

5. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2023). Fiziko-himichne skladannia kombinovanyh bagatokomponentnyh termostiikykh znosostiikykh pokryttiv na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Physical and chemical assembly of combined multi-component heat-resistant and wear-resistant coatings on the surface of abrasive grinding powder]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials* (Science Issue 26, p. 180–194). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
6. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2024). Osoblyvosti tehnologichnogo protsesu formuvannia zahysnogo pokryttia z mikro-, submikro- ta nanoporoshkiv kubichnogo nitrydu boru na poverhni zeren shlifporoshkiv syntetychnogo almazu pidvyshchenoi mitsnosti [Features of the technological process of forming a protective coating of micro-, submicro- and nanopowders of cubic boron nitride on the surface of grains of synthetic diamond grinding powders of increased strength]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science* (27nd Issue, p. 178–183). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
7. *Formuvannia kombinovanykh bahatokomponentnykh termostabilnykh znosostiikykh pokryttiv z sumishi rozchynnykh ta nerozchynnykh rehovyn: oksydiv, sylikativ ta karbidiv na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Forming of combined multi-component thermostable wear-resistant coatings from a mixture of soluble and insoluble substances: oxides, silicates and carbides on the surface of grains of abrasive grinding powders]*. TI 25000.00855. (2022). V. Bakul ISM, NAS of Ukraine [in Ukrainian].

УДК 621.762.5

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-258-266

Андрій ПАЦИК, аспір.; **Микола БЕЖЕНАР**, д-р техн. наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: pacik.andr@gmail.com, bezhenar@ukr.net

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ХІМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ ОДЕРЖАННІ РСВН КОМПОЗИТІВ РЕАКЦІЙНИМ СПІКАННЯМ З АЛЮМІНІЄМ ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ

Виконано термодинамічний аналіз хімічної взаємодії при високому тиску кубічного нітриду бору з алюмінієм та тугоплавкими сполуками титану. Показано, що така взаємодія можлива в області температур до 2300 К і тисків до 7,7 ГПа. Ізобарно-ізотермічний потенціал (енергія Гіббса) ΔG є від'ємний для даного діапазону тисків і температур. Із підвищенням температури абсолютне значення ΔG зростає, із підвищенням тиску абсолютне значення ΔG також зростає, тобто підвищення тиску і температури сприяє хімічній взаємодії в розглянутих системах.

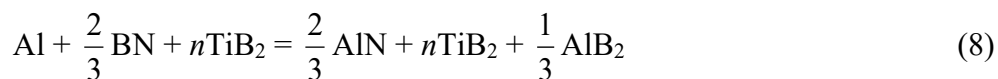
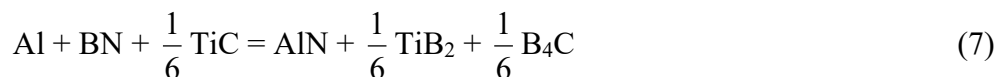
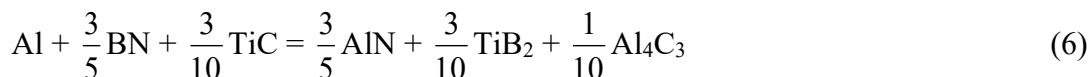
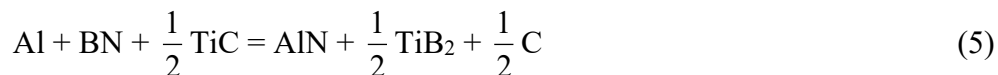
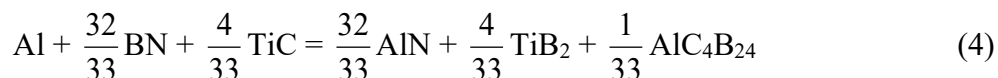
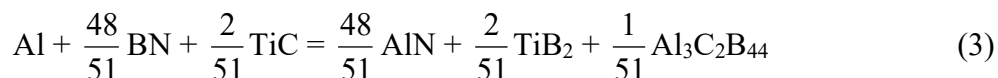
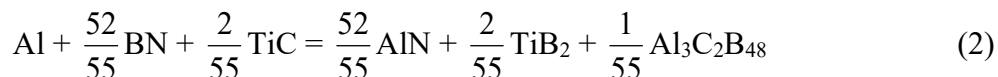
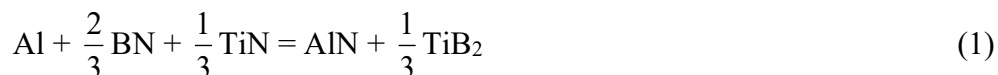
Ключові слова: РСВН-композиції, спікання, тиск, температура, ізобарно-ізотермічний потенціал, енергія Гіббса.

