

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.923

В. І. Лавріненко^{1,*}, В. В. Смоквина^{1,}, Г. Д. Ільницька¹,
В. Ю. Солод^{2,***}**

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Дніпровський державний технічний університет
МОН України, Україна

*lavrinen52@gmail.com

**v.smokvyna@gmail.com

***v_solod@ukr.net

Експлуатаційні показники шліфувального інструменту з алмазними шліфпорошками, отриманими за адгезійно-магнітним сортуванням у рідині

Показано, що застосування відібраних алмазних зерен шліфпорошку AC20 за показниками однорідності, за міцністю та лінійними розмірами з використанням адгезійно-магнітного сортування в рідині є ефективним варіантом підвищення (до 6 разів) зносостійкості алмазних кругів. Використання відібраних із шліфпорошку AC20 алмазних зерен AC32 забезпечує підвищення зносостійкості кругів до 3 разів, а зерен AC50 до 1,5 разів. Тобто, усі досліджені круги з відібраними алмазними зернами мають вищу зносостійкість, ніж круги із суміші вихідних алмазних зерен AC20. Шорсткість оброблюваної поверхні за параметром Ra у разі шліфування кругами з алмазними зернами з різними варіантами адгезійно-магнітного сортування фактично є однаковою. Водночас встановлено, що у разі застосування відібраних зерен AC32 125/100 тримальна здатність шорсткої поверхні, обробленої таким кругом, є найнижчою, і це необхідно враховувати під час їхнього застосування в шліфувальному інструменті.

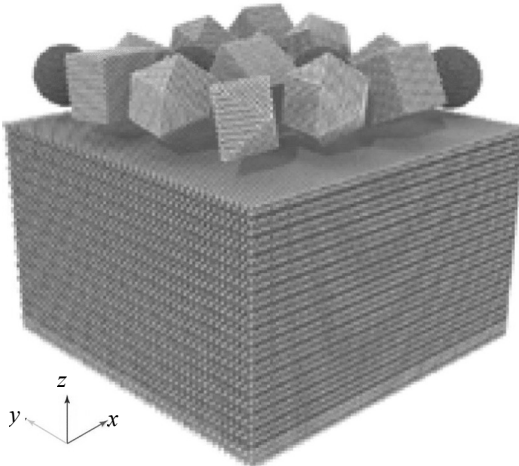
Ключові слова: адгезійно-магнітне сортування алмазних шліфпорошків, шліфувальний інструмент, шорсткість, експлуатаційні показники.

Застосування в шліфувальних кругах шліфпорошків синтетичного алмазу стикається з необхідністю вибору для певних умов шліфування відповідних попередньо відібраних (сортованих) зерен алмазних шліфпорошків. Здебільшого їхнє сортування передбачає розподіл алмазних зерен за розмірами, формою та фізико-механічними властивостями [1, 2]. На необхід-

ність сортування алмазних зерен для шліфувального інструменту звертають увагу в сучасних дослідженнях.

У [3] вказано, що через складну мікроструктуру шліфувального круга, який містить абразивні зерна довільного розміру, розподілених випадково, практичне моделювання і об'єктивне прогнозування є вкрай ускладненими. Для уникнення цього авторами розроблено нову стохастичну модель, яка враховує розміри абразивних зерен і їхній розподіл у робочому шарі круга для більш точного прогнозування сил шліфування. Зазвичай алмазні зерна в шліфувальному крузі необхідно надійно закріплювати зв'язувальним матеріалом. У [4] показано, що в межах виділеного діапазону розмірів зерна, його форма, визначена коефіцієнтом відхилення від сфери, найбільше впливає на його утримання у зв'язувальному матеріалі.

У [5] для досягнення більш високої точності під час обробки виробів з карбїду кремнію застосовували моделювання методом молекулярної динаміки (МД) для дослідження процесу обробки з використанням аналізу механізмів видалення частинок SiC під час різання різними алмазними зернами. Застосована модель МД враховувала чотири різні форми зерен: кубічну, октаедричну, кубооктаедричну та сферичну (рис. 1).



