

**О. О. Бочечка**, д-р техн. наук; **О. І. Чернієнко**, канд. техн. наук;  
**О. В. Куш**, асп.; **Л. О. Романко**, **В. С. Гаврилова**, кандидати технічних наук;  
**Д. В. Соколюк**, інж., **В. О. Веніков**, асп.

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

## **ВПЛИВ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ ЧАСТИНОК АЛМАЗНОГО НАНОПОРОШКУ ЗВ'ЯЗКАМИ C–W НА СПІКАННЯ ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ НАНОКОМПЗИТУ АЛМАЗ – КАРБІД ВОЛЬФРАМУ**

*Досліджено вплив модифікації поверхні частинок алмазного нанопорошку зв'язками C–W на спікання в апараті високого тиску «Тороїд 20» наноккомпозиту алмаз – карбід вольфраму з суміші з триоксидом вольфраму алмазного нанопорошку статичного синтезу АСМ5 0,1/0. Підготовка до спікання полягала в очищенні алмазного нанопорошку від залишків металу-розчинника та неалмазного вуглецю, формуванні суміші, проведенні її нагрівання в вакуумі для формування зв'язків C–W з подальшим відпалом в атмосфері водню, пресуванні компактів та їхньому відпалі в вакуумі перед спіканням. Показано, що відбувається інтенсифікація спікання – ступінь ущільнення алмазного нанопорошку збільшується внаслідок модифікування поверхні зв'язками карбон–вольфрам в поєднанні з дегазацією перед спіканням та реакційною взаємодією алмазу з вольфрамом.*

**Ключові слова:** алмазний нанопорошок, триоксид вольфраму, функціональні групи, високий тиск, спікання, наноккомпозит алмаз – карбід вольфраму, твердість

### **Вступ**

Вивченню процесу спікання алмазних порошків під дією високого тиску і високої температури присвячено ряд робіт. Загально визнаною є точка зору, відповідно до якої основну роль у процесі ущільнення алмазних порошків в зазначених умовах грає пластична деформація алмазних частинок [1–3]. Так, в роботі [2] кінетику ущільнення вивчено за температури 1600 °С в інтервалі 3–30 с. З отриманих експериментальних даних у відповідності з рівнянням Маккензі – Шаттлворса [4] визначено ефективну величину в'язкості. Порівняння отриманої величини з розрахованою за Френкелем для дифузії вакансій в алмазі дало підставу зробити висновок про те, що вклад дифузійних процесів в перенесення речовини під час спікання алмазних порошків в цих умовах незначний. Вивчення структури алмазних полікристалів підтвердило цей висновок [3]. Було показано, що під дією тиску біля 8 ГПа і температури 1400–1800 °С на алмазні порошки пластична деформація здійснюється переважно шляхом генерування та ковзання дислокацій в зоні контакту зерен, а також утворення двійників, що перетинаються.

Однак, у зазначених роботах початковому періоду ущільнення (5–7 с після включення нагрівання), як правило, не надається особливого значення. У той же час основна усадка (пористість зменшується від 20 до 6%) відбувається саме в цей проміжок часу [5]. На підставі експериментальних даних зі спікання алмазного порошку за тиску 8 ГПа і температури 1550 °С в роботі [5] виділено два етапи усадки і показано, що вони обумовлені двома різними механізмами ущільнення – взаємне проковзування і зміна форми частинок, пов'язана з розвитком процесів пластичної деформації, що призводять до суттєвої деформації ґратки алмазу на першому етапі і релаксаційними відновлювальними процесами, що спричиняють зниження рівня внутрішніх напружень в зернах полікристалу, на другому.

В даній роботі описано вплив модифікації поверхні частинок алмазного нанопорошку зв'язками C–W взаємодією з триоксидом вольфраму в газовій фазі та параметрів спікання за

високого тиску на процес ущільнення та фізико-механічні властивості нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму.

#### **Методика експерименту**

Підготовка до спікання суміші з триоксидом вольфраму алмазного нанопорошку статичного синтезу АСМ5 0,1/0 полягала в його очищенні від залишків металу-розчинника та неалмазного вуглецю. Вміст триоксиду вольфраму в суміші складав 30 % (мас.). Вказану величину було обрано на основі досвіду одержання нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму» без проведення модифікації поверхні алмазних частинок зв'язками С–W [6]. Проведено нагрівання сумішей упродовж 20 хв. за температури 600 °С в вакуумі з подальшим відпалом в атмосфері водню за температури 700 °С упродовж 10 хв. Дослідження поглинання одержаних зразків сумішей в ІЧ – області показало наявність зв'язків С–W на поверхні наночастинок алмазу (пік 1220 см<sup>-1</sup>). В ІЧ – спектрах поверхні частинок алмазних нанопорошків інтенсивність піків, які свідчать про наявність оксигенвмісних груп ОН і С–О–С, дещо перевищує рівень шумів. Більш високий рівень мають піки, які відповідають групам СООН [7].

