

О. О. Бочечка, член-кор. НАН України; **Т. О. Куриляк**, **О. І. Чернієнко**,
кандидати техн. наук;
Д. С. Каменських, канд. хім. наук; **А. Г. Филипович**;
В. О. Веніков, **А. О. Лямцева**, аспіранти

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

ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМІ С–Ti–O ПІД ЧАС СПІКАННЯ ЗА ВИСОКОГО ТИСКУ АЛМАЗНОГО ПОРОШКУ З ТИТАНОВИМ ПОКРИТТЯМ ЗЕРЕН АЛМАЗУ

Розглянуто взаємодію між компонентами під час спікання за високого тиску алмазного порошку з титановим покриттям зерен алмазу. На основі розрахунків зміни вільної енергії Гіббса показано, що реакції кисню з титаном термодинамічно більш вигідні, ніж його реакція з алмазом. За тиску 8 ГПа титан залишається гетером для кисню до температури 3000 К, що зупиняє графітизацію алмазу через газову фазу. Показано, що процеси карбідоутворення під час спікання алмазного порошку за високого тиску відбуваються в разі нанесення титанового покриття на алмазні зерна.

Ключові слова: алмаз, титан, карбід титану, високий тиск, кисень.

Вступ

На сьогодні ефективна робота породоруйнівного та металообробного інструменту забезпечується застосуванням полікристалічних композиційних матеріалів на основі алмазу, відомих на світовому ринку як PCD (Polycrystalline Diamond), характерною особливістю яких є наявність жорсткого каркасу зі з'єднаних алмазних частинок.

Під час спікання алмазних мікропорошків без добавок утворюється, як правило, полікристал із низьким рівнем фізико-механічних властивостей. Тому спікання здійснюють у присутності металів групи заліза (переважно кобальту). Це дозволяє отримати композити з високими фізико-механічними властивостями, проте вони різко погіршуються при підвищенні температури – термостабільність таких композитів невисока.

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 їх карбідів як добавки до алмазних порошків для отримання полікристалічних алмазних матеріалів запропоновано ще в [1, 2]. Основна ідея полягала у зниженні крихкості матеріалів за рахунок введення більш пластичних порівняно з алмазом компонентів. Фізико-хімічну взаємодію між вказаними компонентами не досліджували. Однак саме взаємодія з алмазом приводить до формування структури утвореного композита та визначає рівень його фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

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, при взаємодії якого з кремнієм утворюється карбід кремнію, що заповнює пори між алмазними частинками.

В ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України вперше було встановлено принципову можливість реакційного спікання за високого тиску та температури алмазних нанопорошків як детонаційного, так і статичного синтезу з нанопорошком вольфраму [7]. В результаті взаємодії алмазу з вольфрамом у процесі спікання в порах між алмазними наночастинками утворюються

наночастинки карбіду вольфраму, хімічно пов'язані з алмазними, що посилює зв'язок між зернами отриманого композиту [8].

Продовжуються пошуки способів введення в структуру алмазного композиту тугоплавких карбідів, зокрема, карбіду титану для покращення зносостійкості та термостабільності полікристалічних алмазних композитів. Так, в [9] описано спікання за високого тиску алмазного порошку з титаном, нанесеним на поверхню алмазних зерен, в [10] 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 [11] 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 [12].

Проте як під час реакційного спікання алмазу з вольфрамом, так і під час спікання з кремнієм, титаном на формування композитів істотно впливає, причому негативно, взаємодія компонентів вихідної шихти з киснем. Кисень знаходиться в порах брикетів, що формуються з алмазних порошків в комірках високого тиску, а також як домішка входить в алмазні мікро- і нанопорошки (фізично сорбовані і хімічно зв'язані кисневмісні сполуки на поверхні алмазних частинок).

Розрахунок зміни вільної енергії Гіббса під час взаємодії алмазу з киснем, вольфрамом і кремнієм показав [13, 14], що і за нормального, і за високого тиску в системі $C_{алм}-Si-O$ реакції алмазу з киснем переважають його реакції з кремнієм, а в системі $C_{алм}-W-O$ термодинамічно вигідніше утворення карбіду вольфраму, чим окиснення алмазу.

В даній роботі проведено термодинамічний аналіз можливих реакцій між компонентами вихідних сумішей для отримання композиту алмаз – карбід титану між собою та з киснем, кисневмісними сполуками.

