

23. Taniguchi, T., Akaishi, M., & Yamaoka, S. (1999). Sintering of cubic boron nitride without additives at 7.7 GPa and above 2000 °C. *J. Mater. Res.*, 14(1), 162–169. <https://doi.org/10.1557/JMR.1999.0024>.
24. CeramTec, Headquarters. (2024). WBN 565 – Cutting Materials. / . – Plochingen: *CeramTec GmbH*. Retrieved from <https://www.ceramtec-industrial.com/en/products-applications/machining-applications/cutting-materials/hd-line/wbn-565>.
25. Wang, R., Yang, D., Wang, W., Wei, F., Lu, Y. , & Li, Yuqi. (2022). Tool Wear in Nickel-Based Superalloy Machining: An Overview. *Processes*, 10, 2380. <https://doi.org/10.3390/pr10112380>.
26. Wang, C., Ming, W., & Chen, M. (2016). Milling tool's flank wear prediction by temperature dependent wear mechanism determination when machining Inconel 182 overlays. *Tribol. Int.*, 104, 140–156. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.08.036>.

УДК 621.762.5

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-129-140

Микола БЕЖЕНАР, д-р. техн. наук, **Олександр СОКОЛОВ**, канд. техн. наук, **Андрій ПАЦИК**, аспірант, **Ярослав РОМАНЕНКО**, канд. техн. наук.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: bezhenar@ukr.net, oleks1953@ukr.net, pacik.andr@gmail.com, ya.romanenko.ism@gmail.com

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ PCBN КОМПОЗИТІВ СИСТЕМИ cBN-TiN, ОДЕРЖАНИХ В КУБІЧНОМУ АПАРАТІ ВИСОКОГО ТИСКУ

Наведено результати дослідження структури та властивостей надтвердих PCBN композитів, одержаних спіканням в кубічному апараті високого тиску шихти складу cBN-TiN та cBN-TiN-Al. Температура спікання 1750 К, тиск 5 ГПа. Досліджувались мікроструктура, фазовий та елементний склад, твердість за Кнупом і за Віккерсом, тріщиностійкість, визначена індентуванням пірамідою Віккерса.

Ключові слова: кубічний нітрид бору, нітрид титану, високий тиск, реакційне спікання, PCBN композит, фазовий склад, твердість, тріщиностійкість.

Вступ

Полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору (PCBN) широко відомі у світі як інструментальні матеріали для оснащення лезового інструменту, ефективного при обробленні загартованих сталей, чавунів, спеціальних сплавів, інших важкооброблюваних матеріалів [1]. Для чистових і напівчистових операцій металообробки, як правило, у складі шихти cBN використовують одну із тугоплавких сполук – карбід, нітрид або карбонітрид титану [2, 3]. Недоліком композитів, отриманих із двокомпонентної шихти cBN-TiN, є утворення твердого розчину кисню на базі кристалічної ґратки кубічного нітриду бору [4–6], що призводить до зниження термостійкості інструменту внаслідок формування під дією високих температур різання сполук низької міцності – оксиду бору та графітоподібного нітриду бору. Для уникнення утворення цих сполук у шихту додавали алюміній, який ефективно зв'язує кисень [7–10].

Матеріали і методи досліджень

У пропонованій роботі наведено результати дослідження властивостей PCBN композитів, одержаних спіканням порошків систем cBN–TiN і cBN–TiN–Al при тиску 5 ГПа і температурі 1750 К.

Мікроструктуру, фазовий та елементний склад композитів досліджували з використанням методів оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу. Методом індентування з використанням алмазних пірамід Кнупа і Віккерса визначали твердість та тріщиностійкість композитів.

Вихідні порошки: мікропорошок cBN з розміром зерен 1–2 мкм, порошок TiN з розміром зерен 1–1,5 мкм, порошок алюмінію з розміром зерен 1–1,5 мкм.

Вихідні порошки перед використанням досліджувались методами лазерної гранулометрії, оптичної і електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального і рентгенофазового аналізу. Результати досліджень наступні.

Порошок cBN: *фазовий склад* – 100 % cBN, параметр ґратки cBN $a=0,361789$ нм, домішок hBN і V_2O_5 не виявлено; *елементний склад* – порошок стехіометричний, мінімальна (0,5 ат. %) кількість кисню в кристалічній ґратці; *дисперсність* – за результатами гранулометричного аналізу (лазерний гранулометр BT-9300ST) 80 % порошку (за масою) мають розміри в межах від 1 до 2 мкм. На рис. 1 приведені електронномікроскопічні зображення порошку cBN з розміром зерен 1–2 мкм. Видно дефекти на поверхні зерен (борозни, ступені росту), а також дрібні нанодисперсні частинки, які прилипили до поверхні крупного зерна (рис. 1, а). Інколи зустрічаються зерна розміром більше 2 мкм (рис. 1, б).