В умовах високого тиску досліджено кінетику спікання та температурні залежності ущільнення підготовлених сумішей.

Перед спіканням за кімнатної температури з досліджуваної суміші пресували компакти, потім їх нагрівали упродовж 10 хв. при 700 °С в вакуумі. Спікання було проведено в апараті високого тиску типу тороїд з діаметром центрального заглиблення 20 мм. Силу струму нагрівання і напругу, що подається на нагрівач, фіксували за допомогою системи оцифрування сигналу і записували на персональному комп'ютері. Температуру оцінювали за визначеним експериментально співвідношенням між споживаною електричною потужністю і ЕРС термопарі Pt6%Rh-Pt30%Rh. Тиск було визначено за кімнатної температури за відомим фазовим перетворенням в Ві. У центральну частину комірки високого тиску поміщали відпалені компакти, потім створювали тиск 8,0 ГПа, нагрівали до необхідної температури, витримували задану тривалість спікання, охолоджували до кімнатної температури і знімали тиск [8].

Після спікання отримані зразки були очищені від графіту і методом гідростатичного зважування у воді визначена їхня густина [9]. Довірчий інтервал визначення густини за надійності 95% становив 0,01 г/см<sup>3</sup>, температуру витримували з точністю ± 50 °С.

Твердість зразків полікристалів визначали методом індентування за навантаження на індентор Кнупа 9,8 Н.

#### **Результати дослідження та їх обговорення**

Під дією високого тиску за кімнатної температури процес ущільнення порошків алмазу здійснюється як за рахунок взаємного переміщення порошинок, так і внаслідок деформації і викликаного нею руйнування частинок. Про це свідчать результати вивчення розподілу частинок за розмірами до і після впливу тиску 8 ГПа на порошок АСМ 40/28 [5]. Згідно з даною роботою, для вказаного порошку на цій стадії ущільнення на одну третину здійснюється за рахунок взаємного переміщення частинок, а на 2/3 – за рахунок їх дроблення. Проте із зменшенням розміру частинок порошку кількість зруйнованих внаслідок дії високого тиску монокристалів алмазу зменшується [10], а для порошків з розміром частинок менше 2 мкм практично припиняється, тому ущільнення під дією високого тиску за кімнатної температури відбувається за рахунок взаємного переміщення частинок. Це викликає збільшення пористості отриманих брикетів у порівнянні з брикетами, сформованими з мікропорошків алмазу зернистості 40/28.

Слід підкреслити, що, як зазначено в монографії [11], ковзання частинок одна відносно одної вимагає не тільки деякої зміни форми порошинок, що переміщуються, але і подолання різних стопорів (горбки, елементи шорсткості), розташованих на поверхнях, уздовж яких має здійснюватися ковзання контактуючих порошинок. Модифікування поверхні частинок,

очевидно, змінює умови проковзування частинок, а отже, впливає як на кінетику ущільнення, так і на його ступінь.

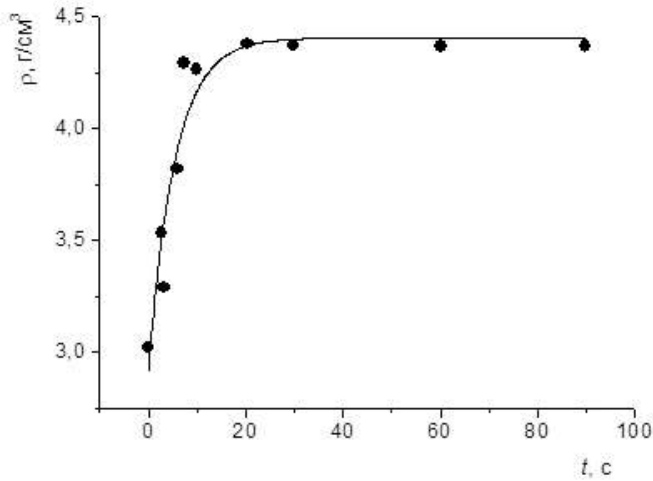


Рис. 1. Залежність від тривалості спікання густини зразків нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за тиску 8 ГПа та температури 1650 °С із суміші з триоксидом вольфраму нанопорошку статичного синтезу

За початкового тиску 8 ГПа та температури 1650 °С вивчено кінетику ущільнення суміші з триоксидом вольфраму алмазного нанопорошку статичного синтезу АСМ5 0,1/0 (рис. 1).

Кінетику усадки вказаної суміші за наведених параметрів ілюструє залежність від тривалості спікання пористості отриманих композитів.