Методика розрахунку зміни вільної енергії Гіббса під час перебігу хімічних реакцій

Зміну вільної енергії Гіббса під час протікання хімічних реакцій розраховували відповідно до методики, викладеної в [15].

Значення ΔG обчислюють за даними про термодинамічні величини виходячи із співвідношення

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

де T – температура в К, ΔH , ΔS – зміна в результаті реакції відповідно ентальпії та ентропії системи.

Значення ентальпії та ентропії речовин, що беруть участь у реакції, в стандартному стані за атмосферного тиску наведено в [16]. Взяті з підручників з фізичної хімії формули для розрахунку ентальпії утворення речовини у стандартному стані, зміни ентальпії під час нагрівання речовини від температури стандартного стану до поточної, а також ентропії у стандартному стані та за поточної температури наведено в [13].

Зміну вільної енергії Гіббса, викликану зміною об'єму твердої фази за підвищення температури та тиску p , обчислювали за формулою [13]:

$$\Delta G_p = \frac{A}{\rho} [1 + 3\alpha'(T - T_0)] \left[p - p_0 - \frac{1}{2} \beta (p - p_0)^2 \right],$$

де A – маса одного моля; ρ – густина; α' – коефіцієнт теплового розширення; β – об'ємний коефіцієнт стисливості речовини T_0 , p_0 – температура та тиск за нормальних умов.

За умови виконання закону Менделєєва-Клапейрона зміна ΔG з підвищенням тиску для одного моля будь-якого газу визначається співвідношенням

$$\Delta G_p = \int_{p_0}^p V(p) dp = RT \int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = RT \ln \frac{p}{p_0}.$$

Таким чином, процедура обчислення ΔG зводиться до підрахунку різниці між сумарною вільною енергією Гіббса речовин у правій частині реакцій та аналогічною величиною у лівій частині. Необхідні довідкові дані наведено в [16–20].

Результати досліджень та їх обговорення

Під час дії високого тиску на алмазний порошок розподіл напруження по об'єму контактуючих частинок залежить від їхньої форми, розміру, фізико-механічних властивостей і взаємного розташування, площі контакту, зусилля стиснення, яке передається частинкою. Внаслідок цього під час спікання алмазних порошоків під дією високого тиску тиск у позаконтактній ділянці алмазної частинки може відповідати ділянці термодинамічної стабільності як графіту, так і алмазу. Як показано в [21], за дії високого тиску та температури на алмазні порошки розміром 0,2 мкм і менше тиск в алмазній фазі відповідає області термодинамічної стабільності алмазу. За умови збереження жорсткості алмазного каркасу тиск в утвореній в результаті графітизації графітій фазі відповідає області термодинамічної стабільності графіту, тобто реалізується ситуація, коли і алмаз, і графіт є термодинамічно стабільними фазами.

У порах алмазного брикету присутні гази, які входять до складу повітря. На поверхні алмазних частинок знаходяться функціональні групи, що містять кисень. За високої температури вони активно взаємодіють із алмазом, в результаті чого утворюється діоксид:



або монооксид вуглецю

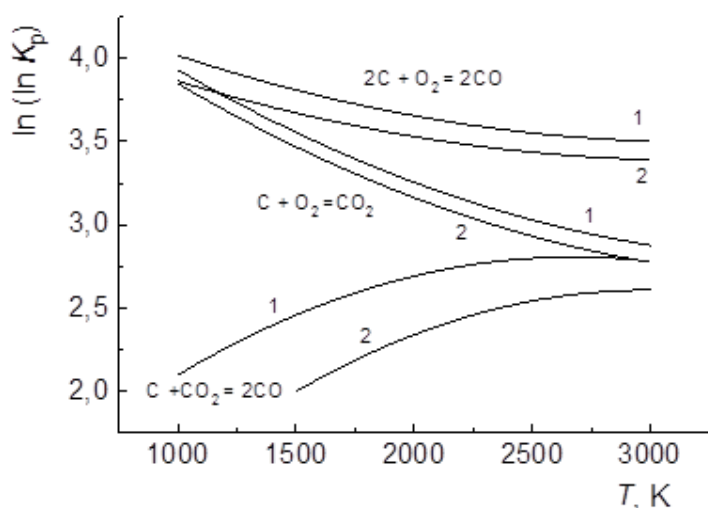


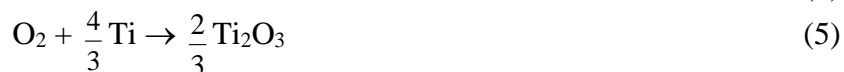
Рис. 1. Залежності від температури констант рівноваги реакцій у системі C – O: 1 – алмаз за тиску 8 ГПа; 2 – графіт за атмосферного тиску [14]

Результати розрахунку констант рівноваги реакцій у системі карбон – кисень за умов, притаманних спіканню алмазних порошоків [14], показано на рис. 1.

