

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.923

В. І. Лаврінченко^{1,*}, В. В. Смоквина^{1,}, Г. Д. Ільницька¹,
Н. О. Олійник¹, Г. А. Базалій¹, В. Ю. Солод^{2,***}**

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

²Дніпровський державний технічний університет
МОН України, м. Кам'янське, Україна

*lavrinen52@gmail.com

**v.smokvyna@gmail.com

***v_solod@ukr.net

Експлуатаційні показники шліфувального інструменту із алмазними шліфпорошками після флотаційного розділення

Досліджено флотаційне розділення алмазних шліфпорошків, де частина зерен шліфпорошку синтетичного алмазу разом із бульбашками повітря виносилися у поверхневий шар (“пінний” продукт), а інша частина зерен алмазів, які краще змочувалися водою, залишалися в камері флотомашини (“камерний” продукт). Показано, що алмази “пінного” продукту, на відміну від вихідних і “камерного”, мають більший показник міцності зерен і однорідність за міцністю та найменшу масову частку домішок і питому магнітну сприйнятливність. Для збільшення зносостійкості алмазного круга найбільш ефективним є застосування саме “пінного” продукту, причому з підвищенням продуктивності шліфування така ефективність зростає. Виявлено, що застосування інструменту з алмазними порошками після флотаційного розділення (“пінного” і “камерного” продуктів) дозволяє досягти меншого показника шорсткості Ra, ніж у разі застосування інструменту з вихідними алмазними порошками. Водночас, наповненість шліфованої шорсткої поверхні за таким параметром кривої опорної поверхні, як t50 свідчить про те, що цей показник для різних варіантів застосування інструменту з порошками алмазу після флотаційного сортування є вищим, ніж з порошками у вихідному стані.

Ключові слова: флотаційне розділення алмазних шліфпорошків, “пінний” та “камерний” продукти, шліфувальний інструмент, експлуатаційні показники.

Отримання порошків синтетичного алмазу передбачає синтез та вилучення частинок алмазу, їхнє сортування. Як правило, сортування пе-

редбачає розподіл частинок алмазу за розмірами, формою, фізико-механічними та морфометричними характеристиками [1–3]. На необхідність мати відібрані за потрібними показниками алмазні зерна звертають увагу в багатьох сучасних дослідженнях.

Так, зазвичай алмазні зерна в алмазному крузі необхідно гарно закріплювати в певному зв'язуючому. В [4] розглянуто зміну модифікації морфології поверхні алмазу для підвищення зносостійкості системи алмазно-гальванічне покриття–алмаз. Водночас, застосування методу термохімічної корозії дозволило отримати алмазні частинки з розвиненою (шорсткою) поверхнею. Показано, що такі частинки мають більшу площу поверхні та вищу електронегативність, ніж вихідний (не модифікований) порошок алмазу, що покращує адгезію між ним та зв'язкою на основі нікелю (Ni). Також у [5] доведено позитивні ефекти від застосування модифікованих алмазних порошоків. Вихідні алмази мають такий недолік, як незадовільне самозаточування у разі використання їх у шліфувальних кругах на керамічній зв'язці. Крім того, вони погано змочуються керамічною зв'язкою, що призводить до меншого зчеплення між нею і алмазом. Для вирішення цих проблем у [5] відбирали алмазні зерна з розвиненою поверхнею з високою здатністю до самозаточування. У [6] монокристалічні синтетичні алмазні частинки з різною міцністю та крихкістю було застосовано в алмазних кругах з випадковим і візерунковим розподілом зерен. На нові розробки з отримання різних за міцністю та крихкістю алмазів звернено увагу в [7].

Розподіл алмазних частинок, різних за міцністю, здійснюють за допомогою процесів розділення, наприклад, у магнітному або електричному полях [1, 2], а також із застосуванням флотаційного методу. У [8] представлено одне з перших наукових досліджень, присвячених тематиці застосування флотації до кондиційних порошоків синтетичного алмазу як способу отримання більш якісних за певними характеристиками їхніх фракцій та започатковано застосування флотації до сортування шліфпорошків синтетичного алмазу за міцністю їхніх зерен. Виявлено, що зерна шліфпорошку синтетичного алмазу з гладенькою поверхнею, покриті плівкою флотореагента-збирача, разом із бульбашками повітря виносилися на поверхню (“пінний” продукт). Зерна алмазів з шорсткою поверхнею, на яких закріпився флотореагент-подавлювач, добре змочувалися водою і залишалися в камері флотомашини (“камерний” продукт). Встановлено, що міцність “камерного” продукту є дещо нижчою за міцність “пінного”, який містить значну частку зерен з гладенькою поверхнею граней. Флотаційний спосіб сортування у поєднанні з класифікацією за формою зерен на вібростолі дозволяє збільшити вихід зерен високої міцності [9].