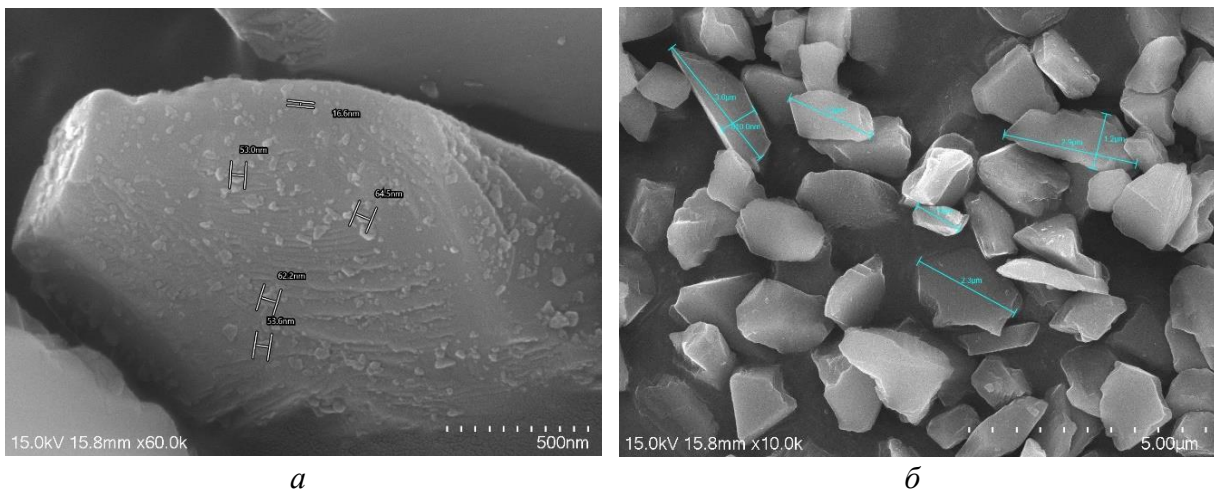


Рис. 1. Електронномікроскопічні зображення порошку cBN з розміром зерен 1–2 мкм

Порошок TiN: *фазовий склад* – 100 % TiN, параметр ґратки $a=0,424208$ нм, характерний для даної сполуки; *елементний склад* (в атомних %) – 51 % Ti, 37 % N, 4 % C, 8% O, що відповідає хімічній формулі сполуки $TiN_{0,73}C_{0,07}O_{0,16}$, 8 % кисню в ґратці може бути проблемою при спіканні композитів без участі алюмінію в шихті; *дисперсність* – результати гранулометричного аналізу не дали відповіді про розмір зерен порошку TiN 1–1,5, так як значна його частина через когезійну взаємодію утворила конгломерати розміром до 40 мкм, це підтвердили і дослідження порошку методами оптичної мікроскопії; дослідження методами електронної мікроскопії показали (рис. 2), що більшість зерен порошку мають розміри в межах 1–1,5 мкм (рис. 2, а), хоча попадаються зерна більшого розміру (до 4 мкм), на поверхні яких налипило багато субмікронних і нанодисперсних зерен (рис. 2, б).

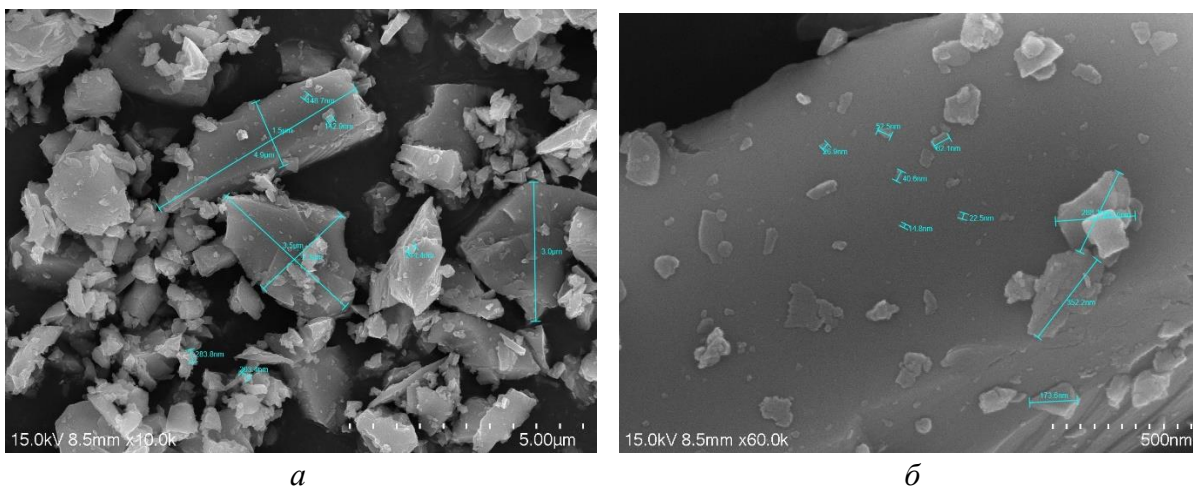


Рис. 2. Електронномікроскопічні зображення порошку TiN з розміром зерен 1 – 1,5 мкм

Порошок Al: **фазовий склад** – 100 % Al, параметр ґратки $a=0,40505$ нм; **дисперсність** – за даними гранулометричного аналізу 90 % зерен порошку алюмінію мають розміри в межах 1–1,5 мкм; дослідження порошку алюмінію з використанням оптичної мікроскопії показали, що його частинки близькі за розмірами і всі мають форму кулі.

Шихту для спікання готували шляхом мокрого змішування вихідних порошків з етиловим спиртом і кулями з оксиду цирконію на протязі 2–4 годин. Однорідність одержаної шихти підтвердили результати досліджень з використанням оптичної мікроскопії. В табл. 1 і 2 приведено фазовий склад шихти з врахуванням намелу оксиду цирконію.

Таблиця 1. **Фазовий склад шихти для одержання PCBN композитів системи cBN–TiN після змішування**

Фази	cBN (1–2 мкм)	TiN (1–1,5 мкм)	ZrO ₂ (намел)
Склад, % масові	49,28	49,28	1,45
Склад, % об'ємні	60,26	38,73	1,02

Таблиця 2. **Фазовий склад шихти для одержання PCBN композитів системи cBN–TiN–Al після змішування**

Фази	cBN (1–2)	TiN (1–1,5)	Al (1–1,5)	ZrO ₂ (намел)
Склад, % масові	46,87	46,87	5,98	0,27
Склад, % об'ємні	55,22	35,49	9,11	0,18

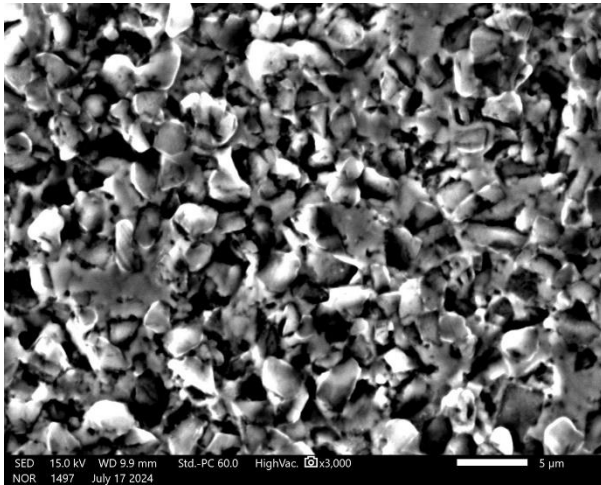
Спікання здійснювали з використанням шестипуансонного пресу китайського виробництва ZR 800, максимальне зусилля пресу 330 МН, ребро куба комірки високого тиску 86 мм. Спікання шихти проводили на тврдосплавній підкладці WC–Co (13 % Co).