Оскільки константи рівноваги реакцій для алмазу значно більші, ніж для графіту, у закритому об'ємі ці реакції для алмазу протікають у прямому, для графіту – у зворотному напрямку, тобто алмаз окислюється, а графіт виділяється із газоподібних продуктів реакції. Енергія активації цих процесів (210 ± 20 кДж/моль для природного алмазу [22]) нижче енергії активації процесу прямої перебудови ґратки алмазу в ґратку графіту (1060 ± 80 кДж/моль [23]), тому зазначені процеси, що призводять до графітизації алмазних частинок за їхнього спікання в умовах

високого тиску, протікають за більш низької температури порівняно з прямою перебудовою ґратки алмазу.

Існують p , T – області, в яких титан активно взаємодіє як з киснем, так і з вуглецем (алмаз):



Порівняння пріоритетів взаємодії кисню з алмазом і титаном показує, що за нормального тиску в системі $\text{O}-\text{C}_{\text{алм}}-\text{Ti}$ до температури 2000 К реакції кисню з титаном термодинамічно більш вигідні, ніж його реакції з алмазом, тобто титан є гетером для кисню. За високого тиску ця тенденція посилюється – титан залишається гетером для кисню до температури 3000 К (рис. 2). Отже, наявність титану в суміші для формування алмазного композиту за високого тиску та високої температури уповільнює або зупиняє процес графітизації алмазу через газову фазу.

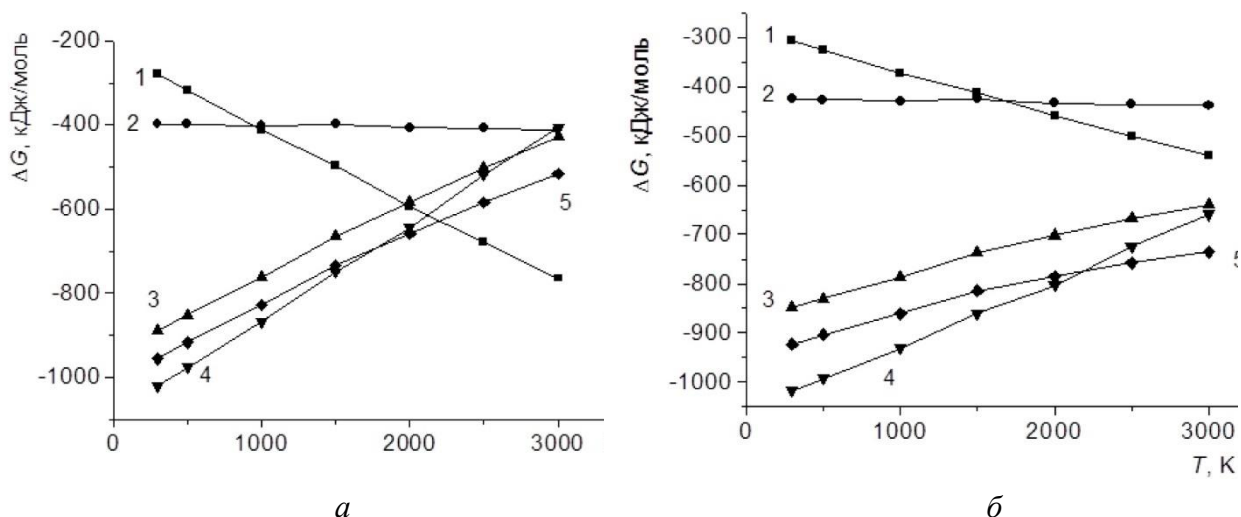


Рис. 2. Зміна вільної енергії Гіббса внаслідок реакцій кисню з алмазом і **ТИТАНОМ** в залежності від температури за атмосферного тиску (а) та 8 ГПа (б). Цифри відповідають номерам реакцій в тексті, розрахунок зроблено за умови участі в реакції 1 молю кисню

Важливим питанням є утворення карбіду титану внаслідок взаємодії алмазу з титаном в процесі формування полікристалічного алмазного композиту під дією високого тиску та високої температури. Проте як за нормальних умов, так і за високого тиску в разі присутності кисню в порах між алмазними частинками термодинамічно найбільш вигідною є реакція титану з киснем (рис. 3).

