

3. Clark I. E., Bex P. A. The use of PCD for petroleum and mining drilling // *Industrial Diamond Rev.* – 1999. – N 1. – P. 43–49.
4. Cook M. W., Bossom P. K. Trends and recent developments in the material manufacture and cutting tool application of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic boron nitride // *Intern. J. of Refract. Met. & Hard Mater.* – 2000. – Vol. 18, N 2–3. – P. 147–152.
5. Scott D. E. The history and impact of synthetic diamond cutters and diamond enhanced inserts on the oil and gas industry // *Industrial Diamond Rev.* – 2006. – N 1. – P. 48–55.
6. Pat. 0185189 A1 USA, IC E21B 10/42, E21B 10/46. Manufacture of thermally stable cutting elements / A. Griffo, M. K. Keshavan. – Publ. 07.08.08.
7. Pat. 7493973 USA, IC E21B 10/46. Polycrystalline diamond materials having imported abrasion resistance, thermal stability and impact resistance / M. K. Keshavan, Y. Zhang, Y. Shen, A. Griffo, M. Janssen. – Publ. 24.02.09.
8. Pat. 0060391 USA, IC E21B 10/36. Thermally stable diamond polycrystalline diamond constructions / R. K. Eyre, A. Griffo, T. W. Oldham. – Publ. 23.03.06.
9. Кушталова И. П., Стасюк Л. Ф. Закономерности образования граничных слоев в системе алмаз-переходной металл // *Процессы взаимодействия на границе раздела фаз.* – К.: ИСМ АН УССР, 1982. – С. 13–16.
10. Найдич Ю. В., Уманский В. П., Лавриненко И. А. Прочность алмазо-металлического контакта и пайка алмазов. – К.: Наук. думка, 1988. – 135 с.
11. Марків В. Я., Белявіна Н. М. Апаратно-програмний комплекс для дослідження полікристалічних речовин за їх дифракційними спектрами // *Тез. доп. другої міжнар. конф. “Конструкційні та функціональні матеріали”, КФМ 97.* – Львів, – 1997. – С. 260–261.
12. Воронин Г. А., Осипов А. С., Шульженко А. А. Композит на основе алмаза и карбида кремния для оснащения бурового инструмента // *Минералог. журн.* – Киев, 1995. – 17, N 6. – С. 90–95.

Надійшла 15.06.11

УДК 621.762.-539.89.-548.73

В. М. Волкогон, М. С. Ковальченко, доктори технічних наук; **С. К. Аврамчук, А. В. Кравчук**, кандидати технічних наук; **Ю. О. Федоран**

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ

ДО ПИТАННЯ ПРО АКТИВУВАННЯ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОРОШКІВ BN_6 ШЛЯХОМ ЇХ ПОПЕРЕДНЬОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Наведено результати дослідження впливу попереднього деформування прокатуванням порошків BN_6 на їх ущільнення у процесі спіканні за високого тиску і температури ($p = 7,7$ ГПа, $T = 1100$ – 1800 °С, $\tau = 60$ – 120 с). Розраховано середнє значення енергії активації ущільнення при спіканні попередньо деформованих при навантаженні $p = 0,8$ ГПа та $p = 1,4$ ГПа порошків BN_6 та встановлено, що вона залежить від напруження деформації і становить відповідно 128 кДж/моль та 75 кДж/моль.

Ключові слова: нітрид бору, прокатування, деформування, тиск, температура, ущільнення, енергія активації.

У технологічному процесі отримання полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) з вюрцитного нітриду бору вирізняються дві основні стадії: холодне пресування (при створенні тиску в апараті високого тиску (АВТ) і спіканні (гарячому пресуванні) за високого тиску і температури в області термодинамічної стабільності сфалеритного нітриду бору. Послідовність цих стадій процесу лише така.