Результати досліджень

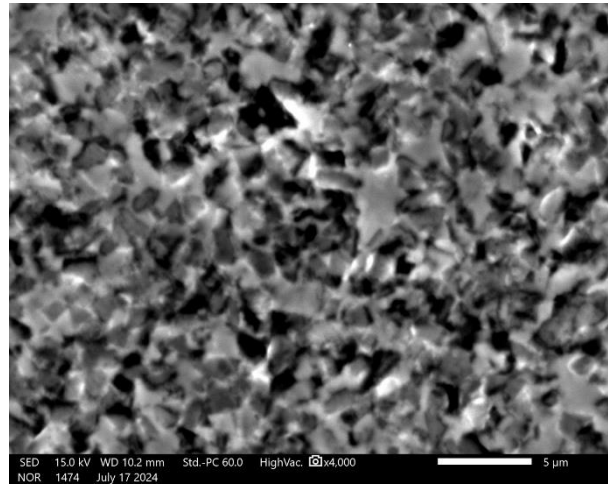
Мікроструктура

З використанням електронної мікроскопії (растровий електронний мікроскоп JSM-IT500) досліджувалась мікроструктура композитів. На рис. 3 приведена мікроструктура PCBN композитів систем cBN–TiN (3 а, в) та cBN–TiN–Al (3 б, г). Структура однорідна, відсутні ділянки, які за розмірами перевищують величину зерен складових композиту. Між

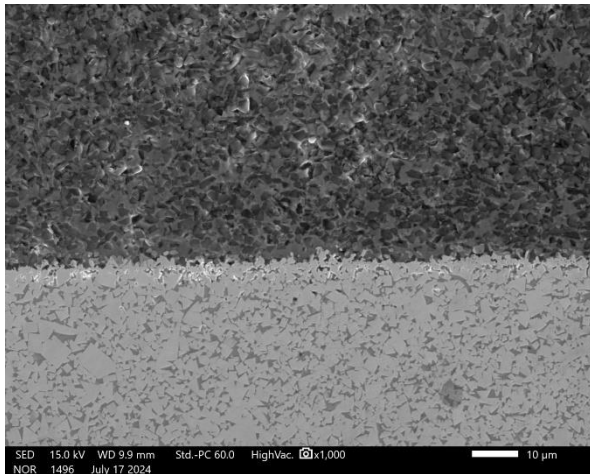
твердосплавною підкладкою і шаром cBN міцний зв'язок, який забезпечує кобальт, просочуючись з твердого сплаву в cBN область (рис. 3, з).



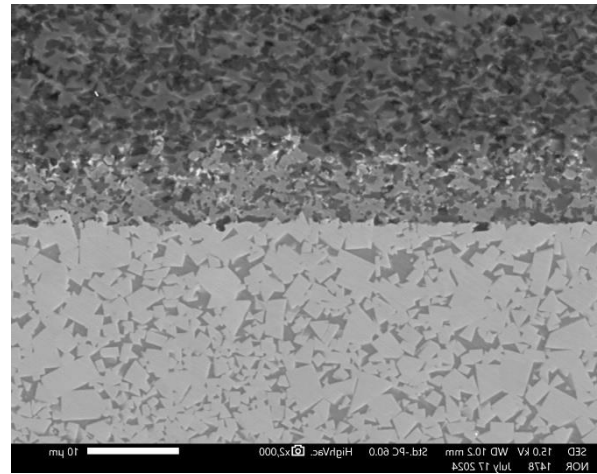
cBN-TiN, ×3000
а



cBN-TiN-Al, ×4000
б



cBN-TiN, ×1000
в



cBN-TiN-Al, ×2000
г

Рис. 3. Мікроструктура PCBN композитів, систем cBN-TiN (а, в) і cBN-TiN-Al (б, г)

На рис. 4, а показано розподіл кобальту в області границі твердий сплав – PCBN шар для композиту, отриманого в системі cBN-TiN-Al. Кобальт служить матеріалом, що забезпечує міцність зв'язку підкладки і робочого шару на основі cBN. У приграничній області cBN товщиною ~10 мкм концентрація кобальту досягає більше 40%, у той час як у вихідному твердому сплаві кількість кобальту – 13%. На рис. 3, г чітко видно смуга шириною 5 мкм, збагачена кобальтом (відрізняється кольором). Концентрація алюмінію і титану на границі шарів закономірно знижується, проникнення їх в твердосплавну підкладку не перевищує 2–3 мкм (рис. 4, б, в).