Таким чином, для того, щоб відбувалися процеси карбідоутворення під час взаємодії алмазу з титаном, необхідною умовою є відсутність кисню чи оксигенвмісних сполук в об'ємі, де відбувається реакція. Унеможливити доступ кисню до поверхонь контактування алмазу з титаном можна за рахунок покриттям титаном алмазних зерен. За умови достатньої товщини такого покриття і мінімізації вмісту оксигенвмісних сполук в порах карбід титану може утворюватись в контакті алмаз – титан. В контакті з киснем, який як газ присутній в порах, буде відбуватись формування оксидів титану.

Нанесення покриття на алмазні зерна очищеного продукту синтезу в системі Mg–Zn–В–С було проведено методом газотранспортного переміщення металу в газовому середовищі галогенідів [24]. Загальний вміст титану в покритому порошку складав 1–2 % (за масою).

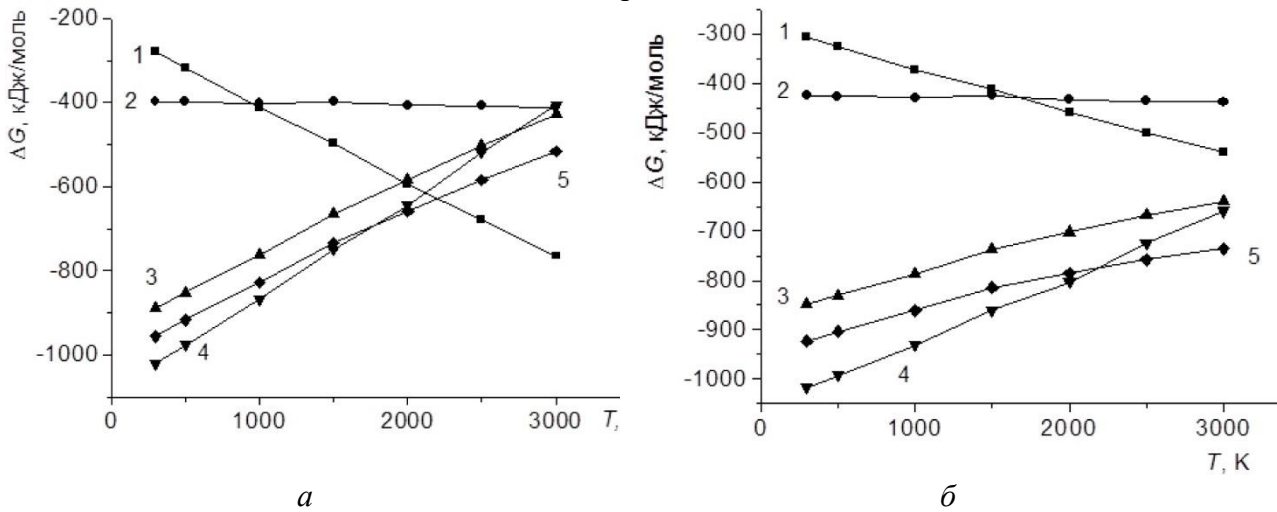


Рис. 3. Зміна вільної енергії Гіббса внаслідок реакцій алмазу з киснем (1), титаном (6) та титану з киснем (4) в залежності від температури за атмосферного тиску (а) та 8 ГПа (б). Цифри відповідають номерам реакцій в тексті, розрахунок зроблено за умови участі в реакції 1 молю кисню та 1 молю карбону (алмаз)

В зразку композита, спеченому з вказаного порошку за 8 ГПа і 1850 °С, методом дифракції рентгенівських променів зафіксовано утворення карбіду титану (рис. 4).