Різні форми шліфувальних зерен

Рис. 1. Застосування в моделі МД чотирьох форм абразивних зерен (кубічної, октаедричної, кубооктаедричної та сферичної) [5].

На необхідність попереднього відбору алмазних зерен шліфпорошків вказано і в [6], де в якості вихідних абразивів було застосовано алмазні шліфпорошки марки MBD4 із середнім розміром 100 мкм фірми “Hunan Chong You Technology Co.”, Ltd., Китай (рис. 2) та в [7], де застосовували алмазні зерна із досконалою та розвиненою поверхнею (рис. 3).

Нові розробки з отримання різних за міцністю та дефектністю алмазних зерен описано у [8].

Відомо [1, 2], що під час синтезу алмазу в нього можуть потрапляти різні домішки з ростових систем, що можуть впливати на властивості алмазних зерен. У [9] автори акцентували увагу на домішки заліза (Fe) в алмазі, показано результати моделювання з перших принципів процесу утворення дефектних центрів, що містять Fe, а також комплексів з власними дефектами та іншими поширеними домішками. Виявлено, що міжвузельний Fe є нестабіль-

ним, але заміщуючий Fe разом з його комплексами та з іншими дефектами забезпечує алмазним зернам широкий спектр властивостей.

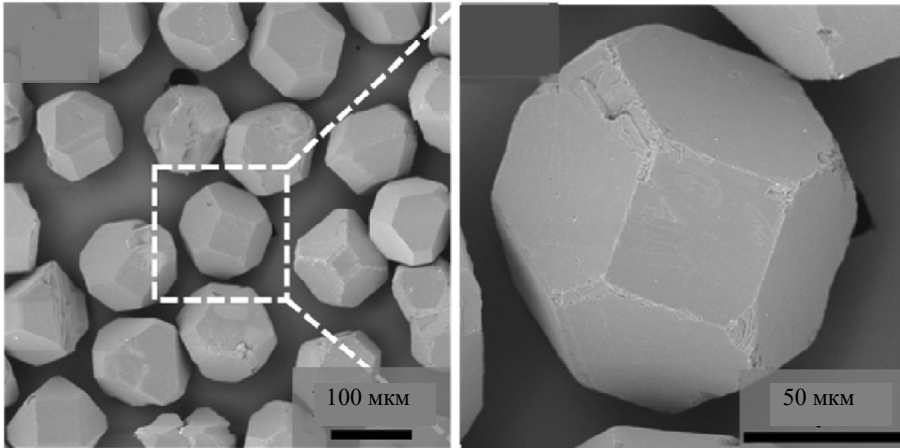


Рис. 2. Вихідні алмазні зерна марки MBD4 із середнім розміром 100 мкм [6].

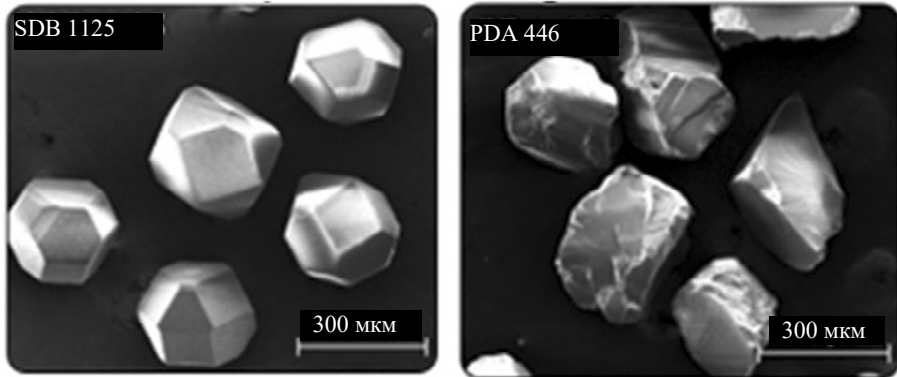


Рис. 3. Монокристалічні синтетичні алмазні зерна з досконалою (SDB 1125) та розвинутою (PDA 446) поверхнею [7].