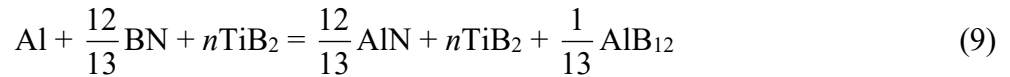
При одержанні полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (РСВН) часто пропонують як добавки для спікання тугоплавкі сполуки перехідних металів IVa - VIa груп, іноді разом з металами, що мають відносно невисокі температури плавлення (Al, Si, метали групи Fe та ін.) [1]. В останньому випадку відбувається спікання за участю рідкої фази. При цьому вибір складу добавок і їх кількісних співвідношень як правило базується на тому, щоб в результаті їх фізико-хімічної взаємодії з нітридом бору утворювалася тверда кераміка, яка забезпечує високу міцність зв'язку по границях зерен cBN. Провідні фірми-

виробники PCBN (*Element Six, Megadiamond, Sumitomo Electric, General Electric*) найчастіше використовують як тугоплавкі добавки сполуки TiC, TiN, інші тугоплавкі сполуки титану, WC, а в якості металу з невисокою температурою плавлення зазвичай застосовують Al або Co.

Однією з вимог до властивостей PCBN-композитів є електропровідність, оскільки поряд із лазерною використовується також електроерозійна різка габаритних PCBN-пластин для одержання різальних вставок потрібних розмірів і форми. Тому вибір складу шихти для одержання надтвердих електропровідних двошарових композитів базувався на наступному: вміст електропровідної фази має становити не менше 15 % (за об'ємом), тобто перевищувати поріг протікання; як електропровідну фазу доцільно використовувати тугоплавкі сполуки титану (TiC, TiN, TiB₂), які близькі до cBN за твердістю, пружними модулями та коефіцієнтами термічного розширення, що гарантує одержання високотвердих і ненапружених (мінімальна величина напруг I роду) композитів; в структурі спеченого матеріалу не повинна залишатись металічна фаза, бо твердість такого матеріалу може бути суттєво понижена; високі твердість і тріщиностійкість композитів забезпечується міцністю міжзеренних і міжфазних границь, які формуються в процесі реакційного спікання за участі рідкої фази. Виходячи з викладеного, для одержання композитів PCBN були вибрані варіанти шихти наступного складу: cBN–TiC–Al, cBN–TiN–Al, cBN–TiB₂–Al.

В [2] розраховано зміну енергії Гіббса для топохімічних реакцій взаємодії кубічного нітриду бору з перехідними металами IVa-VIa груп із урахуванням впливу високого тиску, а в роботі [3] – зміну енергії Гіббса при взаємодії в умовах надвисоких тисків кубічного нітриду бору з алюмінієм. В даній роботі аналогічні розрахунки виконано для взаємодії в потрібній системі, а саме cBN – тугоплавка сполука титану – Al. Під час вибору можливих реакцій для розгляду враховували лише ті, в яких не утворюється газова фаза (наприклад N₂). Крім того, при виборі варіантів реакцій взаємодії було використано дані рентгеноструктурного аналізу спечених композитів. Нижче наведено вибрані нами для розрахунку варіанти.





