиску такий же, як і у випадку холодного пресування порошку.

Таблиця 5. Середні розміри каналів між порами в зразках сBN, одержаних при різних температурах, в залежності від тиску спікання

Марка сBN	Тем-ра спікання, К	Тиск, ГПа						
		10 ⁻²	1	2	3	4	5	8
		Середні розміри каналів між порами (мкм)						
КМ 5/3	300	0,8	0,6	0,45	0,35	0,3	0,28	0,25
КМ 60/40		-	-	-	2,0	1,4	1,0	0,4
КМ 5/3	750	-	0,36	0,27	0,21	0,18	0,17	0,15
КМ 60/40		-	2,0	1,5	1,2	0,84	0,60	0,33
КМ 5/3	1200	-	0,24	0,18	0,14	0,12	0,11	0,10
КМ 60/40		-	1,3	0,77	0,62	0,43	0,31	0,17
	1200	Тиск Лапласа (капілярний тиск в рідкому алюмінії в порах), МПа						
КМ 5/3		-	15,3	20,3	26,1	30,5	33,3	36,6
КМ 60/40		-	2,82	4,75	5,90	8,51	11,8	21,5

В технологических процессах для одержания PCBN материалов часто используют систему cBN–Al [9]. При этом часто используют двостадийный процесс одержания: на первой стадии при низком давлении (до 2,5 ГПа) просочения стиснутого порошка cBN алюминием при температурах, когда жидкий алюминий не смочит cBN (до 1400 К), на второй стадии конечное спекание при давлениях выше 3 ГПа и температурах выше 1500 К [10].

При холодном прессовании шихты cBN + 10% Al сохраняется характер изменения пористой структуры (общая пористость, размер пор, размер каналов пор, размер зерен cBN) в сравнении с прессованием порошков cBN без добавок. На этапе просочения различия существенны, и связаны с плавлением алюминия. Давление Лапласа в пористой среде определяется по формуле

$$p_L = \frac{2\sigma_{mz}}{d_k}, \text{ где } \sigma_{mz} - \text{поверхневый натяг на границе «конденсованная фаза—газ»}, d_k - \text{диаметр}$$

канала поры. При контактной взаимодействии порошковой системы с жидкой фазой величину капиллярного давления p_L определяет диаметр канала поры и поверхностный натяг на границе «конденсованная фаза–жидкость», который определяется углом смачивания (Θ) и поверхностным натяжением жидкой фазы (σ_{pz}). Капиллярное давление на границе «конденсованная фаза–жидкость» равно:

$$p_L = \frac{4\sigma_{pz} \cos \Theta}{d_k}. \text{ Поверхневый натяг алюминия } \sigma_{pz}=0,915 \text{ Дж/м}^2 \text{ [11]. При } T=1273 \text{ К}, p=2,5 \text{ ГПа:}$$

$\Theta_{\text{cBN-Al}} > 140^\circ$ [12], $\cos \Theta \rightarrow -1$. При просочении стиснутого порошка cBN жидким алюминием (температура 1200 К) капиллярное давление в порах уменьшается для порошка КМ 5/3 от 15 до 37 МПа, а для порошка КМ 60/40 от 3 до 22 МПа при изменении внешнего давления от 1 до 8 ГПа (см. табл. 5).

На этапе высокотемпературного спекания порошков системы cBN–Al происходит химическое взаимодействие между компонентами шихты. Графитоподобный BN практически не образуется. Давление стимулирует процессы уплотнения и пластической деформации в фазе cBN, влияет на формирование фазового состава сверхтвёрдого композита. В табл. 6 приведен фазовый состав композитов, спекшихся из шихты КМ 7/5 + 10% Al при температуре 1750 К и давлениях от 1 до 5 ГПа.

Таблица 6. Фазовый состав композитов, спекшихся при 1750 К из шихты КМ 7/5 + 10% Al

Фаза (% по массе)	Давление, ГПа				
	1	2	3	4	5
cBN	83,9	81,6	76,9	80,8	79,6
AlN	9,1	15,8	21,7	17,3	17,5
AlB ₂	0	0	0,5	1,9	2,9
AlB ₁₂	3,5	1,5	0,5	0	0
Al	1,2	0,8	0,4	0	0
hBN	2,3	0,3	0	0	0

Как видно из табл. 6, при давлениях спекания 1 и 2 ГПа в составе композита есть графитоподобный нитрид бора hBN, при давлениях спекания 1, 2 и 3 ГПа – избыточный алюминий, химическое взаимодействие между cBN и Al произошло не полностью. Додекаборид алюминия AlB₁₂ образуется при давлениях до 3 ГПа, при давлениях 3 – 5 ГПа – диборид алюминия AlB₂. При всех давлениях образуется нитрид алюминия AlN, больше всего его при давлении 3 ГПа, причиной могут быть неблагоприятные условия для образования боридов и соответственно образования твердых растворов бора (замена и растворения) в кристаллической решетке AlN.

В табл. 7 и 8 приведены периоды и объемы кристаллических решеток фаз композита, спекшегося из шихты КМ 7/5 + 10% Al при 1750 К, а в табл. 9 – влияние давления на реальную структуру, плотность и твердость этих же композитов.