Якщо величина вмісту за масою оксиду вольфраму  $WO_3$  у вихідній суміші масою  $m$  складала  $C$ , а маса, відповідно,  $Cm$ , і внаслідок відпалу у водні відбулась реакція  $WO_3 + 3H_2 = W + 3H_2O$ , то, виходячи із співвідношення між молекулярними масами  $WO_3$  і  $W$ , одержимо, що маса вольфраму

становитиме  $m_W = \frac{133,8}{181,8} Cm$ .

Внаслідок взаємодії алмазу і вольфраму під час спікання утворюється карбід вольфраму, маса якого складає  $m_{WC} = \frac{145,8}{133,8} m_W = \frac{145,8}{181,8} Cm$ . Маса спеченого композиту дорівнює сумі мас алмазу і карбіду вольфраму:

$$m_k = m(1-C) + \frac{145,8}{181,8} Cm \approx m(1-C) + 0,802Cm = m(1-0,198C). \text{ Звідси випливає:}$$

$$C_{WC} = \frac{m_{WC}}{m_k} \approx \frac{0,802C}{1-0,198C} \quad (1)$$

Для оцінки пористості зразків спечених композитів  $\theta$  на основі експериментальних значень їхньої густини  $\rho_k$  будемо вважати, що в процесі спікання відбувається утворення карбіду вольфраму  $WC$ , вміст оксиду вольфраму в композиті незначний. Виходячи з того, що об'єм зразка композиту являє собою суму об'ємів монокристалічних частинок алмазу, карбіду вольфраму  $WC$  та об'єму пор, а маса – суму мас алмазу та карбіду вольфраму, для пористості композиту одержимо:

$$\theta = 1 - (1 - C_{WC}) \frac{\rho_k}{\rho_a} - C_{WC} \frac{\rho_k}{\rho_{WC}} \quad (2)$$

де  $C_{WC}$  – масовий вміст  $WC$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_{WC}$  – густини монокристала алмазу та карбіду вольфраму, відповідно.

У разі відсутності пористості ( $\theta = 0$ ) густина композиту залежить тільки від вмісту компонент. З формули (2) випливає:

$$\rho_k = \frac{\rho_a \rho_{WC}}{\rho_{WC}(1-C_{WC}) + C_{WC} \rho_a} \quad (3)$$

В табл. 1 наведено значення величин, які входять до формул (2) і (3).

Таблиця 1. Значення величин для розрахунку пористості зразків спечених композитів на основі експериментальних значень їхньої густини

Величина	Розмірність	Значення	Джерело інформації
$C$	відн. од.	0,30	експеримент
$C_{WC}$	відн. од.	0,25579	формула (1)
$\rho_a$ (статичний синтез)	г/см <sup>3</sup>	3,511	[12]
$\rho_{WC}$	г/см <sup>3</sup>	15,63	[13]

Залежність пористості від тривалості спікання зразків композиту «алмаз – карбід вольфраму» показано на рис. 2.

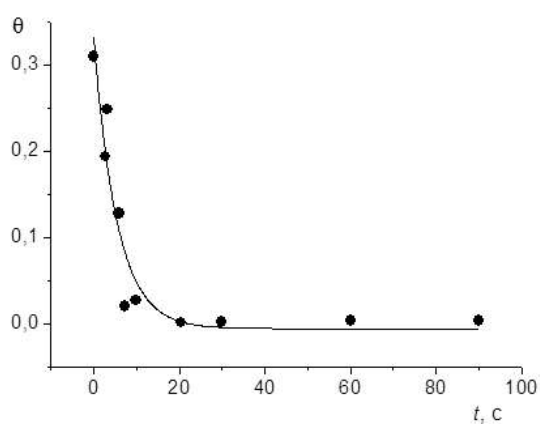


Рис. 2. Залежність від тривалості спікання пористості зразків нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за тиску 8 ГПа та температури 1650 °С із суміші з триоксидом вольфраму нанопорошку статичного синтезу

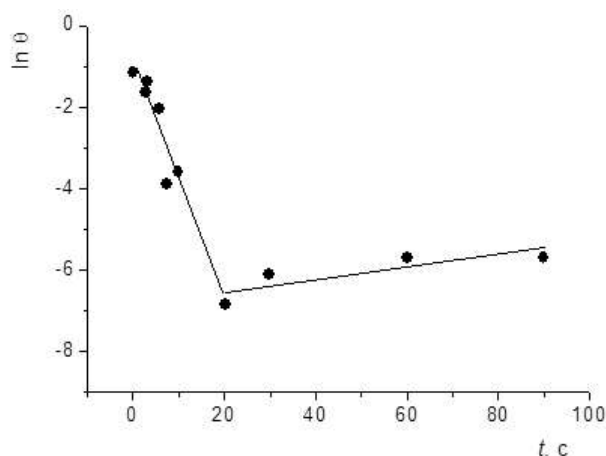


Рис. 3. Залежність від тривалості спікання логарифма пористості зразків нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за тиску 8 ГПа та температури 1650 °С із суміші з триоксидом вольфраму нанопорошку статичного синтезу

Як видно з рис. 1, ущільнення суміші відбувається переважно на першому етапі – упродовж 20 с. На другому етапі, упродовж наступних 70 с, в межах похибки експерименту пористість практично не змінюється.

