

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.923

Г. А. Петасюк^{1,*}, О. О. Бочечка¹, В. І. Лавріненко^{1,**},
В. Г. Полторацький¹, В. В. Смоквина¹, В. В. Білорусець¹,
Л. А. Проц²

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

²Ужгородський національний університет МОН України,

м. Ужгород, Україна

*petasyuk@ukr.net

**lavrinen52@gmail.com

Експлуатаційні показники шліфувального інструменту, в різальному шарі якого використано алмазні шліфпорошки з нанесеним на поверхню їхніх зерен сBN-покриттям

Наведено огляд сучасних публікацій досліджень модифікування поверхні зерен алмазних шліфпорошків за допомогою нанесення на них покриттів з кубічного нітриду бору (сBN). Результати цих досліджень свідчать про ефективну дію такого модифікування та позитивний вплив плівок сBN на алмазні поверхні. Виявлено, що найкращою закріплюючою речовиною для покриття з сBN є желатин, клей БФ6 та полівініловий спирт (ПВС) діють приблизно однаково, хоча за меншої продуктивності шліфування краще застосовувати ПВС, а за більшої – клей БФ6. Проведено дослідження, які показали, що технологічно для нанесення покриття кращим є застосування ПВС, особливо коли до складу покриття входить нанорозмірний кубічний нітрид бору (нано-сBN). Встановлено, що нанесення на поверхню алмазних зерен підвищеної міцності марок АС15–АС20 покриття з наявністю у його складі нано-сBN відчутно підвищує зносостійкість алмазних кругів, що може бути зумовлено покращенням утримання у зв'язуючому матеріалі алмазних зерен.

Ключові слова: покриття з нітриду бору, механічні та трибологічні властивості, алмаз, кубічний нітрид бору, товщина, щільність, ступінь покриття.

В машинобудуванні порошки синтетичного алмазу (СА) невеликої міцності марок АС6–АС20 широко застосовують в процесах механо-

обробки. Водночас працездатність будь-якого алмазовмісного інструменту значною мірою визначається станом поверхні алмазних зерен в його робочому шарі. Важливо, щоб зерна абразиву не тільки достатньо виступали над поверхнею робочого шару інструменту, а ще й добре утримувалися у зв'язці. Зерна абразивних надтвердих матеріалів мають різну морфологію та, відповідно, різняться за міцністю. Чим зерна міцніші, що характерно для шліфпорошку AC20, тим більш гладкою є їхня поверхня, і тим більш актуальним стає закріплення такого зерна у зв'язці. Так, міцніші зерна потребують більш міцної зв'язки, наприклад не полімерної, а металічної. Разом з тим, полімерні зв'язки є більш технологічними. Тому, саме для таких зв'язок і застосовують покриття алмазних зерен для кращого утримання їх у зв'язці та для досягнення підвищеної хімічної і термічної стійкості. Одним з варіантів досягнення таких переваг є створення зносостійкого покриття на поверхні зерен шліфпорошків СА підвищеної міцності (AC15–AC20) з мікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору (нано-сBN) та речовин з підвищеними адгезійними властивостями – неорганічних та органічних. Метою такого покриття є створення захисного бар'єру між зв'язкою та зерном для уникнення графітізації алмазу як під час виготовлення інструменту, так і під час його застосування (шліфування), а також збільшення значення питомої площі поверхні зерен алмазу. Це сприятиме покращенню надійності утримання зерен в зв'язці та створюватиме можливість використання більш міцних (AC15–AC20) шліфпорошків СА в шліфувальних кругах на полімерній зв'язці для обробки твердих сплавів.

У попередніх дослідженнях авторами показано ефективність комбінованих багатокомпонентних оксидних та оксидно-карбідних покриттів на алмазних зернах, зокрема доведено важливість наявності в них оксиду B_2O_3 [1, 2]. Метою даної роботи було дослідження формування комбінованих оксидно-нітридних покриттів, причому використовували мікропорошки з сBN, що були відсутні у відомих авторам сучасних дослідженнях.

Разом з тим, аналіз літературних даних свідчить про ефективну дію BN-модифікування поверхні зерен алмазу та позитивну дію плівок сBN на поверхні алмазних матриць.

Останніми десятиліттями значні зусилля були спрямовані на дослідження електрофізичних властивостей алмазу з поверхнею, модифікованою атомами водню (Н-алмазу), однак досягнення високої рухливості його дірок залишалося проблемою. У [3] запропоновано збільшення рухливості дірок Н-алмазу за допомогою модифікації саме кластерами BN. Аморфні кластери BN були нанесені на високоякісні Н-алмазні поверхні за допомогою магнетронного розпилення. Модифікований Н-алмаз демонструє надвисоку рухливість дірок – $1100 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, що в 10 разів вище, ніж у Н-алмазу до модифікації BN. Але тут для авторів важливим є інше, а саме те, що Н-алмаз, модифікований BN, також демонструє виняткову стійкість до високих температур і чудову термічну стабільність завдяки ефекту BN-пасивації.