Таблица 7. Періоди кристалічних ґраток фаз композиту, спеченого з шихти КМ 7/5 + 10% Al при 1750 К (статистика)

Тиск, ГПа	cBN	Al	AlN	AlN	AlB ₂	AlB ₂
	a, нм	a, нм	a=b, нм	c, нм	a=b, нм	c, нм
1	0,36147(3)	0,40520(5)	0,31150(3)	0,49806(3)	-	-
2	0,36145(3)	0,40520(4)	0,31146(3)	0,49810(3)	-	-
3	0,36148(2)	0,40482(4)	0,31129(2)	0,49770(3)	0,30103(4)	0,32428(3)
4	0,36151(2)	0,40488(9)	0,31138(2)	0,49780(4)	0,30110(3)	0,32590(6)
5	0,36153(2)	0,40490(10)	0,31133(4)	0,49782(2)	0,30115(3)	0,32620(3)
Таб.	0,36153	0,40496	0,3111	0,4978	0,3009	0,3262

Таблица 8. Об'єми елементарних комірок фаз композиту, спеченого з шихти КМ 7/5 + 10% Al при 1750 К (за даними табл. 7)

Тиск, ГПа	cBN		Al		AlN		AlB ₂	
	V, нм ³	ΔV/V, %	V, нм ³	ΔV/V, %	V, нм ³	ΔV/V, %	V, нм ³	ΔV/V, %
1	0,047230	-0,049	0,066529	0,179	0,048328	0,309		
2	0,047222	-0,066	0,066529	0,179	0,048319	0,291		
3	0,047234	-0,040	0,066342	-0,102	0,048228	0,102	0,029386	-0,501
4	0,047246	-0,015	0,066371	-0,059	0,048265	0,179	0,029546	0,041
5	0,047253	0,000	0,066381	-0,044	0,048252	0,152	0,029584	0,169
Таб.	0,047253		0,066410		0,048179		0,029534	

Таблица 9. Характеристики субструктури (в фазі cBN), густина і твердість композитів, спечених при 1750 К з шихти КМ 7/5+ 10% Al

Характеристика	Тиск, ГПа				
	1	2	3	4	5
Розмір ОКР, нм	24	23	22	22	19
Величина мікроспотворень Δd/d, 10 ⁻³	0,72	1,00	1,05	1,30	1,25
Величина мікронапруг, ГПа	0,63	0,88	0,92	1,14	1,10
Щільність дислокацій, 10 ¹¹ см ⁻²	5,2	5,3	6,3	6,6	7,1
Густина, г/см ³	3,27	3,30	3,33	3,35	3,36
Твердість, ГПа	12	18	22	25	28

При зростанні тиску спостерігаємо тенденцію зростання періодів ґраток (і об'ємів) cBN та AlB₂, і зменшення періодів ґраток (і об'ємів) Al та AlN. В зразках, де є AlB₂, період ґратки Al менше.

Для AlN найбільші періоди кристалічної ґратки спостерігаються при 1 ГПа, збільшення об'єму складає 0,31 %, що може бути пов'язано з утворенням твердих розчинів бору на базі кристалічної ґратки AlN. При збільшенні тиску утворюється диборид алюмінію як альтернатива твердому розчину бору в AlN, об'єм елементарної комірки AlN зменшується, наближається до табличного.

Для Al найбільші періоди кристалічної ґратки – при 1 ГПа, збільшення об'єму – 0,18 % в порівнянні з табличним, що може бути пов'язано з утворенням твердого розчину бору в

алюмінії. При збільшенні тиску з розчину виділяється диборид алюмінію, об'єм елементарної комірки Al зменшується.

Для AlB_2 найбільший період ґратки (і об'єм) спостерігається при 5 ГПа, на 0,17 % більше табличного. Ймовірно теж утворюються тверді розчини.

Для cBN найменші значення періоду ґратки (і об'єму) виявлено при 1 ГПа (на 0,05% менший об'єм), що може бути пов'язано з утворенням твердих розчинів кисню на базі ґратки cBN.

Збільшення тиску спікання призводить до підвищення дефектності структури композиту (зменшення розмірів областей когерентного розсіювання, збільшення мікроспотворень і мікронапруг у кристалічній ґратці cBN і, як результат, збільшення щільності дислокацій в фазі cBN. Твердість і густина композитів закономірно збільшуються з підвищенням тиску спікання.

Таким чином, при одержанні PcBN композитів тиск суттєво впливає на формування їх структури та властивостей: при холодному пресуванні – на процеси дроблення і формування пористої структури, при остаточному спіканні – на формування фазового складу і деформаційно зміцненої структури.

Висновки

1. При холодному пресуванні порошків cBN пористість і розмір пор закономірно зменшуються зі збільшенням тиску пресування. В брикетах, спресованих з крупних порошків cBN, пористість нижча, а розмір пор більший, ніж в брикетах, спресованих з дрібних порошків.

