

УДК 661.657.5; 621.762.5

**М. П. Беженар**, д-р техн. наук; **Я. М. Романенко**, інж.;  
**Т. О. Гарбуз**, **С. М. Коновал**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська,  
2, 04074, м. Київ, e-mail bezhenar@ukr.net*

## **ДВОШАРОВІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЛЕЗОВОМУ ІНСТРУМЕНТІ**

*В роботі наведено результати дослідження структури і властивостей PCBN композитів, отриманих при реакційному спіканні в умовах високого тиску і температури порошків cBN з Al, Ti, Co і Ni на підкладці з твердого сплаву BK15. Окремо досліджували структуру і властивості модельних двошарових композитів на підкладках з TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>. Використовували апарати високого тиску типу «ковадло з заглибленням». Отримані зразки після механічної обробки вільним і зв'язаним абразивом мали циліндричну форму діаметром до 15 мм і висотою до 5 мм. Фазовий склад композитів визначали методом рентгеноструктурного аналізу. Твердість визначали при використанні піраміди Кнупа, навантаження на індентор 10 Н, електроопір - з використанням цифрового омметра. Працездатність різців з двошарових надтвердих композитів досліджували на автоматизованому стенді на базі токарного верстата мод. ІК62 при чистовому точінні сталі ХВГ НРС 58-60.*

***Ключові слова:** кубічний нітрид бору, надтвердий композит, двошарові пластини, твердість, різальні властивості, лезовий інструмент.*

Композити кубічного нітриду бору за основним найбільш поширеним призначенням являють собою матеріали для лезового інструменту (різальні пластини класу PCBN. На даний час відомо більше 200 марок PCBN матеріалів, які випускаються провідними світовими фірмами, розробниками надтвердих матеріалів. В номенклатурі інструментальних PCBN матеріалів відомих світових фірм ПАР, США, Японії, Китаю є різальні непереточувані одношарові пластини і двошарові пластини із шаром cBN на твердосплавній підкладці. Діаметр двошарових пластин – до 50,8 мм, загальна товщина – до 6,35 мм, товщина шару cBN – до 1,6 мм. Пластини на твердосплавній підкладці зазвичай піддають лазерній порізці для отримання заготовок, з яких паянням з подальшим заточуванням виготовляють інструменти складного профілю.

В [1] проаналізовано основні вимоги до характеристик PCBN відповідно їх призначенню, які виходять з Міжнародного стандарту специфікації і застосування твердих інструментальних матеріалів ISO513:2001. Серед інших — вимоги до матеріалу інструмента – його складу, структури, фізико-механічних і технологічних властивостей.

В ІНМ ім. В. М. Бакуля створено наукову і технологічну базу для розробки і виробництва при високому тиску надтвердих PCBN композитів у вигляді пластин, що складаються з робочого шару на основі cBN і твердосплавної підкладки, міцне з'єднання яких здійснюється в процесі спікання в апаратах високого тиску (АВТ).

У даній роботі наведено результати дослідження структури і властивостей PCBN композитів, отриманих при реакційному спіканні в умовах високого тиску (4,2 або 7,7 ГПа) і температури (1750–2300 К) порошків cBN з Al, Ti, Co і Ni на підкладці з твердого сплаву BK15 а також на підкладках з TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>. Використовували апарати високого тиску типу

«ковадло з заглибленням». Отримані зразки після механічної обробки вільним і зв'язаним абразивом мали циліндричну форму з розмірами до 15 мм по діаметру і до 5 мм по висоті. Фазовий склад композитів визначали методом рентгеноструктурного аналізу (ДРОН-3, CuK $\alpha$  - випромінювання). Твердість визначали на приладі ПМТ-3 при використанні піраміди Кнупа, навантаження на індентор 10 Н, електроопір – з використанням цифрового омметра Щ-34, діапазон вимірювань якого 10<sup>-3</sup>–10<sup>9</sup> Ом. Працездатність різців з двошарових надтвердих композитів досліджували на автоматизованому стенді на базі токарного верстата мод. 1К62 при чистовому точінні сталі ХВГ НRC 58–60.

