

**Peicheng Mo<sup>1,2,\*</sup>, Jiarong Chen<sup>1,2</sup>, Chao Chen<sup>1,2</sup>,  
Qiaofan Hu<sup>1,2</sup>, Leyin Xiao<sup>1,2</sup>, Feng Lin<sup>1,2</sup>, Xiaoyi Pan<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Guangxi Key Laboratory of Superhard Material,  
China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd.,  
Guilin, Guangxi, P. R. China

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Special Mineral Material,  
China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd.,  
Guilin, Guangxi, P. R. China

\*2393707540@qq.com

## **Дослідження структури та властивостей композитних інструментальних матеріалів PCBN, одержаних за високих температури і тиску**

*Досліджено вплив температури спікання (1400–1700 °C) та високого тиску на мікроструктуру, механічні властивості та продуктивність різання інструментального матеріалу – полікристалічного кубічного нітриду бору (PCBN), отриманого з використанням cBN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> як сировини. Показано, що за допомогою високої температури та високого тиску можна отримати інструментальні матеріали PCBN з більш високою щільністю та кращими комплексними властивостями. За температури 1500 °C спостерігали, що α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> у зв'язувальному матеріалі має тенденцію перетворюватися на β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а зерна були добре розвинені. З підвищенням температури спікання щільність, міцність на вигин і твердість зразків постійно зростали. За температури 1700 °C міцність на вигин і твердість досягли 879,6 МПа і 38,8 ГПа відповідно. Водночас продуктивність різання зразків, спечених за температури 1700 °C, також була найкращою. У разі різання ковкого чавуну на відстані довжиною 7 км знос інструменту був найменшим і становив 0,26 мм.*

**Ключові слова:** інструментальний матеріал PCBN; висока температура і високий тиск; механічні властивості; ковкий чавун.

### **ВСТУП**

Як і алмаз, кубічний нітрид бору (cBN) має високі твердість та теплопровідність і хімічні стабільність та інертність [1–4]. Водночас інструменти з cBN мають вищу ефективність обробки та кращу якість обробки поверхні, ніж алмазні інструменти [5–7]. За допомогою інструментів з cBN досягають високоефективної обробки та різання твердосплавної сталі без охолодження, що робить великий внесок у захист навколишнього середовища. Для практичного застосування зазвичай потрібні зразки cBN великого розміру, але такий матеріал дуже важко синтезувати. Для застосування у виробництві полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN) зазвичай синтезують змішуванням cBN і зв'язувального матеріалу за високих температури та тиску. Використання такої технології є методом досягнення швидкого

спікання cBN та сполучних сумішей за допомогою спільного впливу температури та тиску [8–13].

В останні роки дослідження матеріалів PCBN досягло значного прогресу, для приготування ефективних інструментів PCBN використовують різноманітні зв'язувальні матеріали.

Дослідження НРНТ-спікання матеріалів cBN інструментального призначення без зв'язувальних речовин [14] показало, що оптимальна температура становить 2200–2300 °С. Водночас введення незначних включень  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, що викликають напружений стан, привело до високих загальних механічних і термічних властивостей:  $HK = 41$  ГПа,  $K_{Ic} = 12,6$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $\lambda = 180$  Вт/(м·К).

Використання WC–B<sub>4</sub>C–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> як зв'язки дало можливість синтезувати високоєфективний композит PCBN [15]. Було показано, що за температури спікання 1550 °С комплексні механічні властивості PCBN є найкращими: мікротвердість становила 38,6 ГПа, міцність на вигин – 789,6 МПа, коефіцієнт зношування – 9371.

Було досліджено механічні та різальні властивості надтвердих матеріалів на основі cBN з використанням Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>N та CrB<sub>2</sub> як зв'язувальних матеріалів в [16], а в [17] досліджено вплив добавки VC–Al на зносостійкість композитів на основі cBN.

Структуру, властивості та застосування надтвердого інструментального матеріалу PCBN, що містить зв'язувальний матеріал – МАХ-фазу Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, досліджено у [18].

Досліджено композитну систему cBN–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, армовану SiCw, для токарних інструментів [19]. Було обрано Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> як сполучні речовини, а Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і AlN як добавки для спікання. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> є стійким до високих температур, має високі міцність і в'язкість руйнування, низьке розширення та хімічну стабільність. Його часто використовують як зміцнювальний матеріал для покращення комплексних властивостей композитів з кубічного нітриду бору.

