УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

Є. О. Пащенко, С. В. Сохань*, Г. А. Петасюк,
Г. Д. Ільницька, Д. О. Савченко, Н. В. Єльцов
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна
**svsokh@gmail.com*

Ефективність алмазного мікропорошку з покриттям нікелем під час доведення керамічних куль у магнітному полі

Для умов прецизійного доведення керамічних куль з карбіду бору алмазним мікропорошком з покриттям нікелем у магнітному полі вивчено змінювання точності форми й шорсткості поверхні керамічні куль з карбіду бору, а також еволюцію складу порошку і його питомої магнітної сприйнятливості, морфометричних характеристик алмазних зерен з часом доведення. Показано нелінійний характер зменшення інтегральних параметрів шорсткості поверхні й непостійності діаметра куль. Змінювання інших параметрів шорсткості вказує на тенденцію до стійкого зменшення висоти виступів на фоні наявності надмірно глибоких западин поверхні. Змінювання морфометричних характеристик алмазних зерен свідчить про інтенсивне налаштування абразивної системи на стабільний процес на першому етапі доведення включно з дробленням або зношуванням зерен з прискореною втратою покриття. Сформульовано вимоги до якості таких мікропорошків.

***Ключові слова**: керамічні кулі з карбіду бору, алмазне доведення в магнітному полі, непостійність діаметра, шорсткість поверхні куль, алмазний мікропорошок, покриття нікелем, морфометричні характеристики алмазних зерен, питома магнітна сприйнятливість порошку.*

ВСТУП

Постійне удосконалення власне самих керамічних і композиційних матеріалів [1–2] потребує й неодмінного удосконалення технології їхньої алмазної обробки. Наразі у світі тривають дослідження можливостей досягнення високої точності і шорсткості поверхні виробів складної форми, зокрема керамічних, нетрадиційними методами субтрактивної механічної обробки (тобто з видаленням матеріалу) [3–5].

Серед інших особливу увагу приділяють методам алмазної обробки керамічних куль в магнітному полі із застосуванням магнітно-алмазного порошку

© Є. О. ПАЩЕНКО, С. В. СОХАНЬ, Г. А. ПЕТАСЮК, Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА, Д. О. САВЧЕНКО, Н. В. ЄЛЬЦОВ, 2026

[6–14]. Так, в [14] показано ефективність процесу кластерного магнітно-реологічного фінішування (КМРФ) керамічних куль за технологічної схеми обробки між двома дисками, обладнаними магнітами для створення динамічних магнітних полів з метою кластерного охоплення кожної кулі магнітно-абразивним порошком у магнітному полі. У процесі КМРФ керамічні кулі поміщають у канавку нижнього диску, їх оточує магнітно-алмазний порошок, який утримується магнітним полем через кластерний магнітно-реологічний ефект, спричинений N- і S-полюсами магнітів. Показано принципову можливість зниження шорсткості (*Ra*) поверхні прецизійних куль з нітриду кремнію за оптимальних умов з 63 до 4,35 нм.

Разом з тим працездатність магнітно-алмазного порошку під час доведення керамічних куль у магнітному полі залишається не дослідженою. Отже актуальним з погляду авторів є вивчення умов підвищення якості прецизійних керамічних куль під час їхнього доведення у магнітному полі, зокрема зниження несферичності й шорсткості поверхні куль, за технологічної схеми обробки між двома дисками, один з яких обладнано постійними магнітами для створення динамічних магнітних полів навколо кожної оброблюваної кулі, а також збереження різальної здатності магнітно-алмазного порошку під час обробки, змінювання морфометричних характеристик алмазних зерен під час доведення, питомої магнітної сприйнятливості магнітно-алмазного порошку, які впливають на ефективність процесу обробки.

Тому метою даного дослідження є вивчення умов підвищення якості прецизійних керамічних куль під час алмазного доведення у магнітному полі й змінювання характеристик магнітно-алмазного порошку з покриттям нікелем.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження процесу доведення керамічних куль у магнітному полі в Інституті надтвердих матеріалів НАН України було виготовлено дослідний зразок магнітно-алмазного мікропорошку (МАП) на основі стандартного алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 (ДСТУ 3292-95 [15]) за допомогою металізації поверхні зерен 20 %-ним покриттям нікелем.

Процедура нанесення покриття на поверхню частинок мікропорошку алмазу складалася з двох етапів. На першому етапі знежирений мікропорошок обробляли розчином органічної комплексної сполуки міді у неводному середовищі. Оброблений порошок сушили в атмосфері азоту з поступовим підйомом температури з початкових 323 до 523 K. Водночас на частинках утворювалася неплавка та нерозчинна плівка з товщиною, за розрахунковою оцінкою, в межах 0,2–0,5 мкм. Внаслідок подальшої термообробки за температури 623 K, обраній за даними диференційної сканувальної калориметрії, утворювалася полімерна структура, нерозчинна у воді та органічних розчинниках та міцно зв’язана з поверхнею частинок алмазу. Принаймні, після ручного розтирання зразка обробленого порошку алмазу в ступці, оптична мікроскопія не виявила вільних від полімерної плівки зерен. Згідно результатів, отриманих методом малокутової рентгенівської дифракції, одержані полімерні плівки містили три типи наномасштабних упорядкованих областей. Це, зокрема, вуглецеві домени графен-графанової будови, а також ультрадисперсні частинки та нанокластери міді та її нестехіометричних оксидів (рис. 1).

Наявність кластерів відновленої міді та дефіцитних за оксигеном частково відновлених оксидних форм, які також є електропровідними, підтверджена даними рентгенофотоелектронної спектроскопії (рис. 2). Присутність згаданих фаз підтверджують також дані ширококутової рентгенівської дифракції (рис. 3) та електронної мікроскопії (рис. 4). Застосований ступінь збільшення

не дозволяє візуалізувати нанодисперсні кластери згаданих фаз, виявлених рентгенівськими методами, проте чітко підтверджує присутність ультрадисперсних (діаметром 0,1 мкм та менше) частинок металу, у даному випадку – міді, у складі полімерної плівки, нанесеної на частинки порошку алмазу для активації поверхні з метою подальшої хімічної металізації.