В першій серії дослідів в АВТ тороїд-20 спікали шихту складу 90% cBN, 10% Al на пресованих з підкладках з TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>. Паралельно на цих же підкладках спікали порошки cBN без добавок. Температура спікання 2300 К, тиск – 7,7 ГПа. Розміри підкладок – діаметр 9, висота 2 мм. Для одержання підкладок з TiC використовували два варіанти вихідного порошку: з розміром зерен менше 100 мкм і менше 3 мкм (після розмолу). Розмір зерен порошків TiN і TiB<sub>2</sub> – менше 100 мкм. Композити системи cBN–Al одержували спіканням з попереднім просоченням, а з чистих cBN – одностадійним спіканням. Одержані цілі зразки з розмірами 8,2 - 8,5 мм за діаметром і 5 мм за висотою піддавали механічній обробці до розміру 7,5 мм за діаметром і 3,5 мм за висотою.

Структуру одержаних двошарових пластин досліджували XRD методом. Результати досліджень показали, що композити зі сторони підкладки однофазні з параметрами кристалічної структури, близькими до параметрів кристалічної структури вихідного порошку (TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>). Зі сторони шихти cBN–Al досліджувані зразки багатофазні і крім cBN та AlN мали в своєму складі диборид MeB<sub>2</sub>, періоди ґратки якого займають проміжне положення між періодами ґраток боридів TiB<sub>2</sub> та AlB<sub>2</sub>, у випадку підкладок з TiC, TiN в складі робочого шару були ще сліди TiC і TiN, відповідно. Це свідчить про те, що в умовах високих тисків і температур алюміній взаємодіє з матеріалом підкладки (матеріал підкладки розчиняється в алюмінії, розноситься по об'єму робочого шару композиту і вже з розчину викристалізуються бориди або вихідні TiC, TiN). При спіканні на підкладці порошок cBN без алюмінію (без добавок) на рентгенограмах не зафіксували слідів TiB<sub>2</sub> (TiC, TiN).

Результати рентгенівського дослідження вихідного порошку TiB<sub>2</sub> і модельних двошарових пластин приведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати дослідження зразків (cBN + 10% Al) – TiB<sub>2</sub>, спечених при 7,7 ГПа, 2300 К

Періоди ґратки TiB <sub>2</sub> , нм			Досліджуваний зразок
<i>a</i>	<i>c</i>	<i>c/a</i>	
0,3028	0,3228	1,0660	Літературні дані для TiB <sub>2</sub> [2]
0,30293(1)	0,32278(1)	1,0655	Вихідний порошок
0,30297(2)	0,32283(1)	1,0656	В композиті зі сторони підкладки TiB <sub>2</sub>
0,30223(7)	0,32402(6)	1,0721	В композиті зі сторони робочого шару cBN
0,30050	0,32537	1,0828	Літературні дані для AlB <sub>2</sub> [3]

Одержані результати показують, що за рахунок масопереносу титану розплавом алюмінію в процесі реакційного спікання шихти (cBN + 10% Al) – TiB<sub>2</sub> (TiC, TiN) при високих тисках і температурах утворюються взаємні тверді розчини Ti<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>B<sub>2</sub>. Найбільш

показово це проявляється при спіканні на підкладці з  $TiB_2$ , в меншій мірі на підкладках з  $TiC$ ,  $TiN$ .

Наступна серія дослідів повторює попередню, тільки між підкладкою і шихтою на основі  $cBN$  розміщували пресований диск з алюмінію діаметром 9 і висотою 1 мм. В більшості випадків алюміній просочувався в робочий шар (і підкладку), проблеми були при використанні підкладок з  $TiC$ , і субмікронного порошку  $cBN$  (КМ 1/0, КМ 0,25/0). В цьому випадку в алюмінії розчинявся графіт нагрівника, утворювався карбід алюмінію ( $Al_4C_3$ ). В подальшому в деяких випадках на зразках в зоні контакту підкладка – робочий шар виділявся жовтий порошок, який мав різкий запах і руйнував зразки (з часом частина зразків перетворювалась на пил. Причина – взаємодія карбіду алюмінію з паровою води і киснем ( $4 Al_4C_3 + 6 H_2O + 9 O_2 \rightarrow 8 Al_2O_3 + 6 C_2H_2$ )).

