

**В. І. Лавріненко<sup>1,\*</sup>, В. Г. Полторацький<sup>1</sup>, О. О. Пасічний<sup>1</sup>,  
В. Ю. Солод<sup>2,\*\*</sup>**

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Дніпровський державний технічний університет  
МОН України, м. Кам'янське, Україна

\*lavrinen52@gmail.com

\*\*v\_solod@ukr.net

## **Експлуатаційні показники шліфувального інструменту із зернами кубічного нітриду бору з комбінованими зносостійкими покриттями**

*Досліджено вплив покриття поверхні зерен кубічного нітриду бору (сBN) на зносостійкість інструменту і продуктивність обробки. У разі невеликої (50 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності обробки коефіцієнт підвищення зносостійкості дорівнює 1,66 для покриття В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> + СеО<sub>2</sub>, а для більш високої (200 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності обробки коефіцієнт підвищення зносостійкості дорівнює 1,13 для покриття В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> + В<sub>4</sub>С. Показано, що за такої продуктивності обробки за параметром шорсткості обробленої поверхні Ra найкращим є покриття поверхні зерен сBN комбінацією оксиду та карбиду (В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> + SiC) як за зносостійкістю шліфувального круга, так і за шорсткістю оброблюваної поверхні. Встановлено, що у разі підвищеної продуктивності шліфування будь-яке покриття поверхні зерен сBN знижує параметр t50 і, як наслідок, тримальна здатність шорсткої поверхні, отриманої під час шліфування такими кругами, зменшується.*

**Ключові слова:** комбіновані зносостійкі покриття, шліфувальний інструмент, зерна кубічного нітриду бору, експлуатаційні показники.

Експлуатаційні характеристики шліфувального інструменту з надтвердих матеріалів, як алмазів, так і кубічного нітриду бору, у значній мірі залежать від якості зерен шліфпорошків, що застосовують для його виготовлення. Покриття зерен є одним з важливих факторів впливу на зміну їхніх властивостей та підвищення їхнього утримання у зв'язуючому матеріалі робочого шару шліфувального круга. В [1] звернено увагу на сучасні розробки для отримання різних захисних комбінованих оксидних та карбідних покриттів на алмазних зернах, які дозволяють підвищити їхні експлуатаційні характеристики у разі застосування в шліфувальному інструменті. В даній роботі розглянуто такі питання, але стосовно зерен з кубічного нітриду бору.

На відміну від алмазних порошків, сучасних публікацій у цьому напрямку небагато. Так, в [2] представлено результати отримання восьми нових структур BN з регульованим співвідношенням  $sp^2/sp^3$  гібридизації. Запропоновано використання полімеризації нанотрубок BN (BNNT) з включенням двох повністю  $sp^2$ -гібридизаційних структур ( $tP14$ -BN і  $tP16$ -BN), двох повністю гібридизаційних структур  $sp^3$  ( $hP24$ -BN і  $hP48$ -BN) і чотирьох гібридизаційних

структур  $sp^2/sp^3$  (*mP44-BN*, *oI28-BN*, *mP76-BN* і *mP84-BN*). Вперше повідомлено про чотири надтверді структури  $sp^2/sp^3$  BN. Слід зазначити, що *mP76-BN* із твердістю 52,55 ГПа є найтвердішою структурою серед усіх зареєстрованих  $sp^2/sp^3$  гібридних структур BN. Водночас, *oI28-BN*, *mP76-BN* і *mP84-BN* демонстрували високу в'язкість до руйнування. Це дослідження розкриває механізм перетворення BNNT за високого тиску і теоретично показало ефективний напрямок для модуляції співвідношень гібридизації  $sp^2/sp^3$  у надтвердих алотропах BN.

В [3] основною метою дослідження була оцінка інструментів із cBN з гальванічним покриттям, яке використовували для шліфування заготовок із легваної сталі 40Н, твердість яких становила 54 HRC. Отримані результати та спостереження за робочою поверхнею кругів з cBN і заготовок дозволили ідентифікувати характеристики зношування для трьох зразків нікелю різної товщини, що дорівнювали 35, 50 і 65 % від номінального розміру кристалів cBN для конкретних параметрів процесу. Параметр шорсткості поверхні *Ra* поступово зменшувався від початкового значення 1,9 мкм до значень < 0,7 мкм для більших зерен В107 і для покриттів будь-якої товщини. Найнижче значення параметра *Ra* = 0,4 мкм було отримано для зерен В64 і для найтоншого покриття, але зі зменшенням видалення матеріалу на 50 % порівняно з зернами В107. Тобто, зважаючи на те, що гальванічні круги піддавалися зношенню, це призводило до поступового зниження ефективності обробки, а також до зміни умов роботи в зоні контакту деталь–інструмент.