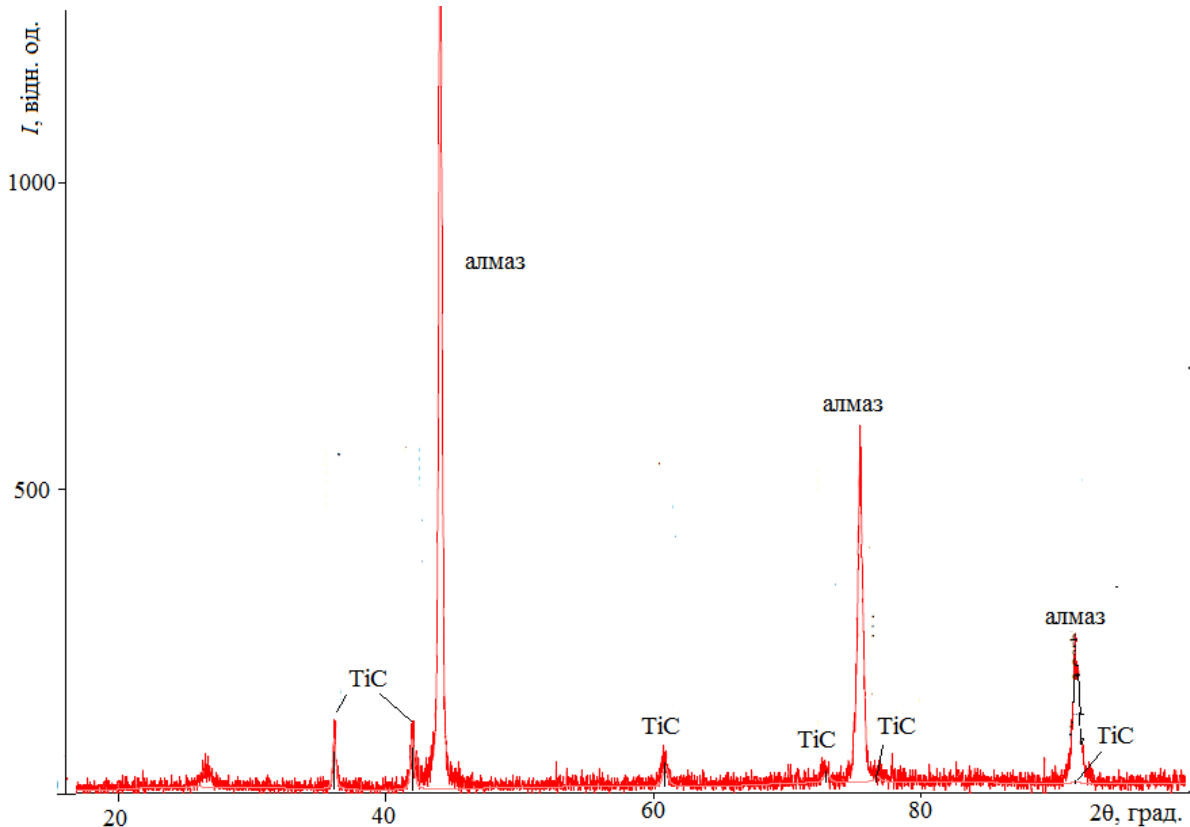


Рис. 4. Дифрактограма зразка композита, спеченого за тиску 8 ГПа та температури 1850 °С із очищеного продукту синтезу алмазу в системі Mg–Zn–B–C з титановим покриттям, нанесеним на алмазні зерна.

Під дією високого тиску в процесі переміщення і руйнування алмазних частинок порушується суцільність титанового покриття, тому залишається відкритим питання можливості взаємодії алмазу з оксидами титану, які утворюються внаслідок реакції титану з киснем. Внаслідок вказаної взаємодії в системі можливе протікання реакцій:



Розрахунок зміни вільної енергії Гіббса для вказаних реакцій показав, що за температур нижче 1000 К вони не відбуваються як за атмосферного, так і за високого тиску. Проте за відсутності незв'язаного кисню за температур вище 1500 К окиснення алмазу може відбуватись внаслідок реакції (7) за атмосферного тиску та реакції (9) за тиску 8 ГПа (рис. 5).