Дослідження синтезованих композитів Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/cBN з cBN різним розміром та вмістом частинок [20] показало, що морфологія та розподіл частинок cBN мають великий вплив на збільшення частинок  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Зі зменшенням розміру частинок cBN збільшується щільність і міцність зразка на вигин.

Було синтезовано PCBN з металокерамічним зв'язувальним Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–Ni і досліджено вплив Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на структуру та властивості [21]. Додавання металевого Ni сприяло більш міцному з'єднанню cBN з Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, водночас утворилася фаза Ni<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> з хорошою ударною в'язкістю, що покращує твердість і зносостійкість спеченого тіла, тоді як додавання Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> покращує міцність і ударну в'язкість PCBN. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> має такі переваги, як відмінні механічні властивості, хорошу хімічну стабільність, низьку спорідненість із металами на основі заліза, непросте зчеплення та дифузне зношування, сильну стійкість до окислення та високу термостійкість тощо. Коефіцієнт теплового розширення ( $7,71 \cdot 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup>) близький до даних для cBN ( $5,8 \cdot 10^{-6}$  °C<sup>-1</sup>).

В [22] і [23] досліджували систему Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–cBN. Результати показали, що Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і cBN мали хороший зв'язок, їхнє використання дозволило отримати композитні матеріали з хорошими властивостями. Як Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, так і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є хорошими зв'язувальними матеріалами, які можуть покращити фізичні властивості інструментальних матеріалів PCBN. Отже, високу температуру та високий тиск було використано для синтезу інструментальних матеріалів PCBN з cBN–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> як основної сировини, а AlN та Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – як допоміжні речовини під час спікання. Було також досліджено фазовий склад, мікроструктуру, механічні властивості та оброблюваність PCBN.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИ СИНТЕЗУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Як сировину для експерименту використовували 83 % (за масою) cBN (розмір частинок – 3–5 мкм, чистота – 99,9 %), 11,5 % (за масою)  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (розмір частинок – 1–3 мкм, чистота – 99,5 %), 4 % (за масою) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (розмір частинок – 1–2 мкм, чистота – 99,5 %) та додавали як добавки для спікання 1 % (за масою) AlN (розмір частинок – 1 мкм, чистота – 99,5 %) і 0,5 % (за масою) Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (розмір частинок – 1 мкм, чистота – 99,5 %). В агатовій ступці як середовище використовували безводний етанол, суміш розтирали протягом 3 год, потім сушили за температури 90 °C протягом 12 год. Одержану сировину поміщали в молібденову чашку, попередньо пресували на формувальній машині для холодного пресування, сушили у вакуумі протягом 12 год і, нарешті, поміщали у пірофілітну форму. Високотемпературне спікання проводили на шести-пуансонному пресі за тиску 5,5 ГПа, температури 1400–1700 °C, часу витримки 600 с. Процес синтезу представлено на рис. 1.

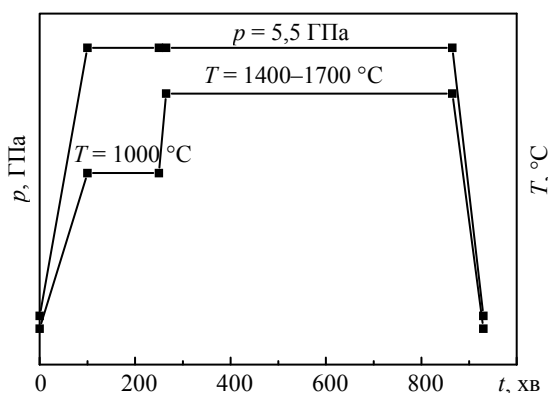


Рис. 1. Процес спікання інструментального матеріалу PCBN.

