

15. Gurvich L. V., Veitz L. V., Medvedev V. A. (1981). *Termodinamicheskie svoistva individualnykh veshchestv [Thermodynamic properties of individual substances]*. Nauka. [in Russian].
16. Grigoriev V. A. & Zorin V. M. (Eds.). (1982). *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment]*. Energoizdat, 512 [in Russian].
17. Forcellese, A., Martarelli, M., & Simoncini M. (2015). Effect of process parameters on vertical forces and temperatures developed during friction stir welding of magnesium alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, DOI 10.1007/s00170-015-7957-6.
18. Sato, Y. S., Urat, a M., & Kokawa, H. (2002). Parameters Controlling Microstructure and Hardness during Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardenable Aluminum Alloy 6063. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33A, 625–635.

УДК 536.421.1:620.187:661.057.5

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-305-314

А.С. Манохін, Ю.О. Мельнійчук, кандидати технічних наук;
С.А. Клименко, член-кор. НАН України¹, **М.П. Семенько**, д-р фіз.-мат. наук²,
Г.А. Петасюк, д-р техн. наук; **А.Г. Филипович**;
С.Ан. Клименко, Ю.Е Рижов, кандидати технічних наук¹,

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, Україна, e-mail: dialab@ism.kiev.ua

²Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, пр. Академіка Глушкова, 4, 03127, м. Київ, Україна, e-mail: nbelyavina@bigmir.net

ІНСТРУМЕНТ, ВИГОТОВЛЕНИЙ ІЗ ПОРОШКІВ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ З CVD ПОКРИТТЯМ

З метою підвищення ефективності різальних інструментів з полікристалічного кубічного нітриду бору ($PcBN$) на вихідні мікропорошки, які використовувались при спіканні композитів, наносилось покриття на основі титану. При використанні CVD методу перенесення металу реалізовано із застосуванням йодотранспортної реакції, яка за високих температур забезпечує утворення на поверхнях зерен cBN продуктів реакції титану, що осаджується, з азотом N та бором B . Результати рентгенівського фазового аналізу вихідних порошків з добавкою алюмінію Al свідчать про те, що окрім кубічного нітриду бору (cBN), ці зразки містять продукти його реакційної взаємодії з титаном (фази TiN та TiB_2), а також інтерметалід $TiAl$. Композит, спечений із порошку з покриттям при тиску 7,7 ГПа і температурі 2300 °С в АВТ типу “тороїд”, має практично той самий фазовий склад, але параметр кристалічної ґратки нітриду TiN збільшується від 0,4244 нм до 0,4253 нм. Порівняльні дослідження ефективності інструментів, виготовлених з використанням порошку із покриттям, продемонстрували зниження інтенсивності їх зношування при високошвидкісному різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним стандартним композитом з $PcBN$.

Ключові слова: інструмент з $PcBN$, CVD покриття, порошки cBN , інтенсивність зношування, морфометрія.

Вступ

Експлуатаційні властивості різальних інструментів тісно пов'язані з фізико-механічними властивостями використаних робочих композитів, що обумовлено їх хімічним складом та особливостями структури. При цьому, управління параметрами структури з метою надання композитам оптимального за даних умов навантаження комплексу властивостей є складною задачею. Наприклад, підбір прекурсорів потрібного хімічного складу та зернистості, можливості механічних методів їх змішування далеко не завжди дозволяють отримувати потрібний розподіл компонентів-наповнювачів та елементів матриці, яка виконує роль зв'язки. Іншим аспектом цієї проблеми є те, що товщина прошарків матричних складових, що утворюються при спіканні сумішей, не може бути меншою, ніж розмір зерна відповідних компонентів. Значною проблемою є агломерація дрібнозернистих порошків карбідів та нітридів тугоплавких металів, які використовуються в якості керамічної зв'язки, з формуванням утворень розміром кілька десятків мікрометрів. Такі включення в структурі композиту здатні спричинити крихке руйнування різальної кромки оснащеного ним інструменту [1] під час його термобаричного навантаження в експлуатації.

Одним з підходів, що дозволяють досягти рівномірного розподілу складових компонентів в структурі матеріалів, а також регулювати товщину прошарків зв'язки, є попереднє нанесення на порошки покриттів, величина яких може варіюватися в широкому діапазоні – від десятків нанометрів до 1–2 мікрометрів. В процесі спікання композиту покриття на зернах основної компоненти відіграє роль зв'язки, що розподілена на міжзеренних границях наповнювача.

