

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]

методом інфільтрації алмазних мікропорошків розплавом інтерметаліду $TiNi_3$ за тиску 8,0 ГПа і температури 1750° С були отримані зразки композита, які мають у своєму складі алмаз, карбід титану та карбіди нікелю. В [9] було показано, що нанесення титанового покриття на зерна алмазу методом газотранспортного переміщення металу в газовому середовищі галогенідів сприяє збільшенню ступеню ущільнення алмазного порошку під дією високого тиску за кімнатної температури, а також знижує температуру спікання, за якої досягається максимальний рівень ущільнення та інтенсифікує процес ущільнення в початковий період [10].

В даній роботі описано стійкість до зношування під час точіння керна граніту Коростишівського родовища X категорії буримості зразками композита, одержаними спіканням за тиску 8 ГПа порошків алмазу, синтезованих в системах Mg–Zn–C та Ni–Mn–C, з титановим покриттям зерен алмазу.

Методика експерименту

Зразки алмазного композита було спечено за тиску 8 ГПа, температури 1500 °С упродовж 20 с з алмазного порошку, синтезованого під час дії тиску 8 ГПа та температури 1700 °С в АВТ типу «тороїд» на суміш графіту та сплаву MgZn. Після хімічного очищення продукту перекристалізації від залишкового графіту і сплаву - розчинника на частинки одержаного алмазного порошку методом газотранспортного переміщення металу в газовому середовищі галогенідів було нанесено титанове покриття. Для порівняння двох систем росту було підготовлено некласифікований алмазний продукт перекристалізації системи Ni–Mn–C з нанесеним титановим покриттям на його поверхню, який спікався в аналогічних режимах.

Твердість зразків вимірювали методом Віккерса на приладі UIT-NV micro-1. Індентор Віккерса – це алмазна пірамідка з квадратною основою та кутом при вершині між протилежними гранями 136°. Робоче навантаження для досліджених зразків складало 9,8 Н.

Значення твердості H обчислювали як відношення прикладеного до алмазного наконечника нормального навантаження до площі бокової поверхні відбитка:

$$H = \frac{P}{S} = \frac{2P(\sin \alpha/2)}{d^2},$$

де α – просторовий кут при вершині (136°); d – діагональ відбитка; P – нормальне навантаження, прикладене до пірамідки.

Дослідження структури зразків алмазного композита здійснювали за допомогою растрової електронної мікроскопії на мікроскопі ZEISS EVO 50 XVP, на якому також визначали елементний склад поверхні зразків на аналізаторі рентгенівських спектрів *Ultim Max 100*, що використовує метод EPC для дослідження елементного складу.

Зносостійкість досліджуваних зразків композита визначали за результатами точіння керна граніту Коростишівського родовища X категорії буримості. Вибір цього граніту як гірської породи було обумовлено його стабільними властивостями, високою твердістю і середньою абразивністю. Випробування проводили на токарно-гвинторізному верстаті 1K62, з режимами роботи: частота обертання $n = 400$ об/хв; глибина різання керна $t = 0,125$ мм; подача $S = 0,23$ мм/об; швидкість різання $V = 72,6$ м/хв; з середнім часом проходження ~ 35 с. Алмазні композити були закріплені в тримачі з твердосплавною підкладкою знизу та під час випробувань охолоджувались водою (рис. 1).



Рис. 1. Визначення зносостійкості на верстаті 1К62

Інтенсивність зношування I визначали як відношення втрати маси зразків до об'єму сточеного граніту:

$$I = \frac{m_0 - m}{0.785(D_0^2 - D^2)L}$$

де m_0 – початкова маса зразка до випробувань, г;
 m – маса зразка після випробувань, г;
 D_0 – зовнішній діаметр керна до випробувань, см; D – зовнішній діаметр керна після випробувань;
 L – глибина різання, см.

Зважування зразків до і після проведення експериментів проводили на аналітичних терезах моделі *AXIS AD 200*.

Результати досліджень та їх обговорення

За результатами ситової класифікації продукт перекристалізації систем росту Mg–Zn–C та Ni–Mn–C має зерновий склад, наведений в табл. 1.