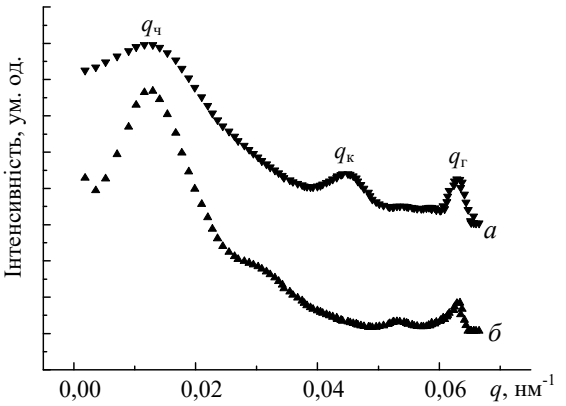


Рис. 1. Малокутові дифрактограми продукту полімеризації комплексної сполуки міді за температури полімеризації 423 (*б*) та 623 (*а*) К; $q_ч$ – ультрадисперсні частинки міді; $q_к$ – нанокластери міді; $q_г$ – упорядковані графен-графанові домени.

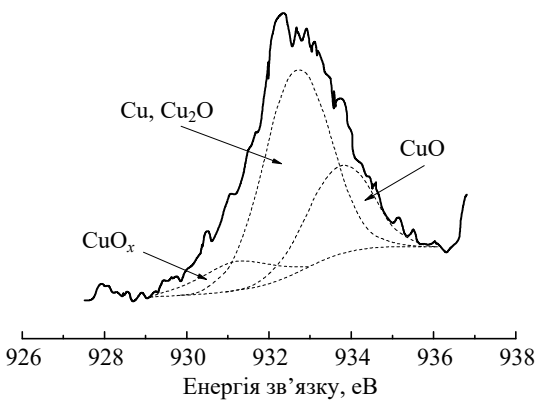


Рис. 2. Нанокластери металічної міді та її нестехіометричних оксидів у складі активуючого шару на поверхні алмазу після полімеризації за температури 623 К.

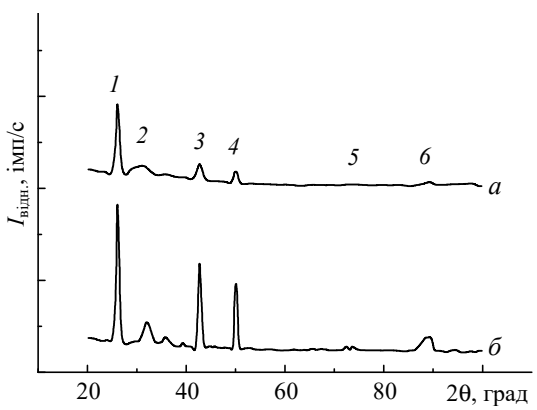
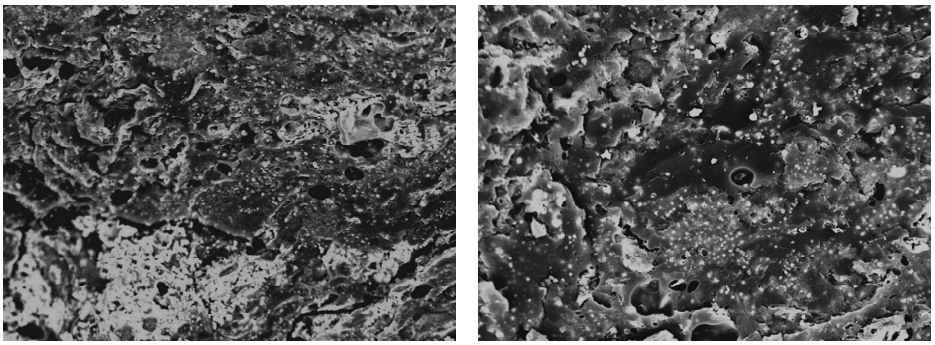


Рис. 3. Рентгенівські дифрактограми продукту полімеризації за температур полімеризації 423 (*а*) та 623 (*б*) К комплексної сполуки міді, використаної для активації поверхні алмазу: *1* – шари графену та графану; *2*, *3* – Cu; *4* – Cu_2O; *5*, *6* – CuO.

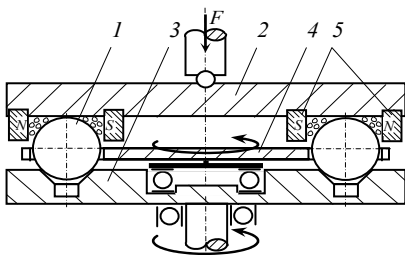


а *б*

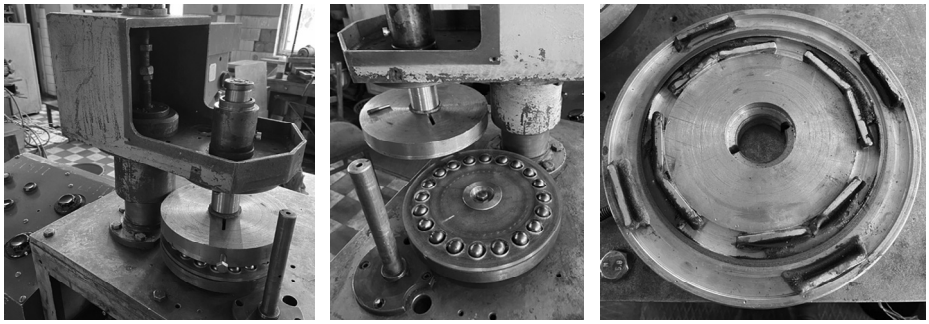
Рис. 4. Мікроструктура продуктів полімеризації комплексної сполуки міді, застосованої для активації поверхні алмазу; температура процесу полімеризації – 423 (*а*) та 623 (*б*) К; ×1000.

На другому етапі здійснювали нанесення на активовані частинки алмазу нікелевого покриття з використанням стандартного розчину хімічної металізації. Завдяки попередній активації процес відбувався з високою швидкістю без застосування високовартісних каталізаторів, зокрема, паладію, причому було забезпечено хорошу адгезію металічного покриття до алмазних зерен, що зазвичай становить проблему для традиційної технології. Одержаний продукт за своєю будовою виходить за межі традиційного погляду на металізовані порошки алмазу і являє собою, скоріше, дисперсний інструментальний композит.

Доведення керамічних куль з карбіду бору у магнітному полі (рис. 5, *а*) проводили на спеціальному технологічному стенді, оснащеному співвісними й обертовими верхнім і нижнім шпинделями для встановлення дисків-притирів, причому обертання верхнього під час обробки куль не використовували. Вигляд стенду наведено на рис. 5, *б*.



а



б *в* *г*

Рис. 5. Схема магнітно-алмазного доведення керамічних куль (*а*), вигляд технологічного стенду (*б*) і куль у сепараторі (*в*), розташування постійних магнітів уздовж доріжки кочення куль (*г*): *1* – оброблювані кулі; *2* – верхній диск; *3* – нижній диск; *4* – сепаратор; *5* – постійні магніти.

