

Xiangxiang Yin^{1,2}, Peicheng Mo^{3,*}

¹Hydrochina Chengdu Engineering Corporation Limited,
Chengdu, P.R. China

²College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University,
Nanjing, P.R. China

³China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd.,
Guilin, P.R. China

*2393707540@qq.com

Вплив тиску спікання на властивості карбідних вставок PcBN

Синтезовано карбідні вставки PcBN (полікристалічний кубічний нітрид бору) з використанням cBN/Zr/Al в якості сировини за високих температури і тиску. Досліджено вплив тиску синтезу на міжфазну морфологію, зносостійкість, мікротвердість і площинність карбідної вставки PcBN. Результати випробувань показали, що зі збільшенням тиску синтезу міжфазний зв'язок композита стає більш цілним і однорідним, а міцність зчеплення між шаром cBN і підкладкою зі сплаву – вищою. Було покращено густину, мікротвердість і стійкість до стирання карбідної вставки PcBN. За надвисокого тиску відхилення товщини карбідної вставки PcBN поступово зменшується, розподіл товщини стає рівномірним, а площинність зразків кращою.

Ключові слова: високий тиск, полікристалічний кубічний нітрид бору, міжфазний зв'язок, зносостійкість.

ВСТУП

Карбідні вставки PcBN (полікристалічного кубічного нітриду бору) зазвичай синтезують шляхом спікання мікропорошку cBN, що містить зв'язуючу речовину, на поверхні тврдосплавної підкладки за високих температури і тиску. Карбідні вставки PcBN зазвичай використовують як матеріали для ріжучих інструментів. Інструменти з PcBN мають вищу твердість і зносостійкість, ніж керамічні та тврдосплавні інструменти, а також відмінну термостійкість, теплопровідність, хімічну стійкість, водночас мають нижчий коефіцієнт тертя. Він відіграє ключову роль в сучасному різанні і стає незамінним інструментальним матеріалом, особливо придатним для високошвидкісної обробки різних загартованих сталей, вибіленого чавуну та інших високотвердих чорних металів [1–4]. В даний час інструменти з PcBN частково замінили інструменти зі сплавів у багатьох галузях промисловості, таких як обробка блоків циліндрів двигунів в автомобільній промисловості, компресорів в індустрії кондиціонування повітря, поршневих колон у вугледобувній техніці та великих зубчастих коліс у вітроенергетиці [6–8].

В останні роки було досягнуто значного прогресу в дослідженні високоефективних матеріалів PcBN. Наприклад, в [9] синтезували карбідну вставку PcBN з мікротвердістю 30,7 ГПа і міцністю на вигин 972,3 МПа за високих температури (1550 °C) і тиску (5,5 ГПа) *in situ* з використанням Ti/Al/W як зв'язки. У [10] вивчали вплив співвідношення Al/AlN/Ni на PcBN за тиску

5,5 ГПа і температури 1550 °С. Результати показали, що відносна густина, міцність на вигин і в'язкість руйнування карбідної вставки PcBN, спеченої з 17 % зв'язки, становили 99,6 %, 661 МПа і 7,19 МПа·м^{1/2} відповідно. За вмісту зв'язуючого 13 % найкраща твердість і найкраще співвідношення абразивності композита становлять 47,92 ГПа і 2,99 відповідно. У [11] синтезували карбідну вставку PcBN з мікротвердістю 29,2 ГПа і міцністю на вигин 1022,5 МПа з використанням Si₃N₄/Ti як зв'язки за тиску 5,5 ГПа і температури 1600 °С.

Існує багато досліджень щодо типу зв'язки, співвідношення зв'язуючого матеріалу або температури спікання [12–18], але менше досліджень щодо впливу тиску синтезу на властивості карбідної вставки PcBN. Тиск спікання також є ключовим фактором, що впливає на властивості карбідної вставки PcBN. Тому дана робота фокусується на впливі тиску синтезу на мікроструктуру і властивості карбідної вставки PcBN.