В [4] проаналізовано крупнозернистий шліфувальний круг з кубічного нітриду бору з гальванічним покриттям, для якого було запропоновано ефективний метод імпульсної лазерної правки. Результати засвідчили, що вплив лазерного випромінювання на зерна cBN не спричиняє фазового переходу через наявність захисного гальванічного покриття.

В [5] показано, що велика різниця модулів пружності cBN і hBN сприяє ефективності вивільнення мастильного матеріалу (hBN), що збільшує можливість отримання відмінних змащувальних характеристик.

В [6] розглянуто механічні і трибологічні властивості багатошарового композиційного покриття cBN/NCD (кубічний нітрид бору та нанокристалічний алмаз). Випробування на тертя і знос засвідчили, що зносостійкість багатошарового композиційного покриття cBN/NCD пов'язана з залишковими напруженнями і в'язкістю руйнування, а коефіцієнт тертя є стабільним і дорівнює 0,12–0,15.

Вказаний позитивний ефект від борвмісних речовин було підтверджено в [7], де досліджено захисні покриття з карбіду титану-бору на алмазних частинках. Результати засвідчили, що вміст бора є важливим для адгезії покриття Ti–B до алмазу. Під час відпалу алмазу з покриттям в повітрі апріорно утворені  $V_2O_5$  та  $TiO_2$  захищали алмаз від окислення як кисневонепроникні шари. Крім того, утворенням рідкого  $V_2O_5$  вдалося уникнути розшарування  $TiO_2$ , викликаного об'ємним розширенням під час окислення. Водночас, наявність  $TiO_2$  забезпечує тривалий захист за рахунок зменшення випаровування  $V_2O_5$  [7].

Наведені вище дослідження свідчать саме про ефективність комбінованих покриттів на зернах cBN, тому метою даної статті було дослідження застосування покриттів на зернах з кубічного нітриду бору у шліфувальному інструменті та визначення найбільш ефективних комбінованих покриттів для підвищення зносостійкості шліфувальних кругів та покращення шорсткості обробленої поверхні такими кругами.

Для досягнення цього, за аналогією з [1], було розроблено технологічний процес (послідовність формування покриттів описана в технологічній інструкції [8]), для формування покриттів з двох компонентів:

- розчинного оксиду  $V_2O_3$  та нерозчинного оксиду  $CeO_2$  (або  $TiO_2$ );
- розчинного оксиду  $V_2O_3$  та нерозчинного карбиду  $V_4C$  або  $SiC$ .

Експлуатаційні характеристики шліфувальних кругів із зернами кубічного нітриду бору з покриттями на основі як двох оксидів, так і сумішшю оксиду з карбідом, досліджували для шліфпорошків кубоніту марки КВ зернистістю 125/100. Для обробки була вибрана важкооброблювана швидкорізальна сталь марки Р6М5 з розмірами зразка  $100 \times 20 \times 8$  мм. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,25 м/хв (для продуктивності обробки  $50 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ), 0,50 м/хв (для  $100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) та 1,00 м/хв (для  $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ). Шліфування провадили без охолодження, щоби не вносити додаткових збурень в процес обробки, оскільки невідомою на даний момент є можливість ймовірної взаємодії оксидів та карбідів зі складу покриттів із складниками технологічної рідини, що може бути предметом подальших досліджень. Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат зерен кубоніту в кругах під час шліфування  $q$  та шорсткість обробленої поверхні за показником  $Ra$ . Результати випробувань наведено в табл. 1.