Огляд літературних джерел

Огляд результатів досліджень за напрямком створення композитів для різальних інструментів, при виготовленні яких методом НРНТ використовувались порошки КНБ з іонно-плазмовим напиленням, показав, що такий підхід дозволяє збільшити механічні властивості отриманих матеріалів. Зокрема $PcBN$, виготовлені корейськими дослідниками з використанням порошків cBN зернистістю 1–2 мкм з покриттям TiN товщиною 50 нм, характеризуються твердістю та міцністю при згинанні на 15% та 30% вищими у порівнянні з композитами аналогічного складу без нітридних плівок на поверхнях вихідних порошків cBN . При порівнянні структури композитів відзначається неоднорідність розподілу порошку в результаті механічного змішування, а частинки TiN існують переважно у вигляді нерівномірно розподілених по об'єму агломератів. Мікроструктура ж композиту з порошків, на поверхнях яких є покриття, демонструє, що частинки cBN вбудовані у безперервній фазі TiN [2].

В ІНМ одержано надтвердий матеріал $PcBN$ з однорідною структурою шляхом спікання за високого тиску порошків cBN , попередньо покритих титаном [3]. Результати рентгеноструктурного дослідження порошків з покриттям показали, що їх фазовий склад складають cBN , TiN і TiB_2 . Це свідчить про те, що при осадженні відбувається хімічна взаємодія титану з нітридом бору. Згідно з даними розрахунків, товщина покриття на порошках марки КМ3/2 становила 0,2 мкм, а на порошках марки КМ7/5 – від 0,23 до 1,06 мкм. Оптимальні характеристики продемонстрували вихідні порошки КМ 3/2 з покриттям товщиною 0,20 мкм і КМ 7/5 з покриттям товщиною 0,23 мкм. У разі використання порошків з покриттями більшої товщини (0,6–1 мкм) зразки після спікання мали тріщини. Особливість структури нових композитів – це відсутність контактів безпосередньо між зернами cBN . В таких матеріалах частинки розділені шарами зв'язки зі сполук TiN і TiB_2 субмікронного розміру. Твердість отриманого композиту становить 30 ГПа. Результати випробування лезового інструменту з нового матеріалу при обробці сталі ХВГ твердістю HRC 58–60 за

режимів тонкого точіння свідчать, що його зносостійкість на 25–33 % вища, ніж зносостійкість інструменту, оснащеного PcBN марки киборит. До недоліків даної методики випробування потрібно віднести низьку швидкість обробки, яка не дозволила в повній мірі оцінити характеристики інструментів з нових матеріалів, призначених для використання в діапазоні високошвидкісного (150–200 м/хв) різання.

В проведеному авторами [4] дослідженні cBN з покриттям TiN був успішно синтезований методом рідкофазного осадження з використанням TiF₄ як джерела Ti. Кристалічна фаза шару покриття TiO_x була перетворена в Ti₄O₇ і TiN за допомогою спікання у відновлювальній атмосфері у вакуумній печі. Після цього покриття було повністю перетворено на фазу TiN при температурі спікання 1200 °C. Шари покриття мали приблизно однакову товщину 20–40 нм незалежно від температури спікання. Різальні інструменти з PcBN, виготовлені з використанням порошків cBN з покриттям з TiN, показали за даними авторів дослідження підвищену зносостійкість у важких умовах різання, забезпечуючи середній шлях різання 10766 м і ширину фаски зносу по задній поверхні 0,3 мм за 108 хв роботи. Така зносостійкість приблизно вчетверо вище, ніж у різального інструменту, оснащеного композитом, виготовленим з використанням порошку cBN без покриття.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що в якості покриття для порошків cBN використовуються Ti, TiN, TiB₂, CeO [5-10].