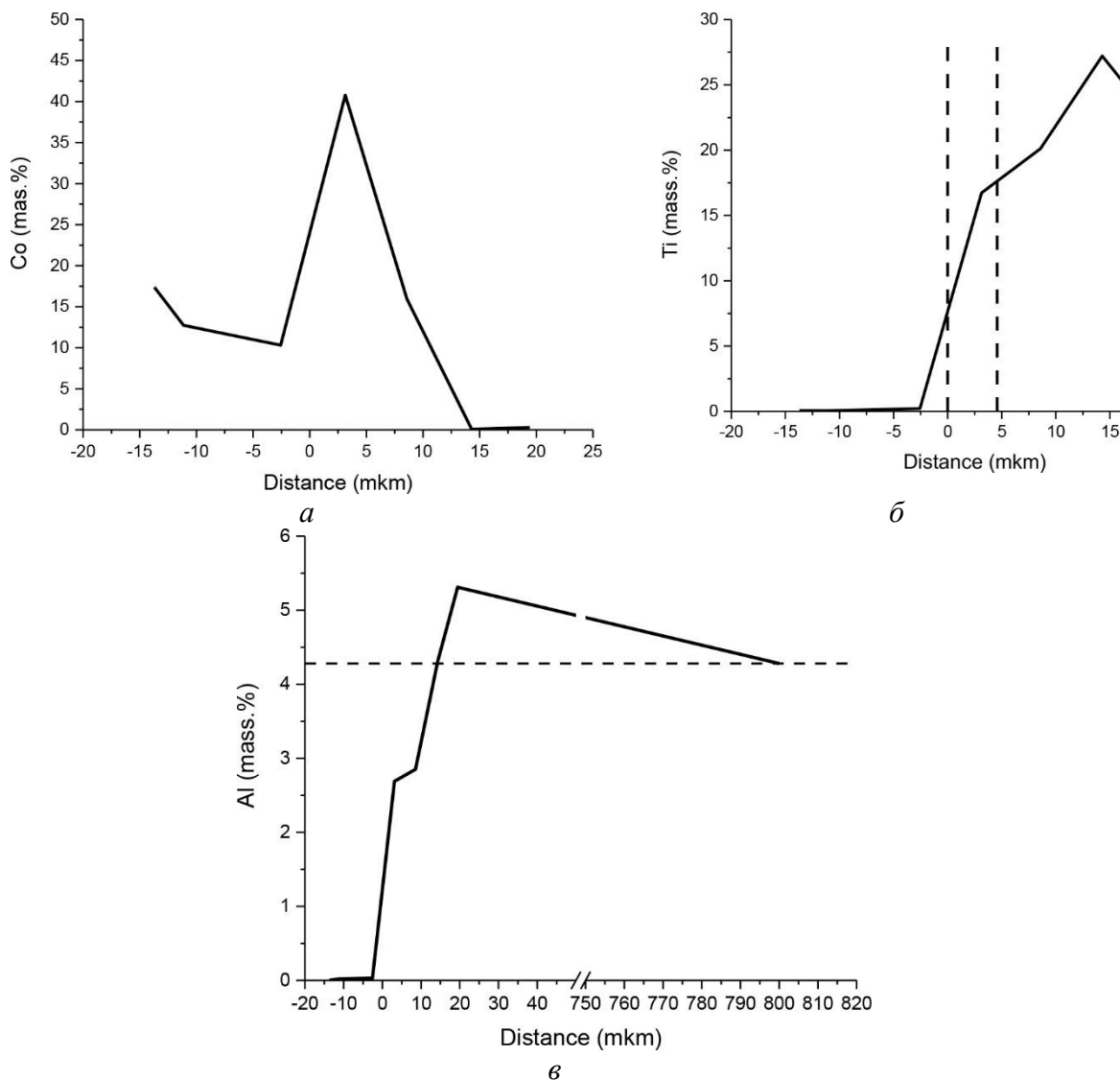


Рисунок 4. Розподіл кобальту (а), титану (б) та алюмінію (в) в області границі твердий сплав – PCBN шар для композитів, одержаних в системі cBN–TiN–Al

Фазовий склад

Методом рентгеноструктурного аналізу досліджували фазовий склад PCBN композитів. В процесі спікання PCBN композитів системи cBN–TiN хімічної взаємодії між компонентами не відбувалося. В табл. 3 приведено фазовий склад композиту (в % інтенсивності), для порівняння приведено фазовий склад вихідної шихти в % за масою і за об'ємом.

Таблиця 3. Фазовий склад PCBN композиту системи cBN–TiN

Фази	cBN (– 2 мкм)	TiN (1–1,5 мкм)	ZrO ₂ (намел)
Склад, % інтенсивності	28,4	67,0	4,6
Склад, % масові (шихта)	49,28	49,28	1,45
Склад, % об'ємні (шихта)	60,26	38,73	1,02

На рис. 5 приведена рентгенограма PCBN композиту системи cBN–TiN. Ідентифіковано 3 фази – cBN, TiN і ZrO₂ (домішка в шихті, намел). Параметри кристалічних ґраток наступні: $a = 0,36164$ для cBN і $a = 0,42421$ для TiN. Інтенсивність ліній TiN і ZrO₂ висока за рахунок масового фактору (маса атомів Ti і Zr значно більша, ніж B і N).

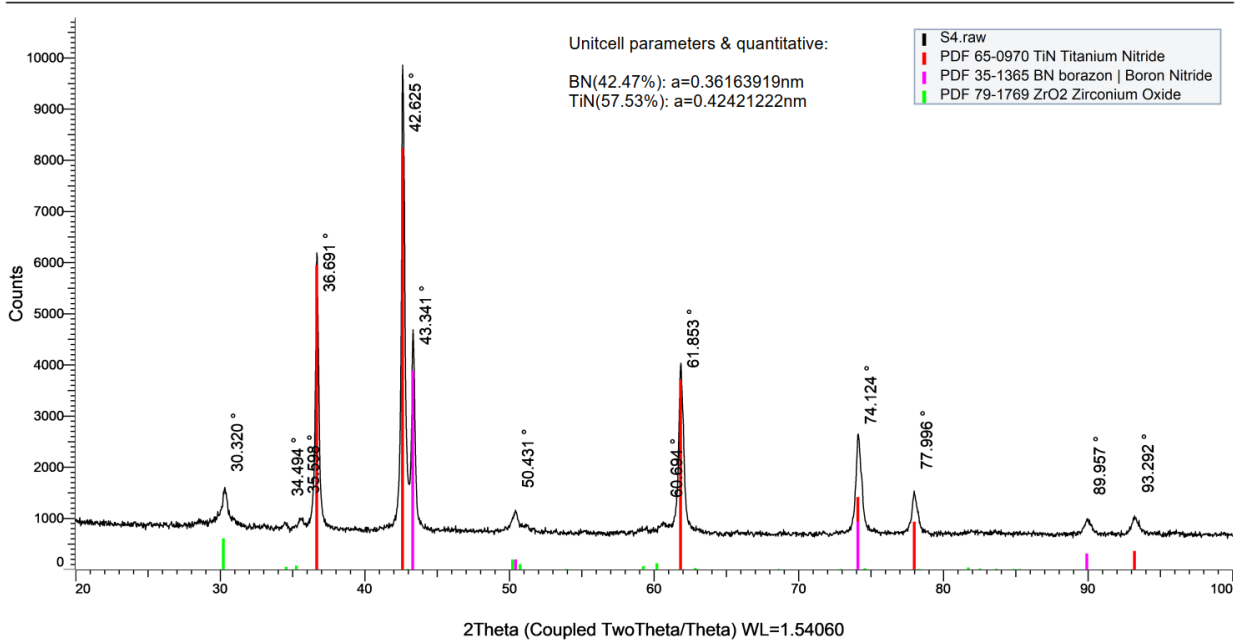


Рис. 5. Рентгенограма PCBN композиту системи cBN–TiN

На рис. 6 приведена рентгенограма PCBN композиту системи cBN–TiN–Al. Ідентифіковано 4 фази – cBN, TiN TiB₂ і AlN. Параметри кристалічних ґраток наступні: $a = 0,36162$ нм для cBN; $a = 0,42491$ нм для TiN; $a = 0,30286$ нм і $c = 0,32530$ нм для TiB₂; $a = 0,31097$ нм і $c = 0,49605$ нм для AlN. Поява нових фаз свідчить про хімічну взаємодію між компонентами шихти.