Розрахунок енергії Гіббса наведених вище реакцій виконували в наближенні $\Delta C_p = 0$. Залежність енергії Гіббса від тиску $(dG/dp)_T = V$ встановлювали з урахуванням об'ємного ефекту плавлення алюмінію $\Delta V = 0,724\text{см}^3 \text{ моль}^{-1}$ [4]. Стисненням фаз нехтували, оскільки його вплив у подібних реакціях є незначний. Таким чином, вплив високого тиску на енергію Гіббса для всіх розглянутих реакцій визначався лише об'ємним ефектом плавлення алюмінію і об'ємним ефектом самих реакцій.

$$\Delta V = d(\Delta G)/dp + \Delta V_{\text{плав. Al}} \quad (10)$$

Для енергії Гіббса одержимо вираз:

$$\Delta G_T^p = \Delta H_{298} + T \Delta S + p \Delta V \quad (11)$$

В табл. 1 наведено літературні дані щодо термодинамічних властивостей і густини (мольних об'ємах) фаз, які приймали участь в реакціях (1) – (9) [5-12]. На рис. 1 показано залежність ентропії і мольного об'єму алюмінію від температури [4, 9, 12].

Таблиця 1 Термодинамічні характеристики, густина та мольний об'єм фаз – складових композитів на основі кубічного нітриду бору [5–12]

	$-\Delta H_{298}$ кДж/моль	S_{298}^0 Дж/(моль*К)	ρ , г/см ³	m , г/моль	V , см ³ /моль
Al	0	28,31 (60,79)	2,70	26,98	9,99
С графіт	0	5,74	2,26	12,01	5,31
cBN	252,3	15,36	3,49	24,82	7,11
TiN	336,4	30,29	5,44	61,91	11,38
AlN	318,4	20,17	3,27	40,99	12,54
TiB ₂	323,63	28,83	4,52	69,52	15,38
TiC	231,4	24,27	4,93	59,91	12,15
AlB ₂	66,9	37,49	3,18	48,60	15,28
αAlB_{12}	200,8	89,20	2,56	156,70	61,21
Al ₃ C ₂ B ₄₈	799	355,2	2,66	623,84	234,53
Al ₃ C ₂ B ₄₄	745	330,5	2,66	580,60	218,27
AlC ₄ B ₂₄	431	190,4	2,54	334,46	131,68
Al ₄ C ₃	207,9	89,1	2,99	143,95	48,14
B ₄ C	69,87	27,12	2,52	55,25	21,92

Ситуація з використанням алюмінію потребує окремого пояснення. Спінання композитів на основі кубічного нітриду бору (КНБ) проводили у два етапи. На першому етапі здійснювали попереднє просочення стиснутої шихти алюмінієм за таких параметрів: тиск 2,5 ГПа, температура 1300 К, на другому етапі виконували власне спікання при тиску 4,2, 5,5 або 7,7 ГПа (залежно від типу апарата високого тиску (АВТ), в якому одержували композит) і температурі 1750–2300 К. За всіх перелічених умов алюміній знаходиться в рідкому стані, тому термодинамічні розрахунки проводили саме для такого алюмінію, тобто брали ентропію і мольний об'єм рідкого алюмінію (див. рис. 1, табл. 1)