2. Збільшення тиску пресування призводить до збільшення питомої поверхні порошку cBN, що пов'язано з дробленням порошку. Крупні порошки дробляться інтенсивніше, початок дроблення настає при менших тисках, для порошку КМ 5/3 це 2,5 ГПа, для КМ 60/40 – 0,5 ГПа. Середній розмір зерен cBN закономірно зменшується зі збільшенням тиску пресування, відповідно зростає кількість зерен в одиниці маси порошку.

3. При холодному пресуванні шихти cBN-Al (до 10% Al) зберігається характер зміни пористої структури (загальна пористість, розмір пор, розмір каналів пор, розмір зерен cBN) в порівнянні з пресуванням порошків cBN без добавок.

4. Фазовий склад композитів cBN-Al системи залежить від тиску спікання. При тисках спікання 1 і 2 ГПа в складі композиту є графітоподібний нітрид бору hBN, при тисках спікання 1, 2 і 3 ГПа – залишковий алюміній, хімічна взаємодія між cBN і Al пройшла не повністю. Додекаборид алюмінію AlB_{12} при тисках до 3 ГПа, при тисках 3 – 5 ГПа – диборид алюмінію AlB_2 . При всіх тисках утворюється нітрид алюмінію AlN, найбільше при тиску 3 ГПа, причиною можуть бути несприятливі умови для створення боридів і, відповідно, утворення твердих розчинів бору (заміщення і втілення) в кристалічній ґратці AlN.

5. При зростанні тиску спікання спостерігаємо тенденцію зростання періодів ґраток (і об'ємів) cBN та AlB_2 , і зменшення періодів ґраток (і об'ємів) Al та AlN. В зразках, де є AlB_2 , період ґратки Al менше.

6. Збільшення тиску спікання призводить до підвищення дефектності структури композиту (зменшення розмірів областей когерентного розсіювання, збільшення мікроспотворень і мікронапруг у кристалічній ґратці cBN і, як результат, збільшення щільності дислокацій в фазі cBN. Твердість і густина композитів закономірно збільшуються з підвищенням тиску спікання.

Исследовано влияние давления на холодное прессование и спекание порошков cBN без добавок и с добавкой 10% Al. Установлено влияние давления на характеристики пористой структуры, фазовый состав, дефектность фаз, плотность и твердость композита.

Ключевые слова: *высокое давление, спекание, кубический нитрид бора, пористость, фазовый состав, плотность, твердость.*

PRESSURE EFFECTS ON FORMATION STRUKTURE AND PROPERTIES OF SUPERHARD PcBN MATERIALS

The influence of pressure on cold pressing and sintering of cBN powders without additives and with addition of 10% Al was investigated. The influence of pressure on the characteristics of the porous structure, phase composition, phase defects, density and hardness have been established of the composite.

Key words: *high pressure, sintering, cubic boron nitride, porosity, phase composition, density, hardness.*

Література

1. Туркевич В. З., Беженар Н. П., Петруша И. А. Сверхтвердые композиционные материалы на основе кубического нитрида бора // В кн. Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2-х т. Т. 2. / Ред.кол; И.К. Походня (предс.) и др.; НАН Украины. – К.: Академперіодика. – 2013. – С. 254–282.
2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. – Обработка материалов лезвийным инструментом. / Под ред. С. А. Клименко. – Киев: ИСМ им В. Н. Бакуля; ИПЦ «Алкон» НАНУ, 2006. – Т. 5. – 316 с.
3. Corrigan F. R., Bundy F. P. Direct transitions among the allotropic forms of boron nitride at high pressure and temperatures// J. Chem. Phys.– 1975. – 63. – N 9.– P. 3812–3820.
4. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора/ А. А. Шульженко, С. А. Божко, А. Н. Соколов и др. – К.: Наук. думка, 1993. – 256 с.
5. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т1. Синтез сверхтвердых материалов / Редколл.: Новиков Н. В. (отв. ред.) и др. – К.: Наук.думка, 1986. – 280 с.
6. Андреев О. Н., Беженарь Н. П. Холодное прессование порошков кубического нитрида бора при высоких давлениях // Сверхтвердые материалы.– 1991.–№ 1.– С. 6–11.
7. Беспалько О. П., Андреев О. Н. Исследование осаждения углерода на алмазной подложке из газовой фазы в условиях средних давлений// Сверхтвердые материалы.– 1980.– № 5.– С.21–22.
8. 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.
9. Беженар Н. П. Получение, структура и свойства поликристаллических и композиционных материалов на основе кубического нитрида бора // Сверхтвердые материалы. Монография в 6 томах. Т.1: Синтез алмаза и подобных материалов. – Киев: ИСМ, ИПЦ «Алкон» НАНУ, 2003. – С. 234–258.
10. 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.
11. Панасюк А. Д., Фоменко В. С., Глебова Г. Г. Стойкость неметаллических материалов в расплавах. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1986. – 352 с.
12. Беженар М. П., Логінова О. Б., Божко С. А. Вплив інших фаз в полікрystalлах $BN_{сф}$ на їх змочування алюмінієм// Сверхтв. материалы. – 1998. – № 5. – С. 60–61.

Надійшла 28.07.17