Відносну щільність PCBN вимірювали методом Архімеда. Фазовий склад визначали за допомогою рентгенівського дифрактометра (мод. X`pert PRO). Морфологію поперечного перерізу спостерігали за допомогою скануючого електронного мікроскопа (СЕМ). Механічні властивості PCBN матеріалів оцінювали за міцністю на вигин та мікротвердістю. Мікротвердість вимірювали мікротвердоміром за Віккерсом (модель VH-5) з навантаженням 49 Н (5 кг), час витримки становив 15 с. Міцність на вигин перевіряли за допомогою електронної універсальної випробувальної машини з комп'ютерним керуванням (мод. СМТ-4304) з відстанню між опорами 10 мм і швидкістю навантаження 0,5 мм/хв.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### Фазовий аналіз

Рентгенограми інструментальних матеріалів PCBN, синтезованих за різних температур спікання, представлено на рис. 2. Видно, що за температури 1400–1700 °C PCBN містять фази BN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> і  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Фази AlN і Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, які знаходяться у вихідних матеріалах, не було виявлено в спечених зразках, це може бути пов'язано з тим, що кількість добавок занадто мала або речовини, утворені допоміжними добавками в процесі спікання, існують у формі склофаз. В діапазоні температур 1400–1700 °C кількість  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> зменшу-

ється зі збільшенням температури спікання, тоді як кількість  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  за такої умови збільшується. Фазовий перехід від  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  до  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  відбувається в PCBN під час спікання і може супроводжуватися утворенням твердого розчину між  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlN}$  і  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Нітрид кремнію є міцною ковалентною сполукою. Для розчинення  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  потрібні  $\text{Y}_2\text{O}_3$  і  $\text{AlN}$  як допоміжні речовини для спікання з метою зменшення в'язкості рідкої фази, але тим самим знижується температура реакції та покращується кінетика перетворення. Розчинення-осадження рідкої фази, утвореної під час спікання, є основним механізмом фазового перетворення  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  формується під час спікання з утворенням рідкої фази та міжфазної дифузії, а далі зростає зі збільшенням температури і тиску як рушійної сили фазового переходу. Тому в разі підвищення температури кількість  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , що утворюється в системі, збільшується.

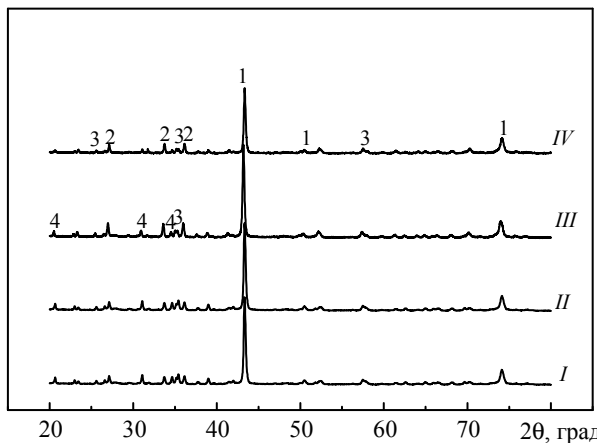


Рис. 2. Рентгенограми PCBN за температури 1400 (I), 1500 (II), 1600 (III), 1700 (IV), спікання: BN (1),  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  (2),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3),  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  (4).

### Мікроструктурний аналіз

На рис. 3 показано морфологію руйнування та енергодисперсійний спектр (ЕДС) відповідних областей інструментальних матеріалів PCBN, спечених за температури 1400, 1500, 1600 і 1700 °C, після травлення плавиковою кислотою. Видно (див. рис. 3, д, е), що великі частинки є частинками cBN, а решта – зв'язувальні речовини, які є стрижнеподібними зернами  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ , тобто частинки cBN з'єднані між собою за допомогою зерен  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На рис. 3, а основною кристалічною фазою нітриду кремнію у зв'язувальному матеріалі є рівновісні зерна  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Розподіл зв'язувального матеріалу та частинок cBN є нерівномірним, і деякі частинки cBN безпосередньо зв'язані між собою. Можливо, через більш низку температуру і меншу кількість енергії, що виділяється системою, зв'язувального матеріалу недостатньо для розплавлення і диспергування всіх складових зразка. За умови спікання за температури 1500 °C через таку низку температуру недостатній вміст рідкої фази, що утворюється в системі, та висока в'язкість не сприяють розчиненню та зростанню  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Тому лише частина  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  має тенденцію до перетворення на  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На знімках СЕМ також можна побачити, що стрижнеподібні зерна  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  є лише прототипами, але розподіл зв'язувального матеріалу та частинок cBN є відносно рівномірним на даний момент. Підвищення температури збільшує вміст рідини в системі, зменшує в'язкість і збільшує відповідну швидкість міграції матеріалу, тим самим збільшуючи швидкість росту зародків  $\beta$ -

