

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 622.23:621.921.1:620.178.162

**Jialiang Wang\***<sup>1</sup>, **Shaohe Zhang**<sup>2,3</sup>, **Xian Yang**<sup>4</sup>,  
**Fenfei Peng**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hunan University of Science and Technology, National Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Xiangtan, P. R. China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, P. R. China

<sup>3</sup>School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, P. R. China

<sup>4</sup>School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, P. R. China

\**Jialiangwang2019@163.com*

## **Вплив розподілу твердих крихких абразивів на продуктивність алмазного різання**

*За допомогою випробування на знос тертям, сканувальної електронної мікроскопії, енергодисперсійної спектроскопії та інших методів у комбінації з теорією трибології та принципами мікромеханічної обробки досліджено вплив розподілення твердих крихких абразивів та алмазних зерен у гарячепресованих спечених зразках на різучі характеристики та руйнування алмазних зерен. Показано що розподілення твердих крихких абразивних матеріалів значно впливає на зносостійкість і характеристики виступу алмазних зерен по-різному і в різному ступені. Вплив більший, коли тверді крихкі абразиви та алмазні зерна стикаються між собою, ніж коли вони розділені та не контактують. Вплив контакту твердих крихких абразивів і алмазних зерен на продуктивність різання в задній, бічній і передній частинах алмазного зерна відбувається в порядку зменшення. Вплив можна розділити на три категорії: мікрозаглиблення, локальний знос та послаблення утримуючої сили, які синергетично впливають на продуктивність різання.*

**Ключові слова:** *імпрегноване алмазне долото, тверді крихкі абразиви, продуктивність різання, морфологія розподілу, знос тертям.*

### **ВСТУП**

Технологія буріння з використанням вискоєфективного алмазного долота є прямим методом оцінки геологічних мінералів шляхом дос-

© JIALIANG WANG, SHAOHE ZHANG, XIAN YANG, FENFEI PENG, 2021

тупу до глибинних корінних порід [1]. В останні роки, коли все більше приділяють увагу охороні навколишнього середовища та екологічному будівництву, було запроваджено концепцію зеленого буріння, метою якої є підвищення ефективності буріння, скорочення виробничого циклу та зменшення втручання у навколишнє середовище [2, 3]. Отже, необхідно розробити алмазне долото з більш високими характеристиками, щоб гарантувати таку швидкість зносу алмазного зерна, як у матриці [4]. Попередні дослідження в основному зосереджувались на регулюванні твердості матриці, твердих мастильних матеріалів, хімічних породоутворюючих агентів та оптимізації конструктивних параметрів алмазних зерен [5–7]. Для поліпшення властивостей алмазних композиційних матеріалів до складу матриці на основі Fe вводили добавки порошку  $\text{CrB}_2$  [8–10] та нанодисперсного порошку VN [11–13] і вивчали фізико-механічні та трибологічні властивості матриці. Крім того, вивчали вплив контактних навантажень [14–16] і температури [17–19] під час експлуатації, а також розташування ріжучого зуба [20] на трибологічні характеристики алмазного бурового або різального інструменту. Дослідження показують, що параметри робочого процесу мають важливий вплив на знос матеріалів матриці [21–23].

Нещодавно однією з нових тем дослідження стало покращення зносостійкості шляхом додавання в матрицю твердих крихких абразивів з відповідною концентрацією. Тверді крихкі абразиви – це абразиви  $\text{SiC}$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , які широко використовують в шліфувальній обробці, де ці абразиви в основному додаються до таких інструментів, як заточні круги, шліфувальні бруски і вільні абразиви для ремонту, заточування та згладжування поверхні шліфувальних алмазних кругів і алмазних кругів з наклеєною абразивною накладкою (FAP) [24, 25]. У процесі буріння частинки твердих крихких абразивів додають до матриці долота, в якій вони розподіляються випадковим чином. Абразиви мають фізико-механічні властивості, притаманні матеріалам зі здатністю до крихкого руйнування і випадіння, які використовують для поліпшення характеристик алмазних доліт, що застосовують при бурінні складних надтвердих щільних із слабоабразивними властивостями порід [26, 27]. Більшість досліджень у цій галузі зосереджено на технічному застосуванні та аналізі впливу матеріалу, розміру частинок і концентрації твердих крихких абразивів на продуктивність буріння алмазних доліт. Дослідження показали, що поліпшення характеристик макробуріння за рахунок використання твердих крихких абразивних зерен може бути пов'язано з поліпшенням морфології мікрозношування матриці і роботою виступів алмазного зерна [28, 29]. Однак в наявних літературних джерелах не наведено домінуючих факторів впливу.