У представлений роботі дослідження з флотаційного розділення синтетичних алмазних шліфпорошків проводили за однакових умов підготовки зразків порошку та очистки від флотореагентів. Флотаційне розділення зразків шліфпорошку на “пінну” та “камерну” фракції виконували із застосуванням лабораторної імпульсної флотомашини з подачею повітря та накладенням ультразвукових хвиль на камеру з пульпою та флотореагентами (розчин солі Мора, емульсія жирної кислоти ряду C7–C9). Після флотаційного розділення шліфпорошку та контрольного хімічного очищення визначали фракційний склад матеріалу за масою. Встановлювали вихід “пінної” та “камерної” фракцій від маси вихідного порошку. Рідиннофазне хімічне оброблення та очистки від флотореагентів шліфпорошку проводили в розчині нітрогенової або хлорводневої кислот за температури кипіння протягом 20 хв, з подальшою

відмивкою та сушінням. Перед флотаційним розділенням шліфпорошку в камері флотаційної машини попередньо здійснювали оброблення ультразвуковими хвилями (активування) суспензії порошку [9]. Активування суспензії порошку іонами заліза (порошок в розчині солі Мора у співвідношенні 1:20) здійснювали в камері флотомашини, оснащеної магнітостриктором, який передає на камеру з пульпою ультразвукові хвилі від ультразвукового генератора. Подальше флотаційне розділення порошку проводили в камері флотаційної машини за допомогою імпеллера, піногона та флотореагентів, з отриманням (після очистки від флотореагентів та висушування) “пінної” та “камерної” фракцій, властивості яких, як вказано вище, відрізнялися.

Метою даної роботи було дослідження експлуатаційних характеристик алмазних кругів із шліфпорошками синтетичного алмазу марки АС20 100/80 які пройшли флотаційне розділення і з вихідних порошків було окремо виділено алмазні порошки, які умовно далі в роботі називаємо “камерні” алмази (з нижньої частини камери) та “пінні” алмази (з верхньої частини камери).

Властивості та характеристики алмазних порошків після флотаційного розділення наведено в табл. 1, аналіз якої свідчить, що “пінні” алмази значно вирізняються від вихідних і “камерних”: вони мають більші показники міцності зерен і однорідності за міцністю, найменшу масову частку домішок, менші гідрофільність і питому магнітну сприйнятливість. У свою чергу “камерні” алмази мають менші показники міцності зерен і однорідності за міцністю, ніж вихідні порошки, які не проходили процес флотації.

Таблиця 1. Показники алмазного порошку марки АС20 100/80 вихідного та після флотаційного розділення

Показник	Вихідний порошок	Порошок після флотаційного розділення	
		“пінний”	“камерний”
Питома магнітна сприйнятливість $\chi \cdot 10^8$, м ³ /кг	32,86	0,40	2,43
Питомий електричний опір, Ом·м	$2,8 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^{12}$	$5,5 \cdot 10^{10}$
Міцність за статичного стиску, Н	17,4	18,9	14,9
Показник однорідності за міцністю, %	16	30	12
Масова частка домішок:			
неспалимий залишок, %	2,22	1,00	1,62
у вигляді розчинних компонентів, %	0,61	0,01	0,02
Гідрофільність порошку (вільна енергія насичення паровою водою) ΔC_s , мДж/(г·моль)	264,9	193,9	238,4
Частка основної фракції зернового складу (100/80), %	71	71	71

Три групи алмазних шліфпорошків АС20 100/80 (вихідна, “камерна” та “пінна”) були застосовані у процесі виготовлення алмазних шліфувальних кругів форморозміру 12А2-45° 125×5×3×32, на полімерній зв’язці В2-08 та з відносною концентрацією алмазів в робочому шарі 100 %.