У [4] розглядалися тонкі плівки турбостратного нітриду бору (t-BN) і сBN, вирощені на полікристалах та монокристалах алмазу, легованих бором. Аналіз за допомогою просвічувальної електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю показав, що тонкі плівки складаються із суміші фаз сBN і t-BN, причому сBN є домінуючою фазою.

У [5] досліджено придатність гетеропереходів алмаз/сBN для високочастотних і потужних пристроїв. Ключові значення зміщення смуги та поляризації заряду на межі досліджені для різних кристалографічних орієнтацій ((110), (111) або (100)), зв'язку (C–B або C–N) і підкладок (алмаз або сBN).

Встановлено, що зв'язок C–B з дефіцитом електронів і зв'язок C–N зі збагаченням електронів індукуює перерозподіл заряду, що по суті призводить до двовимірного шару негативної та позитивної поляризації. Тобто, завдяки прогнозованому вирівнюванню смуг, придатному для утримання носіїв, а також можливості модуляції та поляризаційного легування, гетероструктури алмаз/cBN є перспективними для високопродуктивних електронних пристроїв.

У [6] вивчали механічні та трибологічні властивості багатошарового композиційного покриття cBN/NCD (NCD – нанокристалічний алмаз). Випробування на тертя і знос засвідчили, що зносостійкість багатошарового композиційного покриття cBN/NCD пов'язана із залишковими напруженнями і в'язкістю руйнування, а коефіцієнт тертя зберігає стабільність в інтервалі значень 0,12–0,15.

Отже, аналіз літературних даних свідчить про ефективну дію модифікування BN поверхні кристалів алмазу та позитивну дію плівок cBN на поверхні алмазних матриць.

У даному дослідженні покриття на поверхні алмазних зерен утворювали рідинно-фазним нанесенням у процесі кристалізації або ущільнення розчинних компонентів з комбінованого розчину-суспензії [7, 8]. До складу покриття входили порошки кубічного нітриду бору (KM 3/2 або нано-cBN) та оксид бору (B_2O_3), а закріплюючими речовинами були полівініловий спирт (ПВС), полівінілбутіраль фенол формальдегідний (БФ6) та технічний желатин (Ж).

Спочатку основну увагу було приділено питанню – які закріплюючі речовини є більш ефективними для комбінованого оксидно-нітридного покриття. На цьому етапі застосовували порошки cBN – KM 3/2 і нано-cBN та алмазний шліфпорошок AC15 160/125. Покриті алмазні шліфпорошки, а також вихідний алмазний шліфпорошок без покриття було застосовано для виготовлення алмазних шліфувальних кругів форморозміру 12A2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08 з відносною концентрацією зерен алмазу в робочому шарі – 100 %. Для обробки було вибрано важкооброблюваний вольфрамокобальтовий твердий сплав марки ВК6 з розмірами зразка 63×15×7 мм. Шліфування проводили без охолодження, щоб не вносити додаткових збурень в процес обробки. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с; поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід; повздовжня подача – 0,57 м/хв (для продуктивності обробки 200 мм³/хв) та 1,14 м/хв (для продуктивності обробки 400 мм³/хв). Оцінювали зносостійкість шліфувального інструмента за показником відносних витрат зерен алмазу (q), а шорсткість обробленої поверхні за показником Ra . Результати випробувань наведено в табл. 1.

Порівняльний аналіз даних табл. 1 показує, що як закріплююча речовина найкращим є желатин, а БФ6 та ПВС за своїм ефектом є приблизно однаковими, хоча за меншої продуктивності шліфування краще застосовувати ПВС, а за більшої – БФ6, але технологічно для нанесення покриття краще застосовувати ПВС, особливо коли до складу покриття входить нано-cBN.

У зв'язку із цим було досліджено, якою має бути дисперсність порошків кубічного нітриду бору для їх застосовування у покритті поверхні алмазних зерен.

Питання дисперсності нині є актуальним для сучасних дослідників. Так, в [9] метою було виявлення впливу розміру частинок наповнювача на реологічну поведінку, а також мікро- і макромеханічні властивості полімерно-керамічних композитів. Як наповнювачі застосовували порошки гідроксіапатиту із середнім розміром частинок 10 мкм і 60 нм. Виявлено, що застосування нанометричного наповнювача привело до більш бажаних механічних властивостей і поліпшеної стабільності розплаву полімеру у порівнянні з композитами, що містили мікрометричний наповнювач.