Використання вюрцитного нітриду бору при виготовленні надтвердих матеріалів дає можливість отримувати гетерофазний матеріал зі значною зміною його властивостей шляхом управління ступенем фазового перетворення $\text{BN}_6 \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$. Спікання компактного матеріалу супроводжується фазовими перетвореннями $\text{BN}_6 \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$ та $\text{BN}_6 \rightarrow \text{BN}_7$. Результати вивчення кінетики фазових перетворень при гарячому пресуванні вюрцитного нітриду бору за високого тиску і температури засвідчили, що

фазовий склад матеріалу, який спікається, залежить від температури та тривалості спікання. Формування механічних властивостей ПНТМ із BN_b значною мірою визначається утворенням графітоподібної модифікації, зумовленої зворотним фазовим перетворенням $\text{BN}_b \rightarrow \text{BN}_r$, що має місце на поверхні пор на початкових етапах спікання [1]. Між вмістом BN_r в BN_b і його пористістю перед спіканням існує чіткий корелятивний зв'язок – чим вища початкова пористість порошкової пресовки, тим більше BN_r утворюється за однакових баротермічних умов. Запобігти виникненню BN_r при спіканні BN_b можна шляхом досягнення максимальної щільності пресовок перед спіканням, попереджаючи виникнення графітоподібного нітриду бору у вільному стані.

Пресування порошків у твердофазових АВТ здійснюється в умовах близьких до гідростатичних, але використання вискодисперсних порошків BN_b , що погано формуються, зумовлює просторову неоднорідність його робочого об'єму [2; 3]. За таких умов формується анізотропне пористе тіло, яке складається з компонентів з різними властивостями (пори, частинки), внаслідок чого тензор напружень для часток ущільнюваного порошку не є сферичним. Це зумовлює напружений стан часток, для якого характерні високі тангенціальні напруження (до 75 % зовнішнього тиску) [4]. У свою чергу це зумовлює виникнення в мікрооб'ємах пресування зон зсуву, внаслідок чого в областях часток, які межують з порами, підвищується щільність дислокацій, а частинки, що перебувають у критичних умовах навантаження, руйнуються; при цьому інтенсифікується їх ущільнення. Але, як засвідчили результати дослідження ущільнювання порошків BN_b під дією високого тиску [5], залежність відносної щільності BN_b від тиску пресування в логарифмічних координатах характеризується двома лінійними ділянками, причому, зміна кутового коефіцієнта прямої спостерігається при $p = 1,5$ ГПа, який відповідає межі міцності матеріалу на згин. Розрахунки кутових коефіцієнтів процесу пресування порошків BN_b засвідчили, що для отримання пресовок з мінімальною пористістю потрібен тиск порядку $p > 30$ ГПа, а це неможливо, тому найпростішим шляхом отримання пресовок максимальної щільності є багатократне пресування гранульованих порошків або введення в них домішок, які полегшують процес ущільнення.

Оскільки багаторазове пресування в АВТ неефективне і трудомістке, для активування і ущільнення порошків застосовували багаторазове їх прокатування з проміжним гранулюванням. При цьому щільність і стан порошкового прокату з BN_b залежали від кратності прокатування [6; 7]. У результаті рентгенівськими дослідженнями встановлено [8], що текстура порошків зменшується залежно від кількості переходів прокатування в результаті збільшення напруження в зоні деформації і виникають базисні дефекти упаковки, свідченням чого є тенденція до збільшення ширини ліній V_{103} . При цьому текстура укладки, властива часточкам пластинчастої форми, руйнується. Результати вивчення стану порошків BN_b після оброблення високими статичними тисками і прокатуванням з різним рівнем напружень зсуву показало, що вони значно відрізняються [9]. Внаслідок того, що розподіл напруження в об'ємі АВТ різко неоднорідний через значний градієнт тиску, а умови стискання відповідають квазігідростатичним, деформації зсуву в матеріалі реалізуються лише в окремих мікрооб'ємах і кількість деформаційних дефектів в ґратці BN_b відносно всього масиву матеріалу незначна. Оброблення порошку BN_b прокатуванням з різним рівнем деформацій зсуву дає інший результат. За мінімального напруження зі зсувом ($p \approx 0,2$ ГПа) спостерігається значна текстура, яка на порошковій рентгенограмі характеризується підсиленням лінії 002, що виникає під час прокатування з накладенням зазначеної деформації, і внаслідок плоскої форми частинок BN_b має місце їх орієнтація базисною площиною (001) в напрямку вектора прикладеного навантаження. Збільшення навантаження в зоні деформації до $p \approx 0,7$ ГПа сприяє зменшенню морфологічної текстури, що зумовлюється зміною орієнтації часточок порошку, внаслідок пластичної деформації через міжзеренне проковзування, яке виключає взаємне переміщення зерен та їх взаємне розвертання. Подальше збільшення навантаження ще більшою мірою послаблює текстуру на четвертому переході прокатування при $p = 1,4$ ГПа розмиття текстури і ступінь подрібнення порошку максимальні.