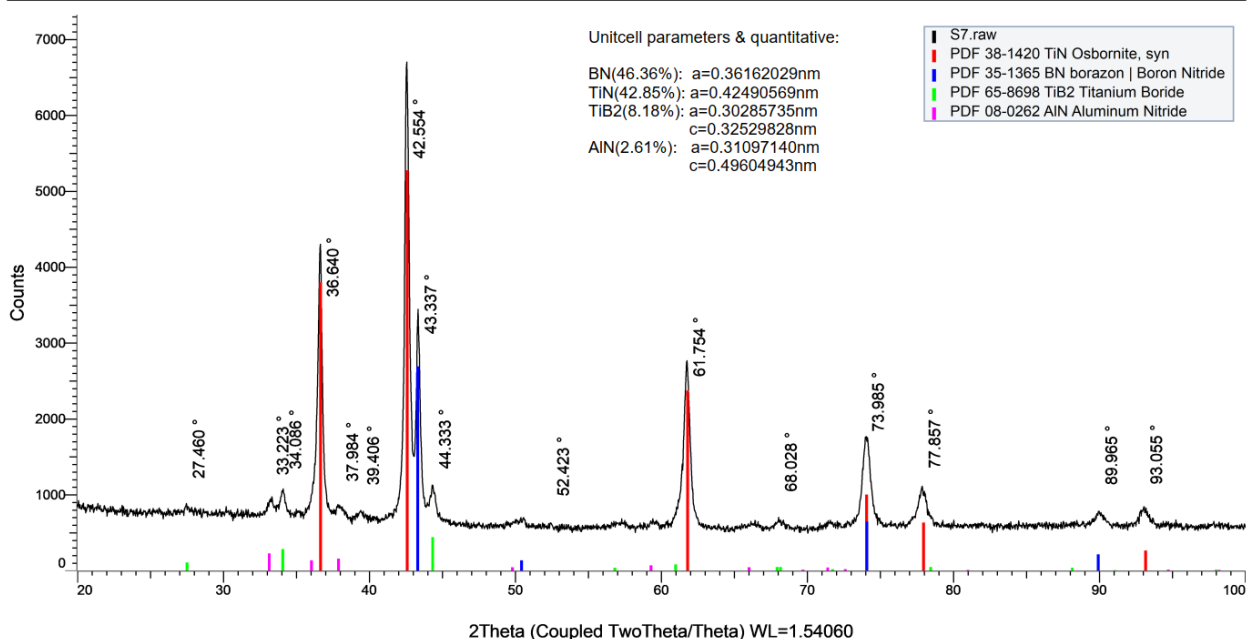


Рис. 6. Рентгенограма PCBN композиту системи cBN–TiN–Al

Хімічна взаємодія найімовірніше проходила за реакцією:



В складі шихти було 6 % алюмінію. Баланс реакції наступний (в % від маси шихти): в хімічній взаємодії взяли участь TiN (4,6 %), BN (3,7 %) і Al (6 %, весь алюміній). В результаті в складі композиту утворились нові фази TiB₂ (5,2 %) і AlN (9,1 %) від маси композиту. В табл. 4 приведено фазовий склад композиту (в % інтенсивності), для порівняння приведено фазовий склад композиту за балансом реакції (1) в % за масою і за об'ємом.

В досліджуваному композиті згідно з балансом реакції (1) значна доля нітриду алюмінію (9,1 % за масою і 11,8 % за об'ємом), але інтенсивність ліній AlN на рентгенограмі низька (див. рис. 6 і табл. 4), що викликає сумніви в його наявності в композиті в розрахованій кількості. Варіант 1 – його значно менше в композиті і тоді реакція (1) проходить тільки частково, можливі інші шляхи реакційної взаємодії. Варіант 2, найбільш ймовірний – утворення політипів AlN (6H, 12H, 24H замість 2H), чому сприяють домішки кисню, інтенсивність відбиттів таких політипів на рентгенограмі значно нижча, їх важко виявити методами рентгеноструктурного аналізу. Дані мікрорентгеноспектрального аналізу свідчать про наявність у складі композиту сполук алюмінію. Нітрид алюмінію та його політипи, що знаходяться між зернами твердих cBN, TiN, TiB₂, діють як амортизатори, підвищуючи в'язкість руйнування (тріщиностійкість) композиту. Структурна перевага композитів, отриманих у системі з BN-TiN-Al, порівняно з композитами системи з BN-TiN проявляється завдяки появі в їх складі нових фаз, що підвищують одночасно твердість (TiB₂) та тріщиностійкість (AlN та його політипи) композиту.

Таблиця 4. Фазовий склад PCBN композиту системи cBN–TiN–Al

Фази	cBN	TiN	TiB ₂	AlN
Склад, % інтенсивності	30,0	63,9	4,2	1,9
Склад, % масові (шихта)	43,3	42,4	5,2	9,1
Склад, % об'ємні (шихта)	51,2	32,2	4,8	11,8

Елементний склад

Методом мікрорентгеноспектрального аналізу досліджувався елементний склад PCBN композитів. В табл. 5 і 6 наведено результат аналізу елементного складу для композитів, отриманих у системах BN-TiN та BN-TiN-Al. Основні елементи на поверхні композиту (в атомних %) – N, B, Ti, O, C, Zr для системи BN-TiN та N, B, Ti, Al, O, C, Zr для системи BN-TiN-Al. Zr – домішка, привнесена в шихту при змішуванні, його мало в шихті (менше 0,5% атомних), при аналізі його можна не враховувати.