Повідомлення про дослідження, які б висвітлювали вплив морфології розподілу твердих крихких абразивів на продуктивність буріння алмазних доліт, відсутні. Коли об'ємна концентрація твердих крихких абразивних зерен однакова, на морфологію мікророзподілу абразивів у тій же партії алмазних доліт також впливає випадковий розподіл твердих крихких абразивних зерен. Продуктивність макроскопічного буріння визначається синергетичним впливом твердих крихких абразивів з різним розподілом структур на мікроскопічному рівні. Механізм впливу мікроскопічного розподілу твердих крихких абразивних зерен на продуктивність різання не встановлений, і немає відповідної теоретичної моделі, яка допомогла б оптимізувати схему розподілу абразивних частинок, що унеможливило б точне прогнозування та контроль твердих крихких абразивів для оптимізації продуктивності долота відповідно до існуючої теорії. Відсутність експериментальних і теоретичних досліджень

призводить до нестабільної роботи алмазних доліт та зменшення терміну їх служби.

В даній роботі використано теоретичний аналіз, експериментальні дослідження та інші методи в поєднанні з теорією трибології та принципами мікрообробки для аналізу впливу зміни відносного положення між твердими крихкими абразивами та алмазними зернами на продуктивність різання і режим руйнування алмазного зерна. Це дослідження має на меті надати теоретичну підтримку стратегії оптимізації розподілу твердого крихкого абразиву в конструкції алмазного долота, наукові критерії для кількісного аналізу параметрів твердого крихкого абразиву та прогнозування продуктивності буріння, а також вдосконалити існуючу теорію і технологію виготовлення алмазних доліт.

## ЕКСПЕРИМЕНТ

### Підготовка зразка

Для вивчення впливу твердих крихких абразивів, що розподілені у типових місцях матриці, на продуктивність алмазного різання було підготовлено шаблонним методом чотири типи зразків. Розподіл алмазних і твердих крихких абразивів показано на рис. 1. У зразку 1 алмазні зерна і абразиви з карбіду кремнію не контактують один з одним, а у зразках 2, 3 і 4 алмазні зерна і абразивні зерна карбіду кремнію контактують між собою, абразиви з карбіду кремнію розташовані спереду, ззаду та збоку алмазного зерна в напрямку різання відповідно. Алмазні та карбідокремнієві абразиви у всіх досліджуваних зразках мають одношарову форму розподілу для зручного спостереження та статистичного аналізу. Розмір зразка в цьому випробуванні мав зовнішній діаметр 46 мм, внутрішній діаметр 30 мм і довжину 16 мм і був розроблений за звичайним стандартним проектуванням різальних зубів.