$\text{Si}_3\text{N}_4$ . Коли температура спікання досягає  $1600\text{ }^\circ\text{C}$  (див. рис. 3, *в*), кількість довгих стрижнеподібних зерен  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  у зв'язувальному матеріалі швидко зростає, зерна швидко ростуть, а щільність зразка значно збільшується. Ці довгі стрижнеподібні частинки розподіляються серед частинок  $\text{cBN}$ , наслідком чого може бути гарне з'єднання. У разі поширенні мікротріщин зміцнювати систему можуть довгі стрижнеподібні зерна, а основними механізмами зміцнення є відхилення тріщин, перекриття та видовження зерна. Кут відхилення тріщини стає більшим через наявність стрижнеподібних зерен, проте ріст тріщин вимагає більших витрат енергії, а недостатня кількість енергії перешкоджатиме зростанню тріщин, сприяючи тим самим створенню більшої міцності на вигин. Коли температура спікання підвищується до  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ , більшість зерен  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  перетворюються на довгі стрижнеподібні зерна  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ , які чітко видно на СЕМ-зображенні. Водночас частинки зв'язувального матеріалу можуть рівномірно з'єднувати частинки  $\text{cBN}$ , що ефективно покращує механічні властивості матеріалу PCBN.

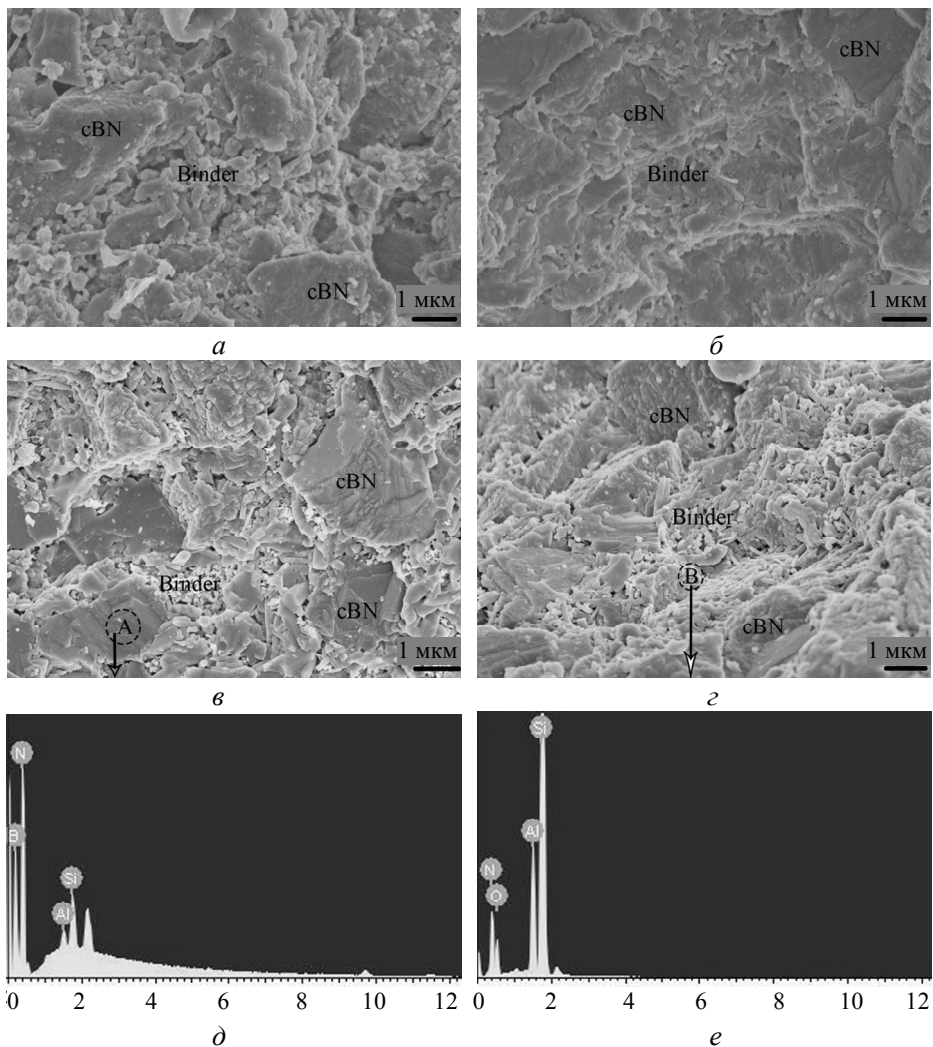


Рис. 3. СЕМ-зображення поверхні руйнування PCBN за температур спікання  $1400$  (*а*),  $1500$  (*б*),  $1600$  (*в*),  $1700$  (*г*)  $^\circ\text{C}$  і результати ЕДС для А (*д*) і В (*е*).

## Властивості спікання

Залежність властивостей інструментальних матеріалів PCBN від температури спікання показано на рис. 4. Видно, що зі збільшенням температури відносна щільність зразка поступово збільшується, що вказує на те, що підвищення температури може сприяти ефективності спікання зразка та покращувати його щільність. З підвищенням температури з 1400 до 1500 °C відносна щільність зразка значно збільшилася, далі зростала повільно і досягла 99,16 % за температури 1600 °C. Коли температура спікання досягла 1700 °C, відносна щільність зразка становила ~ 99,36 %. Результати дослідження показують, що підвищення температури спікання може збільшити кінетику дифузії частинок, сприяти розчиненню та зростанню частинок, прискоренню виділення газу та руху і перегрупованню частинок, тим самим сприяти спіканню та ущільненню зразка.