Так, з метою підвищення однорідності мікроструктури та збільшення міжфазної площі зерен в роботі [5] порошки cBN були покриті нанокристалічним TiN за допомогою золь-гель методу, який не вимагав ні необхідності коригування рН, ні використання поверхнево-активних речовин або добавок. На поверхні зерен cBN за рахунок реакцій гідролізу та конденсації ізопропоксиду титану (IV) утворювався однорідний шар аморфного оксиду титану нанометрової товщини. Аморфне покриття на порошку cBN було азотовано до отримання кристалічного покриття TiN шляхом обробки газоподібним NH₃ при 900 °C. Після азотування аморфний шар повністю перетворився на шар з нанокристалічних частинок TiN, які рівномірно покривали поверхню cBN. Даний підхід використано для створення композиту авторами [2]. В роботі [3] покриття на вихідні порошки наносили CVD методом [6] із використанням газотранспортної реакції при температурі 1200–1300 К. Транспортними агентами виступали іодиди титану. Безпосереднє покриття порошків cBN нітридом титану здійснювалось в [7] методом атомно-шарового осадження (ALD). Дослідження показали, що шар TiN реагує в аргоні Ar при T ≥ 1200 °C з cBN і утворює пористий TiB₂ шар. Реакція в азоті не відбувається до температури 1600 °C. Тим не менш, тонкі покриття 20 і 50 нм зазнають рекристалізації.

В роботі [8] запропоновано використовувати металізоване покриття на керамічних частинках перед спіканням. Покриття на порошках cBN та алмазу було отримано осадженням розплавленої солі Ti. Отримані порошки піддавалися термічній обробці для перетворення шару покриття Ti в TiN на поверхні cBN і TiC на поверхні частинок алмазу, а також для видалення сполук титану нижчої валентності, які забруднюють шари покриття. Дані порошки в подальшому використовувались для спікання композитів за стандартних умов. В роботі [9] запропоновано використовувати порошки cBN з шаром покриття SiO₂ товщиною приблизно 50 нм, нанесеного методом ротаційного хімічного осадження із парової фази (RCVD). Автори [10] показали, що рівномірне та щільне покриття CeO₂ на зернах cBN сприяє змочуванню керамічними зв'язками. Крім того, отримані композити на основі cBN з склоподібним покриттям CeO₂ показали на 9,16 % вищу міцність при згинанні, що пов'язано із стабільним та надійним хімічним зв'язком, який виник через комбінацію зв'язків Ce–O–Al та N–Si у PcBN, вихідні частинки яких мають покриття CeO₂.

Методика досліджень

З метою нанесення покриття на мікропорошки cBN в даному дослідженні було використано метод CVD, який дозволяє отримати плівки з рівномірною товщиною на поверхнях складної форми. Газотранспортна реакція відбувалась при високих температурах (1200–1300 К). Перенесення металу реалізовано з використанням йодотранспортної реакції, яка за високих температур забезпечує утворення на поверхнях зерен cBN продуктів реакції титану, що осаджується, з азотом N та бором B [5]. Вміст титану на поверхнях частинок порошку з покриттям становив 5 мас.%. Покриття наносилось на суміш мікропорошків cBN марки КМ зернистістю 2/1 та 14/10 та 1,5 % алюмінію Al зернистістю 28/20.

Спінання композитів із порошків з покриттям відбувалось при тиску 7,7 ГПа і температурі 2300 °С в апараті високого тиску типу “тороїд” (ІНМ НАНУ).

Для оцінки морфометричних параметрів зерен cBN та їх складу використано вдосконалений метод ідентифікації та кількісної оцінки геометричної форми проекції зерен абразивного порошку з використанням приладу Dialnspect.OSM фірми Vollstaedt Diamant GmnH з використанням системно-аналогового підходу [11].

Рентгенівські дослідження вихідних порошків та створених композитів PcBN проводили за дифрактограмами, отриманими в дискретному режимі на апараті ДРОН-4 (випромінювання $\text{CuK}\alpha$, кутовий інтервал зйомки 20-84°, крок сканування 0,050, експозиція в кожній точці 3 с). Первинну обробку рентгенівських даних виконували методом повнопрофільного аналізу. Для проведення якісного та кількісного фазового аналізу, уточнення параметрів кристалічних ґраток ідентифікованих фазових складових, а також для визначення параметрів реальної структури фаз (розміру блоків когерентного розсіювання, мікрдеформації кристалічної ґратки, напружень I роду) використовували оригінальний програмний пакет [12], який включає до себе повний комплекс процедур Рітвельда.