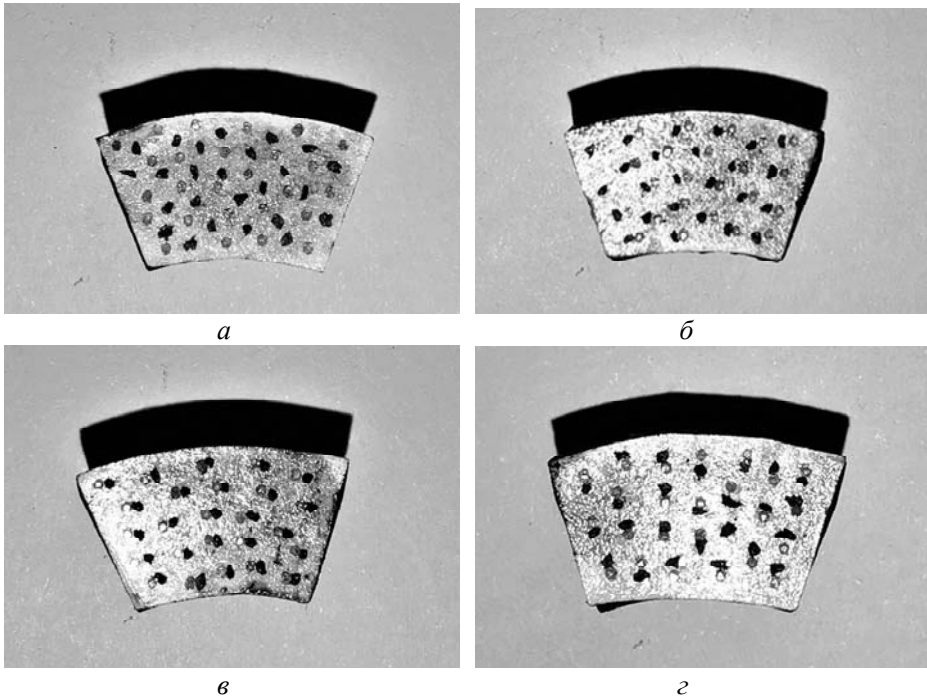


Рис. 1. Розподіл алмазних зерен і твердих крихких абразивів у зразках 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (з).

У цьому експерименті було використано комерційні марки металічних порошоків (виробництва Інституту досліджень металургії та матеріалів провінції Хунань, м. Чанша, Китай). Всі зразки було створено на основі WC за системою рецептур з відомих літературних джерел, що зазвичай використовують у виробництві імпрегнованих алмазних доліт. Склад матриці наведено в таблиці. За системою технології приготування WC створюється матриця з високою твердістю і хорошою зносостійкістю, що дає можливість уникнути надмірного зниження терміну служби долота при додаванні твердого крихкого абразиву для поліпшення синхронного зношування між матрицею та алмазним зерном [30]. Твердість матриці зразків – HRC25. Кількість алмазних зерен в робочому шарі дорівнювала 25, розмір алмазних зерен становив 425–380 мкм, марка алмазу – MBD8, розмір частинок абразиву SiC – 325–380 мкм.

Цей експеримент використовує шаблонний метод підготовки зразків із випадковим розподілом алмазних зерен, що відповідають промисловим зразкам та їх застосуванням, де розподіл алмазних зерен є випадковим. Етапи підготовки зразка були такими:

- термічний клей розміщували на дні рознімної графітової форми відповідно до вимог конструкції;

- алмазні зерна розміщували на дні форми, а абразиви з карбиду кремнію розміщували та кріпили у визначених положеннях алмазних зерен відповідно до вимог конструкції для різних зразків;

- порошок і калібрувальний матеріал заповнювали графітові ущільнювачі в свердлі й далі конструкцію спікали під час гарячого пресування.

У цьому дослідженні використовували тривимірний змішувач HL10 для змішування порошоків протягом 6 год. Енергозберігаючу індукційну тиристорну середньочастотну піч KGBS-B використовували для спікання при гарячому пресуванні. Температура спікання становила 980 °С, а тиск спікання – 15 МПа, час спікання – 4 хв.

### Склад матриці на основі WC

Властивість	Порошок металу				
	WC	663Cu	Co	Ni	Mn
Вміст, % (за масою)	30	50	7	8	5
Розмір, меш	8000	200	8000	300	200
Розмір, мкм	< 2	75	< 2	48	75
Густина, г/см <sup>3</sup>	15,63	8,82	8,7	8,9	7,43

Примітка. 663Cu – це попередньо легований металевий порошок зі складом 85 % Cu, 6 % Sn, 6 % Zn, 3 % Pb.