Руйнування та пластична деформація часточок порошків BN_b при прокатуванні відбувається як по базисній, так і призматичній площині. Деформація проходить за рахунок пластичних зсувів та повертання областей часточок відносно осей, які знаходяться в площині $(0001) \langle \bar{1} \bar{1} 00 \rangle$ і $\langle 11 \bar{2} 0 \rangle$.

Розвиток повертань зумовлює двійникування та виникнення скидів, що спричиняють зміну форми і переорієнтацію розвиненої базисної поверхні часточок.

Як засвідчують результати досліджень [7], попереднє деформування порошків BN_v прокатуванням в умовах зсуву забезпечує їх підвищену активність фазового перетворення при гарячому пресуванні за високого тиску та температури порівняно з деформуванням високим статичним тиском, при цьому, в залежності від величини напружень в зоні деформації початкова температура фазового перетворення $\text{BN}_v \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$ знижується на 100–200 градусів [10–13]. Таке підвищення активності при фазовому перетворенні прокатаних порошків, обумовлене збільшенням рушійної сили деформаційного фазового перетворення метастабільної вюрцитної фази на стабільну сфалеритну, ініційоване напруженнями зсуву в площинах (0001) частинок BN_v . Це збільшення визначається спільною дією наступних факторів розвитку зсувів в базисних площинах частинок: хаотичним положенням розвинених поверхонь (0001) частинок-пластин відносно осевого їх стискання в АВТ, різницею структурного стану частинок порошку після прокатування, а саме меншим розміром в розвиненій поверхні, наявністю базисних дефектів, формозміною та переорієнтацією розвиненої поверхні.

Наведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що при створенні нових та вдосконаленні існуючих композитів на основі BN_v найбільш ефективним є пошук технологічних прийомів оброблення вихідних порошків, які б забезпечили формування дисперсної мікроструктури і дислокаційної структури та сприяли поліпшенню фізико-механічних та експлуатаційних характеристик матеріалів.

Мета досліджень – вивчити ефективності застосування попереднього деформування порошку BN_v в процесах формування композиційних надтвердих матеріалів на його основі.

Методика експериментів та досліджень. вихідні порошки вюрцитного нітриду бору відповідали вимогам ТУУ 75-12006.7-98, основна кількість частинок якого мала розмір 2–5 мкм і їх доля складала біля 60%. Крім того, розмір окремих частинок досягав 10 мкм.

Попереднє деформаційне оброблення порошків BN_v здійснювали шляхом три-, чотири разового прокатування на прокатному стані з вертикальною подачею порошку в зону деформування між валками діаметром 100 мм з гранулюванням прокату після кожного переходу. Прокатування порошків вюрцитного нітриду бору, щпго сприяє інтенсивній фрагментації частинок порошку, зумовлювала зміну його фракційного складу в бік збільшення вмісту частинок < 2мкм. Середній розмір таких порошків залежно від параметрів прокатування, становив 2,6–2,7 мкм.