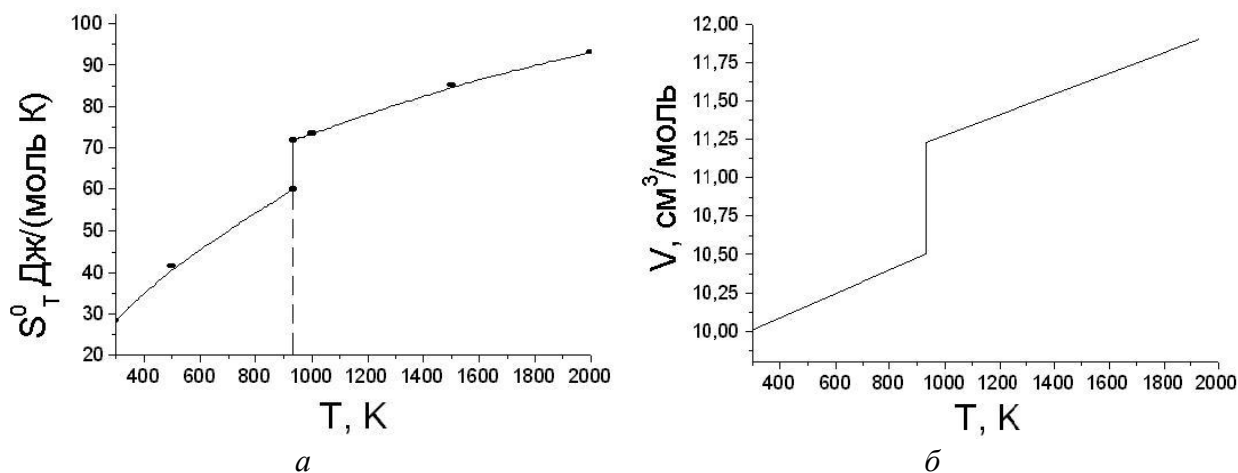


Рис. 1. Залежність ентропії (а) [9, 12] і мольного об'єму (б) [4, 9] алюмінію від температури

Нижче наведено числові значення енергії Гіббса ΔG_T^p (кДж/моль) для реакцій (1)–(9), T – температура (К) и p – тиск (ГПа).

$$\Delta G_T^p = - 69,81 - 51,35 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,38 p \quad (1a)$$

$$\Delta G_T^p = - 80,38 - 49,62 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,20 p \quad (2a)$$

$$\Delta G_T^p = - 80,44 - 49,60 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,20 p \quad (3a)$$

$$\Delta G_T^p = - 88,34 - 49,80 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,07 p \quad (4a)$$

$$\Delta G_T^p = - 112,21 - 50,83 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,01 p \quad (5a)$$

$$\Delta G_T^p = - 88,12 - 47,63 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,68 p \quad (6a)$$

$$\Delta G_T^p = - 93,12 - 50,70 \cdot 10^{-3} \Delta T - 1,09 p \quad (7a)$$

$$\Delta G_T^p = - 66,37 - 45,09 \cdot 10^{-3} \Delta T - 2,00 p \quad (8a)$$

$$\Delta G_T^p = - 76,46 - 49,49 \cdot 10^{-3} \Delta T - 0,99 p \quad (9a)$$

В табл. 2 показано вклад різних складових в енергію Гіббса на прикладі реакції (1), а на рис. 2 і 3 показано вплив температури і тиску на величину енергії Гіббса для реакцій (1)–(9).

З наведених даних випливає, що з точки зору термодинаміки у вибраних нами системах повинна проходити хімічна взаємодія, а оскільки ентропійна і об'ємна складові реакцій (1) – (9) від'ємні, то з підвищенням температури і тиску ймовірність такої взаємодії зростає.

Таблиця 2. Залежність енергії Гіббса і її складових від температури і тиску для реакції (1)

p , ГПа	T , К	ΔH_{298} кДж/моль	$T \Delta S$ кДж/моль	$p \Delta V$ кДж/моль	ΔG кДж/моль
2,5	1300	- 69,81	-51,45	-3,45	-124,71
	1750	- 69,81	-74,56	-3,45	-147,82
	2100	- 69,81	-92,53	-3,45	-165,79
	2300	- 69,81	-102,80	-3,45	-176,06
4,2	1300	- 69,81	-51,45	-5,80	-127,06
	1750	- 69,81	-74,56	-5,80	-150,17
	2100	- 69,81	-92,53	-5,80	-168,14
	2300	- 69,81	-102,80	-5,80	-178,41
7,7	1300	- 69,81	-51,45	-10,63	-131,89
	1750	- 69,81	-74,56	-10,63	-155,00
	2100	- 69,81	-92,53	-10,63	-172,97
	2300	- 69,81	-102,80	-10,63	-183,24