В табл. 2 приведено значення твердості робочого шару досліджуваних композитів із серії 1. Твердість складає 32–36 ГПа і близька до твердості кибориту-1. Недолік даної (першої) серії пластин – крихкість підкладки, в деяких випадках на підкладці утворювались тріщини, зколи. Що стосується пластин з проміжним шаром з алюмінієм, то крім випадків з утворенням карбіду алюмінію, пластини мало відрізнялись від таких без проміжного шару, але загроза утворення  $Al_4C_3$  робила такий спосіб одержання пластин нетехнологічним.

Таблиця 2. Твердість робочого шару двошарових зразків на підкладках  $TiB_2$  ( $TiC$ ,  $TiN$ ), спечених при 7,7 ГПа, 2300 К

Шихта робочого шару	Твердість композиту на підкладці з:, ГПа		
	$TiN$	$TiC$	$TiB_2$
$cBN + 10\% Al$	32±1	31±2	33±1
$cBN$	36±2	36±2	36±2

Зразки з робочим шаром без алюмінію мали вищу твердість, але були крихкішими (більша ймовірність зколів, тріщин після механічної обробки). Найвища твердість у композитів системи  $cBN - Al$  на підкладці з  $TiB_2$  очевидно пояснюється деформаційним зміцненням структури композиту високомодульним боридом зв'язки.

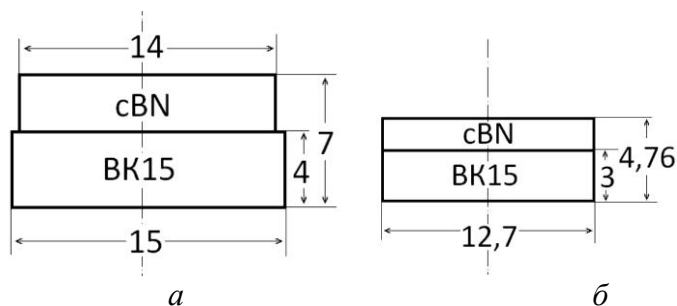


Рис. 1. Форма і розміри спеченої заготовки (а) і ріжучої пластини (б) двошарового  $PCBN$  композиту

Для експериментальних досліджень найзручнішим виявився варіант спікання а сталевому АВТ КЗ-40 заготовок для подальшого виготовлення ріжучих пластин діаметром 12,7 мм і висотою 4,76 мм (RNMN 120400). Спечена підкладка з твердого сплаву  $BK15$  після механічної обробки (плоске шліфування і округлення алмазним абразивом) мала розміри

Більш технологічним вважається одержання двошарових  $PCBN$  композитів на спечених підкладках з твердого сплаву групи  $BK$ . Як показав наш попередній досвід [4], найкраще одержувати такі пластини в сталевих АВТ «ковадло з заглибленням», робочими параметрами яких є тиски до 4,5 ГПа і температури до 1800 К.

14,9 мм в діаметрі і 4,0 мм по висоті. Як шихту на основі cBN використовували порошкові суміші систем cBN–Al, cBN–Ti, cBN–Ti–Al, cBN–Co–Al, cBN–Ni–Al. Режими спікання: тиск 4,2 ГПа, температура 1750 К, тривалість спікання 4 хвилини, в системах з алюмінієм використовували режим попереднього просочення при тиску 2,5 ГПа, температурі 1300 К упродовж 30 с. На рис. 1 показано вигляд і розміри спеченої заготовки і ріжучої пластини двошарового PCBN композиту.

Згідно рис. 1, товщина підкладки ріжучої пластини 3,0 мм, а робочого шару cBN – 1,76 мм. Насправді, зважаючи, що допуск на висоту пластини становить  $\pm 0,13$  мм з врахуванням особливості технології механічної обробки двошарових композитів, реальні значення висоти незначно відхилялись від приведеної. В табл. 3 приведено значення висоти 5 оброблених пластин PCBN композиту системи cBN–Al.