та Ni–Mn–C має зерновий склад, наведений в табл. 1.

Таблиця 1. Розподіл за зернистостями алмазних порошоків, перекристалізованих в системах Mg–Zn–C та Ni–Mn–C

Зернистість	Масова частка, %	
	Ростова система Mg–Zn–C	Ростова система Ni–Mn–C
> 250 мкм	–	1,2
250/125	3,9	22,6
125/100	11,0	31,7
100/80	24,9	17,3
80/50	44,7	21,1
50/40	5,5	5,0
< 40 мкм	10,0	1,1
Разом	100	100

Як видно з таблиці, розмір частинок продукту перекристалізації системи Ni–Mn–C в середньому більше за розмір частинок системи Mg–Zn–C, що може впливати на значення зносостійкості композита, оскільки зі збільшенням зернистості порошоків, з яких сформовано полікристал, збільшується і його зносостійкість [11].

Під час підготовки зразків для вимірювання їхньої твердості та зносостійкості проведено попередню обточку до циліндричної форми та шліфування поверхні зразків, яке проводилось вільним абразивом на чавунному диску з додаванням води для запобігання утворення ділянок локального нагрівання, внаслідок чого до складу зразків композита додаються домішки, присутні в воді з водогону, та матеріал підкладки (чавун). Детальний результат елементного аналізу складу поверхні композитів після обточки наведено в табл. 2.

Варто зазначити, що деякі з елементів, наведених в табл. 2, дійсно могли потрапити в композит з водогону або ж у вигляді неконтрольованих домішок, проте наявність таких елементів як ванадій, барій та сірка, ймовірно, є результатом накладення піків під час машинного аналізу спектрів, та за реальних умов можуть, ба більше, мають бути відсутніми в зразках композита.

Таблиця 2. Елементний склад зразків композита, спеченого з порошків алмазу систем Mg–Zn–C та Ni–Mn–C з титановим покриттям після обточки вільним абразивом. Чисельні значення вмісту елементів вказано у масових відсотках

Хімічний елемент	Ростова система			
	Ni–Mn–C		Mg–Zn–C	
	Номер зразка			
	1	4	2	3
C	94,27	93,30	93,70	95,23
Al	0,06	0,16	0,05	0,05
Si	0,17	0,22	0,14	0,15
Cl	0,03	0,10	0,01	0,05
K	0,04	0,10	–	0,03
Ca	0,60	0,86	0,04	0,50
Ti	1,35	1,66	1,20	1,17
Mn	0,19	0,25	0,31	0,25
Fe	2,97	2,63	4,21	2,36
Ni	0,11	0,21	0,20	0,15
W	0,21	0,25	–	–
S	–	0,03	–	–
Ba	–	0,22	0,11	–
V	–	0,05	0,02	–
Na	–	–	–	0,07

Дослідження структури зразків після їхньої обточки показали наявність розтріскувань алмазних зерен (рис. 2).