Таблиця 1. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен 100 % з різними варіантами покриття поверхні алмазних зерен марки АС15 160/125 у процесі шліфування твердого сплаву ВК6

Покриття поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Продуктивність обробки, мм ³ /хв			
	200		400	
	q, мг/г	Ra, мкм	q, мг/г	Ra, мкм
Суміш (В ₂ О ₃ + КМ3/2 – Ж)	1,7	0,36	2,9	0,42
Суміш (В ₂ О ₃ + КМ3/2 – БФ6)	4,2	0,71	5,1	0,75
Суміш (В ₂ О ₃ + КМ3/2 – ПВС)	2,8	0,60	7,7	0,64
АС15 160/125 без покриття	5,8	0,36	13,8	0,49

У [10] вивчали трибологічну поведінку композитів полієфірефіркетону (РЕЕК), армованих частинками карбїду кремнію (SiC) різних розмірів і концентрацій. Було оцінено зносостійкість і фрикційні властивості композитів, наповнених як нано-, так і мікрочастинками SiC за різних (2,5, 5, 7,5 і 10 %) концентрацій, із застосуванням трибометра “кулька на пластині”. Результати засвідчили, що нанорозмірні частинки SiC забезпечують гарне зниження тертя у порівнянні з їхніми мікророзмірними аналогами за вмісту наповнювача 5–7,5 %. Нанорозмірні частинки SiC поліпшують трибологічні характеристики за рахунок зниження тертя за умови збереженні структурної цілісності. Для мікророзмірних армуючих частинок SiC коефіцієнт тертя збільшується із вмістом SiC, причому більш виражені ефекти спостерігали за більш високих концентрацій наповнювача. Тобто, нанорозмірні частинки, ймовірно, знижують тертя більш ефективно, ніж мікророзмірні, що підкреслює їхні відмінні характеристики ковзання.

Було також визначено дисперсність порошків cBN, які бажано застосовувати для покриття поверхні алмазних зерен. Для цього авторами для нанесення покриття було використано мікропорошки КМ 3/2 та нанопорошки нано-cBN. Покриття наносили, як уже відзначали, на алмазні зерна шліфпорошку АС15 160/125. Модифіковані таким способом шліфпорошки показано на рис. 1. Потім із застосуванням приладу DialInspect.OSM [11] визначали морфометричні характеристики вихідного алмазного шліфпорошку та порошків із нанесеним на їхні зерна покриттями. Ці покриті алмазні шліфпорошки, а також вихідний алмазний шліфпорошок без покриття, було застосовано для виготовлення вказаних вище алмазних шліфувальних кругів, якими шліфували за наведеними вище режимами твердий сплав марки ВК6. Результати випробувань наведено в табл. 2.

Аналіз даних з табл. 2 дозволив встановити наступне:

- в обох випадках нанесення покриття з кубічного нітриду бору на поверхню алмазних зерен дозволяє знизити знос алмазних кругів;
- встановлено, що нанесення покриття нано-cBN дозволяє фактично втричі зменшити знос алмазних кругів, а покриття КМ 3/2 – вдвічі; тобто використання нано-cBN покриття є більш доцільним, що узгоджується з висновками у [9, 10];
- разом з тим, з даних таблиці видно, що наявність покриття на поверхні алмазних зерен призводить до погіршення шорсткості обробленої поверхні – показник Ra зростає, але у разі використання покриття нано-cBN це зростання є меншим, ніж у разі використання покриття КМ 3/2.

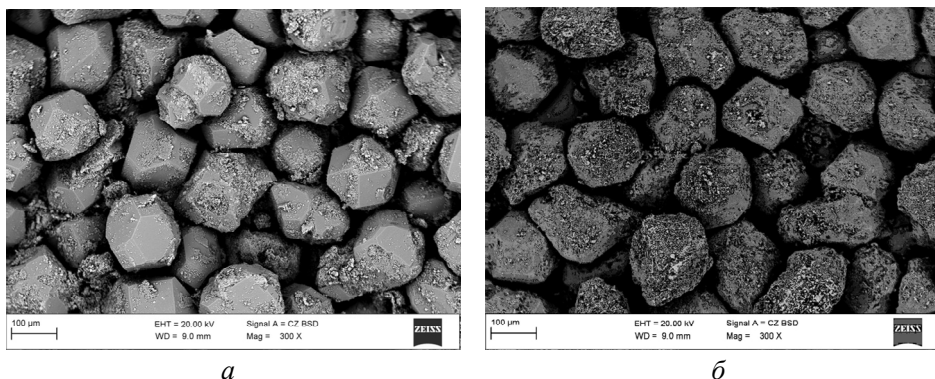


Рис. 1. Алмазні зерна AC15 160/125 з нанесеним на їхню поверхню покриття з порошками кубічного нітриду бору: KM 3/2 (а), нано-сBN (б).