Метою даної роботи було дослідження процесу створення вискоєфективних композитних інструментів з PcBN та сприяння розвитку цих технологій.

ЕКСПЕРИМЕНТИ

Підготовка зразків

Сировиною були такі матеріали: cBN (розмір частинок 1–3 мкм, чистота > 99,99 %, “Funike Superhard Materials Co.”, Китай), порошок Zr (розмір частинок 1–2 мкм, чистота > 99,9 %, “Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.”, Китай) та порошок Al (розмір частинок 1–3 мкм, чистота > 99,9 %, “Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.”, Китай), які змішували відповідно до даних, приведених в таблиці. Твердий сплав виробництва Zhuzhou Jinwei hard Material Co., Ltd., Китай. Сировину подрібнювали в планетарному кульовому млині (співвідношення порошок:куля:етанол дорівнював 1:3:1,5) зі швидкістю 300 об/хв протягом 1,5 год, потім виймали і сушили протягом 6 год, і, нарешті, очищали за високих температур у вакуумній трубчастій печі за температури 800 °С. Після цього порошок було зібрано в циліндричну молібденову чашку діаметром 35 мм, а потім в твердий блок, що складався з соляних трубок, вугільних пластівців, вугільних трубок і пірофіліту. Конкретний метод складання описано в [10, 19]. В експерименті в основному досліджено вплив різних тисків синтезу на властивості карбідної вставки PcBN. За умови повного врахування безпеки та стабільності синтезу під високим тиском, в цьому експерименті тиск було розділено на чотири градієнти, які становили 4,5, 5, 5,5 і 6 ГПа, і тільки найвище значення тиску було відрегульовано за різних умов випробувань.

Вміст сировини та параметри процесу спікання

Вміст, % (за масою)			Технологічні параметри синтезу		
cBN	Zr	Al	Температура T , °С	Час витримки t , с	Тиск p , ГПа
76	16	8	1600	700	4,5
					5
					5,5
					6

Характеристика зразків

Мікроструктуру зразків аналізували за допомогою растрового електронного мікроскопа (S4800-SEM, Японія), поверхню очищали ультразвуковими

хвилями протягом 10 хв перед спостереженням у растровому електронному мікроскопі. Фізичний фазовий аналіз здійснювали методом рентгенівської дифракції (XRD, D/MAX-2500, Японія). Зразки PcBN випробовували на ущільнення методом Архімеда. Площинність і внутрішні дефекти зразків були виявлені за допомогою ультразвукового сканувального мікроскопа (далі – С-сканування), модель D9500, виробництва SONOSCAN, США. Мікротвердість зразків визначали за допомогою мікротвердоміра Віккерса (модель МН-6) з навантаженням 198 Н (20 кгс) і часом витримки 15 с. Коефіцієнт абразивного зношування визначали після шліфування зразків PcBN на стандартному шліфувальному крузі з нітриду кремнію за допомогою вимірювача коефіцієнта абразивного зношування алмазного спеченого тіла JS2000 відповідно до стандарту JB/T3235-2013.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вплив тиску на фазу PcBN

На рис. 1 показано рентгенограму карбідної вставки PcBN за різних тисків синтезу. З рентгенограми видно, що фаза матеріалу PcBN після синтезу за високих температури і тиску складається з cBN, ZrB₂, ZrN і AlN. Зв'язуючи метали Al і Zr, додані в сировину, не було виявлено, що вказує на те, що вони повністю трансформувалися в комбіновані фази ZrB₂, ZrN і AlN.

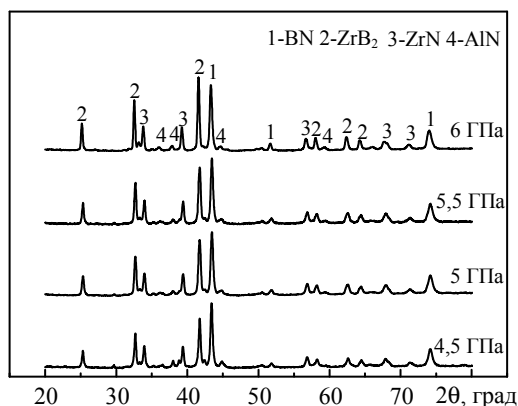
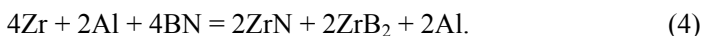


Рис. 1. Рентгенограма карбідної вставки PcBN за різних тисків синтезу.