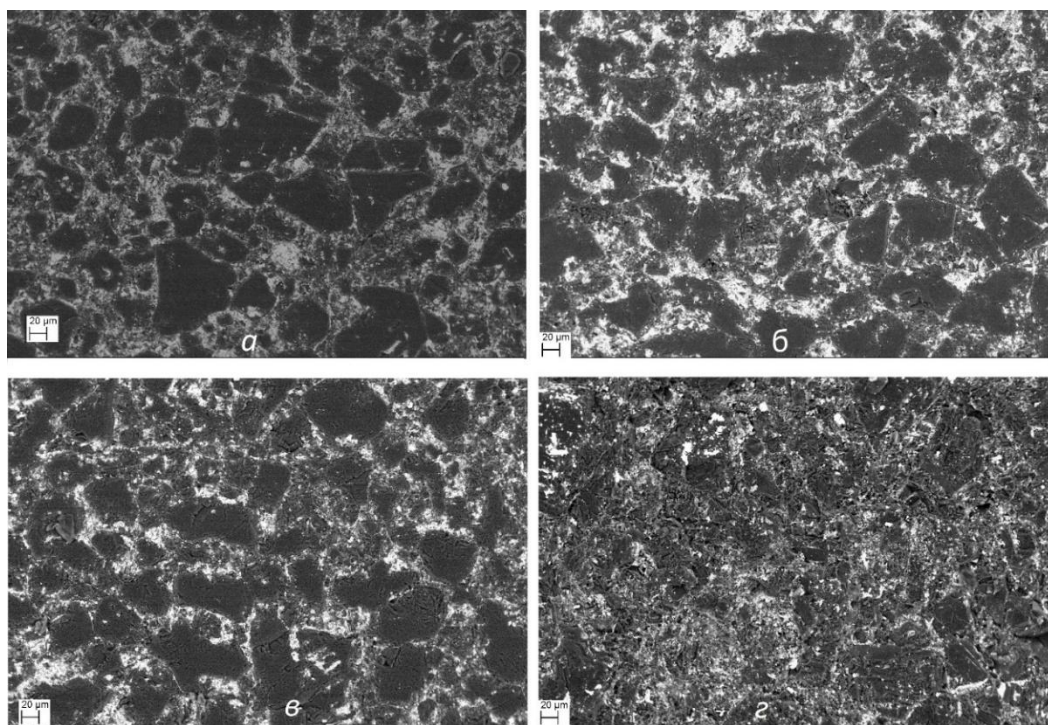


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні зразків композита, спеченого з порошку алмазу системи Ni–Mn–C (№ 1–а, № 4 –г) та Mg–Zn–C (№ 2–б, № 3–в) після їхньої обточки вільним абразивом

Враховуючи, що досліджувані полікристали були оброблені вільним абразивом, можна дійти висновку що під час формування зразків композита з рівнем ущільнення, близьким до 100%, контроль процесів спікання та обробки зразків має бути більш ретельним в порівнянні з композитами, в яких рівень ущільнення є меншим за 97%, оскільки присутність навіть малих кількостей неконтрольованих домішок та надлишкова графітизація чи утворення нових фаз між частинками алмазного порошку можуть призводити до руйнування частинок, або ж зразка в цілому, навіть на етапі підготовки зразків, на кшталт обробки вільним абразивом.

Після обточки та шліфування зразків було проведено вимірювання твердості за Віккерсом. Під час проведення вимірювань діаметр відбитка індентора не перевищував 14,5 мкм, що є значно меншим за середній розмір зерен композита (рис. 2), з яких складається його «каркас». Відтак, зіставляючи діаметр відбитка та розміри частинок, можна дійти висновку, що результати вимірювання твердості зразків в даному дослідженні вказують саме на твердість індивідуальних алмазних монокристалів, які складають композит, а не на інтегральну твердість всього зразка. Відтак, вимірювання показали, що твердість локальних зерен у складі зразків алмазного композита становить 87–100 ГПа [12], що є близьким до твердості монокристалів алмазу (92 ГПа) [13].

З рис. 2 легко бачити, що найбільших пошкоджень зазнали частинки зразка № 4, контури яких ледь можна розрізнити на зображенні його структури. Зразки № 2 та № 3 зазнали подібних між собою пошкоджень з подекуди розтрісканими зернами алмазу. Найменших пошкоджень зазнав зразок № 1, в якому під час перегляду структури в полі зору видно лише 1 або декілька розтрісканих по контуру алмазних зерен. Ступінь пошкодження алмазних частинок варто брати до уваги під час оцінки зносостійкості алмазних композитів, оскільки вже утворені до випробувань тріщини значно знижують здатність матеріалу чинити опір абразивному зношуванню під час випробувань.

Подальші випробування зносостійкості, а саме точіння гранітового керна, показали, що зразок № 1, який зазнав менших за все пошкоджень, очікувано, краще всього чинив опір абразивному руйнуванню, зразки № 2 та № 3 зносились сильніше в порівнянні з першим зразком, а зразок № 4, який зазнав більше всього пошкоджень, зруйнувався в процесі випробувань. Загальний вигляд зразків після випробувань показано на рис. 3.