Більш наглядно зміну пористості демонструють залежності логарифма пористості від тривалості спікання (рис. 3).

Як видно з рис. 3, на обох етапах отримані залежності пористості  $\theta$  від тривалості спікання  $t$  описуються рівнянням виду

$$\theta = \theta_0 \exp(-k t), \quad (4)$$

де  $\theta_0$  – початкова пористість,  $k$  – постійний коефіцієнт. Значення вказаних коефіцієнтів наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів в рівнянні (4)

$\theta_0$		$k, c^{-1}$	
Етап 1	Етап 2	Етап 1	Етап 2
0,310	0,0011	0,294	$-14,34 \cdot 10^{-3}$

В [11] зазначено, що під час усадки компактів під впливом ефективного всебічного стиску можна виділити 2 граничні ситуації перенесення речовини: 1) незагальмоване ковзання уздовж меж порошинок; 2) зміна об'єму пор за рахунок зміни форми порошинок. При цьому швидкість усадки в ситуації 1 більше ніж на порядок перевищує цю величину в ситуації 2. У реальності усадка має змішаний характер, але, як правило, один із зазначених механізмів переважає. Так, під час усадки за рахунок ковзання гальмування порошинок відбувається внаслідок пластичного зім'яття горбків-стопорів [11].

Таким чином, можна припустити, що на першому етапі основним механізмом ущільнення є ковзання частинок під дією високого тиску, викликане зменшенням величини критичного напруження зсуву під час нагрівання і пов'язане зі зміною форми частинок, зім'яттям горбків-стопорів [11]. На другому етапі спікання, як уже зазначалось, пористість в обох сумішах практично не зменшується, більше того, навіть відбувається деяке зменшення густини отриманих зразків композиту «алмаз – карбід вольфраму». Найбільш вагомими причинами цього є зменшення тиску в робочому об'ємі за рахунок фазових перетворень в матеріалах деталей контейнера комірки високого тиску і їхньої усадки [14] та взаємодія з оксигенвмісними сполуками, які присутні як в об'ємі пор [8], так і на поверхні алмазних наночастинок навіть після модифікації їхньої поверхні [7].

Як видно із рис. 2, пористість композиту, спеченого із нанопорошку алмазу статичного синтезу, близька до нуля. Відповідно до формули (3) густина композиту, в якому відсутня пористість, тобто всі проміжки між частинками алмазу заповнені карбідом вольфраму, становить  $4,3796 \text{ г/см}^3$ . Враховуючи точність визначення густини ( $\pm 0,01$ ), можна стверджувати, що в зразках композиту, густина яких перевищує  $4,39 \text{ г/см}^3$ , або з'являються області, в яких відсутні контакти між зернами алмазу, або зерна карбиду вольфраму більші за зерна алмазу.

В інтервалі температур  $1500\text{--}1900 \text{ }^\circ\text{C}$  за тиску  $8 \text{ ГПа}$  та тривалості спікання  $20 \text{ с}$  проведено дослідження температурних залежностей густини зразків нанокompозиту алмаз – карбід вольфраму, спечених за тиску  $8 \text{ ГПа}$  з сумішшю із триоксидом вольфраму алмазного нанопорошку статичного синтезу АСМ5 0,1/0, модифікованого зв'язками С–W. Вміст триоксиду вольфраму у

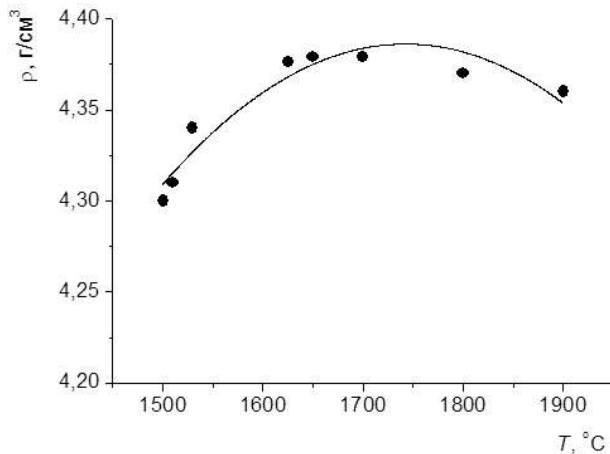


Рис. 4. Залежність від температури спікання густини зразків нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за тиску  $8 \text{ ГПа}$  та тривалості спікання  $20 \text{ с}$  із сумішшю алмазного нанопорошку статичного синтезу та триоксиду вольфраму

сумішах для спікання становив  $30 \%$  (мас.). Одержану залежність наведено на рис. 4.