Вважається, що в процесі спікання відбуваються такі реакції:



ZrB₂, ZrN і AlN, що утворюються в процесі реакції, мають дуже хороші механічні властивості. ZrB₂ має відмінні механічні властивості, високі температуру плавлення, твердість, стабільність і корозійну стійкість, хорошу електропровідність та інші переваги, серед керамічних матеріалів він належить до високоміцної, високотвердої кераміки; AlN – гексагональна кристалічна система, з коефіцієнтом теплового розширення $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, високою теплопро-

відністю, хорошою стійкістю до термічних ударів, водночас AlN може ефективно інгібувати фазовий перехід cBN; ZrN – тугоплавка сполука перехідного металу з високою температурою плавлення, хорошою хімічною стабільністю, зносостійкістю та стійкістю до високих температур. Всі три сполуки можуть бути використані як зв'язуючі речовини для поліпшення механічних властивостей карбідної вставки PcBN. Водночас на рентгеноструктурних діаграмах видно, що немає суттєвої різниці у фізичних фазах матеріалів PcBN за різних тисків синтезу, що вказує на те, що матеріали PcBN можна синтезувати, коли тиск досягає 4,5 ГПа.

Вплив тиску на мікроструктуру PcBN

На рис. 2 показано СЕМ-зображення перерізів композита PcBN за різних тисків синтезу. Композит складається з твёрдосплавного шару та шару cBN, і тому це дослідження зосереджено на аналізі та вивченні шару cBN та межі з'єднання з твёрдосплавним шаром. На рис. 2 видно, що за різних тисків синтезу не відбувається окремого з'єднання великої кількості cBN або зв'язуючого матеріалу, що вказує на те, що розподіл як cBN, так і зв'язки є відносно рівномірним. Однак за нижчих тисків синтезу 4,5 та 5 ГПа (рис. 2, а, б) між частинками всередині шару cBN все ще залишаються деякі проміжки та отвори (показано білою пунктирною рамкою на рис. 2, а, б), і ущільнення зразків є поганим. Зі збільшенням тиску синтезу внутрішні зазори та отвори поступово зникали, а ущільнення зразка ставало кращим. На рис. 2 також видно, що незважаючи на те, що руйнування зразків нерівномірні, можна побачити багато гладких поверхонь cBN, що вказує на те, що зразки мають переважно міжкристалічне руйнування. Водночас у зразку спостерігали явні