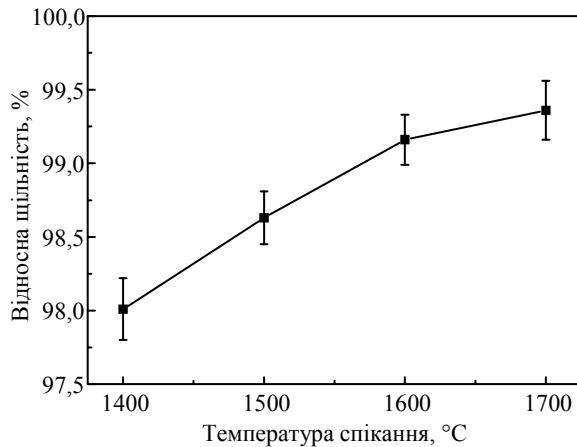


Рис. 4. Відносна щільність PCBN за різної температури спікання.

## Аналіз механічних властивостей

Залежність міцності на вигин і мікротвердості інструментального матеріалу PCBN від температури спікання показано на рис. 5. Видно, що підвищення температури спікання може покращити механічні властивості PCBN. Тенденція зміни механічних властивостей PCBN узгоджується з тенденцією зміни щільності. Поліпшення міцності на вигин невіддільне від утворення склофазу в зразку та росту кристалів  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Міцність зв'язку між склофазою та cBN є одним із важливих факторів, що впливають на міцність на вигин зразків PCBN. У разі більш низької (1400 °C) температури спікання міцність на вигин зразка становить лише 661,8 МПа, що пов'язано з поганою внутрішньою щільністю зразка, рихлою структурою, низькою міцністю зв'язку між частинками та їхнім нерівномірним розподілом. З підвищенням температури у зразку поступово утворюються та ростуть довгі стрижнеподібні зерна  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ , рідка фаза заповнює пори, розмір внутрішніх дефектів зменшується, структура зразка має тенденцію до щільності та підвищується міцність на вигин зразків (досягала 851,7 та 879,6 МПа за температури 1600 та 1700 °C відповідно). З підвищенням температури також зростає мікротвердість зразка за Віккерсом. У разі підвищення температури спікання від 1400 до 1500 °C твердість зразка швидко зростає, а за температури від 1600 до 1700 °C вона зростає повільніше (див. рис. 5). Для всіх зразків PCBN, одержаних під час спікання, найбі-

льший вплив на твердість має  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Значення твердості двох фаз  $\text{Si}_3\text{N}_4$  дуже різні: мікротвердість  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  становить 24,5–32,6 ГПа,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  – 10–16 ГПа [24]. Отже, кількість  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  і  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  має великий вплив на твердість зразків PCBN. За температури 1700 °C вміст зерен  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  у зразку є найбільшим, а його кристалічність – найкращою, тому мікротвердість зразка є найбільшою (38,8 ГПа).