Наявність таких домішок в алмазі є важливою з погляду розподілу алмазних зерен, різних за міцністю, наприклад, розділених у магнітному або електричному полі [1, 2], а також після флотаційного розділення різних видів. Експлуатаційні характеристики алмазних шліфувальних кругів з алмазними порошками після флотаційного розділення розглянуто авторами раніше [10], а в даній роботі розглянуто адгезійно-магнітне сортування алмазних синтетичних шліфпорошків за однорідністю та міцністю їхніх зерен і подальше їхнє застосування в шліфувальному інструменті.

Для отримання відібраних алмазних шліфпорошків з високою однорідністю за міцністю і лінійними розмірами використовували алмазні шліфпорошки 125/100 марки AC20, синтезовані в ростовій системі Ni–Mn–C. Для видалення зі складу шліфпорошку алмазних зерен, що містять металеві внутрішньо кристалічні включення та домішки і мають вищу магнітну сприйнятливість, шліфпорошки на початку розділяли в магнітному полі за напруженістю магнітного поля від 0 до 2 Т на магнітну і немагнітну фракції. Далі проводили поділ алмазних зерен немагнітної фракції за дефектністю їхньої поверхні за допомогою адгезійно-магнітного розподілу в рідинному середовищі. Перед

проведенням розподілу на дефектні ділянки поверхні алмазних зерен у водному середовищі в слаболужному розчині з рН 9 наносили тонкодисперсні феромагнітні луски Fe розміром до 1000 нм з концентрацією в розчині $\leq 2,5\%$ ¹. Після розділення для кожної окремої фракції визначали її вихідний вміст, дефектність поверхні як коефіцієнт поверхневої активності K_a , руйнівне навантаження (міцність) на стиск P , термостійкість $K_{T.c.}$, однорідність алмазних порошків за міцністю $K_{одн.міц.}$ та лінійними розмірами $K_{одн.л.р.}$. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати адгезійно-магнітного сортування у водному середовищі алмазних порошків марки AC20 125/100 на різні фракції

Фракція розподілу	Вихід, %	K_a , %	P , Н	$K_{T.c.}$, %	$K_{одн.міц.}$, %	$K_{одн.л.р.}$, %	Марка за ДСТУ 3292–95
1	11,5	0,57	40,8	93	75	58	AC50
2	34,0	0,71	28,3	90	72	56	AC32
3	43,7	0,89	20,6	75	65	52	AC20 (поліпшена)
4	10,8	1,15	9,5	65	57	50	AC15
Вихідна	100		24,2	85	46	38	AC20 (вихідна)

За результатами випробувань встановлено, що під час розподілу за дефектністю поверхні алмазних порошків немагнітної фракції зернистості 125/100 було отримано порошки фракцій розподілу 1 і 4, які за коефіцієнтом поверхневої активності K_a відрізнялися у ~ 2 рази, що забезпечило виділення алмазних порошків марок AC50 та AC32 в кількості 45,5 %, зокрема 11,5 % марки AC50. Термостійкість одержаних алмазних порошків фракцій 1 і 2 в порівнянні з термостійкістю фракцій 3 і 4 вища на $\sim 25\%$. Однорідність за міцністю та лінійними розмірами алмазних порошків цих фракцій на $\sim 20\%$ вища за однорідність алмазних порошків 3 і 4 фракцій.

На другому етапі досліджували експлуатаційні характеристики алмазних кругів із шліфпорошками синтетичного алмазних порошків марки AC20 125/100, які пройшли сортування із застосуванням впливу дії магнітних полів. Аналіз даних табл. 1 свідчить, що з вихідних порошків марки AC20 125/100 адгезійно-магнітним сортуванням виділено поліпшені за показниками однорідності:

- порошки AC20 125/100, які хоча і мають трохи менший показник міцності, ніж вихідні, але у них значно більші коефіцієнти однорідності за міцністю та лінійним розмірам;
- порошки AC32 125/100, які не тільки переважають вихідні порошки за міцністю, але і за коефіцієнтами термостабільності та однорідності за міцністю та лінійними розмірами,
- порошки AC50 125/100, які переважають за вказаними вище показниками вихідні порошки та порошки марки AC32 125/100.