У диску, закріпленому на нижньому шпинделі було виконано концентричну канавку V-подібного профілю для розміщення й направлення кульок. Оброблювані кулі пружно притискали до канавки верхнім диском, підвішеним через шарнір на верхньому шпинделі. Завдяки шарнірному підвісу верхній диск вільно самовстановлювався на кулях під час пружного притискання. Між дисками було введено вільно обертовий сепаратор у вигляді тонкого диску з отворами під кулі для відокремлення їх одна від одної. Простір між сепаратором і верхнім диском було збільшено під розміщення постійних магнітів для створення магнітного поля. Було використано неодимові магніти аксіальної намагніченості габаритами 8×5×40 мм із силою зчеплення 80 Н кожен. Магніти розміщували на зовнішньому й внутрішньому колах уздовж доріжки кочення куль оберненими максимально намагніченими гранями (8×5 мм) у напрямку куль (див. рис. 1, *в*). Під дією магнітного поля над кожною з вказаних граней утворювалися гнучкі конусоподібні нашарування з МАП, які взаємодіяли з поверхнею куль.

Як зразки для дослідження формування шорсткості поверхні використано попередньо доведені керамічні кулі з B_4C ∅ 16,75 мм у кількості 20 шт. Досліджували змінювання шорсткості поверхні куль за допомогою (через) фіксування значення параметрів шорсткості після кожних 60 хв доведення протягом 300 хв, швидкість обертання нижнього диску – 20 об/хв, зусилля пружного притиснення верхнього – 45 Н. Крім цього, перед початком магнітно-алмазного доведення і за кожної зупинки процесу для фіксації параметрів шорсткості відбирали зразки для визначення морфометричних характеристик зерен і питомої магнітної сприйнятливості χ магнітно-алмазного порошку.

Вимірювання шорсткості поверхні здійснювали на трьох взаємно віддалених площадках поверхні розміром 250×190 мкм кожної кулі з десяти, які досліджували, на безконтактному мікроінтерференційному профілографі Micron-alpha [16] (рис. 6, *а*), а вимірювання непостійності діаметра V_{Dws} (позначення згідно ISO 3290-2:2014) – на двадцяти кулях як різницю найбільшого й найменшого значень діаметра, визначеного у трьох взаємно віддалених перерізах кожної кулі за допомогою встановленого на стійку мікрокатора ИГПВ (головка вимірювальна) з ціною поділки шкали вимірювань 0,1 мкм і межами шкали ±4 мкм (рис. 6, *б*).



а *б*

Рис. 6. Безконтактний інтерференційний профілограф Micron-alpha (*а*) та мікрокатор, встановлений на стійку (*б*).

Досліджували змінювання переважно амплітудних параметрів шорсткості поверхні [17]: *Sa* – середнє арифметичне значення ординат шорсткості, оцінене по всій 3D-поверхні вимірюваної ділянки (ареалу); *Sq* – середнє квадратичне значення тих же ординат шорсткості. Останній є більш чутливим до просторової структури (виступів, западин), ніж *Sa,* через те, що амплітуди піднесені у квадрат, і застосовується для контролю шорсткості вельми тонко оброблених поверхонь у наукових вимірюваннях і статистичних оцінках. Аналізували також параметри *Sp* – максимальну висоту виступу й *Sz* – максимальну висоту поверхні ареалу, та їхнє відношення *Sp*/*Sz*. Параметри *Ssk* – перекіс (асиметрія) поверхні ареалу, тобто ступінь симетрії висот поверхні відносно середньої площини, залежно від знаку вказує на переважання виступів (*Ssk* > 0) або западин (*Ssk* < 0), і *Sku* – ексцес (загостреність) поверхні ареалу, вказує на наявність надто високих виступів або надто глибоких западин (*Sku* > 3) або їхню відсутність (*Sku* < 3). Крім того, для більшої обґрунтованості застосування останніх параметрів наведено криву щільності розподілу ординат ареалу $h(c)$, % від рівня висоти поверхні ареалу c, %.

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [18], під час обрахунку середніх значень показників їхні поточні значення перевіряли на наявність результатів, що різко виділяються серед інших – дисперсії вибірок перевіряли на однорідність за G-критерієм Кохрена ($G_{0,95}$табл = 0,2929 за k = 30, ν = 1 – для *Sa* і $G_{0,95}$табл = 0,3894 за k = 20, ν = 1 – для V_{Dws}), що дозволяло виявити і не враховувати поточні значення, які суттєво відрізняються від середнього. Якщо перевірка показувала (з довірчою імовірністю 0,95), що вони є однорідними, за найкращу оцінку дисперсії відтворюваності вважали середньозважену дисперсію $S^2_{\text{відтв.}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S^2_{\text{відтв.}}$ Середнє значення параметра шорсткості поверхні *Sa* склало 0,39 мкм, непостійності діаметра V_{Dws} – 9,8 мкм. Середню стандартну похибку вимірювання показників обраховували як середнє арифметичне середньозважених стандартних похибок вимірювання. Середня стандартна похибка вимірювання *Sa* склала 0,19 мкм, V_{Dws} – 6 мкм. Середнє значення параметра шорсткості поверхні *Sa* після кожного сеансу доведення визначали аналогічно.

Морфометричні характеристики вихідного алмазного мікропорошку та мікропорошку із нанесеним на його зерна покриттям визначали за допомогою приладу DiaInspect.OSM фірми “Vollstadt Dimant GmbH”, Німеччина [19]. Зазначений прилад дозволяє в автоматичному режимі встановлювати значення (діагностувати) більше 20 характеристик абразивних порошків за результатами вимірювання проби в кількості до 1999 зерен включно. Під час виконання цієї роботи діагностували такі характеристики: максимальний ($F_{\max}$) і мінімальний ($F_{\min}$) діаметри Feret, висоту зерен (H), форм-фактор фактичного (C_r) зображення проекції зерна, Feret-подовження (F_{el}, аналог коефіцієнта форми за стандартом [15]), шорсткість проекції зерен (*Rg*), фактичний (p_r) периметр проекції зерна, відносну частку світлої частини проекції зерна в загальній її площі (*relAreal*). Повний перелік і геометричне тлумачення цих характеристик, їхній понятєвий сенс подаються в описово-методичних матеріалах фірми-виробника до приладу DiaInspect.OSM [19], в оригінальних публікаціях його розробників [20] та в публікаціях авторів цієї роботи, наприклад, в [21, 22].