Як видно з рис. 4, оптимальна температура спікання лежить в інтервалі  $1650\text{--}1750 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Щоб оцінити вплив модифікації поверхні наночастинок алмазного порошку на його ущільнення під дією високого тиску та високої температури, порівняємо ступінь ущільнення, за який приймемо відношення об'єму алмазної складової в композиті чи полікристалі до об'єму зразка  $V_a/V$ , для досліджених випадків спікання полікристалів і композитів на основі алмазних нанопорошків. Якщо маса композиту складає  $m$ , густина  $\rho_k$ , концентрація за масою неалмазної добавки  $C$ , то об'єм композиту

становить  $V = \frac{m}{\rho_k}$ , а об'єм алмазної складової, відповідно,  $V_a = \frac{(1-C)m}{\rho_a}$ . Звідси випливає:

$$\frac{V_a}{V} = (1 - C) \frac{\rho_k}{\rho_a} \quad (5)$$

На рис. 5 наведено залежності від температури ступеня ущільнення, обчисленого за формулою (5), спечених за початкового тиску 8 ГПа зразків композиту на основі модифікованого зв'язками С–W нанопорошку алмазу статичного синтезу, а також

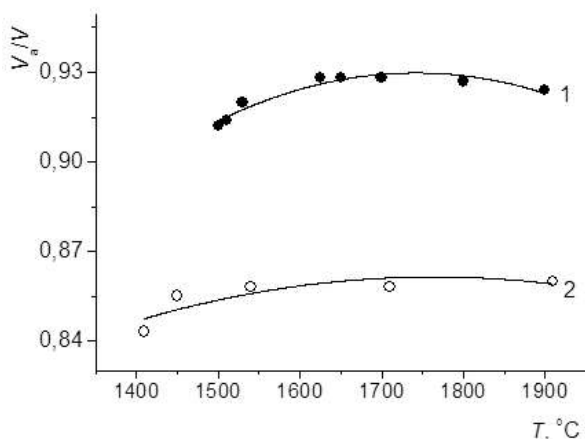


Рис. 5. Залежність від температури спікання ступеня ущільнення алмазної складової нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму» (1), спеченого з нанопорошку алмазу АСМ5 0,1/0, модифікованого зв'язками С–W, та полікристалу з цього ж порошку без проведення модифікації і дегазації (2); початковий тиск складає 8 ГПа, тривалість спікання – 20 с

полікристалу, спеченого з нанопорошку статичного синтезу без проведення модифікації та дегазації наночастинок алмазу [15].

Як видно з рис. 5, ступінь ущільнення алмазного нанопорошку внаслідок проведених операцій збільшується на 8 %. В підсумку можна зазначити, що проведена модифікація поверхні в поєднанні з дегазацією перед спіканням та спікання в поєднанні з реакційною взаємодією алмазу з вольфрамом інтенсифікують процес ущільнення алмазного нанопорошку статичного синтезу під дією високого тиску та високої температури.

Для відпрацювання технології одержання нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму» за визначених операцій та оптимальних параметрів обробки було проведено серію однотипних дослідів зі спікання композиту на основі алмазного нанопорошку статичного синтезу. Таким

чином, спочатку готували суміш алмазного нанопорошку статичного синтезу АСМ5 0,1/0 з вмістом триоксиду вольфраму 30 % (мас.) способом ультразвукового перемішування. Далі проводили відпал суміші в вакуумі упродовж 20 хв. за температури 600 °С. Для мінімізації кількості оксигенвмісних зв'язків ОН, С–О–С на поверхні частинок алмазу проводили подальший відпал суміші в атмосфері водню за температури 700 °С упродовж 10 хв. Далі одержану суміш було розділено на 2 частини. Одну частину в подальшому використовували для спікання, проводячи пресування з неї компактів з подальшим спорядженням комірки високого тиску. Для іншої частини суміші безпосередньо перед спіканням компакти, спресовані з неї, нагрівали упродовж 10 хв. при 700 °С в вакуумі для десорбції з поверхні алмазних частинок фізично адсорбованої води (групи СООН). Одразу після вилучення компактів з вакуумної печі їх поміщали в комірку високого тиску та здійснювали її механічну герметизацію шляхом запресовування пірофілітових і графітових дисків, між якими розміщувався компакт.