Ці чотири групи алмазних шліфпорошків AC20 125/100 (вихідні) та відібрані AC20, AC32 та AC50 було застосовано під час виготовлення алмазних шліфувальних кругів 12A2-45° 125×5×3×32 на полімерній зв'язці В2-08 з концентрацією алмазних порошків у робочому шарі 100 %. Для обробки було вибрано зразки вольфрамо-кобальтового твердого сплаву марки ВК6 з розмі-

¹ Тут і далі концентрацію матеріалів приведено в % (за масою).

рами 63×15×7 мм. Шліфування провадили без охолодження, щоби не вносити додаткового збурення 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 шліфування 200 мм³/хв) та 1,14 м/хв (для продуктивності шліфування 400 мм³/хв). Оцінювали зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат q алмазних порошків під час шліфування та шорсткість обробленої поверхні за показником Ra . Результати випробувань наведено в табл. 2.

Проведені випробування дозволили встановити певний взаємозв'язок експлуатаційних характеристик алмазних шліфпорошків абразивного призначення, які пройшли адгезійно-магнітне сортування, із зносостійкістю шліфувального інструменту.

Таблиця 2. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів з алмазними порошками, відібраними з використанням адгезійно-магнітного сортування в рідині, у процесі шліфування твердого сплаву ВК6

Характеристика алмазних порошків	Продуктивність шліфування			
	200 мм ³ /хв		400 мм ³ /хв	
	q , мг/г	Ra , мкм	q , мг/г	Ra , мкм
АС20 125/100 (вихідний)	2,5	0,45	4,3	0,71
АС20 125/100 (відібраний)	0,4	0,39	0,7	0,64
АС20 125/100 (виділення зерен АС32 125/100)	1,8	0,44	1,2	0,42
АС20 125/100 (виділення зерен АС50 125/100)	1,2	0,40	2,9	0,67

Як було показано вище, з вихідних алмазних порошків АС20 125/100 адгезійно-магнітним сортуванням було отримано порошки АС32 125/100 та АС50 125/100. Порівняння їхньої працездатності в шліфувальному інструменті підтвердили, що основним чинником впливу є підвищення їхнього показника міцності. Так, якщо взяти за точку відліку показники порошку АС50, то відносні витрати вихідного алмазного порошку АС20 у крузі під час шліфування твердого сплаву ВК6 за продуктивності 200 мм³/хв мають бути 2 мг/г, експериментальний результат – 2,47 мг/г; для порошку АС32 розрахунок за міцністю – 1,7 мг/г, а експеримент – 1,79 мг/г. Тобто, розрахункові та експериментальні результати є достатньо близькими і це свідчить, що показник міцності є основним чинником для оцінки алмазних порошків, отриманих за допомогою адгезійно-магнітного сортування.

На відміну від алмазних кругів із зернами, виділеними флотаційним сортуванням [10], ефект від адгезійно-магнітного сортування алмазних зерен суттєво залежить від продуктивності шліфування. Якщо для меншої продуктивності 200 мм³/хв маємо дещо аномальний ряд зносостійкості кругів з алмазними зернами в порядку збільшення зносу, який не співпадає з відповідною послідовністю показників міцності їхніх зерен:

АС20 (відібраний) – АС50 – АС32 – АС20 (вихідний),

то в разі збільшення продуктивності шліфування у 2 рази, коли зростає навантаження на різальну поверхню круга і підвищується її знос, маємо послідовність зносостійкості кругів з алмазними зернами більш відповідну міцності зерен у порядку збільшення їхнього зношування:

АС20 (відібраний) – АС32 – АС50 – АС20 (вихідний).