Таблиця 2. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен 100 % та алмазними зернами AC15 160/125 з різним покриттям

Характеристика алмазних шліфпорошків	Продуктивність обробки:			
	200 мм ³ /хв		400 мм ³ /хв	
	q, мг/г	Ra, мкм	q, мг/г	Ra, мкм
AC15 160/125 (вихідний)	5,8	0,36	13,8	0,49
AC15 160/125 (з покриттям зерен KM 3/2)	2,8	0,60	7,7	0,64
AC15 160/125 (з покриттям зерен нано-сBN)	1,6	0,39	5,2	0,55

Отже, встановлено, що нанесення на поверхню зерен алмазних шліфпорошків підвищеної міцності (з діапазону марок AC15–AC20) покриття з наявністю нано-сBN дозволяє відчутно підвищити зносостійкість алмазних кругів, що може бути зумовлене покращенням утримання у зв'язці алмазних зерен підвищеної міцності.

Водночас доцільно провести порівняльний аналіз впливу кожного з покриттів (нано-сBN та KM 3/2) на морфометричні характеристики та технологічні властивості досліджуваних модифікованих шліфпорошків. У табл. 3 наведено результати дослідження за допомогою приладу DiaInspect.OSM морфометричних характеристик вихідного алмазного шліфпорошку та шліфпорошків із нанесеним на їхні зерна покриттями. В останніх чотирьох строках табл. 3 наведено визначені авторами технологічні властивості досліджених шліфпорошків.

Прилад DiaInspect.OSM дозволяє в автоматичному режимі встановлювати значення (діагностувати) більше 20 характеристик абразивних порошків за результатами вимірювання проби в кількості до 1999 зерен включно. У процесі виконання цього дослідження діагностували такі характеристики: максимальний ($F_{\max}$) і мінімальний ($F_{\min}$), діаметри Feret, висоту зерен (H), форм-фактор ($Comp.$) фактичного зображення проекції зерна, Feret-подовження (F_{el} , аналог коефіцієнта форми за стандартом [12]), шорсткість проекції зерен (Rg), відносну частку світлої частини проекції зерна в загальній її площі ($relAreal$). Повний перелік і геометрична інтерпретація цих характеристик, їхній поняттєвий сенс подано в описово-методичних матеріалах фірми-виробника до приладу DiaInspect.OSM [11], в оригінальних публікаціях його розробників [13] та в публікаціях авторів представленої роботи, наприклад, в [14].

Таблиця 3. Морфометричні характеристики, однорідність за ними та технологічні властивості вихідного шліфпорошку AC15 160/125 та шліфпорошків з нанесеними на поверхню їхніх зерен покриттями

Морфометричні характеристики	Вихідний шліфпорошок AC15 160/125		Модифікований шліфпорошок з покриттям			
			В ₂ O ₃ + КМ 3/2 + ПВС		В ₂ O ₃ + нано-сBN + ПВС	
	с.з.	одн.	с.з.	одн.	с.з.	одн.
$F_{\max}$ мкм	217,75	0,8216	225,40	0,7993	226,49	0,7897
$F_{\min}$ мкм	175,27	0,9557	177,40	0,9551	178,40	0,9546
$Comp.$	1,2804	0,7296	1,2844	0,7524	1,2989	0,7729
H	126,14	0,9557	134,06	0,9551	128,97	0,9546
F_{el}	1,2424	0,6753	1,2712	0,6599	1,2700	0,6283
$K_{\text{спл.}}$	0,5804	0,8576	0,5468	0,8496	0,5848	0,8324
$Roughn.$	1,0684	0,7289	1,0694	0,7398	1,0728	0,7507
D_m , мкм	196,51	0,8336	201,40	0,7604	202,45	0,7530
D_e , мкм	187,32	0,9035	192,44	0,8526	192,46	0,8447
$relAreal$	0,2034	0,4112	0,0656	0,5106	0,0507	0,3397
$F_{\text{пт}}$, м ² /кг	24,69	–	24,98	–	23,96	–
N , шт.	22714	–	24535	–	21815	–
n , шт.	13,7	–	13,2	–	13,2	–
ϕ , град	111,18	–	111,50	–	111,11	–

Примітка. с.з. – середнє значення морфометричної характеристики; одн. – однорідність шліфпорошку за цією характеристикою.