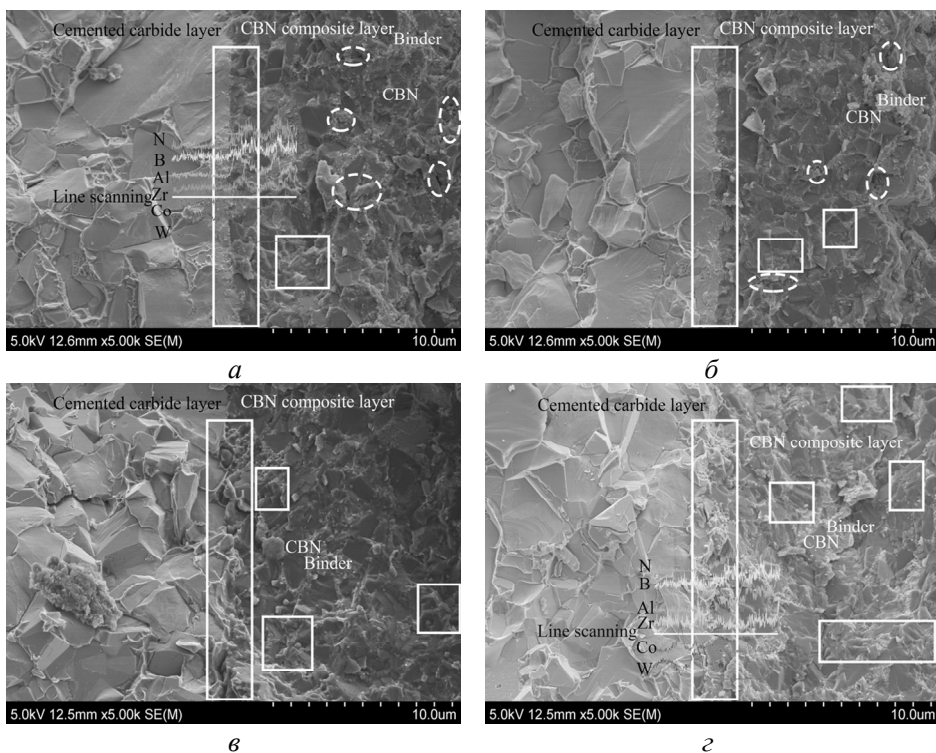


Рис. 2. СЕМ-зображення перерізів зразків за різних тисків синтезу: 4,5 (а), 5 (б), 5,5 (в), 6 (г) ГПа.

зубчасті зерна (показані у сірій прямокутній рамці), що вказує на те, що синтез PcBN супроводжувався трансгранулярним розломом. Зі збільшенням тиску спікання збільшився розподіл зубчастих зерен, це вказує на те, що підвищення тиску сприяє зміцненню з'єднання cBN і зв'язуючого матеріалу, що сприяє покращенню механічних властивостей зразка.

Міжфазний зв'язок зразків, синтезованих за тиску 4,5 та 6 ГПа, було проаналізовано методом лінійного сканування, результати якого показано на рис. 2, а, з. На рис. 1, а видно, що тільки елементи Co з шару твердого сплаву дифундували в шар cBN , тоді як елементи з шару cBN не дифундували в шар твердого сплаву. Зі збільшенням тиску спікання (див. рис. 2, в) спостерігали явища фрагментації частинок і взаємопроникнення елементів шару твердого сплаву і шару cBN , особливо на межі зчеплення (див. рис. 2, з), де взаємопроникнення елементів більш очевидне. З лінійного сканування видно, що елемент Co в шарі твердого сплаву і елемент Zr/Al в шарі cBN дифундували один в одного. Це робить організацію на межі розділу більш щільною і рівномірною, а міцність зчеплення шару cBN і підкладки сплаву вищою, це гарантує, що композитний матеріал PcBN не відпаде від шару композита під час використання його як матеріалу ріжучого інструменту. Отже, за високих температури і тиску твердий сплав на межі розділу твердого сплаву і шару композита cBN зазнає явища плавлення, і розплавлений Co буде проникати в шар композита cBN під дією поверхневого натягу. Крім того, елементи в шарі cBN і шарі твердого сплаву дифундують і проникають один в одного, а також реагують на межі з'єднання з утворенням стабільного металевого перехідного шару, який міцно з'єднує їх разом.

Вплив тиску на гуστину PcBN

Рис. 3 відображає вплив різних тисків синтезу на відносну гуστину карбідної вставки PcBN . У цьому експерименті температура синтезу становила $1600\text{ }^\circ\text{C}$, за якої аналізували вплив тиску на ущільнення шару композита cBN . Перед випробуванням твердосплавний шар зразків було зачищено на плоскошліфувальній машині, а потім методом Архімеда визначено пористість композитного шару cBN , результати наведено на рис. 3, де видно, що за тиску 4,5 ГПа відносна густина становила 98,8 %. В разі підвищення тиску відносна густина композитного шару cBN поступово зростає, і з підвищенням тиску до 6 ГПа становить 99,5 %, що є близьким до повністю щільного стану.