Спікання упродовж 20 с проводили в АВТ «Тороїд 20» за початкового тиску 8 ГПа та потужності струму нагрівання, яка має забезпечити оптимальну температуру 1650 °С. Слід зазначити, що особливістю роботи вказаного АВТ є те, що інтервал встановлення температури за заданою потужністю складає біля 100 °С – оскільки в процесі спікання змінюється провідність системи, яка залежить від багатьох факторів, в тому числі від точності виготовлення деталей комірки високого тиску, в першу чергу, нагрівальних елементів. В таблиці 3 наведено густину та твердість зразків композиту на основі нанопорошку статичного синтезу, спечених за температур, близьких до оптимальної.

Як видно з таблиці, за густиною одержані зразки досить близькі, проте ігнорування проведення десорбції газів, переважно адсорбованої води, знижує твердість зразків композиту в 2 рази (рис. 6).

Таблиця 3. Густина та твердість зразків композиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за температур, близьких до оптимальної, без проведення та з проведенням дегазації перед спіканням

№	Проведення дегазації перед спіканням	Температура спікання, °С	Густина, г/см <sup>3</sup>	Твердість, ГПа
1	–	1625	4,38	12
2	–	1625	4,38	16
3	–	1625	4,40	15
4	–	1700	4,37	15
5	–	1700	4,39	15
6	–	1650	4,39	15
7	–	1625	4,40	15
9	+	1700	4,37	31
10	+	1700	4,37	31
11	+	1725	4,37	32
12	+	1750	4,37	29

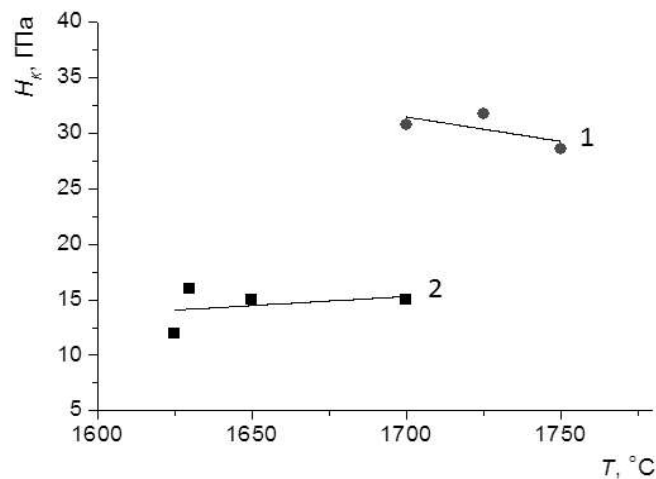


Рис. 6. Залежність від температури спікання твердості за Кнупом зразків нанокompозиту «алмаз – карбід вольфраму», спечених за тиску 8 ГПа та тривалості спікання 20 с із компактів, які перед спіканням були відпалені в вакуумі (1), та з компактів без відпалу (2)

### Висновки

1. Дослідження залежності від температури ступеня ущільнення спечених за початкового тиску 8 ГПа зразків композитів на основі нанопорошку алмазу статичного синтезу, а також полікристалу, спеченого з нанопорошку статичного синтезу без проведення

модифікації та дегазації наночастинок алмазу, показало, що ступінь ущільнення алмазного нанопорошку збільшується на 8 % внаслідок модифікування поверхні зв'язками карбон–вольфрам у поєднанні з дегазацією перед спіканням та реакційною взаємодією алмазу з вольфрамом. В підсумку можна зазначити, що проведена модифікація поверхні інтенсифікує процес ущільнення алмазного нанопорошку статичного синтезу під дією високого тиску та високої температури.

2. Встановлено, що пористість композиту, спеченого із нанопорошку алмазу статичного синтезу за тиску 8 ГПа, температури 1650 °С та тривалості спікання більше 20 с, близька до нуля. За розрахунками густина композиту, в якому відсутня пористість, тобто всі проміжки між частинками алмазу заповнені карбідом вольфраму, становить 4,3796 г/см<sup>3</sup>. Враховуючи точність визначення густини ( $\pm 0,01$ ), можна стверджувати, що в зразках композиту, густина яких перевищує 4,39 г/см<sup>3</sup>, з'являються області, в яких відсутні контакти між зернами алмазу.

3. Ігнорування проведення десорбції газів безпосередньо перед спіканням за рахунок нагрівання компактів упродовж 10 хв. при 700 °С в вакуумі знижує в 2 рази твердість зразків нанокompозиту, спеченого з алмазного нанопорошку, модифікованого зв'язками C–W.