Крім того, за допомогою використання результатів DiaInspect-діагностування визначали інші морфометричні характеристики: середній діаметр (D_m) зерен та їхній еквівалентний діаметр (D_e), коефіцієнт сплюсненості ($K_{\text{спл.}}$) зерен, що є безрозмірною характеристикою зерна як 3D об’єкту, своєрідним коефіцієнтом 3D форми зерен. Його визначають за введеною в [14] залежністю

$$K_{\text{спл.}} = 1 - \left[H^2 / (F_{\min} F_{\max}) \right].$$

Порівняльний аналіз морфометричних характеристик і технологічних властивостей (чотири останні строки в табл. 3) покриттів В₂O₃+ нано-сBN та В₂O₃+ КМ 3/2 дозволяє зробити наступні висновки:

– розмірні характеристики зразка з покриттям нано-сBN дещо більші, тобто зерна більш крупніші. Однорідність за розмірними характеристиками, вирахована системно-критеріальним методом [15], менша;

– через те, що зерна більш крупніші, питома площа поверхні $F_{\text{пт}}$ та число зерен в одному караті N , визначені методами, викладеними в [16, 17] відповідно, також менші. Натомість характеристики різальних кромок (число різальних кромок n , середнє значення кута їхнього загострення ϕ), які було вираховано опосередковано-аналітичним методом, заснованим на геометричному моделюванні проєкції зерна правильними зіркоподібними багатокутниками [18], суттєво не відрізняються;

– шорсткість проєкції зерен більша, однорідність за цією морфометричною характеристикою також більша.

Окремо звернуто увагу на показник $relAreal$ – відносну долю світлої частини проєкції зерна в загальній площі проєкції. Найбільшим було значення показника у вихідного непокритого алмазного зерна (див. табл. 3), що є очі-

куваним, оскільки синтетичний алмаз є оптично прозорим тілом і тому фон проєкції таких зерен є найбільш світлим, а відповідно і показник *relAreal* є найбільшим. Підтвердженням такого пояснення є DiaInspect-знімки зерен вихідного шліфпорошку AC15 160/125 (рис. 2, а) та модифікованих його зразків із покриттями КМ3/2 (рис. 2, б) та нано-сBN (рис. 2, в). Найменше значення показника *relAreal* для покриття нано-сBN зумовлено тим, що наявність покриття на поверхні зерен (кристалів) граней значно погіршує їхню оптичну прозорість, відповідно і фон проєкції стає більш темним.

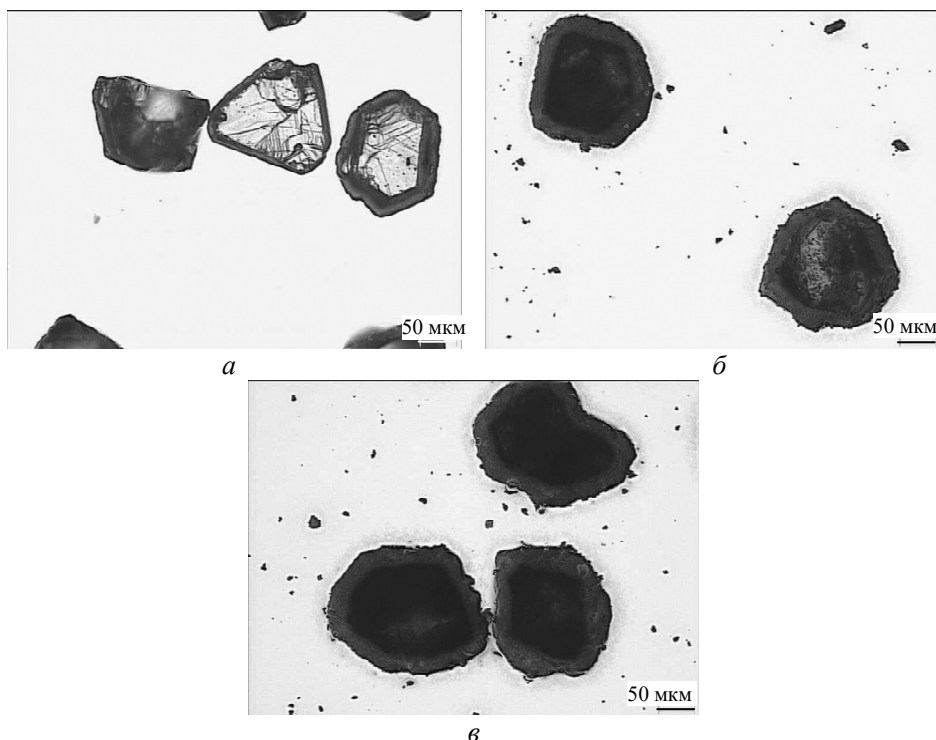


Рис. 2. Зображення алмазних зерен вихідного шліфпорошку AC15 160/125 (а) та модифікованих його зразків із покриттям КМ3/2 (б) та нано-сBN (в).