Для обробки було вибрано зразки вольфрамо-кобальтового твердого сплаву марки ВК6 розмірами 63×15×7 мм. Шліфування провадили без охолодження, щоби 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 інструменту за показником відносних витрат q_p алмазів та шорсткість обробленої поверхні за показником Ra . Результати випробувань наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів, оснащених алмазними порошками марки АС20 100/80 за вихідними та після флотаційного розділення

Алмазний порошок АС20 100/80	Експлуатаційні показники за продуктивності обробки, мм ³ /хв			
	200		400	
	q_p , мг/г	Ra , мкм	q_p , мг/г	Ra , мкм
“Пінний”	3,2	0,42	11,1	0,43
“Камерний”	5,4	0,30	21,3	0,36
Вихідний	3,6	0,43	19,5	0,46

Випробування кругів у разі шліфуванні твердого сплаву ВК6 дозволило встановити певний взаємозв'язок фізико-механічних та дефектних показників шліфпорошків алмазу після їхнього флотаційного сортування (див. табл. 1) із зносостійкістю шліфувального інструменту. Так, порошки АС20 100/80 після їхнього флотаційного сортування мали різні показники міцності, що обумовлено різним вмістом об'ємних дефектів: вихідний порошок – 17,4 Н, “пінна” фракція – 18,9 Н, “камерна” фракція – 14,9 Н. Як наслідок, це впливало як на зносостійкість шліфувального інструменту, так і на шорсткість обробленої поверхні.

У разі продуктивності оброблення 200 мм³/хв для круга з вихідним порошком відносні витрати алмазів складали 3,6 мг/г, а з “пінною” фракцією за підвищення показника міцності відносні витрати мали би складати орієнтовно 3,1 мг/г, експериментальне значення було 3,2 мг/г, тобто розрахункові та експериментальні значення є близькими. Для камерної фракції за зменшення показника міцності відносні витрати алмазів у крузі мали би скласти ~ 4,2 мг/г, але експериментальне значення було 5,4 мг/г. У цьому разі впливала різна масова частка домішок, кількість якої значно більше у порошок алмазу “камерної” фракції. Якщо виходити з цього показника, то для камерної фракції відносні витрати алмазів в крузі мали б скласти 5,1 мг/г, що досить близьке до даних експерименту.

Тобто, для порошків алмазу “пінного” продукту флотаційного розділення основним чинником підвищення зносостійкості шліфувальних кругів є підвищення показника міцності, а для порошків алмазу “камерного” продукту флотаційного розділення – наявна в них частка домішок.

Отже, для підвищення зносостійкості алмазного круга саме застосування “пінного” продукту флотаційного розділення алмазного шліфпорошку є найбільш ефективним, причому із підвищенням продуктивності шліфування така ефективність зростає. Так, за продуктивності шліфування 200 мм³/хв зносостійкість круга з “пінним” продуктом зростає у 1,125 раз відносно круга з вихідним порошком алмазу, а за продуктивності шліфування 400 мм³/хв – у 1,76 раз, тоді як застосування порошків алмазу з “камерного” продукту флотаційного розділення призводить до збільшення зносу круга у порівнянні з вихідними порошками алмазу (див. табл. 2).

У роботі досліджено шорсткість оброблюваної поверхні у разі застосування алмазних зерен із флотаційним сортуванням (див. табл. 2). Очікувано, як

“камерний”, так і “пінний” продукти розділення дещо знижують показник шорсткості Ra , причому застосування “камерного” продукту розділення досить суттєво знижує показник Ra порівняно з вихідними порошками алмазу. Але за цих умов у кругу з “камерним” продуктом розділення алмазного порошку спостерігали і підвищення відносних витрат алмазів.

Також 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. Аналіз даних табл. 3–4 свідчить, що цей показник під час шліфування кругом із порошками, отриманими за різних варіантів флотаційного сортування, є вищим, ніж з вихідними. Причому “камерний” продукт флотаційного розділення має кращу тримальну здатність і у процесі шліфування шорсткої поверхні є найбільш ефективними для менших значень продуктивності шліфування, а у разі більшої продуктивності краще використовувати “пінний” продукт. Більш детально особливості опорних поверхонь шорсткої поверхні показано на рисунку.