Таблиця 5. Елементний состав композиту (в масових і атомних %), одержаного в системі cBN–TiN

Елементи	N	B	Ti	O	C	Zr	Total
% масові	42,58	25,15	26,28	2,77	0,69	2,53	100
% атомні	49,24	37,68	8,89	2,80	0,93	0,45	100

Таблиця 6. Елементний состав композиту (в масових і атомних %), одержаного в системі cBN–TiN–Al

Елементи	N	B	Ti	Al	O	C	Zr	Total
% масові	38,54	23,07	27,95	4,28	3,5	1,64	1,02	100,00
% атомні	45,90	35,60	9,73	2,65	3,65	2,28	0,19	100,00

Кисень у склад композиту потрапляє як складова частина нітриду титану (8 ат. % у вихідному порошку), оксиду цирконію (домішка в шихті). Інші джерела – в процесі шліфування на поверхню композиту потрапляють сполуки із зв'язки шліфувального алмазного круга. У багатьох випадках у зв'язці круга переважно органічні сполуки, що складаються з легких елементів (C, H, O, N), вони залишаються на поверхні композиту. Наявність інших елементів корелює із фазовим складом композиту.

Порівняння елементного складу шихти та композиту приведені в табл. 7 і табл. 8. В обох випадках у композиті менша кількість титану та алюмінію, ніж було у вихідній шихті, різниця становить від 35 до 55 %. Можливо, це пов'язано з процесами міграції фаз у композиті під час спікання, або з домішками на поверхні композитів, потрібні додаткові дослідження для пояснення такого ефекту.

Таблиця 7. Елементний склад композиту системи cBN–TiN та вихідної шихти для його одержання

Елементи	B	N	Ti	Total
Шихта, ат. %	35,69	50	14,31	100
Композит, ат. %	39,33	51,39	9,28	100

Таблиця 8. Елементний склад композиту системи cBN–TiN–Al та вихідної шихти для його одержання

Елементи	B	N	Ti	Al	Total
Шихта, ат. %	34,26	47,99	13,73	4,02	100
Композит, ат. %	37,92	48,89	10,36	2,82	100

Твердість

Вимірювання твердості проводилося на твердомірі FALCON 500 з використанням інденторів Кнупа при навантаженні 2 та 5 кг і Віккерса при навантаженні 10 та 30 кг. Для кожного зразка проводили не менше 5 випробувань. Твердість визначали за формулами $HV = 1,854 P/d_1^2$; $HK = 14,23 P/d_1^2$. Після випробувань проводилась статистична обробка результатів вимірювань (середнє значення, довірчий інтервал при довірчій ймовірності 70 %). В табл. 9 приведені результати випробувань, а на рис. 7 фотографії відбитків після індентування пірамідами Кнупа (7 а) та Віккерса (7 б).

Таблиця 9. Твердість PCBN композитів систем cBN–TiN та cBN–TiN–Al

Композит системи	Твердість, ГПа			
	HK2	HK5	HV10	HV30
cBN–TiN	37±3	27±2	32±2	30±3
cBN–TiN–Al	33±2	27±1	35±2	32±2

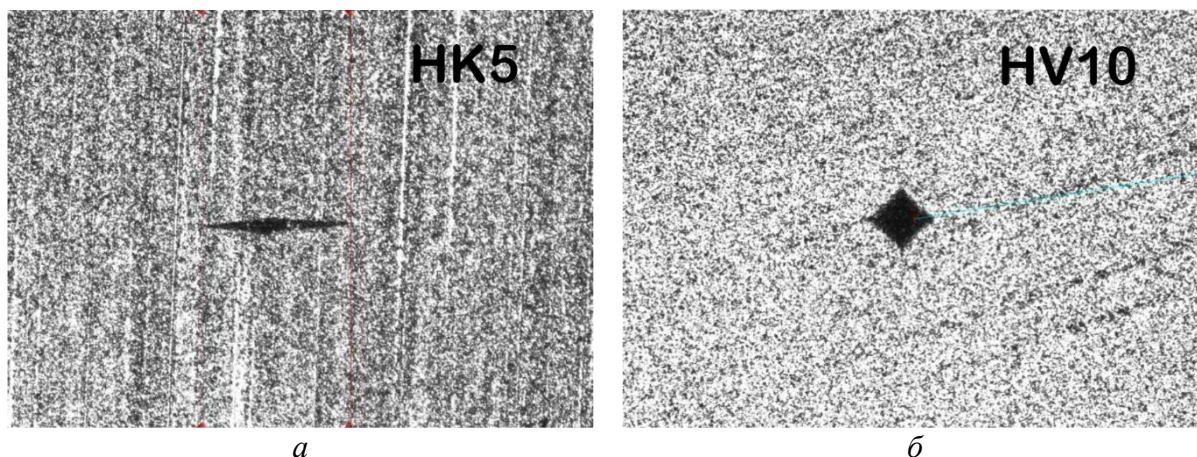


Рис. 7. Фотографії відбитків твердості при випробуванні PCBN композиту системи cBN-TiN-Al з використанням пірамід Кнупа (а) і Віккерса (б) при навантаженні на індентор 5 та 10 кг відповідно

Тріщиностійкість

Для PCBN композитів систем cBN-TiN та cBN-TiN-Al методом індентування при навантаженні на піраміду Віккерса 30 кг були проведені випробування по визначенні тріщиностійкості. Тріщиностійкість визначали за формулою $K_{IC} = 0,016 * (E/Hv)^{0,5} * Fc^{-3/2}$, де E – модуль пружності; Hv – твердість за Віккерсом; F – навантаження при індентуванні; c – довжина радіальної тріщини, виміряна від центру відбитка. В табл. 10 і 11 приведені результати досліджень, а на рис. 8 приклад відбитку з тріщинами.