Крім того, за допомогою використання результатів DiaInspect-діагностування розраховували інші (похідні) морфометричні характеристики: середній розмір (D_m) зерна та його еквівалентний діаметр (D_e), питомий периметр проекції зерен

($P_{пт}$), коефіцієнт сплющеності зерен ($K_{спл}$). Коефіцієнт сплющеності є безрозмірною характеристикою зерна як 3D об'єкту, своєрідним коефіцієнтом 3D форми зерен. Його визначають за введеною в [22] залежністю

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

В доповнення до цього визначали наступні технологічні властивості досліджуваних мікропорошків: зовнішню питому площу поверхні ($F_{зпт}$, [23]), число зерен в одному караті (N, [24]), число різальних кромок (n) та середнє значення кутів (φ) їхнього загострення [25], ступінь [26] та товщину покриття [27], показники зернового складу [28].

Проводили також визначення показників диференціальної формодібності і похибки формозаміни проекції зерен пошуково-аналоговим методом [29] та однорідності за формоподібністю проекції зерен методом, викладеним в [30].

Змінювання у часі магнітних властивостей магнітно-алмазного порошку вивчали за допомогою вимірювання структурно нечутливої характеристики – питомої магнітної сприйнятливості χ за методикою М88 України 90.256-2004 [31].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У табл. 1 представлено усереднені значення параметрів шорсткості поверхні куль після поточного певного етапу доведення куль (60 або 120 хв).

Таблиця 1. Параметри шорсткості поверхні керамічних куль з B_4C й їхня стандартна похибка вимірювання

Час доведення, хв	*Sa*	σ_{Sa}	*Sq*	σ_{Sq}	*Sp*	σ_{Sp}	*Sz*	σ_{Sz}	*Sp/Sz*	*Ssk*	σ_{Ssk}	*Sku*	σ_{Sku}
0	0,140	0,019	0,191	0,026	0,939	0,329	1,690	0,413	0,556	0,294	0,155	4,030	0,485
60	0,131	0,018	0,183	0,014	0,886	0,227	1,646	0,222	0,538	0,042	0,361	4,632	0,974
120	0,118	0,020	0,164	0,032	0,845	0,492	1,916	0,816	0,441	-0,014	0,162	4,995	1,859
180	0,110	0,025	0,153	0,039	0,800	0,258	1,911	0,847	0,419	0,152	0,337	5,014	1,177
300	0,104	0,032	0,143	0,045	0,807	0,251	1,675	0,627	0,482	0,209	0,471	4,903	0,866
420	0,095	0,026	0,132	0,036	0,815	0,200	1,651	0,297	0,494	0,291	0,385	5,459	1,501
540	0,088	0,015	0,119	0,021	0,757	0,160	1,431	0,170	0,529	0,060	0,339	5,090	0,842

На рис. 7 і 8 наведено графіки змінювання з часом обраних параметрів шорсткості поверхні ареалу, непостійності діаметра куль V_{Dws} та питомої магнітної сприйнятливості χ алмазного порошку з покриттям.

У табл. 2 наведено морфометричні характеристики та технологічні властивості (чотири останні рядки) мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 з нікелевим покриттям на початку і в процесі доведення. Аналогічна за обсягом інформація подається і для стандартного за ДСТУ 3292–95 мікропорошку АСМ зернистістю 20/14.

У табл. 3 наведено показники диференціальної формодібності (відносна кількість зерен $f_k^{(д)}$ і відносна похибка формозаміни $\Delta_k^{(д)}$ проекції зерен) та однорідність (u_{fpz}, %) за формоподібністю проекції зерен) мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 з нікелевим покриттям на початку і в процесі доведення, а також стандартного за ДСТУ 3292-95 мікропорошку АСМ зернистістю 20/14. У табл. 4 наведено диференціальний розподіл середнього розміру зерен (D_m).

На рис. 9 показано змінювання кривих розподілу середнього розміру зерен.

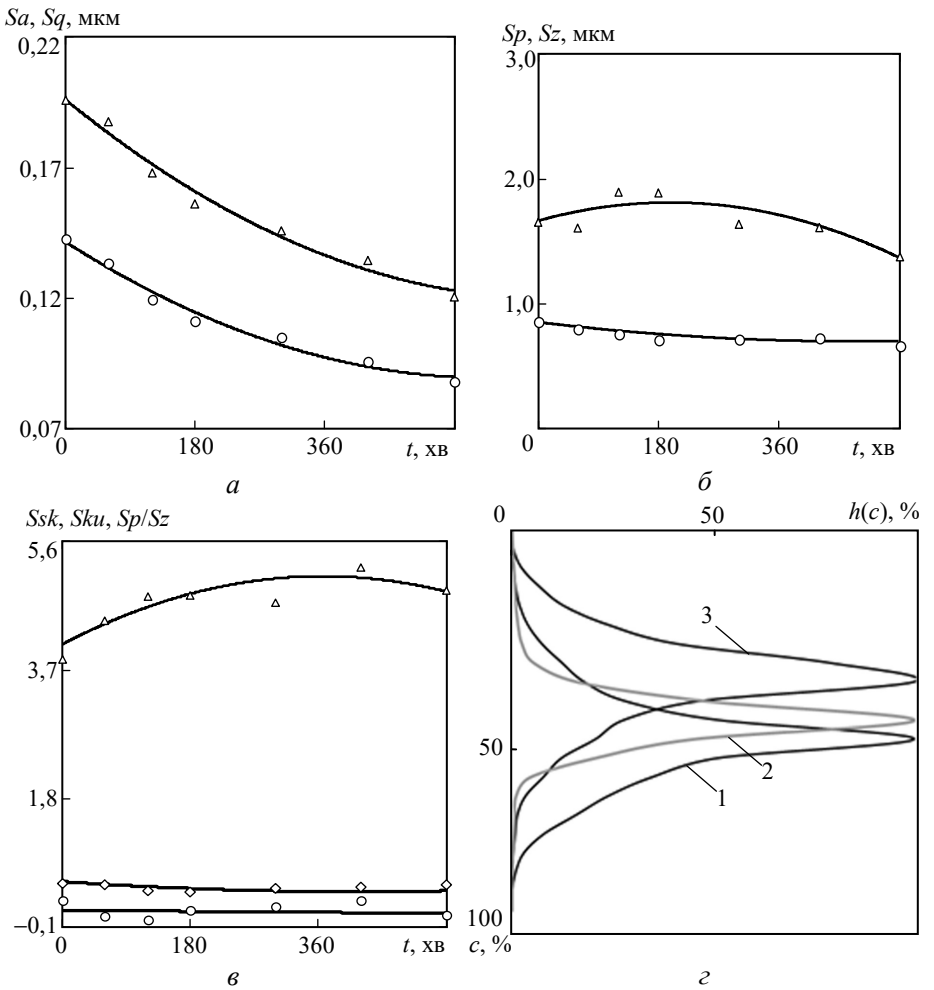


Рис. 7. Змінювання параметрів шорсткості поверхні керамічних куль з B_4C і криві щільності розподілу ординат ареалу $h(c)$: Sa (○), Sq (△) (*а*); Sp (○), Sz (△) (*б*); Ssk (○), Sku (△), Sp/St (◇) (*в*); $h(c)$ для початкового стану поверхні куль (*1*), після 3 (*2*) і 9 (*3*) год доведення (*г*).