Тобто, виділення з вихідних зерен АС20 частки відібраних (поліпшених) зерен АС20 є найкращим варіантом з погляду підвищення зносостійкості алмазних кругів. Другим варіантом є відібрані зерна АС32, третім – відібрані зерна АС50. В усіх випадках відібрані зерна є кращими для забезпечення зносостійкості алмазних кругів, ніж круги з вихідних алмазних зерен АС20.

Було розглянуто вплив використання відібраних зерен на шорсткість оброблюваної поверхні. Майже в усіх випадках (див. табл. 2) значення шорсткості обробленої поверхні за параметром Ra залишається однаковим, хоча за продуктивності шліфування $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$ шорсткість, отримана після шліфування кругом із зернами АС32 125/100, є аномально низькою, що потребує окремого дослідження.

Було досліджено наповненість шорсткої поверхні за параметром кривої опорної поверхні $t50$. Доведено, що чим більшими є значення $t50$, тим шорстка поверхня має кращу тримальну здатність. У табл. 3 наведено дані висотних параметрів шорсткості Ra та R_{max} , крокового параметру шорсткості Sm та параметру кривої опорної поверхні $t50$ за продуктивності шліфування 200 та $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$.

Таблиця 3. Показники шорсткості шліфованої поверхні зразка твердого сплаву ВК6 за різної продуктивності обробки алмазними шліфувальними кругами із відібраними зернами алмазних порошків

Алмазний порошок	Показник шорсткості			
	Ra , мкм	R_{max} , мкм	Sm , мкм	$t50$, %
Продуктивність шліфування – $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$				
АС20 125/100 (вихідний)	0,45	3,75	38	60,69
АС20 125/100 (відібраний)	0,39	3,18	43	69,58
АС32 125/100 (відібраний)	0,44	3,30	43	59,19
АС50 125/100 (відібраний)	0,40	2,94	38	50,13
Продуктивність шліфування – $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$				
АС20 125/100 (вихідний)	0,71	5,30	44	64,58
АС20 125/100 (відібраний)	0,64	4,58	47	61,04
АС32 125/100 (відібраний)	0,42	3,15	46	43,06
АС50 125/100 (відібраний)	0,67	5,27	39	58,31

Аналіз даних табл. 3 свідчить про те, що як за кроковим показником Sm , так і за параметром $t50$ кривої опорної поверхні, їхні значення небагато різняться, хоча, як і за параметром Ra , у разі продуктивності шліфування $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$ шорсткість за параметром $t50$, отримана після шліфування кругом із зернами АС32 125/100, є аномально низькою.

Особливості опорних поверхонь шорсткої поверхні представлено на рис. 4. Наведене вказує, що хоча для зерен АС32 125/100 шорсткість за параметром Ra є найнижчою, але тримальна здатність такої поверхні є також найнижчою.

У дослідженні також було визначено, чи викликає використання в шліфувальних кругах алмазних порошків АС20 125/100 після їхнього сортування за міцністю відхилення від стандартної залежності $R_{\text{max}} = f(Ra)$, що детально описана в [11] і яка для умов алмазного шліфування твердих сплавів має наступний вид:

$$R_{\text{max}} = 7,5Ra.$$

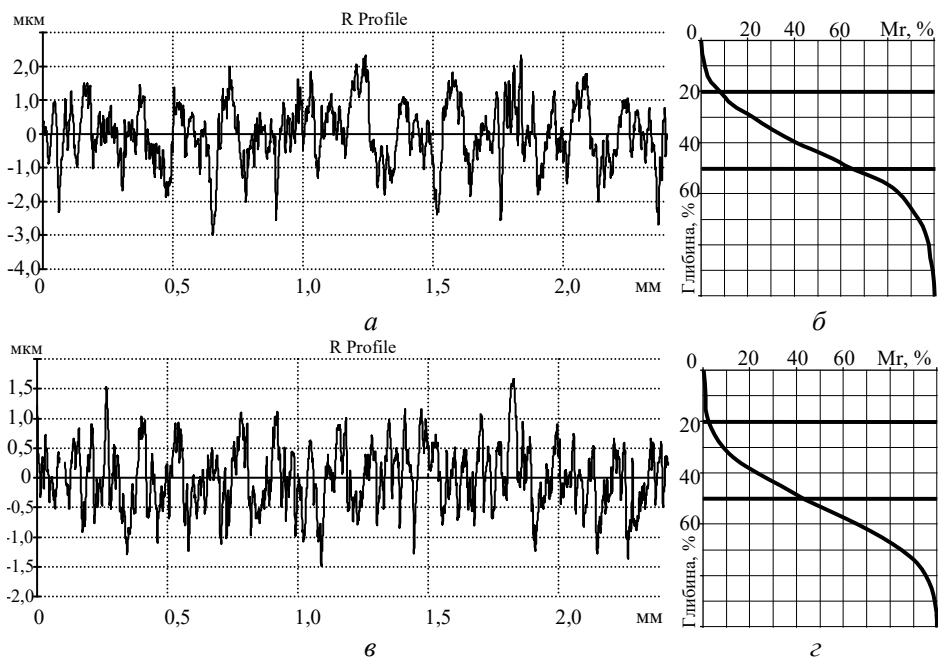


Рис. 4. Профілограми (а, в) і криві відносної опорної довжини профілю (б, з) поверхні, обробленої кругом з вихідними зернами АС20 125/100 (а, б) і кругом з відібраними зернами АС32 125/100 (в, з) під час шліфування твердого сплаву ВК6 з продуктивністю шліфування 400 мм³/хв.

Сукупність даних, наведених у табл. 3, свідчить про те, що для продуктивності шліфування 200 мм³/хв ця залежність має вигляд

$$R_{\max} = (7,4-8,3)Ra,$$

а для 400 мм³/хв

$$R_{\max} = (7,2-7,9)Ra.$$

Тобто, середнє значення дорівнює 7,7 і є близьким до значення 7,5. Все це свідчить про те, що отримані дані не відхиляються від загальноприйнятих, що є опосередкованим підтвердженням адекватності проведених досліджень.

ВИСНОВКИ

Виділення за допомогою адгезійно-магнітного сортування з вихідних алмазних порошоків АС20 алмазних зерен, поліпшених за показниками однорідності за міцністю та лінійними розмірами, є ефективним методом збільшення (до 6 разів) зносостійкості алмазних кругів. Використання відібраних зерен АС32 збільшує зносостійкість до 3 разів, а відібраних зерен АС50 – до 1,5 разів. Відібрані алмазні зерна є кращими для забезпечення зносостійкості алмазних кругів, ніж круги із суміші вихідних алмазних зерен АС20.

Шорсткість оброблюваної поверхні за параметром Ra є майже однаковою, хоча за продуктивності шліфування 400 мм³/хв шорсткість, отримана після шліфування кругом і алмазним порошоком АС32 125/100, є аномально низькою. За кроковим показником Sm та за параметром $t50$ кривої опорної поверхні їхні значення різняться на небагато, хоча, як і за параметром Ra , так і за продуктивності шліфування 400 мм³/хв, шорсткість за параметром $t50$, отримана після шліфування кругом з алмазним порошоком АС32 125/100, є аномально низькою.

Наведені результати вказують на те, що хоча для алмазних порошоків АС32 125/100 шорсткість за параметром Ra є найнижчою, але тримална здатність такої поверхні є також найнижчою, і це необхідно враховувати в разі їхнього застосуванні в шліфувальному інструменті.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу виконували відповідно до тематичного плану Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України “Ш-5-22 (0783) Розробка методів покращення фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей шліфпорошків алмазу абразивного призначення спрямованим впливом на об’ємні дефекти зерен дією гравітаційних, магнітних, електричних полів та хімічної і термохімічної обробок” (номер держреєстрації 0122U000401).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V.I. Lavrinenko, V.V. Smokvyna, H.D. Ilnytska, V.Yu. Solod
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Performance indicators of the grinder tools with diamond grinding powder, obtained by adhesive-magnetic sorting in liquid