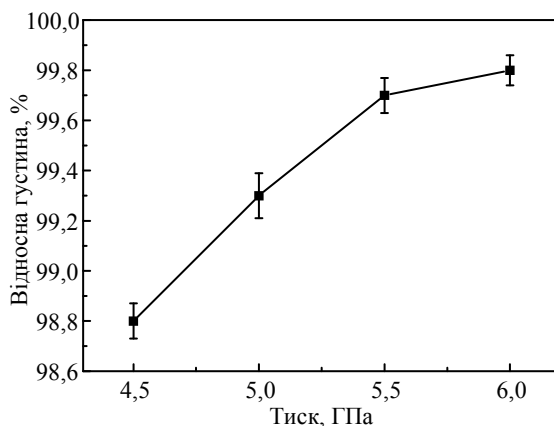


Рис. 3. Відносна густина карбідної вставки PcBN за різних тисків синтезу.

На рис. 2 видно, що за тиску 5 ГПа між частинками всередині шару cBN все ще залишаються проміжки та отвори. За тиску 6,5 ГПа внутрішні проміжки і отвори поступово зникають, і зразок має краще ущільнення. Проаналізовано, що відповідне збільшення тиску спікання може покращити ущільнення карбідної вставки PcBN. Це пов'язано з тим, що за вищих тисків, по-перше, частинки cBN зазнають інтенсивної фрагментації та перегрупування з ковзанням, а дрібні частинки cBN заповнюють проміжки між великими частинками cBN після фрагментації. По-друге, частинки зв'язуючого агента зазнають значного плавлення і течії та проникають в пори частинок cBN, що приводить до покращення ущільнення зразків.

Вплив тиску на механічні властивості PcBN

На рис. 4 показано вплив різних тисків синтезу на коефіцієнт абразивного зношування та мікротвердість карбідної вставки PcBN. На рис. 4 видно, що тиск синтезу має значний вплив на механічні властивості карбідної вставки PcBN, тенденції механічних властивостей карбідних пластин PcBN за різних тисків синтезу залишаються послідовними, тобто їхній коефіцієнт абразивного зношування і мікротвердість зростають зі збільшенням тиску. В разі підвищенні тиску з 5 до 5,5 ГПа коефіцієнт абразивного зношування і мікротвердість зразків збільшуються на 1519 і 1,1 ГПа відповідно, що є значним покращенням експлуатаційних характеристик. З подальшим збільшенням тиску з 5,5 до 6 ГПа коефіцієнт абразивного зношування і мікротвердість зразків композита PcBN збільшуються повільно, твердість зростає лише на 0,4 ГПа, а коефіцієнт абразивного зношування збільшується на 590.

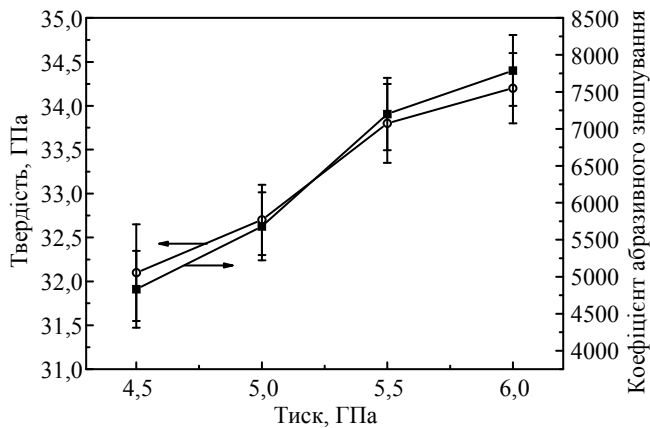


Рис. 4. Коефіцієнт абразивного зношування та мікротвердість карбідної вставки PcBN за різних тисків синтезу.