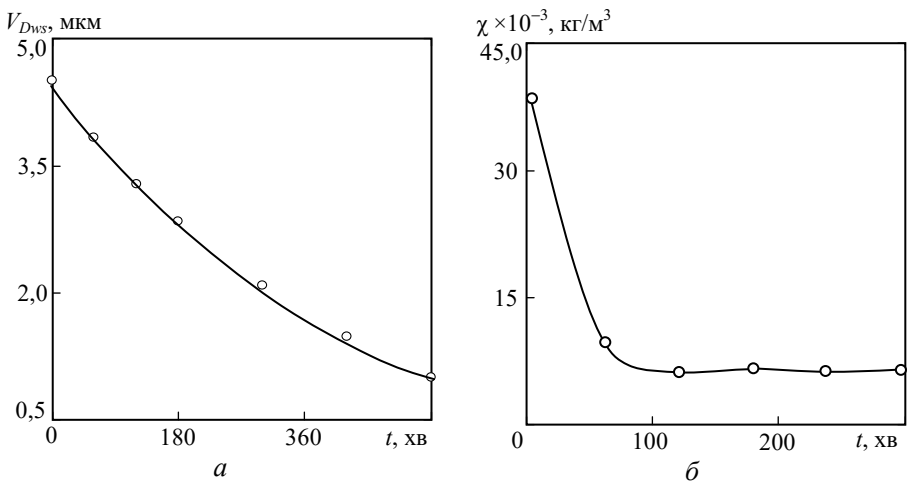


Рис. 8. Змінювання непостійності діаметра куль V_{Dws} (*а*) та питомої магнітної сприйнятливості χ магнітно-алмазного порошку (*б*).

Таблиця 2. Морфометричні характеристики й технологічні властивості (чотири останні рядки) мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 з нікелевим покриттям на початку і в процесі доведення у порівнянні з таким без покриття за ДСТУ 3292–95

Параметр	Початковий мікропорошок з покриттям		Після доведення впродовж, хв						Мікропорошок згідно ДСТУ 3292–95	
			60		120		300			
	с.з.	одн.	с.з.	одн.	с.з.	одн.	с.з.	одн.	с.з.	одн.
F_{max}, мкм	27,45	0,5671	11,75	0,4330	10,73	0,3397	8,5556	0,4746	19,56	0,7048
F_{min}, мкм	18,51	0,6269	7,99	0,5060	7,41	0,4322	6,0943	0,4682	14,11	0,6448
H, мкм	15,84	0,6269	6,84	0,5060	6,34	0,4322	5,21	0,4682	12,08	0,6448
C_r	1,5740	0,4592	1,4031	0,5878	1,3313	0,6850	1,2970	0,7873	1,3272	0,6470
F_{el}	1,4873	0,4754	1,4877	0,5075	1,4611	0,4828	1,4182	0,5499	1,3996	0,4923
$K_{спл}$	0,5062	0,6489	0,4951	0,6779	0,4875	0,6754	0,4752	0,7224	0,4064	0,6017
Rg	1,0894	0,5109	1,0658	0,7034	1,0558	0,7980	1,0567	0,6956	1,0579	0,7186
D_m, мкм	22,98	0,6119	9,8705	0,4178	9,06	0,3839	7,3250	0,4563	16,84	0,7378
D_e, мкм	20,44	0,6398	9,0739	0,4390	8,47	0,3967	6,9406	0,4705	15,76	0,7316
A_{tot}, мкм^2	356,88	0,4484	81	0,3341	76	0,1860	52,0456	0,2983	199,40	0,5669
p_r, мкм	81,19	0,5406	34,21	0,4564	30,91	0,4062	24,9533	0,4615	57,12	0,6354
$P_{пт}$, 1/мкм	0,2590	0,6237	0,6607	0,5173	0,7176	0,5646	0,8949	0,5240	0,2989	0,5787
relAreal	0,2455	0,3999	0,3587	0,3375	0,4633	0,3371	0,4039	0,3609	0,2589	0,3881
N, шт.	12 798 000		104 630 000		101 420 000		180 150 000		34 563 000	
$F_{зпт}$, м^2/кг	130,58		341,61		370,68		442,89		158,06	
n, шт.	7		8		9		10		9,0	
φ, град.	84,33		95,66		101,88		106,56		102,84	

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

Таблиця 3. Показники диференціальної формодібності (відносна кількість зерен $f_k^{(д)}$, %, відносна похибка формозаміни $\Delta_k^{(д)}$ проекції зерен, % та однорідність u_{fpz}, % за формоподібністю проекції зерен мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 з покриттям нікелем на початку і в процесі доведення, а також без покриття (згідно ДСТУ 3292–95)

Номер БФА	Початковий мікропорошок з покриттям		Мікропорошок після доведення впродовж, хв						Мікропорошок згідно ДСТУ 3292–95	
			60		120		300			
	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$
1	2,76	16,71	5,91	17,88	9,43	0,1823	23,36	0,18	5,00	17,12
2	45,40	17,53	61,27	17,60	65,58	0,1718	62,11	0,17	70,14	16,98
3	16,62	36,33	7,46	35,62	2,61	0,3297	1,45	0,33	1,90	30,28
4	12,94	19,02	0,70	19,25	1,66	0,1828	0,15	0,17	4,40	17,17
5	8,43	13,66	7,06	11,05	5,62	0,0966	3,06	0,09	8,35	9,64
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця 3. (Продовження)

8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	12,34	27,38	15,83	29,32	13,50	0,2845	9,52	0,29	8,30	28,06
19	1,02	43,39	1,25	39,85	0,70	0,3992	0,05	0,42	0,15	38,06
11	0,12	8,23	0,10	4,28	0,05	0,0912	0,20	0,06	0,25	6,23
12	0,37	14,38	0,40	2,63	0,85	0,1080	0,10	0,12	1,50	11,11
u_{fpz}	37,19		55,28		55,42		55,61		65,75	

Примітка. БФА – базова фігура-аналог; 1 – овалоподібні фігури (коло+еліпс); 2 – прямокутник; 3 – ромб; 5 – рівнобедрена трапеція; 5 – квадрат; 6 – правильний п'яти кутник; 7 – правильний шестикутник; 8 – правильний восьмикутник; 9 – трикутник; 10 – паралело-грам; 11 – напівправильний дванадцятикутник; 12 – напівправильний восьмикутник; u_{fpz} – однорідність за формоподібністю проекції зерен.