**Таблиця 1. Експлуатаційні показники кубонітових шліфувальних кругів КВ 125/100 В2-08 100 із різними варіантами покриття на поверхні кубонітових зерен**

Покриття поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Продуктивність обробки, $\text{мм}^3/\text{хв}$					
	50		100		200	
	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм
$V_2O_3 + CeO_2$	0,53	0,29	1,10	0,53	2,25	0,60
$V_2O_3 + V_4C$	0,69	0,29	1,23	0,50	2,21	0,72
Без покриття	0,88	0,42	1,24	0,56	2,50	0,83
$V_2O_3 + SiC$	1,07	0,30	1,36	0,49	2,22	0,47
$V_2O_3 + TiO_2$	1,12	0,32	1,53	0,59	2,91	0,70

На відміну від алмазних кругів [1], ефект від покриття поверхні зерен сВН суттєво залежить від продуктивності шліфування. Якщо для невеликої ( $50 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) продуктивності з використанням кращої комбінації покриття ( $V_2O_3 + CeO_2$ ) коефіцієнт підвищення зносостійкості дорівнює 1,66, то для продуктивності від 100 до  $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$  він зменшується і дорівнює 1,13. Тобто, ефект є, але найкраще він проявляється за невеликих навантажень на кубонітові зерна в шліфувальному інструменті. Розташуємо розглянуті в табл. 1 покриття в ряд по мірі збільшення зносостійкості кругів з КНБ для продуктивності  $50 \text{ мм}^3/\text{хв}$ :

$(V_2O_3 + TiO_2) - (V_2O_3 + SiC) - \text{без покриття} - (V_2O_3 + V_4C) - (V_2O_3 + CeO_2)$ .

Різниця в зносостійкості для варіанту без покриття і останньої ( $V_2O_3 + CeO_2$ ) ланки вказаного ряду складає 1,66, тобто зносостійкість кубонітового круга у разі покриття поверхні зерен комбінацією  $V_2O_3 + CeO_2$  підвищується у 1,66 рази.

У разі суттєво більшої ( $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) продуктивності шліфування наведений вище ряд змінюється:

$(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$  – без покриття –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2)$  –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiC})$  –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C})$ .

Для високої ( $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) продуктивності обробки різниця в зносостійкості для варіанту без покриття і останньої  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C})$  ланки вказаного ряду складає всього 1,13, тобто зносостійкості кубонітового круга у разі покриття поверхонь зерен КНБ фактично підвищується на 10 %. Водночас, як і для алмазних кругів [1], найкращим для покриттям поверхні зерен cBN виявилася комбінація  $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C}$ .

Шорсткість поверхні, обробленої кругами з зернами cBN без покриття, має найбільше значення за параметром  $Ra$  для всіх розглянутих продуктивностей шліфування (табл. 2–4). Водночас шорсткість поверхні, обробленої кругами з зернами cBN з різними варіантами покриття, за параметром  $Ra$  за меншої ( $50$  та  $100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) продуктивності шліфування майже не відрізняється, але для значно вищої ( $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) продуктивності показники починають відрізнятися, і ряд покриттів по мірі зменшення параметру  $Ra$  має наступний вигляд (див. табл. 4):

Без покриття –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C})$  –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$  –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2)$  –  $(\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiC})$ .

З наведеного вище можна зробити висновок, що покриття кубонітових зерен сумішшю  $\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  за невеликої продуктивності шліфування не є ефективним, але у разі збільшення продуктивності ця комбінація є найбільш збалансованою як за зносостійкістю шліфувального круга під час обробки, так і за шорсткістю оброблюваної поверхні.

**Таблиця 2. Показники шорсткості обробленої поверхні швидкорізальної сталі Р6М5 кубонітовими шліфувальними кругами KB 125/100 B2-08 100 із різними варіантами покриттів на поверхні кубонітових зерен (для продуктивності обробки  $50 \text{ мм}^3/\text{хв}$ )**

Покриття поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кубонітових кругів 12A2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості :			
	$Ra$ , мкм	$Rmax$ , мкм	$Sm$ , мкм	$t50$ , %
Без покриття	0,42	3,36	32	60,81
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	0,32	2,18	38	42,33
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$	0,30	2,82	37	52,23
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$	0,29	2,06	54	68,96
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C}$	0,29	2,20	49	63,92

**Таблиця 3. Показники шорсткості обробленої поверхні швидкорізальної сталі Р6М5 кубонітовими шліфувальними кругами KB 125/100 B2-08 100 із різними варіантами покриття на поверхні кубонітових зерен (для продуктивності обробки  $100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ )**