Візуальне порівняння знімків на рис. 2 підтверджує такий висновок. Більш темне тло проєкції зерен зразка з покриттям нано-сBN може свідчити про більшу щільність, безперервність і рівномірність (рівномірну розподіленість) цього покриття, як ознак його якості. Останнім часом ці нетрадиційні ознаки якості все частіше використовують для характеристики покриттів (наприклад, [19–22]). Проте в цих та інших подібних за тематичною спрямованістю публікаціях звернення до таких ознак якості покриття здійснюють на описовому рівні – більше, менше, краще, гірше і т. п. І це є їхнім недоліком, над усуненням якого слід працювати в подальшому. Ці ознаки якості є корисним і бажаним доповненням до двох відомих і широко застосовуваних характеристик покриття – товщини (h) і ступеню (μ) покриття, які мають числовий вимір (показники).

Як видно з даних табл. 4, де наведено показники характеристик покриття алмазних зерен, товщина і ступінь покриття $B_2O_3 + KM\ 3/2 + ПВС$ більші, ніж у покриття нано-сBN. Але на підставі візуального порівняння проєкції зерен, на які нанесено зазначені покриття (див. рис. 2), можна зробити висновок, що покриття нано-сBN є більш щільним, безперервним і рівномірним (рівномі-

рно розподіленим), що вже відзначали вище. Тому йому слід віддати перевагу, хоча воно за товщиною і ступенем покриття поступається покриттю $B_2O_3 + KM\ 3/2 + PVC$. Звичайно, краще було б порівняти ці два покриття за щільністю, безперервністю і рівномірністю розподілу на кількісному рівні. Проте відсутність методичного забезпечення щодо визначення показників таких ознак якості покриття та методів їхнього визначення не дозволяє це зробити.

Таблиця 4. Результати обчислення середнього об'єму v зерен вихідного шліфпорошку AC15 160/125 та модифікованих його зразків, ступеня і товщини їхнього покриття, середні значення необхідних для цього морфометричних характеристик

Характеристика	Вихідний шліфпорошок	Модифікований шліфпорошок з покриттям	
		$B_2O_3 + KM\ 3/2 + PVC$	$B_2O_3 + \text{нано-сBN}$
$v/100, \text{ мкм}^3$	23348	26170	25198
$\rho, \text{ г/см}^3$	3,51	3,26	3,13669
$F_{\max}, \text{ мкм}$	217,75	225,40	226,49
$F_{\min}, \text{ мкм}$	175,27	177,40	178,40
$H, \text{ мкм}$	126,14	134,06	128,97
<i>Roughn</i>	1,0684	1,0694	1,0728
$U_{\text{фз}}, \%$	27,46	22,79	33,07
$\mu, \%$	—	11,22	7,07
$h, \text{ мкм}$	—	3,97	1,9885

Зазначені вище нетрадиційні ознаки якості шліфпорошків з нанесеним на їхні зерна покриттям, вказані, наприклад, і у публікаціях [19–22]. З огляду на практичне застосування шліфпорошків із дослідженими авторами покриттями, можна констатувати, що покриття нано-сBN є більш якісним.

В табл. 5 наведено показники диференціальної формоподібності, похибка формозаміни проекції зерен, вираховані пошуково-аналоговим методом [23] та однорідність за формоподібністю проекції зерен шліфпорошків AC15 160/125, визначена методом, викладеним у [24]. Видно, що однорідність за формоподібністю у покриття нано-сBN є найвищою.

З табл. 4 та 5 видно, що у нано-сBN ступінь покриття μ менший, товщина покриття h також менша. Водночас для цього шліфпорошку характерні більша кількість зерен із проекцією у формі прямокутника, трапеції, напівправильних дванадцятикутника та восьмикутника, а також вищий показник однорідності за формоподібністю проекції зерен та менша кількість зерен із проекцією у формі овалоподібних фігур (коло + еліпс).

ВИСНОВКИ

Встановлено, що нанесення на поверхню алмазних зерен шліфпорошків підвищеної міцності (AC15–AC20) покриття з наявністю нанорозмірного кубічного нітриду бору дозволяє відчутно підвищити зносостійкість алмазних кругів, що може бути зумовлено покращенням утримання у зв'язуючому алмазних зерен підвищеної міцності. Такий покращений алмазний інструмент може бути застосований у механообробці новітніх матеріалів, які нині використовують у машино- та авіабудуванні.