Експерименти з визначення зносостійкості різального інструменту виконано на токарному верстаті ФТ11. Оброблювались заготовки із загартованої сталі ХВГ твердістю 60–62 та 56–58 HRC. Обробку виконували інструментами, оснащеними PcBN торгової марки борсиніт ($HK = 36,2 \pm 2,6$ GPa, $K_{1C} = 11,7 \pm 1,5$ МПа·м^{1/2}) та експериментальним композитом, при виготовленні якого використано порошки з покриттям. Використано державку TRDNN 2525M07 з різальними пластинами RNMN 07T300T. Геометричні параметри інструмента: передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$. Тип обробки – повздовжнє точіння без ударів, довжина шляху різання – 300 м. Режими різання були наступними: $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм; $v = 140$ та 220 м/хв. Стан різального інструменту оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа зі збільшенням $\times 100$. Зносостійкість інструменту оцінювалася за величиною швидкості зношування по задній поверхні.

Результати досліджень

Результати рентгенівського фазового аналізу дифрактограм вихідних порошків свідчать про те, що окрім кубічного нітриду бору cBN, досліджувані зразки містять продукти його хімічної взаємодії з титаном (фази TiN та TiB₂), а також інтерметалід TiAl (рис. 1).

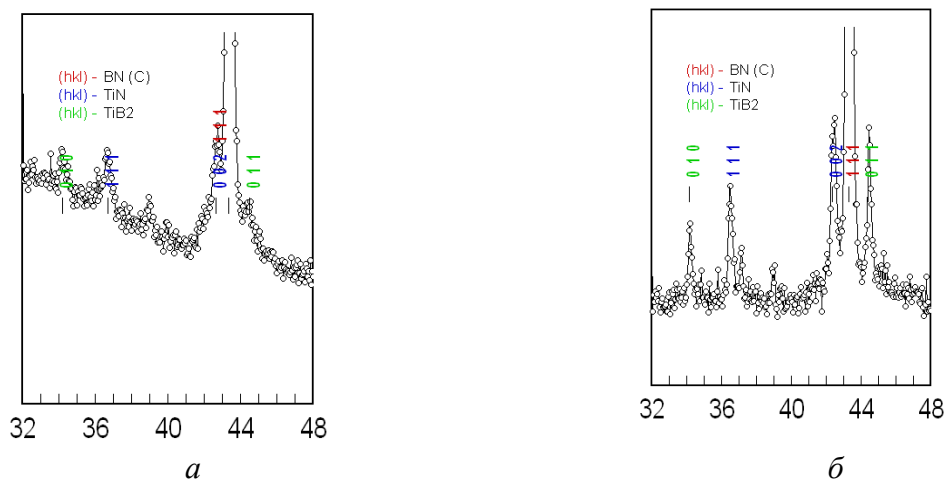


Рис. 1. Фрагменти дифрактограм порошку (а) та компакту (б)

Спикання цього порошку при температурі 2300 °С та тиску 7 ГПа не призводить до суттєвих змін фазового складу (табл. 1), проте параметр кристалічної ґратки нітриду TiN збільшується від 0,4244 нм до 0,4253 нм, а дифрактограма спеченого зразка окрім відбиттів, притаманних зазначеним вище фазам, містить також ще одне відбиття, належність якого до будь-якої з можливих фаз-продуктів взаємодії компонентів вихідної суміші не встановлена.

Таблиця 1. Фазовий склад (ваг.%) досліджених зразків

Зразок	Фазовий склад
Порошок	cBN (96) + TiN (2) + TiB ₂ (1) + TiAl (1)
Компакт	cBN (96) + TiN (2) + TiB ₂ (1) + TiAl (1)

При переході від порошку до компакту форма дифракційних піків дещо змінюється, що пов'язано із напруженнями I або/та II роду, які притаманні досліджуваним зразкам. Отримані результати визначення параметрів мікронапружень II роду (розмірів блоків когерентного розсіювання та мікродоформатії ґратки) та макронапружень I роду (розрахунок за формулою $\frac{E}{\mu} \cdot \frac{\Delta}{a_0}$ при E=256 ГПа, $\mu=20$ для фази TiN) наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Параметри структури фаз cBN та TiN

Зразок	cBN			TiN			
	Параметр ґратки, нм	Мікронапруження II роду		Параметр ґратки, нм	Мікронапруження II роду		Макронапруження I роду, ГПа
		розмір блоків, нм	Деформація ґратки, %		розмір блоків, нм	деформація ґратки, %	
Порошок	0,36161(2)	56(7)	0,11(1)	0,4244(1)	>100	-	-0,05-0,04
Компакт	0,36162(5)	27(1)	0,24(2)	0,42535(3)	20(3)	0,47(1)	- 0,02