Покриття поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кубонітових кругів 12A2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості :			
	$Ra$ , мкм	$Rmax$ , мкм	$Sm$ , мкм	$t50$ , %
Без покриття	0,56	3,54	68	44,81
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	0,59	4,53	49	28,69
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$	0,49	3,81	54	26,00
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2$	0,53	3,67	63	40,96
$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{V}_4\text{C}$	0,50	4,48	46	74,69

Наповненість шорсткої поверхні за таким параметром кривої опорної поверхні, як  $t50$ , також різняться. Чим більшими є значення  $t50$ , тим шорстка поверхня має кращу тримальну здатність [9]. Для невеликої (50 та 100 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності обробки покриття поверхні зерен КНБ комбінацією  $B_2O_3 + V_4C$  дозволяє підвищити параметр  $t50$ , але з подальшим зростанням продуктивності шліфування будь-яке покриття поверхні зерен КНБ знижує параметр  $t50$  і, як наслідок тримальна здатність шорсткої поверхні, отриманої під час шліфування, починає суттєво знижуватися.

**Таблиця 4. Показники шорсткості обробленої поверхні швидкорізальної сталі Р6М5 кубонітовими шліфувальними кругами KB 125/100 B2-08 100 із різними варіантами покриття на поверхні кубонітових зерен марки (для продуктивності обробки 200 мм<sup>3</sup>/хв)**

Покриття поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кубонітових кругів 12A2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості :			
	$Ra$ , мкм	$Rmax$ , мкм	$Sm$ , мкм	$t50$ , %
Без покриття	0,83	5,40	50	67,29
$B_2O_3 + TiO_2$	0,70	4,38	47	49,06
$B_2O_3 + SiC$	0,47	4,81	41	40,38
$B_2O_3 + CeO_2$	0,60	5,02	43	37,81
$B_2O_3 + V_4C$	0,72	6,03	55	28,88

## ВИСНОВКИ

Комплекс проведених досліджень виявив напрямки підвищення експлуатаційних характеристик шліфувального інструменту через застосування шліфпорошків кубонітових зерен з багатокомпонентним покриттям поверхні.

На відміну від алмазних кругів, ефект від покриття поверхні зерен КНБ суттєво залежить від продуктивності шліфування. Якщо для невеликої (50 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності шліфування покриття зерен КНБ сумішшю  $B_2O_3 + CeO_2$  коефіцієнт підвищення зносостійкості дорівнює 1,66, то для продуктивності 100 мм<sup>3</sup>/хв зменшується і складає тільки 1,13.

Для підвищеної (200 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності шліфування збільшення ефективності покриття зерен КНБ має наступний вигляд:

$(B_2O_3 + TiO_2)$  – без покриття –  $(B_2O_3 + CeO_2)$  –  $(B_2O_3 + SiC)$  –  $(B_2O_3 + V_4C)$ .

Для більш високої продуктивності обробки найкращим покриттям є комбінація  $B_2O_3 + V_4C$ .

Круг з непокритими зернами КНБ дає найбільше значення шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  незалежно від продуктивності шліфування. У разі меншої (50 та 100 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності шліфування варіанти покриттів за параметром  $Ra$  майже не різняться, але у разі значно вищої (200 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності показники починають відрізнятися, і ряд покриттів по мірі зменшення параметра  $Ra$  має наступний вигляд:

Без покриття –  $(B_2O_3 + V_4C)$  –  $(B_2O_3 + TiO_2)$  –  $(B_2O_3 + CeO_2)$  –  $(B_2O_3 + SiC)$ .

Покриття поверхні зерен КНБ сумішшю  $B_2O_3 + SiC$  є найбільш ефективним як за зносостійкістю шліфувального круга, так і за шорсткістю оброблюваної поверхні.

Для невеликої (50 та 100 мм<sup>3</sup>/хв) продуктивності обробки покриття поверхні зерен КНБ комбінацією  $B_2O_3 + V_4C$  дозволяє підвищити параметр  $t50$ . Та з подальшим зростанням продуктивності шліфування будь-яке покриття поверхні

ні зерен КНБ знижує параметр  $t_{50}$  і, як наслідок тримальна здатність шорсткої поверхні, отриманої під час шліфування кругами з покриттями зерен КНБ, починає суттєво знижуватися.

## ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не було профінансовано із зовнішніх джерел.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

V. I. Lavrinenko<sup>1</sup>, V. G. Poltoratskyi<sup>1</sup>, O. O. Pasichnyi<sup>1</sup>,  
V. Yu. Solod<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Dniprovsky State Technical University,  
the Ministry of Education and Science of Ukraine,  
Kamianske, Dnipropetrovsk Region, Ukraine  
Performance indicators of the grinder tools with cubic boron  
nitride grains with combined wear-resistant coatings

*Attention was drawn to the fact that, unlike diamond grains, the effect of cubic boron nitride (cBN) grain surface coating depends significantly on the grinding performance. If for a small productivity of 50 mm<sup>3</sup>/min. the effect of the best coating combination (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CeO<sub>2</sub>) is a wear resistance increase factor of 1.66, then for a higher processing productivity of 200 mm<sup>3</sup>/min. the difference in wear resistance for the version without coating and the best version of coating (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+B<sub>4</sub>C) is already 1.13. At the same time, with such performance, the best option is to cover the surface of cBN grains with a combination of oxide and carbide (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC) according to the roughness parameter of the processed surface Ra. That is, in general, the combination of covering the grain surface with B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxide and SiC carbide is determined to be the most balanced both in terms of the wear resistance of the grinding wheel and the roughness of the treated surface. It was established that with increased grinding productivity, any surface coating of cBN grains reduces the  $t_{50}$  parameter and, as a result, the holding capacity of the rough surface obtained by grinding with such wheels decreases.*

**Keywords:** combined wear-resistant coatings, diamond grinding powders, wear resistance of diamond wheels, roughness of the treated surface.

1. Лавріненко В.І., Полторацький В.Г., Пасічний О.О., Солод В.Ю. Застосування в шліфувальному інструменті алмазних шліфпорошків з комбінованими покриттями на поверхні алмазних зерен. *Надтверді матеріали*. 2024. № 3. С. 94–101.
2. Liu Y., Xu D., Wang Y., Hu K., Yao Zh. Superhard BN allotropes with tunable hybridization sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> ratios by compressed nanotubes. *Diamond Rel. Mater.* 2023. Vol. 139, art. 110313.
3. Deja M. The use of Preston equation to determine material removal during lap-grinding with electroplated CBN tools. *Wear*. 2023. Vol. 528–529, art. 204968.
4. Guo B., Meng Q., Li Sh., Wu G., Xiang Y., Zhao Q. Pulse laser precision truing of the V-shaped coarse-grained electroplating CBN grinding wheel. *Mater. Des.* Vol. 217, art. 110650.
5. Wu J., Wang H., Wang Ch., Zhang Zh., Tang Ya., Hou Zh., Wan Sh., Wu D., Tan Zh., Ouyang X. High-pressure synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-cBN-hBN self-lubricating ceramic. *Mater. Des.* Vol. 217, art. 110638.
6. Tian Sh., Xu F., Ma Zh., Zhou Q., Zhao Ya., Li Zh., Wang D., Zeng G., Zuo D. Effect of the modulation periods on the mechanical and tribological properties of cBN/NCD multilayer composite coating. *Diam. Relat. Mater.* Vol. 132, art. 109628.
7. Sun Y., Zhang Ch., Wu J., Meng Q., Liu B., Gao K., He L. Enhancement of oxidation resistance via titanium boron carbide coatings on diamond particles. *Diam. Relat. Mater.* 2019. Vol. 92. P. 74–80.

8. Формування комбінованих багатокомпонентних термостабільних зносостійких покриттів з суміші розчинних та нерозчинних речовин: оксидів, силікатів та карбідів на поверхні зерен шліфпорошків абразивного призначення. Технологічна інструкція ТІ 25000.00855. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2022. 10 с.
9. Lavrinenko V.I. Degree of filling of the roughness profile of the surface obtained by diamond abrasive treatment as a factor affecting its bearing capacity. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, no. 3. P. 217–225.

Надійшла до редакції 18.01.24

Після доопрацювання 04.03.24

Прийнята до опублікування 07.03.24