Рис. 3. Зображення зразків № 1 (а), № 2 (б) та № 3 (в) після проходження випробувань зносостійкості

Під час випробувань кожен з трьох зразків охолоджувався водою, та сточив 0,85 м гранітового керна. Після закінчення процесу точіння зразки було очищено від граніту, що покрив поверхню зразків, втім, не вдалося вичистити весь наявний

граніт, оскільки деяка його частка закріпилась в порах та тріщинах зразків, тому можна припустити, що зразки № 2 та № 3 з більшою кількістю тріщин можуть мати дещо завищені значення зносостійкості, оскільки більша кількість граніту може знаходитись в їхніх порах, збільшуючи масу та впливаючи на розрахунки. Візуальне порівняння площадок зношування робочої кромки зразків композита зображено на рис. 4.

Окрім візуального порівняння, з деякою похибкою, спричиненою надлишковою масою через присутність граніту, зносостійкість I зразків можна розрахувати за наведеною формулою.

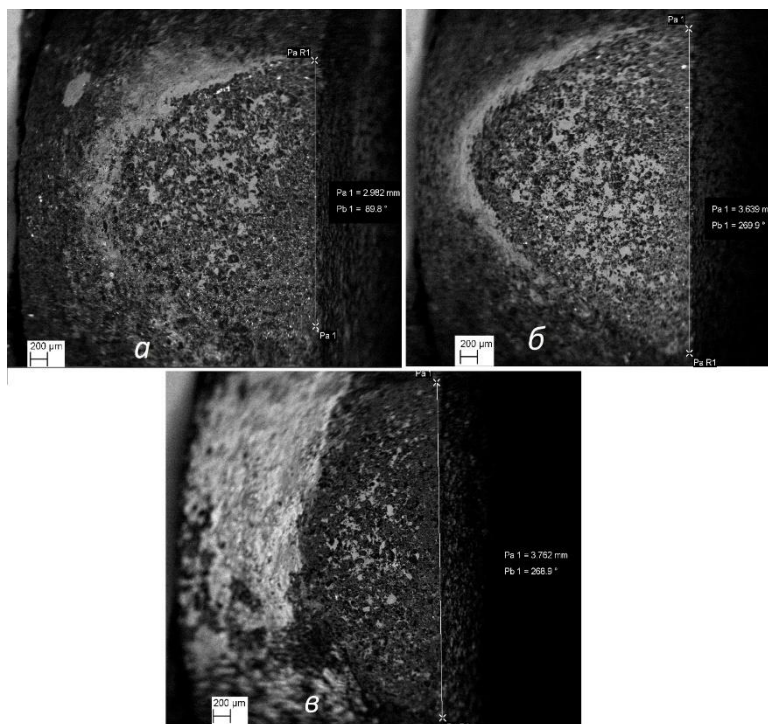


Рис. 4. Зображення площадок зношування робочої кромки зразків № 1 (а), № 2 (б) та № 3 (в)

У відповідності з розрахунками маємо значення зносостійкості: зразок № 1 (алмаз системи росту Ni-Mn-C) – $I = 1,6 \times 10^{-4}$ г/см³; зразки з алмазу системи росту Mg-Zn-C № 2 – $I = 4,2 \times 10^{-4}$ г/см³ та № 3 – $I = 6,0 \times 10^{-4}$ г/см³, відповідно. Щодо зразка № 3 варто зазначити, що з усіх трьох зразків в його об'ємі знаходиться більше всього граніту, тож реальні значення зносостійкості можуть дещо відрізнятись від обчислених.

Зразок № 1 отримано з алмазу системи росту, що містить метали групи заліза, та зразки № 2 і № 3, отримано з алмазу системи росту, що цих металів не містить. Зважаючи на те, що значення зносостійкості всіх трьох зразків є одного порядку та процес випробувань супроводжувався охолодженням водою з водогону, можна припустити, що навіть за наявних сильніших руйнувань у зразків з алмазу системи Mg-Zn-C, порівняно зі зразком з найменшим ступенем руйнувань (алмаз системи Ni-Mn-C), абразивне зношування цих трьох зразків може бути набагато подібнішим за умов відсутності охолоджувальної рідини, оскільки нікель, що залишився всередині пор частинок зразка № 1 є каталізатором зворотної перекристалізації алмазу=>графіт за атмосферного тиску під час нагрівання, спричиненого точінням гранітового керна.