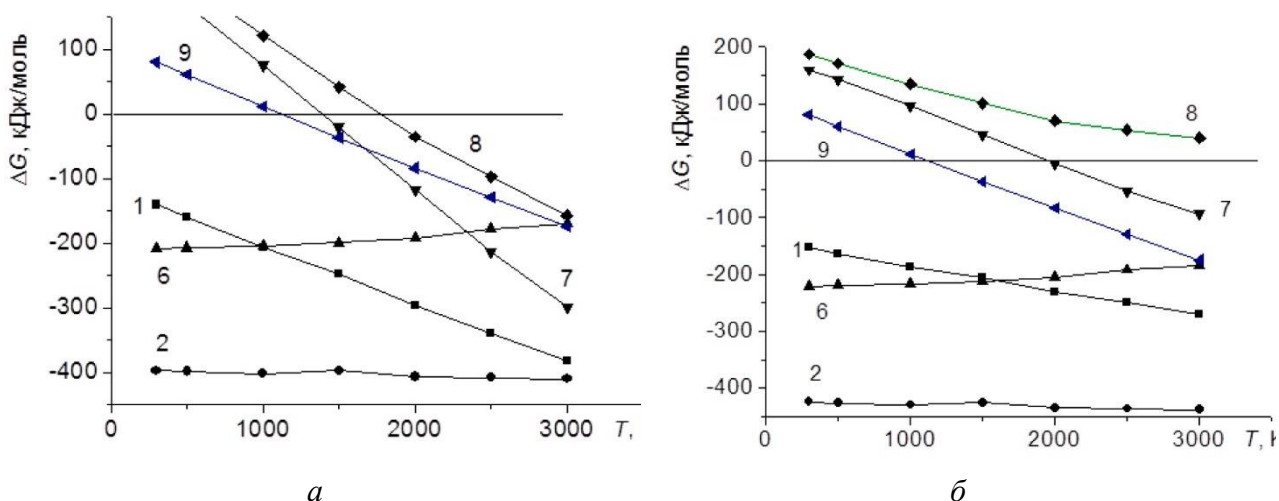


Рис. 5. Зміна вільної енергії Гіббса внаслідок реакцій алмазу з оксидами титану в залежності від температури за атмосферного тиску (а) та 8 ГПа (б). Цифри відповідають номерам реакцій в тексті, розрахунок зроблено за умови участі в реакції 1 молю карбону (алмаз)

Таким чином, титанове покриття на зернах алмазного порошку до температури 1000 К захищає алмазний каркас утвореного композиту від окиснення, навіть якщо в процесі спікання порошку за високого тиску воно частково перетворюється в оксид титану.

Висновки

1. У порах стисненого алмазного порошку реакції з киснем та оксидами вуглецю для алмазу протікають у прямому, а для графіту – у зворотному напрямі, тобто алмаз окислюється, а графіт виділяється з газоподібних продуктів реакції. Це істотно знижує температуру початку графітизації алмазних частинок під час спікання в умовах високого тиску.

2. За нормального тиску в системі O–C_{алм}–Ti до температури 2000 К реакції кисню з титаном термодинамічно більш вигідні, ніж його реакції з алмазом, тобто титан є гетером для кисню. За високого тиску ця тенденція посилюється – титан залишається гетером для кисню до температури 3000 К, що уповільнює або зупиняє процес графітизації алмазу через газову фазу під час спікання алмазних порошків.

3. Як за нормальних умов, так і за високого тиску в разі присутності кисню в порах між алмазними частинками реакція титану з киснем унеможливило взаємодію алмазу з титаном. Для того, щоб відбувалися процеси карбідоутворення, необхідною умовою є відсутність кисню чи оксигенвмісних сполук в об'ємі, де відбувається реакція.

4. Унеможливити доступ кисню до поверхонь контактування алмазу з титаном можна за рахунок покриттям титаном алмазних зерен. За умови достатньої товщини такого покриття і мінімізації вмісту оксигенвмісних сполук в порах карбід титану може утворюватись в контакті алмаз – титан. Методом дифракції рентгенівських променів зафіксовано утворення карбіду титану в зразку композита, спеченому за 8 ГПа і 1850 °С з очищеного продукту синтезу в системі Mg–Zn–B–C, на алмазні зерна якого методом газотранспортного переміщення металу в газовому середовищі галогенідів було нанесено покриття титану.

5. Титанове покриття на зернах алмазного порошку до температури 1000 К захищає алмазний каркас утвореного композиту від окиснення, навіть якщо в процесі спікання порошку за високого тиску воно частково перетворюється в оксид титану.

О. Bochechka, Т. Kurilyak, О. Chernienko, D. Kamenskykh, А. Filipovych; V. Venikov, А. Lyamtseva

V.M. Bakul Institute of Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine

THERMODYNAMIC EVALUATION OF INTERACTION IN THE C–Ti–O SYSTEM DURING HIGH-PRESSURE SINTERING OF TITANIUM-COATED DIAMOND POWDER WITH DIAMOND GRAINS

The interaction between components during high-pressure sintering of diamond powder with titanium coating of diamond grains is considered. Based on calculations of the change in Gibbs free energy, it is shown that the reactions of oxygen with titanium are thermodynamically more favorable than its reaction with diamond. At a pressure of 8 GPa, titanium remains a heterogen for oxygen up to a temperature of 3000 K, which stops the graphitization of diamond through the gas phase. It is shown that the processes of carbide formation during the sintering of diamond powder under high pressure occur in the case of application of a titanium coating on diamond grains.