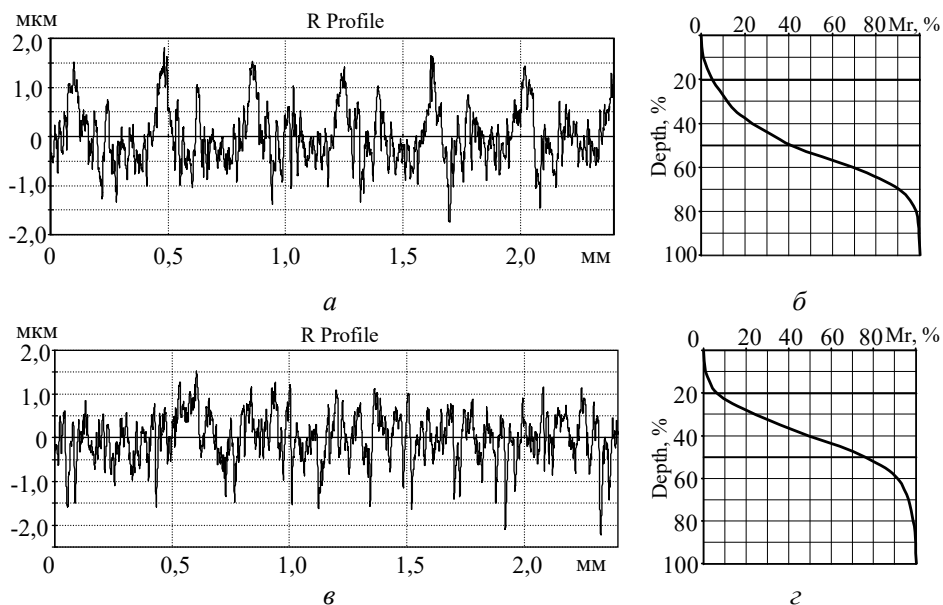
Таблиця 3. Показники шорсткості обробленої поверхні зразків твердого сплаву ВК6 після обробки алмазними шліфувальними кругами з алмазними порошками марки АС20 100/80 вихідними та після флотаційного розділення за продуктивності обробки $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$

Алмазний порошок АС20 100/80	Показники шорсткості :			
	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мкм	$t50$, %
“Пінний”	0,43	3,08	43	37,63
“Камерний”	0,42	2,87	65	44,77
Вихідний	0,30	2,13	48	65,25

Таблиця 4. Показники шорсткості обробленої поверхні зразків твердого сплаву ВК6 після обробки алмазними шліфувальними кругами з алмазними порошками марки АС20 100/80 вихідними та після флотаційного розділення за продуктивності обробки $400 \text{ мм}^3/\text{хв}$

Алмазний порошок АС20 100/80	Показники шорсткості :			
	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мкм	$t50$, %
“Пінний”	0,46	3,55	45	41,15
“Камерний”	0,43	3,74	36	76,23
Вихідний	0,36	3,26	46	39,85

Використання алмазних кругів з порошками алмазу після флотаційного сортування впливає на відхилення від стандартної залежності $Rmax = f(Ra)$, детально описаної у [10], де показано, що майже вся сукупність даних для умов алмазного шліфування твердих сплавів відповідає залежності $Rmax = 7,5Ra$. Аналіз даних, наведених у табл. 3 і 4, свідчить про те, що усереднено вся сукупність даних складає 7,75, це значення є близьким до вказаного вище – 7,5. Це свідчить про те, що отримані дані майже не відхиляються від стандартної залежності, що є опосередкованим підтвердженням адекватності проведених досліджень.



Профілограми (а, в) і криві відносної опорної довжини профілю (б, г) шорсткої поверхні зразків твердого сплаву, шліфованої з продуктивністю 400 мм³/хв кругом з вихідним порошком алмазу AC20 100/80 (а, б) і кругом з алмазу AC20 100/80 після флотаційного розділення – “пінний” продукт (в, г).

ВИСНОВКИ

Для підвищення зносостійкості алмазного круга застосування “пінного” продукту флотаційного розділення алмазного шліфпорошку є найбільш ефективним, причому з підвищенням продуктивності шліфування така ефективність зростає. Застосування порошків алмазу з “камерного” продукту флотаційного розділення навпаки гарантовано підвищує знос круга відносно використання вихідних алмазів.