Після 4-го переходу прокат гранулювали протиранням через проволочне сито 1000 мкм. З отриманого порошку пресуванням в сталій прес-формі при зусиллі $p = (5-10) \cdot 10^2$ МПа формували заготовки полікристалів діаметром 9 мм і висотою 5 мм, які потім піддавали баротермічному обробленню.

Спікали ПНТМ в АВТ типу „тороїд” при тиску $p = 7,7$ ГПа і температурі $T = 1100-1800$ °С протягом 120 с від моменту включення нагріву при наперед заданій температурі.

Густину спечених полікристалічних композитів визначали гідростатичним зважуванням зразків за стандартною методикою.

Обговорення отриманих результатів. Результати вивчення кінетики ущільнення порошків BN_v при гарячому пресуванні під високим тиском засвідчили, що в реальних умовах отримання ПНТМ на ущільнення суттєво впливає протитиск десорбованих поверхнею порошків газів, який на заключній стадії гарячого пресування може сягнути величини прикладеного тиску і призвести до зупинення ущільнення [14]. Коефіцієнт нелінійності течії твердої фази BN_v при високих тисках становив $n = 2$, що характерно для міжзеренного проковзування, енергія активації процесу течії BN_v становила 1,4 еВ.

Проаналізуємо кінетику ущільнення при спіканні в умовах високих тисків і температур прокатаних порошків BN_v [15]. Криві ущільнення порошків BN_v , прокатаних з різним рівнем контактних напружень деформації (партії 1 і 2) показані на рис. 1, звідки випливає, що порошки, які піддані більшому деформуючому впливу і мають більш високу початкову щільність, при тих же баротермічних умовах ущільнюються інтенсивніше і досягають більших значень густини. Порошки BN_v , прокатані з деформуючим напруженням $p = 0,8$ ГПа, ущільнюються при $T = 1200$ °С практично лінійно в часі і до 120 с пористість полікристалів становить близько 10 %, що відповідає даним, наведеним у [15].

Підвищення напруження деформації до $p = 1,4$ ГПа при прокатування порошків значно активує ущільнення і вже до 60 с густина досягає максимального значення і на кривій ущільнення з'являється характерний для спікання при більш високих температурах прокатаних порошків перегин, що свідчить про зниження густини зразків. Це явище, очевидно, зумовлюється виникненням пор внаслідок рекристалізації матеріалу під час спікання [17].