Густина матеріалу є одним з важливих факторів, що впливають на зносостійкість і мікротвердість. Під час процесу спікання, чим вищий тиск, тим більше стискаються внутрішні порожнини в зразку і тим щільнішим стає матеріал, а частинки зв'язуючого матеріалу здатні поступово проникати в міжчастинкові проміжки частинок cBN, в результаті чого пори, що утворюються в композитному шарі, поступово стають меншими. Чим ретельніше було проведено процес ущільнення перед спіканням зразка, тим щільнішим буде шар cBN у зразку. Водночас, коли температура синтезу досягає температури плавлення металевої зв'язки в процесі спікання, частинки зв'язки переходять в розплавлений стан і течуть всередину системи, в результаті чого

відбувається об'ємне стиснення шару PcBN , що супроводжується утворенням нової зв'язуючої фази. Розплавлена металева фаза і дрібні частинки cBN прослизують в пори між великими частинками, сприяють перегрупованню частинок cBN , що змушує шар PcBN ще більше стискатися, а чим вище тиск, тим більше усадка, і тим щільнішим є матеріал PcBN . Тому, коли тиск синтезу збільшується, не тільки матеріал PcBN може бути спечений більш ретельно, але і його густина, зносостійкість і мікротвердість будуть кращими.

Вплив тиску на площинність PcBN

Ультразвукове С-сканування використовували для внутрішнього неруйнівного контролю карбідної вставки PcBN , спеченої за різних тисків синтезу, для виявлення міжфазного зв'язку між композитним шаром і шаром сплаву, а також площинності композитного шару в карбідній вставці PcBN . Для того, щоб забезпечити відмінну продуктивність карбідної вставки PcBN , необхідно переконатися, що відхилення товщини полікристалічного шару cBN в карбідній вставці PcBN невелике, і водночас немає внутрішнього розшарування, немає тріщин і плям на поверхні і т. п. На рис. 5 показано схему детектування ультразвукового С-сканування, видно, що коли тиск становить 4,5–6 ГПа у карбідній вставці PcBN не відбувається міжфазного розшарування, немає тріщин, плям та інших явищ, це свідчить, що міжфазний зв'язок у карбідній вставці PcBN є хорошим. Водночас на рис. 5, *а*, *б* видно, що товщина полікристалічного шару cBN в карбідній вставці PcBN за зниженого тиску спікання не має очевидного правила зміни, і є багато видів відхилень кольору в