Таблиця 3. Загальна висота і висота окремих шарів двошарових пластин PCBN композиту системи cBN–Al, після механічної обробки

Висота, мм	Номери пластин				
	1	2	3	4	5
Загальна	4,70	4,70	4,69	4,71	4,71
Підкладки BK	2,92	2,93	2,71	2,85	2,98
Шару з cBN	1,78	1,77	1,98	1,86	1,73

В табл. 4 приведено значення твердості і питомого електроопору двошарових пластин, спечених на підкладці BK15 в АВТ КЗ-40 при тиску 4,2 ГПа, температурі 1750 К, тривалості спікання 4 хв.

Таблиця 4. Твердість і електроопір двошарових композитів системи cBN–Me–Al, (Me - Ni, Co, Ti), одержаних в АВТ КЗ-55 при тиску 4,2 ГПа, температурі 1750 К

Шихта	Твердість, ГПа	Електроопір $R_{cp}$ , Ом*м	Електроопір робочого шару, Ом*м
90 % cBN, 10 % Al	27 $\pm$ 1	7,5*10 <sup>-2</sup>	1,9*10 <sup>-1</sup>
80 % cBN, 10 % Ti, 10 % Al	26 $\pm$ 1	8,7*10 <sup>-4</sup>	2,2*10 <sup>-3</sup>
67 % cBN, 23 % Ti, 10 % Al	25 $\pm$ 1	2,8*10 <sup>-4</sup>	7,2*10 <sup>-4</sup>
57 % cBN, 33 % Ti, 10 % Al	23 $\pm$ 1	1,5*10 <sup>-4</sup>	3,9*10 <sup>-4</sup>
85 % cBN, 5 % Co, 10 % Al	25 $\pm$ 1	3,2*10 <sup>-2</sup>	8,3*10 <sup>-2</sup>
83 % cBN, 7 % Ni, 10 % Al	26 $\pm$ 1	4,4*10 <sup>-2</sup>	1,1*10 <sup>-1</sup>

При одержанні композитів використали 6 варіантів шихти систем cBN– Al, cBN–Ti–Al, cBN–Co–Al, cBN–Ni–Al.

Твердість двошарових композитів мало відрізняється від твердості одношарових, одержаних з такої ж шихти при тих же умовах спікання.

Електроопір двошарових композитів в кілька раз нижчий, ніж в одношарових того ж складу, але тут треба врахувати, що електроопір підкладки значно нижчий, ніж робочого шару (питомий електроопір BK15 – 19,4·10<sup>-8</sup> Ом·м. З врахуванням цього факту і значення середньої товщини твердосплавної підкладки (див. табл. 3), значення питомого електроопору робочого шару двошарової пластини було перераховано (останній стовпчик в табл. 4).

Електроопір робочого шару двошарової пластини трохи нижчий, ніж в одношарових, причина може бути пов'язана з міграцією кобальту в робочий шар композиту, подібне явище спостерігали в [5]. Крім того кобальт з алюмінієм може утворювати електропровідні інтерметаліди і вони можуть пронизувати структуру композиту, створювати електропровідні містки. Питомий електроопір кобальту  $6,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, а алюмінію –  $2,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

Паралельно з двошаровими спікали трьохшарові PCBN композити. Були варіанти використання металів (Co, Ni, Al) в якості перехідного шару між підкладкою і робочим шаром на основі cBN, але більш технологічним виявився варіант, де в якості перехідного шару використали суміш порошків BK15, cBN і Al у відношенні за вагою 10:9:1, тобто фазовий склад шихти перехідного шару був 50 % BK15, 45% cBN і 5 % Al. Товщина перехідного шару не перевищувала 0,5 мм. Одержані пластини несуттєво відрізнялись від двошарових пластин такої ж системи. За властивостями (твердість) суттєвої різниці між двошаровими і трьохшаровими пластинами не було. У випадку спікання пластин, в яких висота більша за діаметр, перехідний шар необхідний, інакше зразки розшаровувались по контакту BK – шар cBN. Наприклад, при одержанні композитів висотою 12–14 мм і діаметром 6 мм при товщині твердосплавної підкладки 3 мм використання проміжного шару необхідно, тільки зразки з перехідним шаром не розшаровувались. Для зразків, в яких діаметр значно більший висоти, наявність проміжного шару не впливає суттєво на технологічність процесу одержання композиту.