Таблиця 4. Диференціальний розподіл середнього розміру D_m зерен мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 з покриттям нікелем на початку і в процесі доведення та без покриття (згідно ДСТУ 3292-95)

№ з/п	Межі і середина розмірних інтервалів зернистості, мкм			Зерновий склад, %				
				згідно ДСТУ 3292–95	початковий з покриттям	після доведення впродовж, хв		
						60	120	300
1	0	1	0,5	0	0	0	0	0,0000
2	1	2	1,5	0	0	0	0	0,0000
3	2	3	2,5	0	0	0	0	12,6316
4	3	5	4,0	0	0	22,04	31,01	32,2306
5	5	7	6,0	0,50	0	19,14	19,47	17,4937
6	7	10	8,5	0,25	0	17,13	13,05	13,3835
7	10	14	12,0	8,25	0	16,18	17,21	10,2757
8	14	20	17,0	79,64	45,99	21,04	15,76	13,5338
9	20	28	24,0	11,36	31,04	4,46	2,41	0,4511
10	28	40	34,0	0	19,33	0	1,05	0
11	40	60	50,0	0	3,65	0	0,05	0
12	60	80	70,0	0	0,01	0	0	0
13	80	100	90,0	0	0	0	0	0

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дані, наведені у табл. 1 і на рис. 7, *а*, свідчать про нелінійний характер зменшення інтегральних параметрів шорсткості поверхні *Sa* й *Sq* й непостійності діаметра V_{Dws} – протягом перших трьох годин доведення швидкість зменшення є постійною, потім цей показник падає приблизно на третину.

Параметр *Sp* має тенденцію до стійкого зменшення за мінливості тенденцій змінювання параметру *Sz* (див. табл. 1). Протягом перших трьох годин доведення останній монотонно збільшується на ~ 15 %, потім поступово зменшується на 25 %, через що графік змінювання їхнього відношення *Sp*/*Sz* (див. рис. 7, *в*) має мінімум в тих же часових координатах. Графік змінювання

параметру *Ssk* в цілому схожий на такий у попереднього показника й крім того вказує на переважання виступів (*Ssk* > 0).

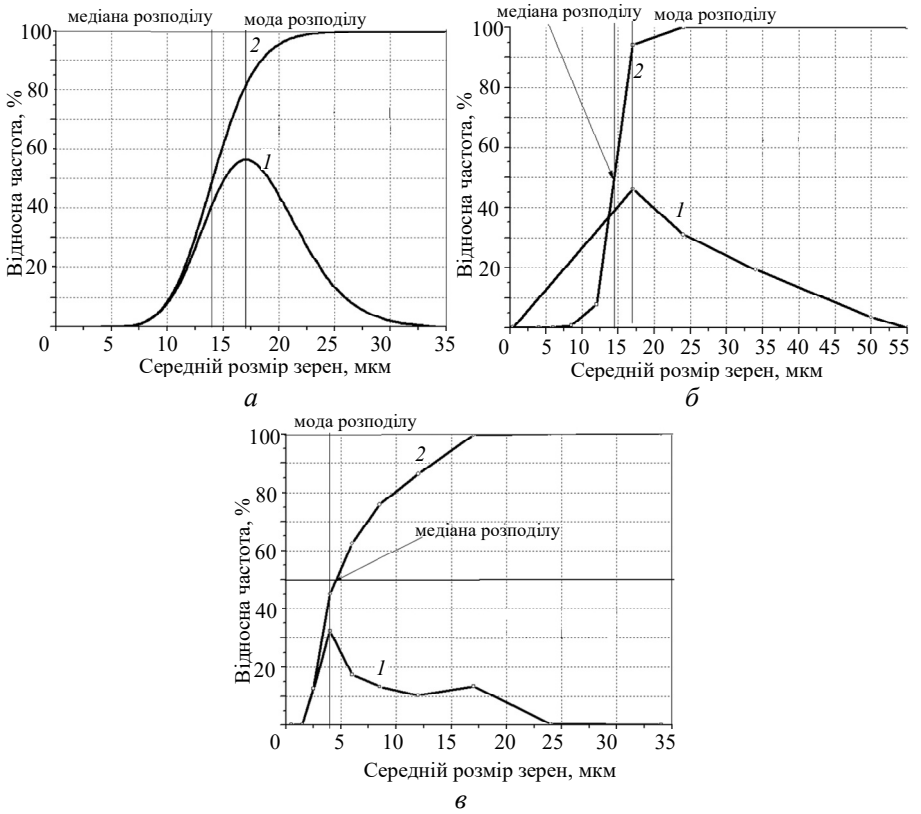


Рис. 9. Диференціальна (*1*) та інтегральна (*2*) криві розподілу середнього розміру зерен мікропорошку АСМ зернистістю 20/14 до (*а*) та після (*б*) нанесення покриття нікелем; *в* – після 300 хв роботи (доведення).

Поступове в цілому збільшення параметру *Sku* вказує про наявність надто глибоких западин (*Sku* > 3) на фоні тенденції до стійкого зменшення висоти нерівностей поверхні (зменшення параметру *Sp*). Порівняння кривих щільності розподілу ординат ареалу *h*(*c*). % від рівня висоти поверхні ареалу *c*, % (див. рис. 7, *г*) дозволяє спостерігати описану тенденцію змінювання співвідношення висоти й глибини нерівностей поверхні.

На підставі даних, наведених у табл. 2–4, можна стверджувати про наступне. У процесі доведення зменшуються розмірні параметри зерен, що є цілком природним, оскільки відбувається їхнє зношування. Найбільшу інтенсивність зношування спостерігали на початковій стадії доведення. Так, наприклад, у перші 60 хв процесу максимальний діаметр Feret зменшується у 2,34 рази, а мінімальний – у 2,32 рази. Подібну інтенсивність зношування (~ 2,32 рази) спостерігали і для інших розмірних параметрів – середнього розміру і еквівалентного діаметру проекції зерна та для висоти зерна. Водночас фактичний периметр зменшувався у 2,37 рази, а загальна площа проекції – у 4,4 рази. Тому на підставі такого порівняльного аналізу можна зробити припущення, що має місце рівномірне зношування по всьому периметру проекції зерна. Підтвердженням цього є і той факт, що значення коефіцієнта сплющеності зерен особливо не змінюється (див. табл. 2).