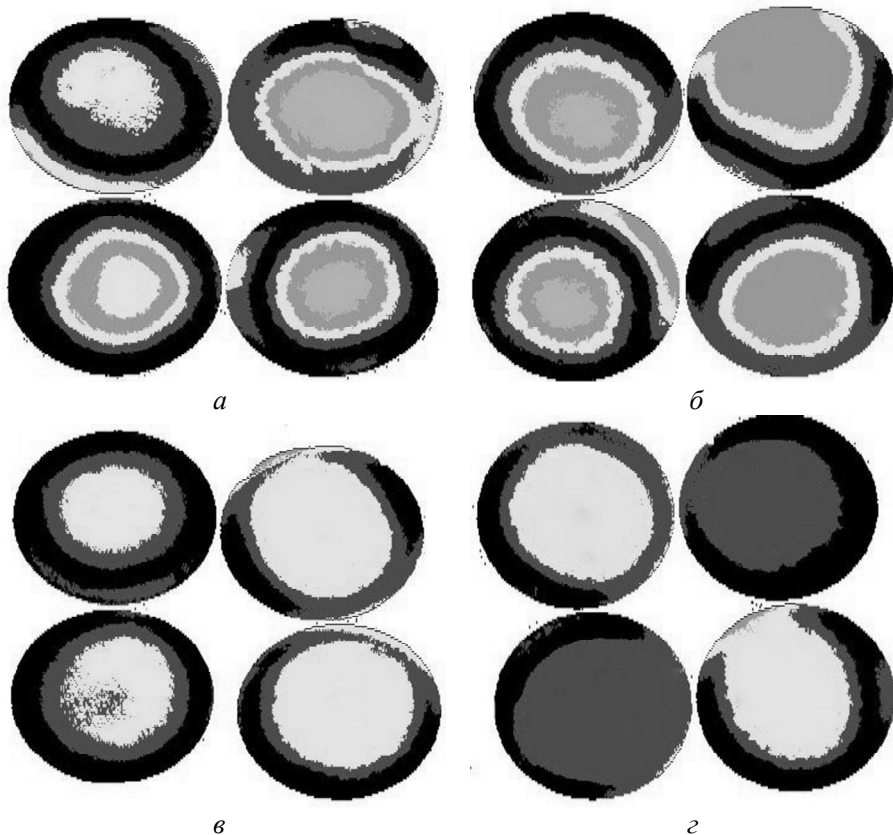


Рис. 5. Схема детектування ультразвукового С-сканування: 4,5 (*а*), 5 (*б*), 5,5 (*в*), 6 (*г*) ГПа.

зразках, і чим більше видів кольорів, тим гірша площинність зразків. Як видно на рис. 5, в, з, в разі збільшення тиску відхилення товщини полікристалічного шару cBN в карбідній вставці PcBN поступово зменшується, розподіл товщини поступово стає рівномірним, а площинність зразків покращується. Це може бути пов'язано зі збільшенням тиску, завдяки чому міцність зчеплення між шаром cBN і твёрдосплавною підкладкою поступово зростає, а градієнт тиску всередині всієї камери високого тиску зменшується, і камера поступово наближається до ізобаричного стану всередині. Тому, в цілому, площинність зразка збільшується зі збільшенням тиску спікання.

ВИСНОВКИ

За тиску 6 ГПа елемент Со в шарі твёрдого сплаву і елемент Zr/Al в шарі cBN дифундують один в одній, що приводить до більш щільної і однорідної організації міжфазного з'єднання і більш високої міцності з'єднання між шаром cBN і твёрдосплавною підкладкою.

Густина, мікротвердість і зносостійкість карбідної вставки PcBN підвищуються зі збільшенням тиску.

Зі збільшенням тиску відхилення товщини полікристалічного шару cBN у карбідній вставці PcBN поступово зменшується, розподіл товщини стає рівномірним, а площинність карбідної вставки PcBN покращується.

ФІНАНСУВАННЯ

Ця робота була підтримана програмами “Центральний уряд керує місцевими фондами науково-технічного розвитку” (Китай, ZY20220102) та “Інноваційна платформа та програма талантів”, Гуйлін, Китай (20220110-1).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

Xiangxiang Yin^{1, 2}, Peicheng Mo³

¹Hydrochina Chengdu Engineering Corporation Limited,
Chengdu, P.R. China

²College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University,
Nanjing, P.R. China

³China Nonferrous Metal (Guilin) Geology And Mining Co., Ltd.,
Guilin, P.R. China

Effect of sintering pressure on the properties of PcBN carbide inserts

PcBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) carbide insert were synthesized with cBN/Zr/Al as raw material under high temperature and pressure. The effects of synthesis pressure on the interfacial morphology, wear resistance, microhardness and flatness of PcBN carbide insert were investigated. The test results show that with the increase of synthesis pressure, the composite interfacial bond is more dense and homogeneous, and the bonding strength between the cBN layer and the alloy substrate is higher. Additionally, the density, microhardness and abrasion resistance of the PcBN carbide insert were improved. Meanwhile, under the ultra-high pressure, the thickness deviation of the PcBN carbide insert gradually decreases, the thickness distribution gradually becomes uniform, and the flatness of the samples gradually becomes better.

Keywords: high pressure, polycrystalline cubic boron nitride, interfacial bonding, wear resistance.