Дослідження різальних властивостей пластин здійснювали на верстаті 1К62. Точіння проводили без ударного навантаження. Для випробувань використовували токарні прохідні прямі різці з механічним кріпленням змінних пластин, що не переточуються, геометричні параметри різальної частини: передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ , кут нахилу різальної кромки  $\lambda = 0$ . Оброблюваний матеріал – заготовки сталі ХВГ, загартованої до твердості 58–60 HRC. Розмір заготовок: діаметр – 90–95 мм, довжина – 300 мм. Режимми випробувань: швидкість різання  $V = 90$  м/хв; глибина різання  $t = 0,02$  мм; подача  $S = 0,07$  мм/об. За критерій стійкості інструменту при точінні загартованої сталі прийнято величину зносу ріжучої пластини із композиційного матеріалу по задній поверхні  $h_3$ , мм. В табл. 5 приведено результати випробувань. Для порівняння в табл. 5 приведено також результати дослідження одношарових пластин, одержаних за тих же умов, що і двошарові і з тої ж шихти, що і робочий шар двошарових пластин.

Таблиця 5. Різальні властивості пластин двошарових композитів системи cBN-Me-Al, (Me - Ni, Co, Ti), одержаних в АВТ КЗ-40 при тиску 4,2 ГПа, температурі 1750 К

Шихта	Величина зносу по задній поверхні ( $h_3$ , мм) при тривалості роботи різця			
	Двошарові		Одношарові	
	10 хв	30 хв	10 хв	30 хв
90 % cBN, 10 % Al	0,12	0,24	0,12	0,22
80 % cBN, 10 % Ti, 10 % Al	0,11	0,21	0,08	0,16
67 % cBN, 23 % Ti, 10 % Al	0,12	0,25	0,12	0,24
57 % cBN, 33 % Ti, 10 % Al	0,13	0,28	0,13	0,28
85 % cBN, 5 % Co, 10 % Al	0,13	0,23	0,09	0,19
83 % cBN, 7 % Ni, 10 % Al	0,13	0,26	0,10	0,22

Таким чином, при обробці загартованої сталі ХВГ твердістю 57–58 HRC в режимі безперервного точіння кращі результати показали зразки, одержані з шихти складу 80 % cBN, 10 % Ti, 10 % Al, трохи поступаються їм зразки з шихти складу 85 % cBN, 5 % Co, 10 % Al. Одношарові зразки з шихти такого ж складу мають зносостійкість на 20–30 % вищу, ніж двошарові (див. табл. 5).

Можна стверджувати про перспективність систем cBN–Ti–Al, cBN–Co–Al і cBN–Ni–Al при спікання двошарових композитів на підкладці ВК завдяки покращенню зв'язку між підкладкою і робочим шаром. При цьому двошарові PCBN композити мають нижчі властивості, ніж одношарові, одержані при тих же умовах (шихта, параметри). Їхня зносостійкість при точінні сталі ХВГ нижча на 30%, електроопір робочого шару – в 2–3 рази. Тришарові PCBN композити ефективні, якщо в якості перехідного шару застосувати суміш cBN–WC–Co–Al, їхні властивості майже співпадають з властивостями двошарових, одержаних за тих же умов.