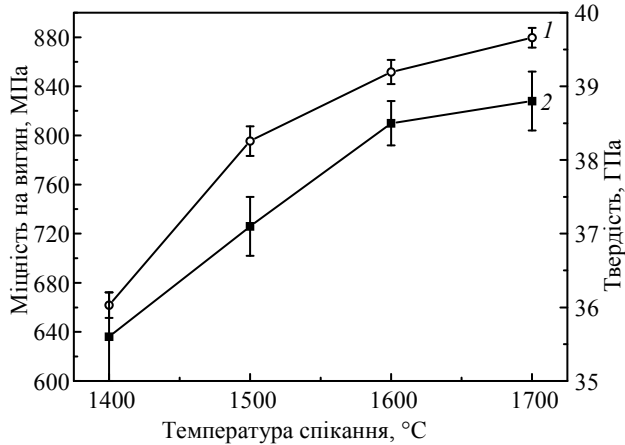


Рис. 5. Міцність на вигин (1) і твердість (2) PCBN за різної температури спікання.

### Дослідження продуктивності різання

Зразки PCBN було виготовлено за різних температур у вигляді цілісних інструментів типу RNGN120400: S1 (1400 °C), S2 (1500 °C), S3 (1600 °C), S4 (1700 °C), радіус заокруглення різальної кромки – 12,7 мм, довжина різальної кромки – 4,7 мм. Випробування на різання проводили на верстаті САК4085Апj: було оброблено круглий стрижень з ковкого чавуну діаметром 100 мм і довжиною 330 мм. На рис. 6 показано різальний інструмент і заготовки з ковкого чавуну. Методом обробки було сухе різання, параметри різання: швидкість різання – 500 м/хв, глибина різання – 0,25 мм, подача – 0,2 мм/об. Знос по задній поверхні інструмента PCBN під час різання на відстані довжиною 7 км спостерігали та вимірювали за допомогою мікроскопа з надвисокою глибиною різкості.



Рис. 6. Зображення різального інструмента і заготовки з ковкого чавуну.

Результати випробувань на різання чотирьох інструментів наведено в таблиці. Видно, що характеристики спікання зразка S1 є поганими, структура

рихла, щільність низька, сила зв'язку між зернами cBN є слабкою, що призводить до поганих механічних властивостей. Під час процесу різання таким інструментом легко отримати відколи кромок, частинки cBN відпадають, що, без сумніву, впливає на продуктивність різання та призводить до підвищеного зносу інструменту, тому його продуктивність різання є найгіршою. Знос по задній поверхні зразків S3 і S4 відносно невеликий – 0,28 і 0,26 мм відповідно, що свідчить про хорошу термостійкість та зносостійкість у процесі різання. Отже, інструментальний матеріал PCBN, виготовлений за температури 1700 °C, має найкращу продуктивність різання, а знос інструменту є найменшим у разі різання ковкого чавуну на відстані довжиною 7 км.

### **Знос під час різання ковкого чавуну різними інструментами з PCBN**

Інструмент	Знос по задній поверхні, мм у разі різання на відстані 7 км	Параметри режиму різання
S1	0,41	$v = 500$ м/хв, $a_p = 0,25$ мм, $f = 0,2$ мм/об
S2	0,33	
S3	0,28	
S4	0,26	

### **ВИСНОВКИ**

Інструментальні матеріали PCBN, отримані за високої температури та високого тиску, мали високу щільністю та гарні механічні властивості у разі регулювання температури спікання.

Під час спікання за температури 1500 °C зерна  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> у зв'язувальному матеріалі мають тенденцію перетворюватися на  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, і за такої умови вони інтенсивно ростуть. З підвищенням температури спікання до 1700 °C більшість зерен  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> трансформувалися в довгі стержнеподібні зерна  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Інструментальний матеріал PCBN, виготовлений за температури 1700 °C, має найкращі механічні властивості та продуктивність різання, а відносна щільність, міцність на вигин і твердість становлять 99,36±0,2 %, 879,6±8 МПа та 38,8±0,4 ГПа відповідно. У разі різання ковкого чавуну (довжина різання 7 км) інструментом, виготовленим за температури 1700 °C, його знос був найменшим – 0,26 мм.