1. Fiorini P., Byrne G.. The influence of built-up layer formation on cutting performance of GG25 grey cast iron. *CIRP Ann.* 2016. Vol. 65, no. 1. P. 93–96.
2. Gutnichenko O., Bushlya V., Zhou J., Ståhl J.-E. Tool wear and machining dynamics when turning high chromium white cast iron with PcBN tools. *Wear.* 2017. Vol. 390. P. 253–269.
3. Ren Z., Qu S., Zhang Y., Sun F., Li X., Yang C. Machining performance of PCD and PcBN tools in dry turning titanium alloy Ti–6Al–0.6 Cr–0.4 Fe–0.4 Si–0.01 B. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2019. Vol. 102, no. 5. P. 2649–2661.
4. Kong F., Yi M., Xiao G., Chen Z., Zhang J., Chen H., Wang L., Wu J., Xu. C. Synthesis and characterization of cBN–Al₂O₃–Al cutting tool material by dual power spark plasma sintering. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2022. Vol. 103, art. 105765.
5. Su H., Liu P., Fu Y., Xu J. Tool life and surface integrity in high-speed milling of titanium alloy TA15 with PCD/PcBN tools. *Chinese J. Aeronaut.* 2012. Vol. 25, no. 5. P. 784–790.
6. Díaz-Álvarez J., Criado V., Miguélez H., Cantero J.L. PcBN performance in high speed finishing turning of inconel 718. *Metals.* 2018. Vol. 8, no. 8, art. 582.
7. Chen Z., Lin P.R., Zhou J., M'Saoubi R., Gustafsson D., Moverare J. Effect of machining parameters on cutting force and surface integrity when high-speed turning AD 730™ with PcBN tools. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* 2019. Vol. 100, no. 9. P. 2601–2615.
8. Kolabylina T., Bushlya V., Petrusha I., Johansson D., Ståhl J.-E., Turkevich V. Superhard PcBN tool materials with Ti₃SiC₂ MAX-phase binder: Structure, properties, application. *J. Superhard Mater.* 2017. Vol. 39, no. 3. P.155–165.
9. Li L., Zhao Y., 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.
10. Mo P.C., Chen C., Jia G., Chen J., Xie D., Xiao L., Pan X., Lin F. Effect of tungsten content on microstructure and mechanical properties of PcBN synthesized in cBN–Ti–Al–W system. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. Vol. 87, art. 105138.
11. Chen C., Mo P.C., Wang P., Wu Y., Zhong S.L., Li Z.K. Effect of titanium content on microstructure and mechanical properties of PcBN synthesized in cBNSi₃N₄–Ti system. *Material-wiss. Werkst.* 2020. Vol. 51. P. 391–399.
12. Ji H., Li Z., Sun K., Zhu Y. Assessment of the performance of TiB₂ nanoparticles doped cBN–TiN–Al–Co composites by high temperature high pressure sintering. *Mater. Chem. Phys.* 2019. Vol. 233. P. 46–51.
13. Shulzhenko A.A., Bozhko S.A., Sokolov A.N., Petrusha I.A., Bezhenar N.P., Ignatusha A.I. Synthesis, sintering and properties of cubic boron nitride. Kiev: Naukova dumka, 1993. 256 p.
14. Liu Y., Sun A.L., Zhong S.L., Mo P., Wu Y. Effect of Al Ti content on mechanical properties of in-situ synthesized PcBN composites. *Diam. Relat. Mater.* 2020. Vol. 109, art. 108068.
15. Wang S., Li Z., Zhu Y., Huang P., Wang W., Zhang X., Wei X. Enhanced mechanical properties of cBN–Al–Si₃N₄ composites by introducing diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 121, art. 108808.
16. Slipchenko K.V., Stratiichuk D.A., Turkevich V.Z., Bilyavyna N.M., Bushlya V.M., Ståhl J.-E. Sintering of BN based composites with ZrC and Al under high temperatures and pressures. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 4. P. 229–234.
17. Yang L., Yue Z., Gong J., Zhao X., Chu X. Compositions, mechanical properties and microstructures of cBN-based composites sintered with Al or TiC. *Adv. Appl. Ceram.* 2017. Vol. 116, no. 5. P. 254–259.
18. Mo P., Chen J., Chen C., Oin H., Xiao L. Effect of the TiC–TiB₂–AlN system on properties of PcBN tool material. *Ceram. Int.* 2023. Vol. 49, no. 14. P. 22637–22643.
19. 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. 1077414.

Надійшла до редакції 05.11.23

Після доопрацювання 11.12.23

Прийнята до опублікування 11.12.23