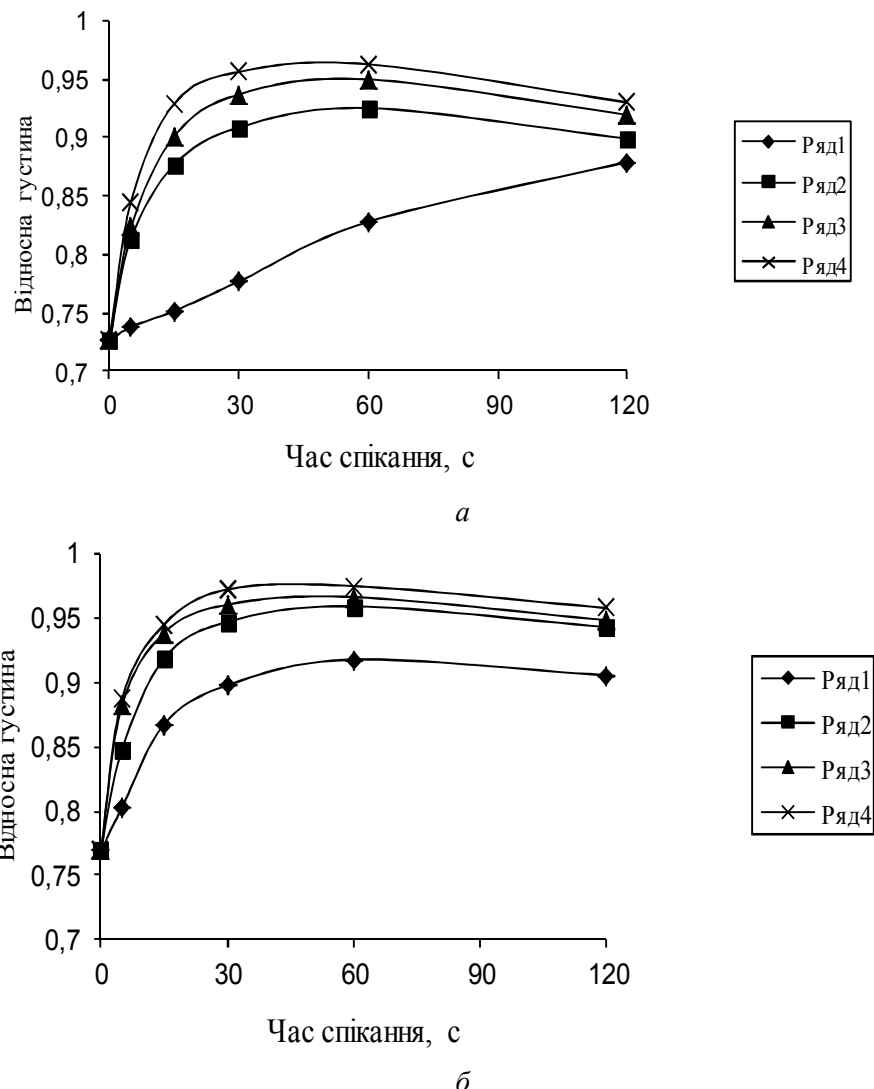


Рис. 1. Кінетика спікання порошків BN_6 , деформованих прокатуванням при різній величині контактних напружень в зоні деформації (1 – 1200 °C; 2 – 1400 °C; 3 – 1600 °C; 4 – 1800 °C) [13] (а – партія 1; б – партія 2)

Кінетику ущільнення при спіканні під високим тиском проаналізували з використанням результатів досліджень М.С. Ковальченка [18] щодо сталої повзучості, яка контролює гаряче пресування. При цьому процес розглядали як об'ємний в'язкий плин пористого тіла, в якому плин твердої фази здійснюється за нелінійним законом. В умовах спікання під високим тиском реалізуються умови ізостатичного гарячого пресування і кінетика ущільнення, яка контролюється механізмом сталої повзучості матриці, що утворює пористе тіло, описується рівнянням

$$\frac{d}{dt} \Psi(n, c) = c \frac{n-3}{2} \frac{n+1}{2} \frac{dc}{dt} = \frac{Ap^n}{2\phi_0^n} \quad (1),$$

де ρ – відносна густина пористого тіла; n – показник нелінійності плинину ($n = 1$ при плинні за лінійним законом; $n > 1$ при нелінійному плинні); $X(n, \rho)$ – інтегральна функція густини; $\Psi(n, c) = \int_{\rho_0}^{\rho} c^{\frac{n-3}{2}} \frac{n+1}{\rho^2} d\rho$;

$\Psi = \frac{1}{6} \frac{2+c^{3/c}}{1-c^{3/c}} c^{(2-c)/c}$; τ_0 – межа пружності матеріалу матриці.

Для ізотермічного процесу ($A = \text{const}$) після інтегрування вираження (1) виглядає:

$$\Psi(n, c) = \frac{Ap^n t}{2\tau_0^n} \quad (2)$$

Для оброблення експериментальних даних використали комп'ютерні програми за наведеними алгоритмами [18].