### **ПОДЯКИ**

Автори вдячні за підтримку Ключовому науково-дослідному проекту провінції Гуансі, Китай (AB20159010).

Peicheng Mo<sup>1,2</sup>, Jiarong Chen<sup>1,2</sup>, Chao Chen<sup>1,2</sup>, Qiaofan Hu<sup>1,2</sup>,  
Leyin Xiao<sup>1,2</sup>, Feng Lin<sup>1,2</sup>, Xiaoyi Pan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Guangxi Key Laboratory of Superhard Material,  
China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd.,  
Guilin, Guangxi, P. R. China

<sup>2</sup>National Engineering Research Center for Special Mineral Material,  
China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd.,  
Guilin, Guangxi, P. R. China

Research on the structure and properties of high temperature  
and high pressure composite PCBN tool materials



Using cBN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as raw materials, PCBN tool materials were prepared by high temperature and high pressure. The effects of sintering temperature (1400–1700 °C) on the microstructure, mechanical properties and cutting performance of tool materials were studied. The results show that PCBN tool materials with higher density and better comprehensive properties can be obtained by using high temperature and high pressure technology. At 1500 °C, it was observed that the α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in the binder had a tendency to transform to β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, and the grains were well developed. With the increase of sintering temperature, the density, flexural strength, and hardness of the samples increased continuously. At 1700 °C, the flexural strength and hardness reached 879.6 MPa and 38.8 GPa, respectively. At the same time, the cutting performance of the samples sintered at 1700 °C is also the best. When cutting ductile cast iron with a cutting distance of 7 km, the tool wear is the smallest, which is 0.26 mm.

**Keywords:** PCBN tool material, high temperature and high pressure, mechanical properties, ductile cast iron.

1. Mo P.C., Chen C., Chen J.R., Jia G., Xie D., Xiao L., Pan X., Lin F. Effect of sintering temperature on synthesis of PCBN in CBN–Ti–Al–W system. *Diam. Relat. Mater.* 2020. Vol. 103. art. 107714.
2. Liu Y., He D., Wang P., Yan X., Xu C., Liu F., Liu J., Hu Q. Microstructural and mechanical properties of CBN–Si composites prepared from the high pressure infiltration method. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2016. Vol. 61. P. 1–5.
3. Monteiro S.N., Skury A.L., Azevedo M.G., Bobrovitchii G.S. Cubic boron nitride competing with diamond as a superhard engineering material an overview. *J. Mater. Res. Technol.* 2013. Vol. 2, no. 1. P. 68–74.
4. Li L.Q., Zhao Y. B., Sun K., Ji H., Feng D., Li Z. Composition, microstructure and mechanical properties of cBN-based composites sintered with AlN–Al–Ni binder. *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44, no. 14. P. 16915–16922.
5. Luo X.T., Li C.J., Yang G.J. Correlations between milling conditions and iron contamination, microstructure and hardness of mechanically alloyed cubic BN particle reinforced NiCrAl matrix composite powders. *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 548. P. 180–187.
6. Rong X.Z., Tsurumi T., Fukunaga O., Yano T. High-pressure sintering of cBN–TiN–Al composite for cutting tool application. *Diam. Relat. Mater.* 2002. Vol. 11, no. 2. P. 280–286.
7. Ong C.W., Zhao X.-A., Chan K.F., Ng Y.M., Chan P.W., Choy C.L., Kwok R.W.M. Effects of carbon incorporation on the structure and mechanical properties of cubic boron nitride films. *Thin Solid Films.* 1997. Vol. 307, nos. 1–2. P. 152–155.
8. Yu W.L., Wang J.L., Wu Y., Zou Z., Yu Q., Mo P. *In situ* synthesis of polycrystalline cubic boron nitride with high mechanical properties using rod-shaped TiB<sub>2</sub> crystals as the binder. *Adv. Appl. Ceram.* 2017. Vol. 116, no. 8. P. 419–427.
9. Yuan Y., Cheng X., Chang R., Li T., Zang J., Wang Y., Yu Y., Lu J., Xu X. Reactive sintering cBN–Ti–Al composites by spark plasma sintering. *Diam. Relat. Mater.* 2016. Vol. 69. P. 138–143.
10. Zhao Y.C., Wang M.Z. Interaction of Al and cBN under high temperature and high pressure. *J. Inorg. Mater.* 2008. Vol. 23, no. 2. P. 253–256.
11. Song J., Ma K., Li Y., Zhang L., Schoenung J.M. High temperature microstructure and microhardness evolution in dense NiCrAlY bulk material fabricated by spark plasma sintering. *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. Vol. 528, nos. 7–8. P. 3210–3217.
12. Jiang W., Zhou W.N., Ling F. Sintered cBN–Ti–B–Al–SiC under high temperature and high pressure. *Superhard Mater. Eng.* 2010. Vol. 22, no. 4. P. 24–29.
13. Mo P.C., Wu Y., Yu W.L., Wang J.L., Zou Z.G., Zhong S.L. *In situ* synthesis of PcBN composites by cBN/Ti/Al/Si and the mechanical property of research. *Mater. Rep.* 2018. Vol. 32, no. 14. P. 30–34.
14. Bushlya V., Petrusha I., Gutnichenko O., Osipov O., M'Saoubi R., Turkevich V., Ståhl J.-E. Sintering of binderless cubic boron nitride and its modification by β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> additive for hard machining applications. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 86. art. 105100.
15. Mo P.C., Chen J.R., Chen C., Zhang Y., Luo Y., Wang W., Pan X., Zhang Z. Synthesis and performance study of polycrystalline cubic boron nitride using WC–B<sub>4</sub>C–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as the binder. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 4. P. 252–258.
16. Slipchenko K., Turkevich V., Petrusha I., Bushlya V., Ståhl J.-E. Superhard pcBN materials with chromium compounds as a binder. *Procedia Manuf.* 2018. Vol. 25. P. 322–329.