Аналіз результатів рентгенівського структурного аналізу дає підстави припустити, що при осадженні титану на поверхню частинок порошку cBN формуються окремі конгломерати продуктів реакції з фаз TiN, TiB₂ та TiAl. Судячи з результатів, отриманих для TiN, мікронапруження в окремих зернах утворюваного нітриду титану відсутні, а поверхневий натяг сформованої при цьому плівки існує, але визначеного напрямку не має, про що свідчить велика похибка в визначенні параметрів ґратки TiN та значна дисперсія значень, розрахованих за різними відбиттями значень напружень I роду (табл. 2).

При компактуванні зазначеного порошку розмір кристалітів фаз у межах окремих зерен зменшується, а деформація кристалічної ґратки зростає. Вочевидь, також відбувається пересичення нітриду титану азотом (суттєве збільшення параметру його ґратки), а сформована при цьому плівка суто зорієнтована в напрямку (022).

Результати морфометричної діагностики порошку КМ 14/10 виявили розподіл фракцій мікропорошків за розмірами (гістограма на рис. 2, а), форми їх проєкцій (рис. 2, б) та такі параметри як середні значення площі поверхні зерен та їх об'єм (табл. 3).

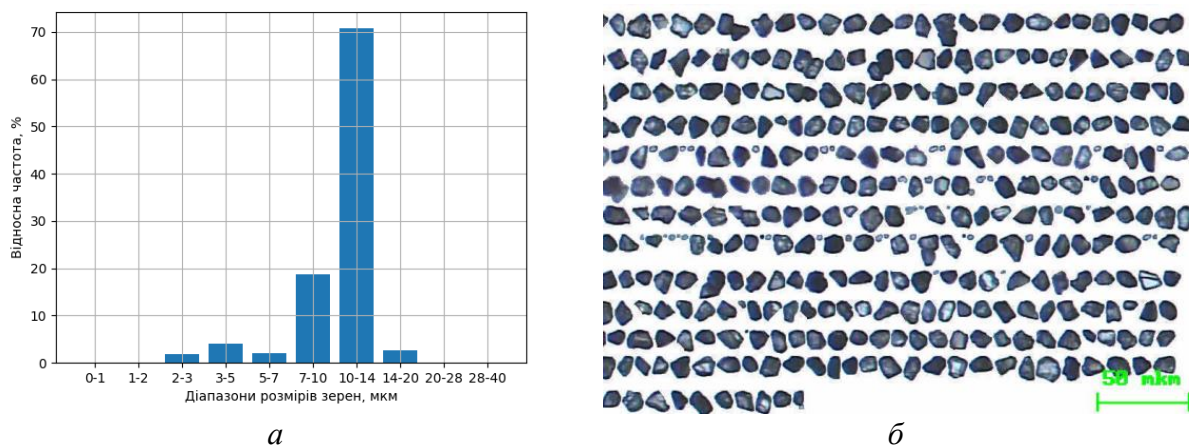
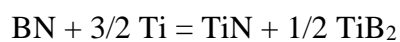


Рис. 2. Гістограма розподілу за розміром (а) та зображення проєкцій зерен (б) мікропорошків 14/10

Таблиця 3. Морфометричні параметри мікропорошків

Тип мікропорошку	Середній об'єм зерен V, мкм ³	Середня площа поверхні зерен S _{пов} , мкм ²	Число зерен в одному караті, млн. шт.	Середня площа проєкції зерна, мкм ²	Середній периметр проєкції зерна, мкм
КМ 14/10	388,56	299,78	147,480	81,39	35,37

Аналіз результатів дослідження поверхні порошків cBN з покриттям, виконаного рентгенівським дифракційним методом, продемонстрував, що їх фазовий склад характеризується наявністю cBN, TiN та TiB₂. Вказане пояснюється тим, що під час нанесення покриттів спостерігається реакція нітриду бору з титаном, який характеризується великою хімічною активністю, що обумовлює протікання реакції [3]:



Товщину шару покриття доцільно оцінити аналітичним методом, оскільки експериментальний підхід пов'язаний зі значними труднощами та вимагає використання

обладнання для іонного травлення. Було проведено відповідні розрахунки, які враховують дані щодо реальної площі поверхні частинок порошку, отримані за допомогою морфометричних вимірювань. Результати розрахунків товщини покриття Δh_c на зернах мікропорошку КМ 14/10 показали, що для вмісту титану 5% товщина покриття складає 0,32 мкм.