Таблиця 5. Показники диференціальної формоподібності ($f_k^{(л)}$), похибка формозаміни ($\Delta_k^{(л)}$) проєкції зерен та однорідність (u_{fz}) за формоподібністю проєкції зерен вихідного та модифікованих шліфпорошків АС15 160/125

Базові фігури-аналоги	Вихідний шліфпорошок		Модифікований шліфпорошок з покриттям			
	$f_k^{(л)}$, %	$\Delta_k^{(л)}$, %	В ₂ О ₃ + КМ 3/2 + ПВС		В ₂ О ₃ + нано-сВН	
	$f_k^{(л)}$, %	$\Delta_k^{(л)}$, %	$f_k^{(л)}$, %	$\Delta_k^{(л)}$, %	$f_k^{(л)}$, %	$\Delta_k^{(л)}$, %
1	11,11	0,1562	15,77	0,1618	7,32	0,1740
2	36,59	0,1723	39,58	0,1702	42,37	0,1744
3	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
4	16,09	0,1042	16,37	0,1006	18,35	0,1028
5	6,13	0,1036	4,46	0,1143	4,43	0,0996
6	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
7	1,34	0,2444	3,27	0,2524	3,40	0,2604
8	1,53	0,0442	0,00	0,0000	0,00	0,0000
9	0,96	0,2796	0,60	0,3001	0,52	0,2782
10	0,00	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000
11	9,20	0,0594	5,65	0,0679	7,42	0,0664
12	17,05	0,0936	14,29	0,0983	16,19	0,1026
u_{fz}	27,46		22,79		33,07	

Примітка. 1 – овалоподібні фігури (коло + еліпс); 2 – прямокутник; 3 – ромб; 4 – трапеція; 5 – квадрат; 6 – правильний п'ятикутник; 7 – правильний шестикутник; 8 – правильний восьмикутник; 9 – трикутник; 10 – паралелограм; 11 – напівправильний дванадцятикутник; 12 – напівправильний восьмикутник.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори роботи заявляють, що не мають конфлікту інтересів

G. A. Petasyuk¹, O. O. Bochechka¹, V. I. Lavrinenko¹,
V. G. Poltoratskii¹, V. V. Smokvyna¹, V. V. Bilorusets¹, L. A. Prots²

¹Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Uzhgorod National University, Ukraine

Performance indicators of a grind tool using diamond
abrasive powders with cBN coating on the surface
of their grains in the cutting layer

A review of modern publications on the modification of the surface of diamond grinding powder grains by applying coatings of cubic boron nitride (cBN) on them is presented. The results of these studies indicate the effective effect of such modification and the positive effect of cBN films on diamond surfaces. It was found that the best fixing agent for cBN coating is gelatin, and BF6 glue and polyvinyl alcohol (PVA) are approximately the same in their effect, although for lower grinding performance, the use of PVA is preferable, and for

higher ones, the use of BF₆ glue. At the same time, the studies described in the article, conducted by the authors, showed that technologically for coating application, the use of PVA is preferable, especially when the coating includes nano-sized cubic boron nitride (cBN-nano). It has been established that applying a coating containing cBN-nano to the surface of high-strength diamond grains of grades AC15–AC20 significantly increases the wear resistance of diamond wheels, which may be due to the improvement of the retention of these diamond grains in the binder. The coating of modified diamond grinding powders has been characterized, and the feasibility of using such quality characteristics of the coating of diamond grinding powders as its density, continuity and uniformity (uniform distribution) has been revealed.

Keywords: boron nitride coating, mechanical and tribological properties, diamond, cubic boron nitride, thickness, density, degree of coating.