Відносна частка світлої частини проекції зерна в загальній її площі (*relAreal*) початкового стандартного мікропорошку після нанесення на його зерна покриття дещо зменшилася (в 1,05 рази). Це зумовлено тим, що нанесення покриття погіршує оптичну прозорість зерна (кристалу) міропорошку. Тут потрібно мати на увазі, що прилад DiaInspect.OSM працює із проникаючим світовим потоком. На початковій стадії доведення в перші 60 хв процесу характер зміни цієї морфометричної характеристики набуває протилежної спрямованості, а саме відбувається збільшення її показника в 1,46 рази. Це можна пояснити тим, що по завершенню першого етапу доведення поверхня зерен зношується з одночасним частковим руйнування і покриття. Внаслідок цього покращується умова проходження світлового потоку крізь поверхню зерна і тим самим покращуються умови для реалізації оптичної прозорості зерна (кристалу). Зменшується шорсткість проекції зерен за одночасного збільшення однорідності мікропорошку за цією морфометричною характеристикою.

Звертає на себе увагу факт суттєвого збільшення (у 7,92 рази) кількості зерен в одному караті мікропорошку на початковій стадії доведення, тобто у перші 60 хв процесу. Це може бути наслідком інтенсивного руйнування зерен на цьому етапі доведення. Оскільки водночас зменшуються і розмірні параметри зерен, то це супроводжується збільшенням (в 2,62 рази) зовнішньої питомої площі поверхні початкового мікропорошку з нанесеним покриттям. При такому переході збільшується відносна частка зерен із округлою проекцією зерен, що підтверджується і зменшенням в 1,12 рази відповідного показника форм-фактора фактичної проекції зерен. Одночасно відбувається і перерозподіл зерен із многокутною формою проєкції (див. табл. 3). За такого перерозподілу суттєво збільшується відносна частка зерен із прямокутною проекцією зерен. Натомість в такій же мірі зменшується відносна частка зерен із проекцією у формі рівнобедреної трапеції і ромба та збільшується у 1,48 рази однорідність мікропорошку за формоподібністю проєкції його зерен.

Кількість різальних кромок суттєво не міняється, але середнє значення кутів їхнього загострення збільшується в 1,13 рази. Збільшення кутів загострення різальних кромок може свідчити про те, що проєкція контуру проекції зерна стає більш округлою. Це перекликається із встановленим вище висновком про збільшення відносної частки зерен із округлою проекцією зерен. На тлі зазначених вище змін відбуваються також суттєві зміни і у зерновому складі відпрацьованого мікропорошку (див. табл. 4). Якщо розподілення середнього розміру початкового мікропорошку з покриттям носить яскраво виражений одно модальний характер, то для відпрацьованого (60 хв) мікропорошку воно є принаймні двох модальне. Водночас середнє значення середнього розміру проєкції зерна зменшується у 2,33 рази.

Етап руйнування зерен можна назвати налаштуванням абразивної системи доведення (переважно основного її елементу, яким є мікропорошок СА) на стабільний процес доведення.

Порівняльний аналіз подальших етапів доведення (120 і 300 хв процесу оброблення) показує відсутність суттєвих змін морфометричних характеристик, залишкових мікропорошків, форми проекції їхніх зерен (а, відтак, і 3D форми самих зерен), зернового складу мікропорошків. Тому цей етап можна назвати етапом стабільного доведення. Проте на тлі зазначеної вище відносної стабільності зазначених вище характеристик мікропорошків, якість обробленої (доведеної) поверхні продовжує покращуватися.

У кінцевому підсумку виконаного дослідження варто звернути увагу на наступний факт. По завершенню першого етапу доведення (перші 60 хв про-

цесу) розподіл зернового складу залишкового мікропорошку втрачає одномодальний характер і стає розмитим за модою, значення якої дуже близькі між собою. Така трансформація супроводжується і значним зменшенням однорідності залишкового мікропорошку за розмірними морфометричними характеристиками, зокрема і за середнім розміром зерен, який є відповідальним за зерновий склад. Наприклад, для згаданого вище середнього розміру зерен таке зменшення складає 2,33 рази. Впродовж наступних етапів доведення (після 60 хв процесу) спостерігали значне зменшення однорідності мікропорошку за шорсткістю проекції зерен.

Змінювання питомої магнітної сприйнятливості χ алмазного порошку з покриттям в цілому корелює зі змінами у морфометричних характеристик алмазних зерен.

ВИСНОВКИ

На підставі дослідження тенденцій змінювання точності форми куль й обраних параметрів шорсткості їхньої поверхні, зміни морфометричних характеристик та технологічних властивостей покритих нікелем мікропорошків синтетичного алмазу АСМ 20/14 у процесі доведення поверхні керамічних куль можна зробити наступні висновки.

Зменшення інтегральних параметрів шорсткості поверхні й непостійності діаметра куль має нелінійний характер. Змінювання інших параметрів шорсткості вказує на тенденцію до стійкого зменшення висоти виступів на фоні наявності надмірно глибоких западин поверхні.

Впродовж першої стадії доведення (перші 60 хв процесу) відбувається інтенсивне налаштування абразивної системи на стабільний процес доведення, який за нашими спостереженнями починається із 120 хв процесу. Ця перша стадія характеризується зношуванням зерен мікропорошку і їхнім руйнуванням. Тому можливо є сенс починати процес доведення із мікропорошків меншої у порівнянні із 20/14 зернистості, наприклад, як показують дані табл. 4, із зернистості 5/3 або 7/5.

На підставі даних табл. 2 і 3 можна сформулювати вимоги до якості таких мікропорошків: вони повинні мати показник округлості проекції зерен за диференціальним показником формоподібності не менше 0,9, показник однорідності мікропорошків за розмірними характеристиками на рівні 0,4–0,56, розподіл середнього розміру бажано мати із розмитими в інтервалі 10–32 % значеннями відносної частоти в інтервалі значень середнього розміру зерен 3–17 мкм.

Очевидно має місце швидке (прискорене) зношування нікелевого покриття на початковому етапі (перші 60 хв) процесу доведення.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не було профінансовано із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Ye. O. Pashchenko, S. V. Sokhan', G. A. Petasyuk, H. D. Ilnytska,
D. O. Savchenko, N. V. Yeltsov
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Efficiency of nickel-coated diamond micropowder during the finishing of ceramic balls in a magnetic field

For the conditions of precision finishing of ceramic balls made of boron carbide with diamond micropowder coated with nickel in a magnetic field, changes in the accuracy of the shape and surface roughness of ceramic balls made of boron carbide were studied. It were investigated the evolution of the powder composition and its specific magnetic susceptibility, morphometric characteristics of diamond grains depends on the finishing time too. The nonlinear nature of the decrease in the integral parameters of surface roughness and the ball diameter variation of the balls was shown. Other roughness parameters confirmed a tendency to a steady decrease in the height of the protrusions against the background of the presence of excessively deep surface depressions. Changes in the morphometric characteristics of diamond grains indicate intensive adjustment of the abrasive system to a stable process at the first stage of finishing, including crushing or wear of grains with accelerated loss of coating. Requirements for the quality of such micropowders are formulated.