Експериментальні дослідження кінетики та морфології зношування інструменту, отриманого з використанням порошоків з покриттям та стандартних пластин з PсBN, показали, що морфологія зношених поверхонь обох інструментів, на відміну від кількісних параметрів зносу, однотипна (рис. 3) і характеризується наявністю фасок зносу на задніх та лунок на передніх поверхнях інструментів. Кількісна характеристика кінетики їх зношування приведена на діаграмі (рис. 4), яка демонструє ефект впливу швидкості різання на інтенсивність зношування досліджуваних композитів.

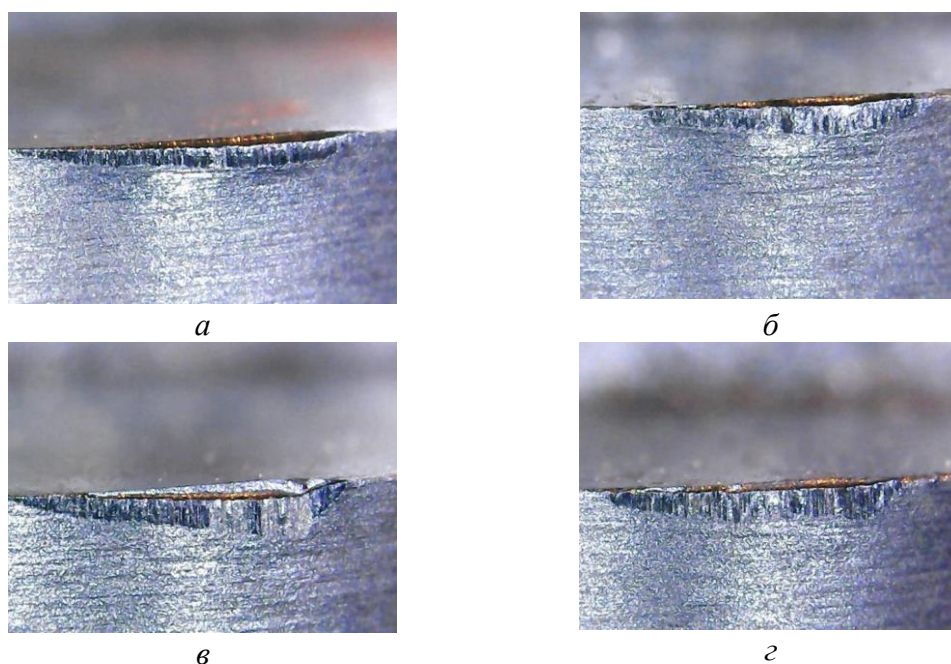


Рис. 3. Зовнішній вигляд зношених ділянок інструменту: а – борсиніт; б – PсBN(c) ($v = 140$ м/хв); в – борсиніт; г – PсBN(c) ($v = 220$ м/хв)

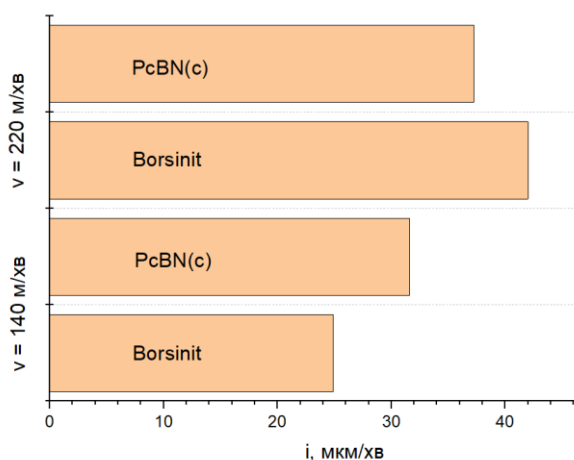


Рис. 4. Швидкість зношування інструментів при швидкостях різання $v = 140$ м/хв та $v = 220$ м/хв