Key words: *diamond, titanium, titanium carbide, high pressure, oxygen.*

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; published 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 карбіду 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. Спосіб отримання алмазного композиційного матеріалу: пат. 93803 Україна: В24D 3/02, В22F 3/14. № а200913970; заявл. 30.12.2009; опубл. 10.03.2011, бюл. № 5. 5 с.
8. Бочечка О. О., Свешніков І. А., Назарчук С. М., Заболотний С. Д., Гаврилова В. С., Боженок В. М., Луцак Е. М., Романко Л. О., Ільницька Г. Д., Смекаленков С. В.

- Алмазний полікристалічний композиційний матеріал алмаз – карбід вольфраму для бурового інструменту. *Інструментальний світ*. 2011. № 1–2 (49–50). С.50–52.
9. Zhaoran Chen, Dejiang Ma, Shanmin Wang, Wenha Dai, Pinwen Zhu, Yiqing Zhu, Baochang Liu. 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. doi.org/10.1016/j.jrmhm.2020.105278.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Бочечка А. А., Назарчук С. Н., Гадзыра Н. Ф., Гаврилова В. С., Белявина Н. Н. Термодинамическая оценка взаимодействия в системе С-W-O при спекании нанокompозита алмаз-карбид вольфрама при высоком давлении. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 14. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. С. 261–265.
 14. Новиков Н. В., Бочечка А. А., Назарчук С. Н. Особенности взаимодействия между компонентами при реакционном спекании композитов алмаз – карбид вольфрама и алмаз – карбид кремния в условиях высокого давления. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 15. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2012. С. 232–240.
 15. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. Москва: Металлургия, 1964. 676 с.
 16. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: в 4 т./ Под ред. В. П. Глушко. Москва: Наука, 1978–1979. Т. 1; кн. 2. 328 с. Т. 2; кн. 2. 344 с. Т. 4; кн. 2. 560 с.
 17. Физические свойства алмаза. Справочник / Под ред. Н. В. Новикова. Киев: Наук. думка, 1987. 192 с.
 18. Энциклопедия неорганических материалов: в 2 т. / Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Глав. ред. УСЭ, 1977. Т. 1. 840 с.
 19. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения. Справочник. Москва: Металлургия, 1976. 560 с.
 20. Кипарисов С. С., Левинский Ю. И. Петров А. П. Карбид титана: получение, свойства, применение. Москва: Металлургия, 1987. 216 с.
 21. Bochchka A. A., Romanko L. A., Gavrilova V. S., Konoval S. M., and Nazarchuk S. N. Special features of sintering diamond powders of various dispersions at high pressures. *Journal of Superhard Materials*. 2007. N 1. P.24-31. DOI: 10.3103/S1063457607010030.
 22. Успенская К. С., Урусов В. А., Дерягин Б. В. Окисление алмаза и графитированной сажи кислородом воздуха. *Теоретическая и экспериментальная химия*. 1969. Т. 5. № 1. С. 133–134.

23. Properties of diamond / ed. by J. E. Field. London: Akad. Press, 1979. 674 p.
24. Шефер Г. Химические транспортные реакции. М.: Мир, 1964. 189 с.