Порівнюючи отримані зразки композита з дослідженням [11], в якому були сформовані алмазні композити з порошку алмазу системи Ni-Mn-C, а саме порошку марки AC 160 400/315 без покриття, з магнетронним покриттям вольфраму та титану, видно, що навіть в порівнянні з доволі пошкодженими зразками № 2 та № 3, зразки без покриття мають меншу зносостійкість, а саме $I = 7,9 \times 10^{-4}$ г/см³. Втім, в порівнянні зі зразками з вольфрамовим покриттям, величини зносостійкості мають близькі значення, а саме – $I = 4,0 \times 10^{-4}$ г/см³ (W) та $I = 2,9 \times 10^{-4}$ г/см³ (Ti), що вказує на те, що навіть дещо зруйновані алмазні композити, сформовані з порошків алмазу системи Mg-Zn-C, вкритих титаном, можуть бути дієспроможними елементами бурового інструменту.

Висновки

Результати вимірювання твердості зразків вказують на твердість індивідуальних алмазних монокристалів, які складають композит, а не на інтегральну твердість всього зразка.

Твердість локальних зерен у складі зразків алмазного композита становить 87–100 ГПа, що є близьким до твердості монокристалів алмазу.

Нанесення титанового покриття на кристали алмазу, одержаними перекристалізацією графіту як в системі Mg–Zn–C, так і в системі Ni–Mn–C, збільшує зносостійкість полікристалічних алмазних композитів, сформованих з них за високого тиску і високої температури.

З огляду на отримані результати за умов належного рівня контролю домішок використання зразків алмазного композита, спечених з порошків алмазу системи росту Mg–Zn–C, є доцільним для оснащення дослідної партії різців і проведення їхніх випробувань в виробничих умовах буріння, оскільки вони мають подібні, а за певних умов (наприклад, локального бракування охолоджувальної рідини) можуть мати кращі механічні властивості в порівнянні з традиційними алмазними полікристалами.

V. Venikov, O. Bochechka, D. Korostyshevskyi, Y. Melniichuk, O. Chernienko, T. Kuryliak,
V. Bilorusets, A. Liantseva, A. Fylypovych

V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

WEAR RESISTANCE OF HIGH-PRESSURE SINTERED COMPOSITES FROM TITANIUM-COATED DIAMOND POWDER

Samples of the composite «diamond – titanium carbide» were obtained by high-pressure sintering of diamond powders synthesized in the Mg–Zn–C and Ni–Mn–C systems, with a titanium coating of diamond grains. The wear resistance of the obtained samples was studied by turning them into a cylindrical core of granite from the Korostyshiv deposit of the X drillability category. It was shown that applying a coating to the surface of diamond powder particles increases the wear resistance of the composite samples obtained from them in comparison with samples obtained from uncoated diamond powders.

Key words: *granite core turning, wear resistance, hardness, diamond powders, high pressure, sintering, diamond-titanium carbide composite.*

Література

1. Pope B. J., Horton M. D., Hall H. T. Megadiamond, a new superhard material. *Congress American Association Technical Diamond*. Collection of scientific papers. Issue 1. Scotdail, Arisona. 1972. P. 390–401.
2. Comprim de diamante avec procede de fabrication: brevet 2043350 France: B 24 D 3.00; N 7013508; déclaré 15.04.1970; publié 12.02.1971.
3. An abrasive article: European patent 0116403: B24 D 3/4, C 09 K 3/14; N 84300117; fill. 09.01.1984; publ. 22.08.1984.
4. Brookes E. J., Harris T. K., Al-Watban A. The determination of the static flow stress of polycrystalline diamond – SYNDAX3. *Industrial Diamond Review*. 1997. N 2. P. 51–55.
5. Воронін Г. О., Осіпов О. С., Шульженко О. О. Композит на основі алмазу та карбиду кремнію, призначений для оснащення бурового інструменту. *Мінералогічний журнал*. 1995. № 6. С. 90–95.
6. Спосіб одержання композиційного матеріалу на основі алмазу: пат. 34174 А Україна: С22С26/00; № 99063216; заявл. 10.06.1999; опубл. 15.02.2001, бюл. № 1. 3 с.
7. Chen Z., Ma D., Wang S., Dai W., Zhu P., Zhu Y., Liu B. Wear resistance and thermal stability enhancement of PDC sintered with Ti-coated diamond and cBN. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020. V. 92. P. 105278–105283.
8. Осіпов О. С., Биков О. І., Стратійчук Д. А., Мельнійчук Ю. О., Петруша І. А. Особливості структури композиту, отриманого в системі алмаз–TiNi₃ шляхом термобаричного спікання. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. праць. Вип. 24. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2021. С. 271–277.