В діапазоні середніх швидкостей різання (140 м/хв) інструмент з PcBN борсиніт характеризується меншою швидкістю зношування (25 мкм/хв) у порівнянні з інструментом (32 мкм/хв) із композиту, виготовленого з порошку із покриттям (PcBN(c)), що пов'язано з його більшою твердістю і, відповідно, більш високою здатністю до опору абразивно-механічному впливу при зношуванні. Зі збільшенням швидкості до 220 м/хв інтенсивність зношування інструментів з обома композитами зростає, але в даному випадку меншою величиною швидкості зношування характеризується інструмент, оснащений PcBN(c), – 42 та 37 мкм/хв відповідно. Така закономірність пов'язана зі зростанням ефективності застосування інструменту, виготовленого із використанням порошоків з покриттям, при збільшенні швидкості різання, і у цілому характерна для інструментів з PcBN зі значним (30-40%) вмістом керамічних добавок типу TiN, TiC, TiCN. В даному випадку аналогічний ефект спостерігається при значно меншому вмісті складової TiN, яка утворюється при використанні Ti в кількості 5% від маси порошку cBN в процесі CVD нанесення покриття, що свідчить про збереження високих механічних властивостей надтвердих композитів, виготовлених за даним методом.

Висновки

Результати рентгенівського фазового аналізу дифрактограм вихідних порошоків свідчать про те, що окрім кубічного нітриду бору cBN, ці зразки містять продукти його реакційної взаємодії з титаном (фази TiN та TiB₂), а також інтерметалід TiAl.

Результати розрахунків товщини покриття на зернах мікропорошку КМ 14/10 з урахуванням даних щодо хімічної реакції, яка відбувається при нанесенні покриття методом CVD, та результатів визначення морфометрії порошку показали, що для кількості титану 5% відносно маси порошку товщина покриття складає 0,32 мкм.

Використання у різальному інструменті композитів, отриманих з вихідних порошоків з покриттям, дозволяє знизити швидкість зношування інструменту при високошвидкісному (220 м/хв) різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним стандартним композитом PcBN. В умовах переважно абразивно-механічного зношування при швидкості 140 м/хв ефективність інструменту з новим композитом низька.

**A. Manohin, Yu. Melniichuk, S.A. Klymenko¹, M. Semenko², G. Petasyuk,
A. Fylypovych, S. Klymenko, Yu. Ryzhov¹**

¹V.N. Bakul Institute for superhard materials of NAS of Ukraine, Kyiv

²Taras Shevchenko National University of Kyiv

TOOL MADE OF CUBIC BORON NITRIDE POWDER WITH CVD COATING

In order to increase the effectiveness of PcBN cutting tools, titanium coatings were deposited to the micropowders used in composite sintering. When using the CVD method, metal transport is implemented using the iodine transport reaction, which at high temperatures ensures the formation of titanium reaction products precipitated with N and B on the surfaces of cBN grains. The results of the X-ray phase analysis of the diffractograms of the powders indicate that in addition to cubic boron nitride these samples contain the products of its reaction with titanium (TiN and TiB₂ phases), as well as the intermetallic TiAl. The sintering of composites from coated powders at a pressure of 7.7 GPa and a temperature of 2300 °C in a toroid-type high-pressure apparatus does not lead to significant changes in the phase composition, but the crystal lattice parameter of TiN nitride increases from 0.4244 nm to 0.4253 nm. Comparative studies of the new composite effectiveness demonstrated a reduction in its wear intensity during high-speed cutting of hardened steel in comparison with a standard PcBN composite.

Key words: PcBN tool, CVD coating, cBN powders, wear intensity, morphometry.