Надійшла 30.10.24

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., Osipov, 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 kompozytsiinoho material na osnovi almazu [The method of obtaining a composite material based on diamond]* (Patent Ukrainy N 34174) [in Ukrainian].
7. Novikov, M. V., Bochechka, O. O., Nazarchuk, S. M., at. al. (2011). *Patent of Ukraine N 93803. B24D 3/02, B22F 3/14. Sposib otrymannia almaznoho kompozytsiinoho material [Method of obtaining diamond composite material]* (Patent Ukrainy N 93803) [in Ukrainian].
8. Bochechka, O. O., Sveshnikov, I. A., Nazarchuk, S. M., at. al. (2011). Almaznyi polikrystalichnyi kompozytsiinyi materialalmaz – karbid volframu dlia burovoho istrumentu [Diamond polycrystalline composite material diamond - tungsten carbide for drilling tools]. *Instrumentalnyi svit – Instrumental world*. (1–2), 50–52 [in Ukrainian].
9. Zhaoran Chen, Dejiang Ma, Shanmin Wang, 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). [Doi.org/10.1016/j.jrmhm.2020.105278](https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2020.105278).
10. Osipov, O. S., Bykov, O. I., Stratiichuk, D. A., at. al. (2021). Osoblyvosti struktury kompozytu, orymanoho v systemialmaz-TiNi₃ shliakhom termobarychnoho spikannia [Features of the structure of the composite obtained in the diamond-TiNi₃ system by thermobaric sintering]. *Instrumentalne materialoznavsyvo – Tooling materials science*. (24nd Issue, p. 271–277) [in Ukrainian].
11. Chernienko, O. I., Venikov, V. O., Liamtseva, A. O. at. al. (2022). Ushchilnennia almaznykh 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) [in Ukrainian].
12. Bochechka, O. O., Chernienko, O. I., Kuryliak, T. O. at. 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) [in Ukrainian].

13. Bochechka, A. A., Nazarchuk, S. N., Gadzyra, N. F. et al. (2011). Termodinamicheskaia otsenka vzaimodeistviia v sisteme C–W–O pri spekanii nanokompozitaalmaz-karbid volframa pri vysokom davlenii [Thermodynamic evaluation of interaction in the C-W-O system during sintering of diamond-tungsten carbide nanocomposite at high pressure]. *Porodorazrushaiushchii I metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika I tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools –Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (14nd Issue, p. 261–265). ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukkrainy [in Russian].
14. Novikov, N. V., Bochechka, A. A., & Nazarchuk, S. N. (2012). Osobennosti vzaimodeistviia mezhdru komponentami pri reaktsionnom spekanii kompozitovalmaz-karbid volframa ialmaz-karbid kremniia v usloviiah vysokogo davleniia [Features of interaction between components during reaction sintering of diamond-tungsten carbide and diamond-silicon carbide composites under high pressure conditions]. *Porodorazrushaiushchii I metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika I tekhnologiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools –Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (15nd Issue, p. 232–240). ISM im. V. N. Bakulia NAN Ukkrainy [in Russian].
15. Zhukhovitskii, A. A., & Shvartsman L. A. (1964). *Fizicheskaiia khimiia [Physical Chemistry]*. Moskva: Metallurgiiia [in Russian].
16. Glushko, V. P. (Ed.) (1978–1979). *Termodinamicheskie svoistva individualnykh veshchestv [Thermodynamic properties of individual substances]* (V1 (2), V2 (2), V4 (2)). Moskva: Nauka [in Russian].
17. Novikov, N. V. (Ed.) (1987). *Fizicheskie svoistva almaza. Spravochnik [Physical Properties of Diamond. Handbook]*. Naukova dumka [in Russian].
18. Fedorchenko, I. M. (Ed.) (1977). *Entsiklopediia neorganicheskikh materialov [Encyclopedia of Inorganic Materials]* (VI). Glav. Red. USE [in Russian].
19. Samsonov, G. V., & Vinnitskii, I. M. (1976). *Tugoplavkie soedineniia. Spravochnik [Refractory Compounds. Handbook]*. Metallurgiiia [in Russian].
20. Kiparisov, S. S., Leviskii, Yu. I., & Petrov, A. P. (1987). *Karbid titana: poluchenie, svoistva, primeneniie [Titanium carbide: production, properties, application]*. Metallurgiiia [in Russian].
21. Bochechka, A. A., Romanko, L. A., Gavrilova, V. S., et al. (2007). Special features of sintering diamond powders of various dispersions at high pressures. *Journal of Superhard Materials*. (1), 24-31. DOI: 10.3103/S1063457607010030.
22. Uspenskaia, K. S., Urusov, V. A., & Deriahyn B. V. (1969). Okysleniie almaza i hrafitirovannoi sazhi kislorodom vozdukha [Oxidation of diamond and graphitized carbon black by air oxygen]. *Teoreticheskaiia y eksperimentalnaiia khimiia – Theoretical and experimental chemistry*, 5(1), 133–134 [in Russian].
23. Field, J. E. (Ed.). (1979). *Properties of diamond*. Akad. Press.
24. Shefer, G. (1964). *Khimicheskie transportnye reaktsii [Chemical transport reactions]*. Mir [in Russian].