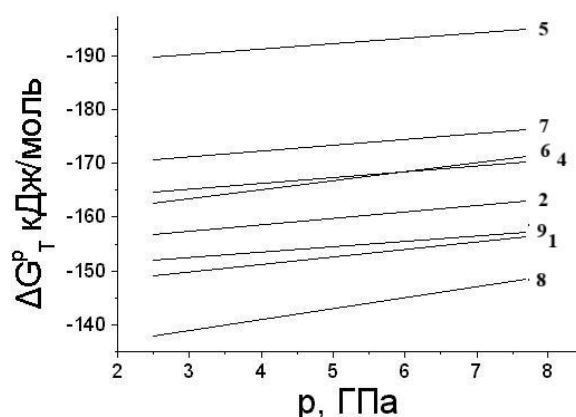
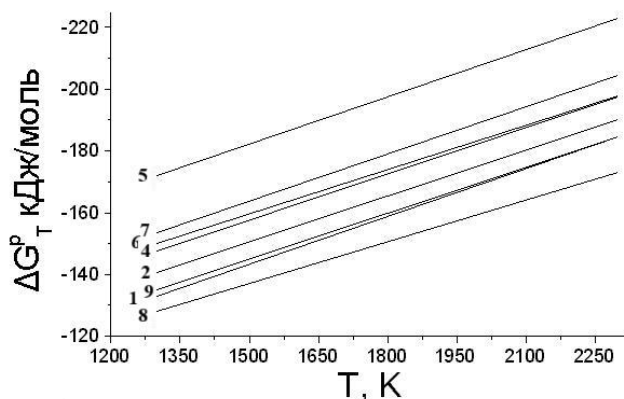


Рис. 2. Залежність енергії Гіббса реакцій (1) – (9) від температури при тиску взаємодії 7,7 ГПа
 Рис. 3. Залежність енергії Гіббса реакцій (1) – (9) від тиску при температурі взаємодії 1750 К

Особливо слід звернути увагу на реакції (8), (9), які стосуються системи $cBN - TiB_2 - Al$. На перший погляд, борид алюмінію не бере участі у реакції, ми маємо давно відому систему $cBN - Al$, описану в [3]. Але, як зазначено в [3], а потім в [13, 14], для даної системи існує проблема утворення зародків нової фази, і ця ситуація особливо гостро виражена для боридів алюмінію. Це викликано тим, що при гомогенному зародкоутворенні вільна енергія ΔG зародку радіуса r визначається сумарним внеском об'ємної та поверхневої енергії.

$$\Delta G = 4/3 \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^2 \Delta G_S \quad (12)$$

Енергія Гіббса реакцій (1)–(9) зв'язана тільки з вільною об'ємною енергією утворення зародку одиничного об'єму ΔG_V і не враховує внеску поверхневого натягу ΔG_S на границі розділу фаз. У випадку реакцій (8), (9) існування в середовищі кристалізації дибориду титану TiB_2 , який за своїми кристалографічними характеристиками є дуже близьким до AlB_2 , а об'єми елементарних комірок цих боридів однакові [7], зумовлює те, що TiB_2 може слугувати зародком для утворення нової фази бориду AlB_2 , що і підтвердили експерименти. Тому, незважаючи на те, що згідно з термодинамічними розрахунками в системі $cBN-TiB_2-Al$ можуть протікати обидві реакції (8) і (9), на практиці, завдяки ролі TiB_2 як активатора зародкоутворення фази AlB_2 , взаємодія проходить за реакцією (8).

У цілому слід зазначити, що залежність енергії Гіббса від температури найбільш сильно виражена для реакції (1), а від тиску – для реакцій (6) та (8).

У табл. 3 наведено розрахований фазовий склад композитів, одержаних при реакційному спіканні трьох варіантів шихти: cBN–Al – TiC; cBN–Al–TiN; cBN–Al–TiB₂.

Таблиця 3. Фазовий склад композитів, одержаних з шихти складу 66% cBN + 8% Al + 26% TiC (TiN, TiB₂) при умові хімічної взаємодії при спіканні по реакціях 1–9