Спінання при високих тисках на мікрорівні пов'язане зі зміною дислокаційної структури і контролюється накладенням механізмів ковзання і дифузії. Тому в [19] до цього процесу застосували основні положення теорії крипу. У результаті опрацювання даних встановили, що при всіх значеннях n функція $X(n, \rho)$ нелінійна, відповідно для плинину твердої фази, контрольованого механізмом несталої повзучості, формулу (2) можна записати у вигляді:

$$\Psi(n, c) = Bt^m \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (3)$$

де $B = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{U}{kT}\right)$; t – час; T – температура; k – постійна Больцмана.

Використання рівняння (3) для оброблення експериментальних даних по кінетиці спінання дозволяє визначити коефіцієнт n , а також енергію активації процесу:

$$U = k(\ln B_2 - \ln B_1) \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

Залежності інтегральної функції щільності $X(n = 3, \rho)$ від часу t^m для всіх наведених даних по спінанню під тиском порошків BN_b , підданих різному деформаційному впливу, показана на рис. 2.

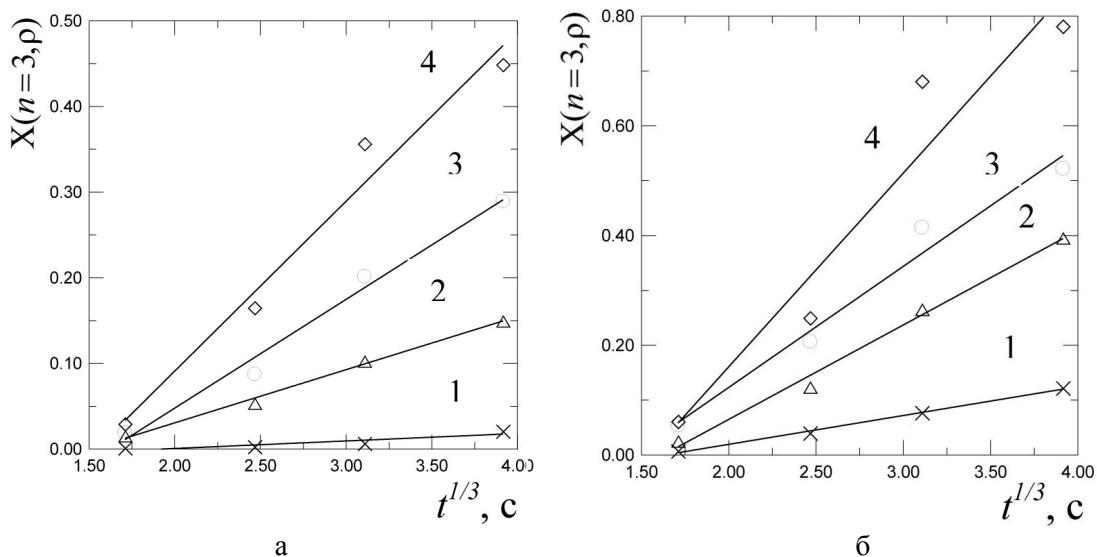


Рисунок 2. – Залежність функції відносної щільності $X(n = 3, \rho)$ від тривалості спікання $t^{1/3}$ порошків BN_b партії 1 (а) і 2 (б) при різних температурах (1 – 1200 °С; 2 – 1400 °С; 3 – 1600 °С; 4 – 1800 °С)

Як бачимо, зазначені залежності нелінійні, що свідчить про несталу ($m = 1/3$) нелінійної ($n = 3$) повзучості.

Використавши розраховані дані та залежність (4), визначимо оціночну середню енергію активації ущільнення для порошків партій 1 і 2.

Як бачимо на рис. 3, нахили прямих, що характеризує енергію активації, різні для порошоків партій 1 і 2. Це свідчить про різну поведінку порошоків BN_v партій 1 і 2 при спіканні в умовах високих тисків і температур.

Необхідно зазначити, що залежності $\ln B-1/T$, побудовані з використанням функцій $X(n, \rho)$, вищого порядку ($n = 3, 4$) і з більшою помилкою апроксимуються прямими лініями, ніж такі самі залежності при $n = 1$ або $n = 2$.