9. Чернієнко О. І., Веніков В. О., Лямцева А. О., Филипович А. Г., Бочечка О. О. Ущільнення алмазних порошків з титановим покриттям під дією високого тиску за кімнатної температури. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. праць. Вип. 25. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2022. С. 209–213.
10. Бочечка О. О., Чернієнко О. І., Куриляк Т. О., Филипович А. Г., Веніков В. О., Лямцева А. О. Ущільнення за високого тиску і високої температури алмазного порошку з титановим покриттям. *Інструментальне матеріалознавство*. Зб. наук. праць. Вип. 26. Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2023. С. 141–146.
11. Бочечка О. О., Куш О. В., Ісонкін О. М., Петасюк Г. А., Чернієнко О. І., Осіпов О. С., Гаврилова В. С., Боримський О. І., Румянцева Ю. Ю. Вплив зернового складу порошку алмазу, синтезованого в системі Mg-Zn-C, на структуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості полікристалів, спечених з ним за високого тиску. *Надтверді матеріали*. 2023. № 5. С. 21–35.
12. Vieniakov V. O., Bochechka O. O., Chernienko O. I., Osipov O. S., Bilorusets V. V., Liantseva A. O., Melniychuk Y. O. (). Effect of Titanium Coating Modification of Diamond Powder Grains on the Formation of a Polycrystalline Composite under High Pressure and High Temperature. *Journal of Superhard Materials*. 2025. V. 47, N 3. P. 193–197.
13. Xu B., Tian Y. Ultrahardness: measurement and enhancement. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015. V. 119. N 10. P. 5633–5638.

Надійшла 6.11.25

References

1. Pope, B. J., Horton, M. D., & Hall, H. T. (1972). Megadiamond, a new superhard material. *Congress American Association Technical Diamond*. (Issue 1. P. 390–401). Scotdail, Arisona.
2. Hall, H. T. (1971). Brevet français 2043350. B 24 D 3.00. *Comprim de diamante avec procede de fabrication* (Brevet français 2043350).
3. Phaal, C., Pipkin, N. J., & Burnand, R. P. (1984) European patent 0116403. B24 D 3/4. *An abrasive article* (European patent 0116403)
4. Brookes, E. J., Harris, T. K., & Al-Watban, A. (1997). The determination of the static flow stress of polycrystalline diamond – SYNDAX3. *Industrial Diamond Review*, (2), 51–55.
5. Voronin, G. O., Osipjv, O. S., & Shulzhenko, O. O. (1995). Kompozyt na osnovi almazu ta karbidu kremniuu, pryznachenyi dlia osnashchennia burovoho instrument [Composite based on diamond and silicon carbide, intended for equipping drilling tools]. *Mineralohichnyi zhurnal – Mineralogical magazine*, (6), 90–95 [in Ukrainian].
6. Novikov, M. V., Shulzhenko, O. O., Harhin, V. H., & Bochechka, O. O. (1999). Patent of Ukraine N 34174. C22C26/00. *Sposib oderzhannia kompozytsiuiinoho material na osnovi almazu [The method of obtaining a composite material based on diamond]* (Patent Ukrayny N 34174).
7. Chen Z., Ma D., Wang S., at. al. (2020). Wear resistance and thermal stability enhancement of PDC sintered with Ti-coated diamond and cBN. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 92, 105278–105283.
8. Osipov, O. S., Bykov, O. I., Stratiichuk, D. A., at. al. (2021). Osoblyvosti struktury kompozytu, orymanoho v systemi almaz-TiNi₃ shliakhom termobarychnoho spikannia [Features of the structure of the composite obtained in the diamond-TiNi₃ system by thermobaric sintering]. *Instrumentalne materialoznavsyyvo – Tooling materials science*. (24nd Issue, p. 271–277). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrayny [in Ukrainian].