Фаза	%	Реакція, по якій проходила хімічна взаємодія при спіканні								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
BN	мас.	61,09	59,04	59,07	58,86	58,64	61,59	58,64	61,09	59,21
	об.	66,3	62,7	62,7	63,2	62,1	65,7	62,2	64,3	61,6
AlN	мас.	12,16	11,49	11,45	11,79	12,15	7,29	12,15	8,11	11,22
	об.	14,1	13,0	13,0	13,5	13,7	8,3	13,7	9,1	12,4
TiN	мас.	19,88	-	-	-	-	-	-	-	-
	об.	13,8	-	-	-	-	-	-	-	-
TiC	мас.	-	25,35	25,30	23,85	17,12	20,67	23,04	-	-
	об.	-	19,0	18,9	18,2	12,9	15,6	17,3	-	-
TiB ₂	мас.	6,87	0,76	0,81	2,50	10,31	6,19	3,44	26,00	26,00
	об.	5,8	0,6	0,7	0,7	8,4	5,1	2,8	21,1	20,9
Al ₃ C ₂ B ₄₈	мас.		3,36							
	об.		4,7							
Al ₃ C ₂ B ₄₄	мас.			3,37						
	об.			4,7						
AlC ₄ B ₂₄	мас.				3,00					
	об.				4,4					
C	мас.					1,78				
	об.					2,9				
Al ₄ C ₃	мас.						4,27			
	об.						5,3			
B ₄ C	мас.							2,73		
	об.							4,0		
AlB ₂	мас.								4,80	
	об.								5,5	
AlB ₁₂	мас.									3,57
	об.									5,1
Електро- провідні фази	мас.	26,75	26,11	26,11	26,35	29,21	26,85	26,48	30,80	26,00
	об.	19,6	19,6	19,6	18,9	24,2	20,7	20,1	26,6	20,9

У всіх випадках масова частка cBN в шихті складала 66%, масова частка алюмінію - 8%, масова доля тугоплавкої сполуки титану (TiC, TiN, TiB₂) – 26%. Вважалося, що під час високотемпературного спікання хімічна взаємодія тривала до повного вичерпання алюмінію, тобто в отриманому композиті не було вільного алюмінію. Таким чином, у складі композиту були надлишкові cBN і тугоплавкий борид, а також продукти реакцій (1)–(9). В таблиці приведено склад композитів у масових (%) та об'ємних (%) частках; об'ємні дані є важливими для подальших розрахунків можливої електропровідності і твердості композитів. В

останньому рядку таблиці наведено сумарну частку електропровідних фаз в композиті, до яких віднесено TiC, TiN, TiB₂, AlB₂ та C (графіт).

Висновок

Виконано термодинамічний аналіз хімічної взаємодії при високому тиску кубічного нітриду бору з алюмінієм та тугоплавкими сполуками титану. Показано, що така взаємодія можлива в області температур до 2300 К і тисків до 7,7 ГПа. Ізобарно-ізотермічний потенціал (енергія Гіббса) ΔG є від'ємний для даного діапазону тисків і температур. Із підвищенням температури абсолютне значення ΔG зростає, із підвищенням тиску абсолютне значення ΔG також зростає, тобто підвищення тиску і температури сприяє хімічній взаємодії в розглянутих системах.

A. Patsyk, M. Bezhenar

V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine

ТHERMODYNAMIC ANALYSIS OF CHEMICAL INTERACTION IN THE PRODUCTION OF PCBN COMPOSITES BY REACTIVE SINTERING WITH ALUMINUM UNDER HIGH PRESSURE

A thermodynamic analysis of the chemical interaction of cubic boron nitride with refractory titanium compounds and aluminum under high pressure has been carried out. It has been shown that such interaction is possible in the temperature range up to 2300 K and pressures up to 7.7 GPa, with the isobaric-isothermal potential ΔG (Gibbs free energy) being negative for this range of pressures and temperatures. When the temperature rises, the absolute value of ΔG increases; when the pressure rises, the absolute value of ΔG increases, i.e., increases in pressure and temperature promote chemical interaction in the systems under consideration.

Key words: *PCBN composites, sintering, pressure, temperature, isobaric-isothermal potential, Gibbs energy.*