Оціночне середнє значення енергії активації ущільнення порошоків BN_v партій 1 становить 128 кДж/моль, партій 2 – 75 кДж/моль. Зниження енергії активації ущільнення у випадку спікання порошоків BN_v партії 2 пов'язане з підвищенням щільності дислокацій в частинках, зумовленою інтенсивною їх необоротною деформацією при прокатуванні, що залежить від контактного напруження в зоні деформації.

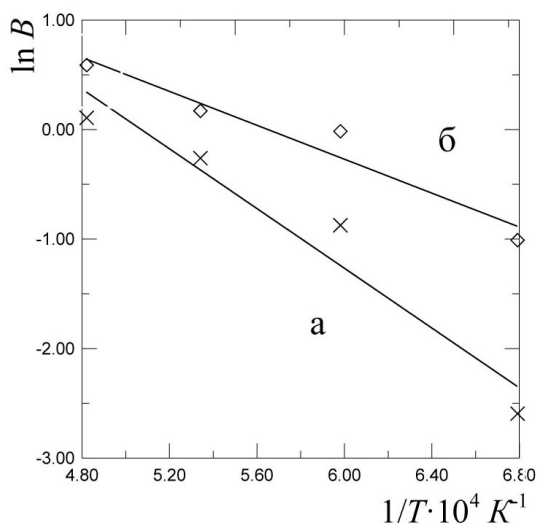


Рисунок 3. Температурна залежність функції ущільнення при спіканні порошоків BN_v (а – партія 1; б – партія 2)

Висновки

Результати досліджень засвідчили, що попереднє деформаційне оброблення вихідних порошоків вюрцитного нітриду бору перед спіканням в умовах високих тисків сприяє активації їх ущільнення в залежності від величини деформації. Це підтверджують дані про значне зниження енергії активації ущільнення при збільшенні деформації та зниженні температурного порогу фазового перетворення $\text{BN}_v \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$ на 150–200 градусів, що прямо пов'язано з ущільненням матеріалу при спіканні ПНТМ з BN_v [11].

Приведены результаты исследования влияния предварительного деформирования прокатыванием порошков BN_v на их уплотнение в процессе спекания при высоком давлении и температуре ($p = 7,7$ ГПа, $T = 1100-1800$ °С, $\tau = 60-120$ с). Рассчитано среднее значение энергии активации уплотнения при спекании, предварительно деформированных при нагрузке $p = 0,8$ ГПа и $p = 1,4$ ГПа, порошков BN_v и установлено, что она зависит от напряжения деформации и составляет соответственно 128 кДж/моль и 75 кДж/моль.

Ключевые слова: нитрид бора, прокатывание, деформирование, давление, температура, уплотнение, энергия активации.

Results of researches of preliminary deformation influence by rolling of wBN powders on process of their consolidation at sintering in the conditions of high pressures and temperatures ($p = 7,7$ GPa, $T = 1100-1800$ °C, $\tau = 60-120$ s) are shown. The average size of activation energy of consolidation process is calculated at the sintering, preliminary deformed at loading $p = 0,8$ GPa and $p = 1,4$ GPa, wBN powders and is established, that it depends on size of deformation pressure and makes 128 kDzh/mol and 75 kDzh/mol, accordingly.

Key words: boron nitride, rolling, deformation, pressure, temperature, consolidation, activation energy.

Література

1. Волкогон В. М., Бочко А. В., Балан Т. Р. Кинетика $\text{BN}_v \rightarrow \text{BN}_r$ превращения в условиях неизотермического спекания // Физика и техника высоких давлений. – 1986. – Вып. 22. – С. 56–59.