It is shown that the use of selected grinding powder of AC20 grains according to the indicators of uniformity in terms of strength and linear dimensions with the use of adhesive-magnetic sorting in liquid is an effective option for increasing the wear resistance of diamond wheels (increase up to 6 times). The use of AC32 diamond grains selected from AC20 grinding powder ensures an increase in the wear resistance of wheels up to 3 times, and AC50 grains up to 1.5 times. That is, in all studied cases, grinding wheels with selected diamond grains have higher wear resistance than wheels made from a mixture of original diamond grains AC20. The roughness of the treated surface according to the Ra parameter when grinding with diamond wheels with different options of adhesive-magnetic sorting is actually the same. At the same time, it has been established that when using selected AC32 125/100 grains in a wheel, the holding capacity of a rough surface polished with such a wheel is the lowest, and this must be taken into account when using them in a grinding tool.

Keywords: adhesive-magnetic sorting of diamond grinding powders, grinding tool, roughness, performance indicators.

1. Shulzhenko A.A., Prikhna T.O., Ilnytska H.D., Lavrinenko V.I., Borymskii O.I., Sokolov A.N., Tkach V.N., Smokvyna V.V., Zaitseva I.N., Tymoshenko V.V. Comparison of the dimensional, physical, mechanical and operational characteristics of AS6 and AS20 synthetic diamond powders synthesized in the Ni–Mn–C and Fe–Si–C systems. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 1. P. 1–14.
2. Prikhna T.O., Ilnytska H.D., Lavrinenko V.I., Zaitseva I.N., Sheiko M.N., Smokvyna V.V., Tymoshenko V.V. Improvement of physical and mechanical characteristics of synthetic diamond powders synthesized from ferroalloys for increasing the wear resistance of the diamond dressing tool. *J. Superhard Mater.* 2022. Vol. 44, no. 2. P. 139–150.
3. Wu Zh., Zhang L. Analytical grinding force prediction with random abrasive grains of grinding wheels. *Int. J. Mech. Sci.* 2023. Vol. 250, art. 108310.
4. Guo Lei, Song., Xu Ch., Cao Ch., Liu X., Li Ch., Wang B., Hui J. Retention and interfacial failure mechanism of single diamond grains in resin-bonded grinding tools. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 150, art. 111681.
5. Huang Y., Zhou Y., Li J., Zhu F. Understanding of the effect of wear particles removal from the surface on grinding silicon carbide by molecular dynamics simulations. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art. 110150.

6. Cao Y., Li B., Liu L., Li Sh., Hui Do., Wang Sh., Liu H., Li X., Zhang X., Zhou Sh., Li Sh. Quantitative control of interfacial structure and thermal conductivity between diamond and copper via thermal diffusion of alloying element. *J. Mater. Res. Techn.* 2024. Vol. 33. P. 6641–6655.
7. Nanda T.P., Ghosh A. Influence of grit friability and grit distribution pattern on dry grindability of WC–6Co by single layered brazed diamond wheels. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 147, art. 111300.
8. Lavrinenko V.I. Recent developments in diamond processing and surface modification techniques for tailoring properties of diamond grains: a review. *J. Superhard Mater.* 2024. Vol. 46, no. 6. P. 462–461.
9. Alshahrani M.D., Goss J.P., Briddon P.R., Rayson M.J., Peaker C.V. Density functional theory study of iron defects in diamond. *Diam. Relat. Mater.* 2024. Vol. 148, art. 111332.
10. Lavrinenko V.I., Smokvyna V.V., Ilnytska H.D., Oliinyk N.O., Bazaliy G.A., Solod V.Yu. Performance characteristics of grinding tools from diamond grinding powders after floatation separation. *J. Superhard Mater.* 2025. Vol. 47, no. 4. P. 324–329.
11. Lavrinenko V. 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 30.01.25

Після доопрацювання 28.02.25

Прийнята до опублікування 07.03.25