1. Lavrinenko V.I., Poltoratskyi V.G., Pasichnyi O.O., Solod V.Yu. Using diamond grinding powders with combined coatings on diamond grain surfaces in abrasive tools. *J. Superhard Mater.* 2024, Vol. 46, no. 3. P. 238–243. DOI: 10.3103/S1063457624030067
2. Lavrinenko V.I. Boron oxide on the surface of grains from superhard materials as a possible factor increasing the performance characteristics of grinding tools. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 5. P. 402–408. DOI:10.3103/S1063457624050058
3. Yang M., Hu Y., Cui J., Yang Y., Qiu M., Lu Yu., Shen Yi, Jia Zh., Nishimura K., Tang Ch., Jiang N., Yuan Q. Achieving ultrahigh hole mobility in hydrogen-terminated diamond via boron nitride modifications. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 144, April. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111007>
4. Erick G., Kargar F., Patel A., Vishwakarma S., Wright D., Wilson R.B., Smith D.J., Nemanich R.J., Balandin A.A. Optical and acoustic phonons in turbostratic and cubic boron nitride thin films on diamond substrates. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 140. Part A, art. 110452. DOI: 10.48550/arXiv.2307.11276
5. Mullen J.T., Boulton J.A., Pan M., Kim K.W. Electronic properties of c-BN/diamond heterostructures for high-frequency high-power applications. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 143, art. 110920. DOI: 10.1016/j.diamond.2024.110920
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.* 2023. Vol. 132, art. 109628. DOI:10.1016/j.diamond.2022.109628
7. Лаврінченко В.І., Бочечка А.А., Полторацький В.Г., Солод В.Ю. Модифікування шліфпорошків синтетичного алмаза для шліфувального інструмента. *Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка)*. 2020. № 6. С. 56–59.
8. Полторацький В.Г., Бочечка О.О., Лаврінченко В.І., Лещенко О.В., Білоченко В.П., Сільченко Я.Л., Смірнова А.В. Особливості технологічного процесу формування захисного покриття з мікро-, субмікро- та нанопорошків кубічного нітриду бору на поверхні зерен шліфпорошків синтетичного алмазу підвищеної міцності. *Інструментальне матеріалознавство: Зб. наук. пр.* 2024. Вип. 27. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України. С. 178–183. DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-178-183
9. Kryszak B., Ujčić A., Gajdošová V., Šlouf M., Szustakiewicz K. Micro vs nano: influence of filler size on the rheological and mechanical properties of highly-filled PLA/HAp and PCL/HAp composites. *J. Mater. Res. Technol.* 2025. Vol. 37. P. 2919–2934. DOI:10.1016/j.jmrt.2025.06.234
10. Delbé K., Doumeng M., Denape J., Mérian T., Berthet F., Marsan O., Chabert F. Contribution of Raman analysis on terminological study of PEEK reinforced with micro or nano SiC particles. *Wear.* 2025. Vol. 570, art. 205927. DOI: 10.1016/j.wear.2025.205927
11. YUMPU Dialnspect.OSM Dialnspect.OSM – Vollstaedt-Diamant GmbH. <https://www.yumpu.com>
12. ДСТУ 3292–95 Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.96.
13. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Ind. Diam. Rev.* 2006. Vol. 66, no. 1. P. 42–47.
14. Poltoratskiy V.G., Petasyuk G.A., Safonova M.N., Bochechka A.A., Tkach V.N., Shamraeva V.S. A novel composite abrasive material of unmarketable natural diamond powder. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, no. 2. P. 136–144. DOI: 10.3103/S1063457614020087
15. Петасюк Г.А. Системно-критеріальний метод кількісної оцінки однорідності надтвердих дисперсних матеріалів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2003. № 5. С. 101–105.

16. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. Extrapolation-analytical method for determination of outer specific surface of powders of superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2007. Vol. 29, no. 6. P. 375–383. <https://doi.org/10.3103/S1063457607060081>
17. Petasyuk G.A., Sirota Yu.V. Analytical determination of a number of particles per carat for diamond powders on the basis of an extrapolation-affine 3D grain model. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 200–208. <https://doi.org/10.3103/S1063457612030082>
18. Petasyuk G.A. Interpretative and applied aspects of some morphological characteristics of superabrasive powders. *J. Superhard Mater.* 2010. Vol. 32, no. 2. P. 128–139. <https://doi.org/10.3103/S1063457610020073>
19. Qingzhu G., Meng Y., Yang J., Yonghong W., Junwu L. Characterization of Cr coating obtained on micrometer-scale diamond particles prepared by molten salt method. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 6. P. 393–404. <https://doi.org/10.3103/S106345762206003X>
20. Su Zh., Han K., Ye Zh., Zhao J., Tang X., Pang J., Zhu D., Sun T., Gao G., Cao W. Tungsten coating by diffusion on diamond surfaces: process and characterization. *Surf. Sci. Technol.* 2025. Vol. 3, no. 17. <https://doi.org/10.1007/s44251-025-00083-8>
21. Zhou Q.W., Bolzoni L., Yang F. Effects of different element coatings on the interface characteristics and thermal conductivity of vacuum-sintered diamond/Cu composites. *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum Surfaces and Films.* 2024. Vol. 42, no. 4. DOI: 10.1116/6.0003600doi.org/10.1116/6.0003600
22. Vienikov V.O., Bochechka O.O., Chernienko O.I., Osipov O.S., Bilorusets V.V., Liantseva A.O., Melniychuk Yu.O. Effect of titanium coating modification of diamond powder grains on the formation of a polycrystalline composite under high pressure and high temperature. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 3. P. 193–197. <https://doi.org/10.3103/S1063457625030104>
23. Petasyuk G.A. A system-analogue method of identification of geometric shape of the abrasive grain projection. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 4. P. 277–287. DOI: 10.3103/S1063457616040092
24. Petasyuk G.A., Bochechka O.O. Uniformity of abrasive powders according to the shape similarity of grain projections and a method for its determination. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 2. P. 117–125. DOI: 10.3103/S1063457620020070

Надійшла до редакції 15.04.26

Після доопрацювання 22.04.26

Прийнята до опублікування 28.04.26