Таблиця 10. Результати випробувань по визначенню тріщиностійкості PCBN композитів системи cBN-TiN

№ випробування	HV30, ГПа	d_{cp} , мкм	c_{cp} , мкм	c/d	K_{IC} , МПа*м ^{0,5}
1	35,44	124,0	150,0	1,21	10,67
2	28,98	137,1	144,2	1,05	12,51
3	30,2	134,3	157,4	1,17	10,75
4	32,23	130,0	136,7	1,05	12,86
Середнє значення					11,70
Стандартне відхилення					1,15
Довірчий інтервал при довірчій ймовірності 70 %					0,60

Таблиця 11. Результати випробувань по визначенню тріщиностійкості PCBN композитів системи cBN-TiN-Al

№ випробування	HV30, ГПа	d_{cp} , мкм	c_{cp} , мкм	c/d	K_{IC} , МПа*м ^{0,5}
1	32,26	129,98	140,11	1,08	12,03
2	31,53	131,48	149,03	1,13	11,09
3	33,81	126,98	148,93	1,17	10,72
Середнє значення					11,28
Стандартне відхилення					0,67
Довірчий інтервал при довірчій ймовірності 70 %					0,40

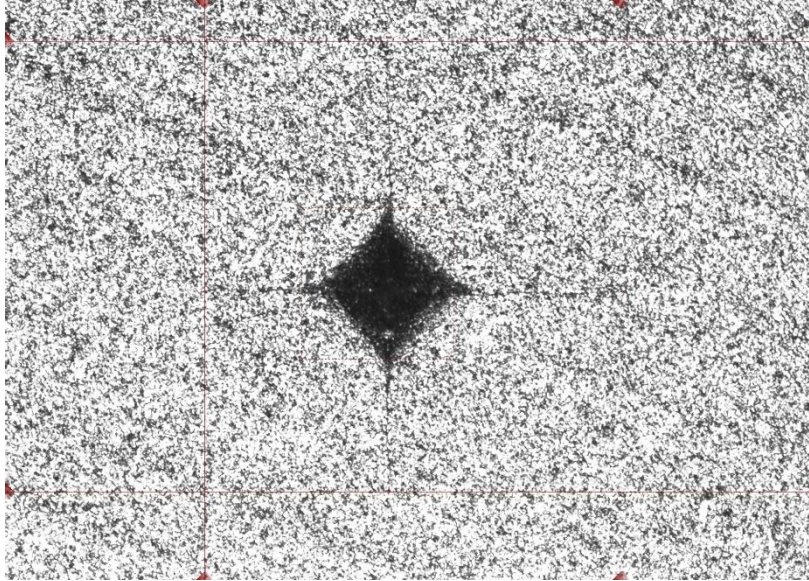


Рисунок 8. Фотографія відбитка при випробуванні PCBN композиту системи cBN–TiN–Al на тріщиностійкість з використанням піраміди Віккерса при навантаженні на індентор 30 кг

Середнє значення тріщиностійкості для PCBN композиту системи cBN–TiN – $11,7 \pm 0,6$ МПа·м^{0,5}, а для PCBN композиту системи cBN–TiN–Al – $11,3 \pm 0,4$ МПа·м^{0,5}, діапазони значень перекриваються, тому можна стверджувати, що в одержаних нами PCBN композитах систем cBN–TiN і cBN–TiN–Al значення тріщиностійкості однакові з врахуванням похибки вимірювань.

Висновки

1. З використанням електронної мікроскопії досліджено мікроструктуру PCBN композитів систем BN–TiN та BN–TiN–Al. Відзначено однорідність структури композитів. Між твердосплавною підкладкою і шаром на основі cBN міцний зв'язок, який забезпечує кобальт, просочуючись з твердого сплаву в cBN область. У приграничній області cBN товщиною ~10 мкм концентрація кобальту досягає 40%.

2. При спіканні PCBN композитів системи cBN–TiN–Al відбувається хімічна взаємодія між компонентами шихти. За даними рентгеноструктурного аналізу фазовий склад композиту – cBN, TiN, TiB₂, AlN. Наявність у структурі композиту твердого високомодульного бориду титану сприяє збільшенню його твердості. Нітрид алюмінію та його політипи, що знаходяться між зернами твердих cBN і TiB₂, діють як амортизатори, підвищуючи в'язкість руйнування композиту. При спіканні PCBN композитів системи cBN–TiN нових фаз не виявлено.

3. Методом мікрорентгеноспектрального аналізу досліджено елементний склад PCBN композитів. Основні елементи на поверхні композитів – N, B, Ti, O, C, Zr для системи cBN–TiN і N, B, Ti, Al, O, C, Zr для системи cBN–TiN–Al. Кисень у складі композиту потрапляє як складова частина нітриду титану (8 ат. % у вихідному порошку), оксиду цирконію (домішка в шихті). Інші джерела додаткових кисню, вуглецю, азоту, бору – у процесі шліфування на поверхню композиту потрапляють сполуки із зв'язки шліфувального алмазного круга. Порівняння елементного складу шихти та композиту показує, що в композиті менша кількість титану та алюмінію, ніж у вихідній шихті, різниця становить від 35 до 55 %, що теж може бути пов'язано з домішками на поверхні композитів.

4. Значення твердості PCBN композитів системи cBN–TiN наступні: $HK2 = 37 \pm 3$ ГПа, $HK5 = 27 \pm 2$ ГПа, $HV10 = 32 \pm 2$ ГПа, $HV30 = 30 \pm 3$ ГПа. Наведені довірчі інтервали відповідають довірчій ймовірності 70 %. Для PCBN композитів системи cBN–TiN–Al значення твердості

наступні: $HK2 = 33 \pm 2$ ГПа, $HK5 = 27 \pm 1$ ГПа, $HV10 = 35 \pm 2$ ГПа, $HV30 = 32 \pm 2$ ГПа. Як видно з приведених даних, з врахуванням похибки вимірювань твердість PCBN композитів систем cBN–TiN і cBN–TiN–Al майже однакова.

5. Середнє значення тріщиностійкості для PCBN композиту системи cBN–TiN – $11,7 \pm 0,6$ МПа·м^{0,5}, а для PCBN композиту системи cBN–TiN–Al – $11,3 \pm 0,4$ МПа·м^{0,5}, діапазони значень перекриваються.

M. Bezhenar, O. Sokolov, A. Patsyk, Ya. Romanenko

V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine

STRUCTURE AND PROPERTIES OF PCBN COMPOSITES OF THE CBN–TiN SYSTEM, OBTAINED IN A CUBIC HIGH-PRESSURE APPARATUS

The results of a study on the structure and properties of superhard PCBN composites, obtained by sintering in a cubic high-pressure apparatus from a mixture of cBN–TiN and cBN–TiN–Al, are presented. The sintering temperature was 1750 K, and the pressure was 5 GPa. The research focused on microstructure, phase and elemental composition, hardness (measured by Knoop and Vickers methods), and fracture toughness, determined by Vickers pyramid indentation.