17. Slipchenko K.V., Petrusha I.A., Stratiichuk D.A., Turkevych V.Z. The influence of VC–Al additive on wear resistance of cBN-based composites. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 3. 226–227.
18. Kolabylina T., Bushlya V., Petrusha I., Johansson D., Turkevich V. Superhard pcBN tool materials with  $Ti_3SiC_2$  MAX-phase binder: Structure, properties, application. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 3. P. 155–165.
19. Osipov A.S., Klimczyk P., Cygan S., Melnichuk Iu.A., Petrusha I.A., Jaworska L. Composites of the cBN– $Si_3N_4$  system reinforced by SiCw for turning tools. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 1. P. 1–7.
20. Han J.L., Wu Y., Gu Q., Wu X.Z. Effect of cube boron nitride (CBN) on mechanical performance and  $Si_3N_4$  phase transformation of  $Si_3N_4$ /CBN composite. *J. Synth. Cryst.* 2015. Vol. 44, no. 5. P. 1254–1258.
21. Zou W.J., Hao D.H., Peng J., Dong Q.M., Li B.Y., Zhu J.F. Performance and tool application of polycrystalline boron nitride (PCBN)  $Si_3N_4$ –Ni bonds. *Diamond Abrasive Abrasion Eng.* 2011. Vol. 31, no. 3. P. 43–46, 50.
22. Chu D.L., Ma H., Wang J., Zhang Z., Shen W., Jia X. cBN– $Al_2O_3$  composites in NaCl environment under high pressure and high temperature conditions. *Ceram. Int.* 2019. Vol. 45, no. 14. P. 16792–16796.
23. Klimczyk P., Cura M.E., Vlaicu A.M., Mercioniu I., Wyzga P., Jaworska L., Hannula S.-P.  $Al_2O_3$ –cBN composites sintered by SPS and HPHT methods. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016. Vol. 36, no. 7. P. 1783–1789.
24. Zhang J.X., Xu Z.Y., Wang B., Qin Y., Yang J.F., Zhao Z.J., Hu W., Shi Z.W. Effect of nitrogen pressure on microstructure and mechanical properties of porous silicon nitride ceramics. *J. Inorg. Mater.* 2014. Vol. 29, no. 7. P. 701–705.

Надійшла до редакції 15.07.22

Після доопрацювання 10.08.22

Прийнята до опублікування 15.08.22