*В работе представлены результаты исследования структуры и свойств PCBN композитов, полученных при реакционном спекании в условиях высокого давления и температуры порошков cBN с Al, Ti, Co и Ni на подложке из твердого сплава VK15. Отдельно исследовали структуру и свойства модельных двухслойных композитов на подложках из TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>. Использовали аппараты высокого давления типа «наковальня с углублением». Полученные образцы после механической обработки свободным и связанным абразивом имели цилиндрическую форму диаметром до 15 мм и высотой до 5 мм. Фазовый состав композитов определяли методом рентгеноструктурного анализа. Твердость определяли при использовании пирамиды Кнупа, нагрузка на индентор 10 Н, электросопротивление – с использованием цифрового омметра. Работоспособность резцов из двухслойных сверхтвердых композитов исследовали на автоматизированном стенде на базе токарного станка мод. 1К62 при чистовом точении стали ХВГ HRC 58-60.*

**Ключевые слова:** кубический нитрид бора, сверхтвердый композит, двухслойные пластины, твердость, лезвийный инструмент, режущие свойства

**M. P. Bezhenar, Ya. M. Romanenko, T. O. Garbuz, S. M. Konoval**  
**TWO-LAYER PCBN COMPOSITES FOR USE IN A TOOL**

*In this paper the results of studying the structure and properties of PCBN composites produced by reactive sintering under high pressure and temperature powders of cBN with Al, Ti, Co and Ni on a VK15 hard alloy substrate are presented. The structure and properties of model two-layer composites on TiC, TiN, and TiB<sub>2</sub> substrates were studied separately. High-pressure apparatuses «anvil with recess» were used. The obtained samples after mechanical treatment with a free and bound abrasive had a cylindrical shape with a diameter of up to 15 mm and a height of up to 5 mm. The phase composition was determined by X-ray diffraction analysis. The hardness was determined using the Knoop pyramid, the load on the indenter is 10 N, the electric resistivity is measured using a digital ohmmeter. The cutters working capacity of two-layered superhard composites was investigated on an automated stand based on a turning machine 1K62 at the final turning of CVH steel HRC 58-60.*

**Key words:** cubic boron nitride, superhard composite, two-layered plates, hardness, tool, cutting properties

**Література**

1. Application areas for PCBN materials / J. Barry, G. Akdogan, P. Smyth et al. // Industrial Diamond Rev. – 2006. – 66. – N 3. – P. 46–53.

2. Lundstrom T. Preparation and Crystal Chemistry of some refractory Borides and Phosphides // *Arkiv. Kemi.* – 1969. – 31. – P. 227–266.
3. On the electronic and structural properties of aluminium diboride  $Al_{0.9}B_2$  / U. Burkhard, V. Gurin, F. Haarmann et al. // *Solid State Chemistry.* – 2004. – 177. – P. 389 – 394.
4. Electrical conductivity of cubic boron nitride-on- carbide substrate composites and the possibility for spark cutting them / S. V. Tkach, A. A. Shulzhenko, N. P. Bezhenar, et al. // *Journal of Superhard Materials.* – 2006. – N 1. – P. 16–24.
5. The structure formation and hardness of cubic boron nitride composites in reaction sintering on carbide substrates / A. A. Shulzhenko, N. P. Bezhenar, S. V. Tkach, et al. // *Journal of Superhard Materials.* – 2005. – N 3. – P. 3–13.

Надійшла 29.07.18

### References

1. Barry J., Akdogan G., Smyth P., et al. (2006). Application areas for PCBN materials. *Industrial Diamond Rev., Vol. 66, 3, 46–53.*
2. Lundstrom T. (1969) Preparation and Crystal Chemistry of some refractory Borides and Phosphides. *Arkiv. Kemi, Vol. 31, 227–266.*
3. Burkhard U., Gurin V., Haarmann F., et al. (2004). On the electronic and structural properties of aluminum diboride  $Al_{0.9}B_2$ . *Solid State Chemistry., Vol. 177., 389–394.*
4. Tkach S. V., Shulzhenko A. A., Bezhenar N. P., et al. (2006). Electrical conductivity of cubic boron nitride-on- carbide substrate composites and the possibility for spark cutting them. *Journal of Superhard Materials, 1, 16–24*
5. Shulzhenko A. A., Bezhenar N. P., Tkach S. V., et al. (2005). The structure formation and hardness of cubic boron nitride composites in reaction sintering on carbide substrates. *Journal of Superhard Materials, 3, 3–13*