**O. O. Bochechka, O. I. Chernienko, O. V. Kushch, L. O. Romanko,  
V. S. Havrylova, D. V. Sokoliuk, V. O. Venikov**

*V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS Ukraine*

#### **THE EFFECT OF MODIFICATION OF THE SURFACE OF DIAMOND NANOPOWDER PARTICLES WITH C–W BONDS ON THE HIGH-PRESSURE SINTERING OF A DIAMOND – TUNGSTEN CARBIDE NANOCOMPOSITE**

*The effect of modification of the surface of diamond nanopowder particles with C–W bonds on the sintering in the high-pressure apparatus «Toroid 20» of a diamond-tungsten carbide nanocomposite from a mixture of tungsten trioxide with statically synthesized diamond nanopowder ASM5 0.1/0 was studied. Preparation for sintering consisted in cleaning the diamond nanopowder from solvent metal and non-diamond carbon residues, forming the mixture, heating it in a vacuum to form C–W bonds with subsequent annealing in a hydrogen atmosphere, pressing the compacts and annealing them in a vacuum before sintering. It is shown that sintering intensifies – the degree of densification of diamond nanopowder increases as a result of surface modification with carbon–tungsten bonds in combination with degassing before sintering and the reactive interaction of diamond with tungsten.*

**Key words:** *diamond nanopowder, tungsten trioxide, functional groups, high pressure, sintering, diamond–tungsten carbide nanocomposite, hardness*

#### **Література**

1. Шульженко А. А., Гаргин В. Г. Свойства и структура алмазных поликристаллов, полученных при различных температурах спекания // Сверхтвердые материалы. – 1984. – № 2. – С. 26–30.
2. Федосеев Д. В., Соколина Г. А., Яковлев Е. Н. Пластическая деформация порошков алмаза при высоком давлении // ДАН СССР. – 1985. Т. 282, № 3. – С. 601–604.
3. Britun V.F., Oleynik G. S., Semenenko N. P. Deformation process during high-pressure sintering of the diamond powders produced by catalytic synthesis // J. Mater. Sci. – 1992. – Vol. 27, N 16. – P. 4472–4476.
4. Mackenzie J. K., Shuttleworth R. A phenomenological theory of sintering // Proc. Phys. Soc. B. – 1949. – Vol. 62, N 12. – P. 833–852.

5. Бочечка А. А. Формирование поликристаллов из алмазных микропорошков в условиях высоких давлений и температур // Сверхтвердые материалы. – 1999. – № 6. – С. 18–25.
6. Стахнив Н. Е., Девин Л. Н., Бочечка А. А. и др. Исследование влияния фазового состава режущих пластин из нанокompозита алмаз–карбид вольфрама на процесс чистового точения сплавов алюминия и латуни // Сверхтвердые материалы. – 2018. – № 3. – С. 56–66.
7. Чернієнко О.І., Куц О.В.; Гаращенко В.В. та ін. Модифікація нанорозмірних алмазних порошків взаємодією з триоксидом вольфраму в газовій фазі // Інструментальне матеріалознавство: зб. наук. пр. – Випуск 23. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2020. – С. 269–276.
8. Шульженко А.А., Гаргин В.Г., Шишкин В.А., Бочечка А.А. Поликристаллические материалы на основе алмаза / Отв. ред. Н.В. Новиков. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
9. Кивилис С.С. Плотномеры. – М: Энергия, 1980. – 280 с.
10. Бочечка А. А. Разрушение частиц алмазного порошка под воздействием высокого давления // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 5. – С. 9–14.
11. Гегузин Я. Е. Физика спекания. 2-е изд. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
12. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.
13. Справочник химика. Т.1. / Гл. ред. Б. Никольский. – Ленинград: Химия, 1963. – 1072 с.
14. Бочечка А. А., Гаргин В. Г. Оценка изменения величины давления при спекании алмазно-твердосплавных пластин в аппарате высокого давления типа "тороид" // Сверхтвердые материалы. – 1998. – № 3. – С. 31–39.
15. Бочечка А.А., Романко Л.А., Гаврилова В.С. и др. Особенности спекания алмазных порошков различной дисперсности в условиях высокого давления // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 1. – С. 24-31.