***Keywords**: ceramic balls from boron carbide, diamond finishing in a magnetic field, ball diameter variation and its surface roughness, diamond micropowder, nickel coating, morphometric characteristics of diamond grains, specific magnetic susceptibility of the powder.*

1. Richerson D.W. Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and use in Design. Taylor e Francis Group, Boca Raton, USA, 2006, 728 p.
2. Ножницкий Ю.А., Петров Н.И., Лаврентьев Ю.Л. Гибридные подшипники качения для авиационных двигателей (обзор): *Авиационные двигатели*. 2019. № 2(3). С. 63–76.
3. Heng L., Kim J.S., Song J.H. Mun S.D. A review on surface finishing techniques for difficult-to-machine ceramics by non-conventional finishing processes. *Materials.* 2022. Vol. 15, no. 3, art. 1227. https://doi.org/10.3390/ma15031227
4. Lee S.M., Kwak T.S. Trends of removal machining technology of silicon nitride ceramics. *JOJ Material Sci.* 2023. Vol. 8, no. 1. https://juniperpublishers.com/jojms/JOJMS.MS.ID.555727.php
5. He C., Zhang J., Geng K., Wang S., Meijun L., Zhang X., Chengzu R. Advances in ultra-precision machining of bearing rolling elements. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. Vol. 122. P. 3493–3524.
5. Zhao J., Jiang E., Qi H., Ji S., Chen Z. A novel polishing method for single-crystal silicon using the cavitation rotary abrasive flow. *Precis. Eng.* 2020. Vol. 61. P. 72–81.
6. Qian C., Fan Z., Tian Y., Liu Y., Han J. and Wang J. A review on magnetic abrasive finishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021. Vol. 112. P. 619–634.
7. Майборода В.С., Слободянюк И.В., Джулий Д.Ю. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы. Житомир: ПП “Рута”, 2017. 272 с.
8. Zhou D., Huang X., Ming Y., Li X., Li H., Li W. Material removal characteristics of magnetic-field enhanced shear thickening polishing technology. *J. Mater. Res. Technol.* 2021. Vol. 15. P. 2697–2710.
9. Zhu P., Zhang G., Teng X., Du J., Jiang L., Chen H., Liu N. Investigation and process optimization for magnetic abrasive finishing additive manufacturing samples with different forming angles. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 2022. Vol. 118. P. 2355–2371.
10. Sharma A., Vaish A., Sharma A. Detailed review of ball end magnetorheological fluid finishing process, *W. Trans. Heat. Mass. Tran.* 2020. Vol. 15. P. 163–173. https://wseas.com/ journals/articles.php?id=1400
11. Alam Z., Iqbal F., Ganesan S., Jha S. Nanofinishing of 3D surfaces by automated fiveaxis CNC ball end magnetorheological finishing machine using customized controller, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. Vol. 100. P. 1031–1042.
12. Childs T.H.C., Mahmood S., Yoon H.J., Magnetic fluid grinding of ceramic balls. *Tribol. Int.* 1995. Vol. 28, no. 6. P. 341–348.
13. Behnam Niknam and Mehrdad Vahdati. Optimizing Magnetic Float Polishing Parameters for Enhanced Nano Surface Finish and Material Removal Efficiency on Silicon Nitride Balls. The preprint research paper, 49 Pages Posted: 29 Sep 2024. https://ssrn.com/abstract=4970905.
14. Xiao X.L., Li G.X., Mei H.J., Yan Q.S., Lin H.T., Zhang F.L. Polishing of silicon nitride ceramic balls by clustered magnetorheological finish. *Micromachines*. 2020. Vol. 11, no 3, art. 304. https://www.mdpi.com/2072-666X/11/3/304

15. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. Київ: Госстандарт Украины, 1995. 72 с.
16. Сохань С.В., Гавлик Й., Нимчевска-Войцек М., Ефросинин Д.В., Мельник-Кагляк Н.А. Оценка шероховатости гладких поверхностей неметаллов микроинтерференционным методом. *Журнал інженерних наук.* 2015. Т. 2, № 2. С. D1-D9. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU_tekh_2015_2_2_7.
17. ISO 25178-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
18. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента): В 4 т. Т. 2. Киев: Изд-во КНТ, 2011. 453 с.
19. YUMPU DiaInspect.OSM DiaInspect.OSM – Vollstaedt-Diamant GmbH. https://www.yumpu.com
20. List E., Frenzel J., Vollstadt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders. *Ind. Diamond Rev.* 2006. Vol. 66. no. 1. P. 42–47.
21. Bogatyreva G.P., Petasyuk G.A., Bazalii G.A., Shamraeva V.S. On morphometric uniformity of diamond micron powders *J. Superhard Mater*. 2009. Vol. 31, no. 2. P. 126–134. DOI: 10.3103/S1063457609020105
22. 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
23. 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
24. 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.
25. 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.
26. Petasyuk G.A., Bochechka O.O., Lavrinenko V.I., Poltoratsky V.G., Bilochenko V.P., Sokolyuk D.V. The additive pycnometric method for assessment of the degree of coating of grinding powders made of superhard materials using the extrapolation-affine 3D-model of the grain. *J. Superhard Mater*. 2020. Vol. 42, no. 3. P. 199–202.
27. Petasyuk G.A. Determining the thickness coating of grinding powders of synthetic diamond based on a specific-surface approach and using an extrapolation-affine 3D model of grain. *J. Coat. Sci. Technol.*. 2022. Vol. 9. P. 20–25. https://doi.org/10.6000/2369-3355.2022.09.03.
28. Novikov N,V., Nikitin Yu.I., Petasyuk G.A. Computer_based diagnostic sieve for identification of grit size and grit size distribution in microscopic samples of diamond grits, *J. Superhard Mater.* 2003. Vol. 25, no. 3. P. 68–78.
29. 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
30. Petasyuk G.A., Bochechkaa 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.
31. М88 Украины 90.256–2004. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов. Київ, 2004. 9 с.

Надійшла до редакції 15.05.26
Після доопрацювання 21.05.26
Прийнята до опублікування 25.05.26