Література

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография: в 6 т. Т. 1 / под общ. ред. Н. В. Новикова – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2004. Т.1: Синтез алмаза и подобных материалов. 319 с.
2. Божко С.А., Беженарь Н.П. Термодинамика твердофазного взаимодействия кубического нитрида бора с переходными металлами IVa–VIa групп при высоких давлениях. *Влияние высоких давлений на свойства сверхтвердых материалов*. К.: ИСМ АН УССР, 1985. С. 62–65.
3. Шульженко, А. А., Божко, С. А., Беженарь, Н. П. Спекание кубического нитрида бора с алюминием. *Сверхтвердые материалы*. 1986. № 5, С.14–17.
4. Тонков Е.Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М.: Наука, 1979. 192 с.
5. Курдюмов А.В., Малоголовец В.Г., Новиков Н.В. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. М.: Metallurgia, 1994. 318 с.
6. Голубев А. С., Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н. Нитрид бора. Структура, свойства, получение. К.: Наук. думка, 1987. 200 с.
7. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. М.: Metallurgia, 1991. 368 с.
8. Болгар А.С., Литвиненко В.Ф. Термодинамические свойства нитридов. К.: Наук. Думка, 1980. 284 с.
9. Свойства элементов: Справочник. В 2-х частях. Ч.1. Физические свойства / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Metallurgia, 1976. 600 с.

10. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения: Справочник. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
11. Косолапова Т.Я. Карбиды. М.: Металлургия, 1968. 300 с.
12. Горонковский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. К.: Наук. Думка, 1987. 830 с.
13. Беженар Н.П., Божко С.А., Белявина Н.Н. и др. Фазовый состав поликристаллов, полученных при реакционном спекании кубического нитрида бора с алюминием. *Сверхтвердые материалы*. 2002. № 1. С. 37–48.
14. Беженар М.П., Божко С.А., Нагорний П.А., Білявина Н.М., Марків В.Я. Взаємодія кубічного нітриду бору з алюмінієм в присутності вуглецю. Надтверді матеріали. 2000. № 4. С. 36–40.

Надійшла 7.11.25

Reference

1. Novikov, N. V. (Ed.). (2004). *Sverkhtverdye materyaly. Poluchenie i primeneniye* [Superhard materials. Obtaining and using]: V. 1. Sintez alvaza I podobnykh materialov [Synthesis of diamond and related materials]. ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy, IPTS ALKON NAN Ukrainy [in Russian].
2. Bozhko, S.A., & Bezhenar, N.P. (1985). Termodinamika tverdogaznogo vzaimodeistviia kubicheskogo nitride bora s perekhodnymi metallami IVa–VIa hrupp pri vysokikh davleniakh [Thermodynamics of solid-state interaction between cubic boron nitride and transition metals of groups IVa–VIa at high pressures]. *Vliianie vysokikh davlenii na svoistva sverkhtverdykh materialov* [The effect of high pressures on the properties of superhard materials] (p. 62–65). ISM AN USSR [in Russian].
3. Shulzhenko, A. A., Bozhko, S.A., & Bezhenar N.P. (1986). Spekanie kubicheskogo nitride bora s aliuminiem [Sintering cubic boron nitride with aluminum]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, (5), 14–17 [in Russian].
4. Tonkov, E. Yu. (1979). *Fazovye diagrammy elementov pri vysokom davlenii* [Phase diagrams of elements at high pressure]. Nauka [in Russian].
5. Kurdiumov, A.V., Maloholovets, V.H., & Novikov, N.V. (1994). *Polimorfnye modifikatsii ugleroda i nitrida bora* [Polymorphic modifications of carbon and boron nitride]. Metallurhiia [in Russian].
6. Holubev, A. S., Kurdiumov, A.V., & Piliankevich, A. N. (1987). *Nitrid bora. Stuktura. Svoistva. Poluchenie* [Boron nitride. Structure. Properties. Obtaining]. Naukova dumka [in Russian].
7. Serebriakova, T.I., Neronova, V.A., Peshev, P.D. (1991) *Vysokotemperaturnye boridy* [High-temperature borides]. Metallurhiia [in Russian].
8. Bolhar, A.S., & Litvinenko, V.F. (1980). *Termodinamicheskie svoistva nitridov* [Thermodynamic properties of nitrides]. Naukova dumka [in Russian].
9. Samsonov, H.V. (1976) *Svoistva elementov* [Element properties] part 1. *Fizicheskie svoistva* [Physical properties]. Metallurhiia [in Russian].
10. Samsonov, H.V., & Vinnitskii, I.M. (1976) *Tuhoplavkie soedineniia* [refractory compounds]. Metallurhiia [in Russian].
11. Kosolapova, T.Ya. (1968). *Karbidy* [Carbides]. Metallurhiia [in Russian].
12. Horonovskii, I.T., Nazarenko, Yu.P., & Nekriach, E.F. (1987). *Kratkii spravochnik po khimii* [A Brief Reference Guide to Chemistry]. Naukova dumka [in Russian].
13. . Bezhenar, N.P., Bozhko, S.A., Beliavina, N.N., et al. (2002) Fazovyi sostav polikristallov poluchenykh pri reaktsionnom spekanii kubicheskogo nitride bora s aliuminiem [Phase