Key words: *Cubic boron nitride, titanium nitride, high pressure, reactive sintering, PCBN composite, phase composition, hardness, fracture toughness.*

Література

1. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография: в 6 т. Т. 5 / под общ. ред. Н. В. Новикова – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2006. Т. 5. Обработка металлов лезвийным инструментом. 315 с.
2. Benko, E., Stanisław, J. S., Kroślicka, B., Wyczasany, A., Barr, T. L. cBN–TiN, cBN–TiC composites: chemical equilibria, microstructure and hardness mechanical investigations. *Diamond and Related Materials*. 1999. Vol. 8. P. 1838–1846.
3. Беженарь Н. П. Кубический нитрид бора, поликристаллические и композиционные материалы на его основе. *Неорганическое материаловедение. Материалы и технологии* / за ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. Київ, 2008. Наук. думка. К. 1., Т. 2. С. 503–511.
4. Xie, H., Deng, F., Wang, H., Han, S. Superhigh-pressure fragments of metal nitride/carbide ceramic powders and their behavior under high-pressure and high-temperature sintering. *Powder Technology*. 2021. Vol. 378, P. 639–646.
5. Беженар, Н. П., Божко, С. А., Белявина, Н. Н., Марків, В. Я. Физико-химическое взаимодействие при спекании в условиях высокого давления сфалеритного нитрида бора с нитридом титана. *Сверхтвердые материалы*. 1997. № 1. С. 9–13.
6. Беженар, Н. П., Божко, С. А., Белявина, Н. Н., Марків, В. Я. Исследование твердофазного взаимодействия при спекании сфалеритного нитрида бора с карбидом и нитридом титана в присутствии кислорода при высоком давлении. *Сверхтвердые материалы*. 1998. № 2. С. 29–35.
7. Rong, X.Z., Tsurumi, T., Fukunaga, O., Yano, T. High-pressure sintering of cBN–TiN–Al composite for cutting tool application. *Diamond and Related Materials*. 2002. Vol. 11. P. 280–286.
8. Беженар, М. П., Коновал, С. М., Гарбуз, Т. О., Білявина, Н. М. Вплив умов одержання на властивості надтвердих композитів системи cBN–TiN–Al, отриманих при високому тиску. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения*. Зб. наук. пр. Вип. 16, Київ: ІНМ ім. В. Н. Бакуля, НАН України, 2013. С. 287–294.

9. Rong, X.-Z., Fukunaga, O. Sintering of Cubic Boron Nitride with Added Aluminum at High Pressure and High Temperatures. *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.* 1994. Vol. 14B. P. 1455–1458.
10. Benko, E., Wyczesany, A., Barr, T. L. CBN-metal/metal nitride composites. *Ceramics International*. 2000. Vol. 26. P. 639–644.

Надійшла 03.09.24

Reference

1. Novikov, N. V. (Ed.). (2006). Sverkhтвердые материалы. Poluchenie i primeneniye [Superhard materials. Obtaining and using]: V. 5. Obrabotka metallov lezviinym instrumentom [Metal working with bladed tools]. ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukrainy, IPTS «ALKON» NAN Ukrainy [in Russian].
2. Benko, E., Stanisław, J. S., Kroślicka, B., et al. (1999). cBN–TiN, cBN–TiC composites: Chemical equilibria, microstructure and hardness mechanical investigations. *Diamond and Related Materials*, (8). 1838–1846.
3. Bezhenar, N. P. (2008). Kubicheskii nitrid bora, polikristallicheskie i kompozitsionnye materialy na eho osnove [Cubic boron nitride, polycrystalline and composite materials based on it]. G. G. Hnesina & V. V. Skorokhoda (Ed.), *Neorhanicheskoe materialovedenie. Materialy i tekhnologii [Inorganic materials science. Materials and technologies]* (B. 1, V. 2., p. 503–511). Naukova dumka, Kyiv [in Russian].
4. Xie, H., Deng, F., Wang, H., & Han, S. (2021). Superhigh-pressure fragments of metal nitride/carbide ceramic powders and their behavior under high-pressure and high-temperature sintering. *Powder Technology*. (378), 639–646.
5. Bezhenar, N. P., Bozhko, S. A., Beliavina, N. N., & Markiv, V. Ya. (1997). Fiziko-khimicheskoe vzaimodeistvie pri spekanii v usloviakh vysokoho davleniia sfaleritnoho nitrída bora s nitridom titana [Physicochemical interaction during sintering under high pressure of sphalerite boron nitride with titanium nitride]. *Sverhtverdye materialy – Superhard materials*, (1), 9–13 [in Russian].
6. Bezhenar, N. P., Bozhko, S. A., Belyavina, N. N., & Markiv, V. Ya. (1998). Issledovanie tverdogaznogo vzaimodeistviia pri spekanii sfaleritnoho nitrída bora s karbidom i nitridom titana v prisutstvii kisloroda pri vysokom davlenii [Solid-phase interaction during sintering of sphalerite boron nitride with carbide and titanium nitride in the presence of oxygen under high pressure]. *Sverhtverdye materialy - Superhard materials*, (2), 29–35 [in Russian].
7. Rong, X.-Z., Tsurumi, T., Fukunaga, O., & Yano, T. (2002). High-pressure sintering of cBN–TiN–Al composite for cutting tool application. *Diamond and Related Materials*, (11), 280–286.
8. Bezhenar, M. P., Konoval, S. M., Garbuz, T. O., & Bilyavina, N. M. (2013). Vplyv umov oderzhannia na vlastyvoli nadtverdykh kompozytiv systemy cBN–TiN–Al, otrymanykh pry vysokomu tysku [The influence of production conditions on the properties of superhard composites of the cBN–TiN–Al system obtained under high pressure]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika, tekhnologiiia ego izgotovleniia i primeneniia - Rock-breaking and metalworking tools – techniques, technology of their production and application*, (16nd Issue, p. 287–294). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
9. Rong, X.-Z., & Fukunaga, O. (1994). Sintering of cubic boron nitride with added aluminum at high pressure and high temperatures. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, (14B), 1455–1458.
10. Benko, E., Wyczesany, A., & Barr, T. L. (2000). CBN-metal/metal nitride composites. *Ceramics International*, (26), 639–644.