Література

1. Шульженко А. А., Беженар Н. П., Ткач С. В. и др. Формирование структуры и твердость композитов кубического нитрида бора при реакционном спекании на твердосплавной подложке. *Сверхтвердые матер.* 2005. № 3. С. 3–13.
2. Malik A. U., Park H. S., Lee D. J., Ryu H. J., Hong S. H. Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 552. P. 151–156.
3. Беженар М. П., Коновал С. М., Гарбуз Т. О., Весна В. Т., Ткач В. М., Романенко Я. М. Одержання надтвердих композитів з однорідною структурою при спіканні в умовах високого тиску порошків cBN, вкритих титаном. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 18. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, НАН Украины, 2015. С. 360–365.
4. Lee Y.-S., Kang T.-W., Kim S.-W., Lee Y.-J., Shin D.-W., Kim J.-H., Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 631. P. 127758.
5. Umer, M. A., Park, H. S., Lee, D. J., Ryu, H. J., Hong, S. H. (). A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509, N 41. P. 9764–9769.
6. Весна В. Т., Маслов В. П. Взаимодействие кубического нитрида бора с иодидами титана. *Порошковая металлургия*. 1984. № 10. С. 57–59.
7. Hering, B.; Wolfrum, A.-K.; Gestrich, T.; Herrmann, M. Thermal Stability of TiN Coated cubic Boron Nitride Powder. *Materials*. 2021. Vol. 14, P. 1642. DOI: 10.3390/ma14071642].
8. Daoush, W. M., Park, H. S., Hong, S. H. Fabrication of TiN/cBN and TiC/diamond coated particles by titanium deposition process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol.24, N11. P. 3562–3570.
9. Kitiwan, M., Ito, A., Zhang, J., & Goto, T. Densification and mechanical properties of cBN–TiN–TiB₂ composites prepared by spark plasma sintering of SiO₂-coated cBN powder. *Journal of the European Ceramic Society*. 2014. Vol.34, N. 15. P. 3619–3626.
10. Shi, J., He, F., Xie, J., Liu, X., & Yang, H. Preparation and characterization of vitrified CeO₂ coated cBN composites. *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. – P. 19704–19709.
11. Petasyuk G.A. A system–analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, N 4. P. 277–287. DOI: 10.3103/S1063457616040092.
12. Dashevskiy M., Boshko O., Nakonechna O., Belyavina N. Phase transformations in equiatomic Y–Cu powder mixture at mechanical milling. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, N 4. P. 541–552.

Надійшла 12.09.23

References

1. Shulzhenko, A. A., Bezhenar, N. P., Tkach, S. V. Et al. (2005). Formirovanie struktury i tverdost kompozitov kubicheskoho nitrída bora pri reaktсионном spekanii na tverdospлавnoi podlozhke [Structure formation and hardness of cubic boron nitride composites by reaction sintering on a carbide substrate]. *Sverkhtverdye materialy . Superhard materials*, 3, 3–13 [in Russian].

2. Malik, A. U., Park, H. S., Dong, J. L., et al. (2012). Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Materials Science and Engineering: A*, 552, 151–156.
3. Bezhenar, M. P., Konoval, S. M., Harbuz, T. O., et al. 2015. Oderzhannia nadtverdykh kompozytiv z odnoridnoiu strukturoiu pry spikanni v umovakh vysokoho tysku poroshkiv cBN, vkrytykh tytanom [Obtaining superhard composites with a homogeneous structure by sintering titanium-coated cBN powders under high pressure]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologii ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (18nd Issue, p. 360–365). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
4. Lee, Y.-S., Kang, T.-W., Kim, S.-W., et al. (2021). Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 631, 127758.
5. Umer, M. A., Park, H. S., Lee, D. J., et al. (2011). A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(41), 9764–9769.
6. Vesna, V. T., & Maslov, V. P. (1984). Vzaimodeistvie kubicheskoho nitrida bora s yodidami titana [Interaction of cubic boron nitride with titanium iodides]. *Poroshkovaia metallurhiia – Powder metallurgy*, 10, 57–59. [in Russian].
7. Hering, B.; Wolfrum, A.-K.; Gestrich, T., & Herrmann, M. (2021). Thermal Stability of TiN Coated cubic Boron Nitride Powder. *Materials*, 14, 1642.
8. Daoush, W. M., Park, H. S., & Hong, S. H. (2014). Fabrication of TiN/cBN and TiC/diamond coated particles by titanium deposition process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(11), 3562–3570.
9. Kitiwan, M., Ito, A., Zhang, J., & Goto, T. (2014). Densification and mechanical properties of cBN–TiN–TiB₂ composites prepared by spark plasma sintering of SiO₂-coated cBN powder. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(15), 3619–3626.
10. Shi, J., He, F., Xie, J., Liu, X., & Yang, H. (2019). Preparation and characterization of vitrified CeO₂ coated cBN composites. *Ceramics International*, 45, 19704–19709.
11. Petasyuk, G.A. A (2016). System–analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater*, 38(4) 277–287.
12. Dashevskiy, M., Boshko, O., Nakonechna, O., & Belyavina, N. (2017). Phase transformations in equiatomic Y-Cu powder mixture at mechanical milling. *Metallofizika Noveishie Tekhnologii – Metallophysics and advanced technologies*, 39(4), 541–552.