composition of polycrystals obtained by reaction sintering of cubic boron nitride with aluminum] *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, (1), 37–48 [in Russian].

14. Bezhenar, M.P., Bozhko, S.A., Nahorni, P.A., et al. (2000). Vzaiemodiia kubichnoho nitrydu boru z aliuminiem v prysutnosti vuhletsu [Interaction of cubic boron nitride with aluminum in the presence of carbon] *Nadtverdi materialy – Superhard materials*, (4), 36–40 [in Ukrainian].

УДК 621.921.34-492.2:539.89:621.762.5

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-266-274

В. О. Веніков, д-р філософії; **О. О. Бочечка**, член-кор. НАН України;
Д. Л. Коростишевський; **Ю. О. Мельнічук**, **О. І. Чернієнко**, **Т. О. Куриляк**, кандидати
технічних наук; **В. В. Білорусець**; **А. О. Лямцева**, д-р філософії; **А. Г. Филипович**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074
м. Київ, bochekha@ism.kiev.ua*

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОМПОЗИТІВ, СПЕЧЕНИХ ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ З ПОРОШКІВ АЛМАЗУ З ТИТАНОВИМ ПОКРИТТЯМ

Зразки композита «алмаз – карбід титану» були отримані спіканням за високому тиску порошків алмазу, синтезованих в системах Mg–Zn–C та Ni–Mn–C, з титановим покриттям алмазних зерен. Проведено дослідження зносостійкості отриманих зразків шляхом точіння ними циліндричного керна граніту Коростишівського родовища X категорії буримості. Показано, що нанесення покриття на поверхню частинок алмазних порошків збільшує зносостійкість одержаних з них зразків композита в порівнянні з зразками, одержаними з алмазних порошків без покриття.

Ключові слова: *точіння керна граніту, зносостійкість, твердість, алмазні порошки, високий тиск, спікання, композит «алмаз – карбід титану».*

Вступ

На сьогодні використання доліт, оснащених зразками алмазних полікристалів чи композитів *PDC (Polycrystalline Diamond Compact)*, для буріння свердловин в породах середніх і твердих категорій буримості дозволяє в декілька разів збільшити проходку на долото і механічну швидкість буріння у порівнянні з шарошковими долотами. Однак при переході буріння від порід середньої категорії буримості до більш твердих, у доліт, оснащених пластинами *PDC*, як правило, спостерігаються істотне зниження механічної швидкості буріння і зносостійкості інструменту.

Для покращення спікання алмазних порошків застосовують добавки, які утворюють у процесі спікання хімічні сполуки з вуглецем і таким чином пов'язують алмазні частинки. Введення тугоплавких металів або їхніх карбідів як добавки до алмазних порошків для отримання полікристалічних алмазних матеріалів запропоновано ще в [1, 2]. Прикладом успішної реалізації реакційного спікання алмазних порошків за високого тиску є одержання таких матеріалів як синдакс [3; 4], АКТМ [5; 6], в основі формування яких лежить просочення рідким кремнієм стисненого високим тиском порошку алмазу, під час взаємодії якого з кремнієм утворюється карбід кремнію, що заповнює пори між алмазними частинками.

Продовжуються пошуки способів введення в структуру алмазного композита тугоплавких карбідів, зокрема, карбиду титану для покращення зносостійкості та термостабільності полікристалічних алмазних композитів. Так, в [7] описано спікання за високого тиску алмазного порошку з титаном, нанесеним на поверхню алмазних зерен, в [8]