2. Волкогон В.М., Островская Н.Ф., Будяк А.А. Температурное поле аппарата высокого давления и его влияние на структурообразование материала из вюрцитного нитрида бора / Порошковая металлургия. – 1987. – № 5. – С. 40–46.
3. Волкогон В. М., Островская Н. Ф. Особенности структурообразования СТМ при горячем прессовании BN_v в условиях неоднородного теплового поля АД // Изменения свойств материалов под действием высоких давлений: Сб. науч. тр – К.: ИПМ АН УССР. – 1986. – С. 61–64.
4. Рэдклифф С. В. Влияние гидростатического давления на дефекты структуры и свойства // Механические свойства металлов под давлением. – М.: Мир, 1973. – С. 254–295.
5. Джамаров С. С., Щербань Н. И. Холодное прессование порошков вюрцитного нитрида бора при высоких давлениях // Порошковая металлургия. – 1983. – № 2. – С. 32–34.
6. Волкогон В. М., Островская Н. Ф. Особенности прокатки порошков вюрцитного нитрида бора // Сверхтвердые матер. – 1993. – № 2. – С. 38–41.
7. Волкогон В. М. Фізико-технічні основи отримання та управління формуванням властивостей інструментальних полікристалічних надтвердих матеріалів з вюрцитного нітриду бора: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.01/ Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – К., 2004. – 41 с.
8. Волкогон В. М., Курдюмов А. В., Запорожец О. И. Влияние предварительной деформационной обработки порошков вюрцитного BN на их структуру и спекание при высоких статических давлениях // Тр. междунар. конф. «Новейшие технологии в порошковой металлургии и керамике». – К.: ИД Академперіодика, – 2003. – С. 68.
9. Олейник Г. С., Волкогон В. М., Аврамчук С. К. Структурные превращения в частицах вюрцитного нитрида бора при прокатке // Сверхтвердые матер. – 2002. – № 5. – С. 26–35.
10. Волкогон В. М. До питання про структурний механізм фазового перетворення $\text{BN}_v \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$ // Зб. наук. пр ХДПУ: Високі технології в машинобудуванні. – Харків, 1999. – С. 53-58.
11. Волкогон В. М. Влияние сдвиговых напряжений на полиморфные превращения в вюрцитном нитриде бора // Сверхтвердые матер. – 1993. – № 3. – С. 19–22.
12. Volkohon V. M., Oleynik G. S., Avramchuk S. K. Influence of rolling the structural state of 2H BN particles // Inter. conf. „Science for materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges”. 4–8 November, 2002, Kyiv, Ukraine. – P. 169–170.
13. Волкогон В. М., Олейник Г. С. Влияние предварительной обработки порошка BN_v прокаткой на фазовое превращение вюрцит-сфалерит при спекании гексаниита-Р // Сверхтвердые матер. – 2003. – № 1. – С. 22–31.
14. Ковальченко М. С., Джамаров С. С. Кинетика уплотнения порошка вюрцитного нитрида бора при горячем прессовании под высоким давлением // Порошковая металлургия. – 1984. – № 2. – С. 31–36.
15. Кинетика уплотнения и фазовых превращений при спекании в условиях высоких давлений порошков вюрцитного нитрида бора деформированных прокаткой / В. М. Волкогон, Г. С. Олейник, С. К. Аврамчук и др. // Сверхтвердые матер. – 2006. – № 4. – С. 55–61.
16. Курдюмов А. В., Джамаров С. С., Балан Т. Р. Закономерности превращения вюрцитной модификации нитрида бора в графитоподобную при высоких давлениях // Сверхтвердые матер. – 1986. – № 3. – С. 3–7.
17. Роль пластической деформации в процессах уплотнения и разуплотнения при спекании материалов на основе вюрцитного нитрида бора / Г. С. Олейник, В. М. Волкогон, С. К. Аврамчук, и др. // Сверхтвердые матер. – 2010. – № 5. – С. 51–60.
18. Ковальченко М. С. Особенности кинетики уплотнения порошков ковалентных веществ при горячем прессовании // Порошковая металлургия. – 1990. – № 5. – С. 19–24.
19. Ковальченко М. С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. – К.: Наук. думка, 1980. – 238 с.

Надійшла 16.06.11