Показник шорсткості *Ra* оброблюваної поверхні у разі застосування алмазних зерен після флотаційного сортування як “камерного”, так і “пінного” продукту дещо знижується по відношенню до вихідного порошку алмазу, причому у разі застосування “камерного” продукту зниження є більш суттєвим. Наповненість шорсткої поверхні за параметром кривої опорної поверхні *t50* свідчить, що цей показник у разі використання різних варіантів продуктів флотаційного розділення є вищим, ніж у разі використання вихідних зерен. Причому “камерний” продукт флотаційного розділення має кращу тримальну здатність під час шліфування шорсткої поверхні та є найбільш ефективним для менших значень продуктивності шліфування, а для більшої продуктивності шліфування краще використовувати “пінний” продукт флотаційного розділення.

Для підвищення зносостійкості алмазного круга та кращої тримальної здатності отриманої шорсткої поверхні рекомендується використовувати в алмазних шліфувальних кругах “пінний” продукт флотаційного розділення алмазних порошків. Для отримання найменшого значення висотного показника шорсткості обробленої поверхні рекомендується застосовувати в алмазних шліфувальних кругах “камерного” продукту флотаційного розділення алмазних порошків.

ФІНАНСУВАННЯ

Дану роботу не фінансували із зовнішніх джерел.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів.

V. I. Lavrinenko¹, V. V. Smokvyna¹, H. D. Ilnytska¹, N. O. Oliinyk¹,
G. A. Bazaliy¹, V. Yu. Solod²

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

²Dniprovsky State Technical University,
the Ministry of Education and Science of Ukraine,
Kamianske, Dnipropetrovsk Region, Ukraine
Performance indicators of the grinder tools with diamond
grinding powder after flotation separation

The flotation separation of diamond grinding powders was investigated, where part of the grains of synthetic diamond grinding powder, together with air bubbles, were carried to the surface layer (foam product), and the other part of the diamond grains, which were better wetted by water, remained in the chamber of the flotation machine (chamber product). It is shown that the diamonds of the foam product, in contrast to the initial and chamber diamonds, have higher indicators of grain strength and uniformity in strength, and the smallest mass fraction of impurities and specific magnetic susceptibility. In order to increase the wear resistance of the diamond wheel, the most effective is the use of a foam product. Moreover, with an increase in grinding productivity, this efficiency increases. It was found that the use of a tool with diamond powders after both cases of flotation separation allows to achieve a lower roughness index Ra than when using the original diamond powders in a wheel. At the same time, the fullness of the polished rough surface according to such a parameter of the curve of the support surface as t50 indicates that this indicator for various options of using the tool with diamond powders after flotation sorting is higher than with powders in the initial state.

Keywords: flotation separation of diamond grinding powders, foam and chamber product, grinding tool, 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. Petasyuk G.A., Lavrinenko V.I., Sirota Yu.V., Muzichka D.G. A study of the tendency and extent of variation of morphometric characteristics of standard synthetic diamond grits in a continuous series of their grades and sizes. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 6. P. 414–423.
4. Hong Q., Zhou R., Guo X., Wang Zh., Yin Sh. A novel strategy for improving the wear resistance of electrodeposited Ni-diamond composite coatings by diamond surface morphology modification. *Diam. Relat. Mater.* 2023. Vol. 137, art.110093.
5. Li J., Fang W., Wan L., Liu X., Hu W., Cao D., Han K., Li Y., Yan Y. Research on the bonding properties of vitrified bonds with porous diamonds and the grinding performance of porous diamond abrasive tools. *Diam. Relat. Mater.* 2022. Vol. 123, art. 108841.
6. 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.

7. 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.
8. Богатырева Г.П. Сортировка алмазов по прочности флотацией. *Синтетические алмазы*. 1972. Вып. 3. С. 23–25.
9. Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А, Базалій Г.А. Особливості фізико-механічних характеристик порошку алмазу марки АС20 зернистості 100/80 та продуктів його флотаційного розділення. *Міжвузівський збірник наукових праць “Наукові нотатки” за галузями знань “Фізико-математичні науки” та “Технічні науки”*. Луцьк, 2023. Вип. № 75. С. 36–40.
10. 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 15.01.25

Після доопрацювання 06.02.25

Прийнята до опублікування 11.02.25