Надійшла 12.08.22

### References

1. Shulzhenko, A.A., & Gargin, V.G. (1984). Svoistva i strukturaalmaznykh polikristallov, poluchennykh pri razlichnykh temperaturakh spekaniia [Properties and structure of diamond polycrystals obtained at different sintering temperatures]. *Sverkhtverdye Materialy – Superhard Materials*, 2, 26–30 [in Russian].
2. Fedoseev, D. V., Sokolina, G. A., & Jakovlev, E. N. (1985). Plasticheskaia deformatsiia poroshkov almaza pri vysokom davlenii [Plastic deformation of diamond powders at high pressure]. *Doklady AN SSSR – Reports of the Academy of Sciences of the Soviet Union*, 282, 3, 601–604 [in Russian].
3. Britun, V.F., Oleynik, G. S., Semenenko, N. P. (1992). Deformation process during high-pressure sintering of the diamond powders produced by catalytic synthesis. *J. Mater. Sci.*, 27, 16, 4472–4476.
4. Mackenzie, J. K., Shuttleworth, R. (1949). A phenomenological theory of sintering. *Proc. Phys. Soc. B.*, 62, 12, 833–852.
5. Bochechka, A. A. (1999). Formation of polycrystals from diamond micron powders at high pressures and temperatures. *Sverkhtverdye Materialy – Journal of Superhard Materials*. 6, 18–24.
6. Stakhniv, N. E., Devin, L. N., Bochechka, A. A., et al. (2018). Issledovanie vliianiia fazovoho sostava rezhushchikh plastin iz nanokompозita almaz–karbid volframa na protsess chistovoho tocheniia splavov aliuminiia i latuni [Study of the influence of phase composition of cutting inserts made of diamond–tungsten carbide nanocomposite on the

- process of finish turning of aluminum alloys and brass]. *Sverkhtverdye Materialy – Journal of Superhard Materials*, 3, 56–66.
7. Chernienko, O. I., Kushch, O. V., Garashchenko V. V., et al. (2020). Modyfikatsiia nanorozmirnykhalmaznykh poroshkiv vzaiemodiieiu z tryoksydom volframu v hazovii fazi [Modification of nanosized diamond powders by interaction with tungsten trioxide in the gas phase]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling materials science*, 23, 269–276 [in Ukrainian].
  8. Shulzhenko, A. A., Gargin, V. H., Shishkin, V. A., & Bochechka, A. A. (1989). *Polikrystallicheskie materialy na osnove almaza [Diamond-based polycrystalline materials]*. N.V. Novikov (Ed.). Kiev: Naukova dumka [in Russian].
  9. Kivilis, S.S. (1980). *Plotnomye [Density meters]*. Moskow. Energiia [in Russian].
  10. Bochechka, A. A. (1983). Razrushenie chastits almaznogo poroshka pod vozdeistviem vysokogo davleniia [Destruction of diamond powder particles under high pressure]. *Sverkhtverdye Materialy – Superhard Materials*, 5, 9–14 [in Russian].
  11. Geguzin, Ja. E. (1984). *Fizika spekaniia [The physics of sintering]*. Moskow. Nauka [in Russian].
  12. Enokhovich, A.S. (1976). *Kratkii spravochnik po fizike [Concise reference book on physics]*. Moskow. Vysshiaia shkola [in Russian].
  13. Nikolskii, B. (Eds.) (1963). *Spravochnik khimika.T. 1 [Chemist's Handbook. Vol. 1]*. Leningrad: Khimiia [in Russian].
  14. Bochechka, A. A., & Gardin, V. G. (1998). Otsenka izmeneniia velichiny davleniia pri spekanii almazno-tverdospлавnykh plastin v apparate vysokoho davleniia tipa "toroid" [Evaluation of the change in pressure when sintering diamond-carbide cutting blanks in a toroid-type high-pressure apparatus]. *Sverkhtverdye Materialy – Journal of Superhard Materials*. 3, 31–39.
  15. Bochechka A. A., Romanko L. A., Gavrilova V. S., et al. (2007). Osobennosti spekaniiaalmaznykh poroshkov razlichnoi dispersnosti v usloviakh vysokoho davleniia [Special features of sintering diamond powders of various dispersions at high pressures]. *Sverkhtverdye Materialy – Journal of Superhard Materials*, 1, 24–31.

УДК 621.921.34.492.2:539.89:621.762.5

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-228-232

**А.О. Чумак, Д.Л. Коростишевський; Ю.О. Мельничук, О.М. Ісонкін,  
О.С. Осіпов<sup>1</sup>, О.І. Запорожець<sup>2</sup>**, кандидати технічних наук

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: [mega-osipov@ukr.net](mailto:mega-osipov@ukr.net)

<sup>2</sup>Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,  
б. Академіка Вернадського 36, 03143, м. Київ, e-mail: [zapus.ua@gmail.com](mailto:zapus.ua@gmail.com)

## **ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ АЛМАЗУ ПРИ ПЕРЕРИВЧАСТОМУ ТОЧІННІ ГРАНІТУ**

Розроблено методику визначення показника зносостійкості надтвердих матеріалів при переривчастому точінні граніту. Встановлено, що зносостійкість отриманого за умов високих тисків і температур композиційного матеріалу алмаз-Fe<sub>3</sub>C в 1,3 рази перевищує зносостійкість стандартних АТП, призначених для оснащення бурових доліт.

**Ключові слова:** алмаз, композит, точіння, знос, зносостійкість