9. Chernienko, O. I., Venikov, V. O., Liantseva, A. O. et al. (2022). Ushchilnenniaalmaznykh poroshkiv z tytanovym pokryttiam pid diieiu vysokoho tysku za kimnatnoi temperatury [Compaction of diamond powders with titanium coating under the action of high pressure at room temperature.] *Instrumentalne materialoznavsyvo – Tooling Materials Science*. (25nd Issue, p. 209–213). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
10. Bochechka, O. O., Chernienko, O. I., Kuryliak, T. O. et al. (2023). Ushchilnennia za vysokoho tysku i vysokoi temperatury almaznoho poroshku z tytanovym pokryttiam [High pressure and high temperature compaction of diamond powder with titanium coating]. *Instrumentalne materialoznavsyvo – Tooling Materials Science*. (26nd Issue, p. 141–146). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
11. Bochechka, O. O., Kushch, O. V., Isonkin, O. M. et al. (2023). Effect of the Granular Composition of Diamond Powder Synthesized in the Mg–Zn–C System on the Structure, Physicomechanical Properties, and Performance Characteristics of Crystals Sintered from It under High Pressure. *Journal of Superhard Materials*. (45), 336–347.
12. Vienikov, V. O., Bochechka, O. O., Chernienko, O. I. et al. (2025). Effect of Titanium Coating Modification of Diamond Powder Grains on the Formation of a Polycrystalline Composite under High Pressure and High Temperature. *Journal of Superhard Materials*, 47(3), 193–197.
13. Xu, B., & Tian, Y. (2015). Ultrahardness: measurement and enhancement. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119, 5633–5638.

УДК 536.421.1:620.187:661.057.5

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-274-290

І. А. Петруша¹, д-р техн. наук; **О. С. Осіпов¹**, **Ю. О. Мельнічук¹**, **О. І. Боримський¹**,
Т. І. Смірнова¹, кандидати технічних наук; **В. М. Ткач¹**, д-р фіз.-мат. наук;
Н. М. Білявіна², канд. фіз.-мат. наук

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,
04074, м. Київ, Україна, e-mail: dialab@ism.kiev.ua

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, пр. Академіка Глушкова, 4,
03127, м. Київ, Україна, e-mail: nbelyavina@bigmir.net

ЕВОЛЮЦІЯ КЛАСТЕРА ПРОСОЧЕННЯ В ПОРОШКУ КУБІЧНОГО BN ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ ПРИ НАГРІВАННІ

Досліджено еволюцію кластера просочення (КП) в стиснутому до 7,7 ГПа порошку cBN фракції KM 10/7 (мкм) в процесі поступового підвищення температури від кімнатної до 2250 °С. Термобаричні умови створювали в апаратах високого тиску тороїдального типу АВТ/Т-30 і АВТ/Т-20. Характер просочення (перколяції, інфільтрації) рідини в стиснуту порошкову масу cBN з зовнішнього джерела вивчали як для розплаву Si, так і розплавів кольорових металів, таких як Al, Ag, Cu, Au і Ni (інфільтранти). Максимальну температуру в еволюційному процесі змін КП ототожнювали з точкою плавлення речовини, яка заповнює об'єм перколяційного кластера. Обговорено ряд аспектів формування структури композитів за типом «зерен і прошарків» Купса: проблема сумішей, інвазійна перколяція та рафінування, «отруєння» інфільтранта.

Ключові слова: кубічний нітрид бору (cBN), алмаз, високий тиск і температура, перколяційний кластер, інфільтрація розплаву, консолідація структури, композит