### Випробування на знос тертям

Випробування на знос тертям проводили на розробленому авторами випробувальному стенді, який може автоматично встановлювати швидкість, тиск і об'єм промивання. Шліфувальний круг з оксиду алюмінію закріплювали на випробувальному стенді, а зразок, закріплений на приладі, обертався за годинниковою стрілкою під певним тиском. Параметри та умови випробування були такими: тиск – 0,4 кН; швидкість обертання 650 об/хв; час – 1 хв; охолоджували водою, кількість промивної рідини становить 40 л/хв. Цифрова шкала з точністю аналізу 0,01 г вимірює втрату маси до і після випробування на знос усіх зразків. Кожну групу зразків повторювали три рази для отримання середнього значення даних. Скануючий електронний мікроскоп (фірми

“Sirion”, США), обладнаний енергодисперсійним спектрометром, використовували для спостереження за мікроморфологією зносу та хімічним складом поверхні всіх зразків. Потужний інтегрований відеомікроскоп SQ500MF використовували для аналізу швидкості зносу алмазних зерен в матриці. Морфологію зношеного шламу спостерігали та аналізували.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

### Характеристика зносу тертям

*Властивості зносу тертям.* Вид зносу алмазних зерен є одним із найважливіших факторів, що впливає на зносостійкість матриці та продуктивність алмазного різання. Вид зносу можна розділити на повний знос, мікродроблення, макродроблення, знос і випадіння. Передчасне випадіння і знос мають найбільш значний вплив на зносостійкість матриці. Зносостійкість матриці значно знижується, коли захист алмазних зерен втрачається. Тому аналіз швидкості зносу алмазних зерен в робочому шарі є ефективним методом прогнозування продуктивності різання та терміну служби зразка.

На рис. 2 показано швидкість зносу алмазних зерен на одиниці площі, на рис. 3 – втрата маси зразка при шліфуванні і шліфувального круга з оксиду алюмінію. Видно, що зміна відносного положення між твердими крихкими абразивними зернами та алмазними зернами має великий вплив на швидкість їхнього зносу та втрат маси зразка при шліфуванні. Тверді крихкі абразиви в зразку 1 не контактують з алмазними зернами, їхня втрата маси при шліфуванні становить 0,55 г, а втрата маси шліфувального круга з оксиду алюмінію – 8,35 г. Швидкість зносу алмазних зерен становить 28 %. Тверді крихкі абразивні зерна в зразках 2 і 4 контактують з алмазними зернами, у зразку 2 вони розміщені перед алмазними зернами у напрямку різання. Швидкість зносу алмазних зерен становить 32 %, їхня втрата маси при шліфуванні – 0,64 г, а втрата маси шліфувального круга з оксиду алюмінію – 9,24 г. Зразки 1 та 2 мають схожі результати. Однак втрата маси шліфувального круга з оксиду алюмінію в зразку 2 зростає швидше, ніж у зразку 1, що вказує на поліпшення характеристик різання алмазними зернами. Тверді крихкі абразиви зразка 3 у напрямку різання знаходяться за алмазними зернами, які мають найвищу швидкість зносу – до 52 %. Це вказує на те, що вид розподілу твердих крихких абразивів у зразку 3 найбільше сприяє метаболізму алмазних зерен. У цьому експерименті алмазні та тверді крихкі абразиви мають одношаровий розподіл, і в матриці немає алмазних зерен після їхнього зносу. Відповідно, якщо швидкість зносу алмазних зерен занадто висока, зносостійкість матриці значно знижується через втрату їхнього захисту, що призводить до значного збільшення втрати маси при шліфуванні.

Отже, втрата маси зразка 3 при шліфуванні має найбільший загальний показник – 1,25 г, а втрата маси шліфувального круга з оксиду алюмінію – 10,43 г. Тверді крихкі абразиви в зразку 4 розміщені збоку від алмазних зерен в напрямку різання. Коефіцієнт зносу алмазних зерен в зразку 4 дорівнює 20 %, що є найнижчим серед усіх зразків, втрата їхньої маси при шліфуванні – 0,38 г, втрата маси шліфувального круга з оксиду алюмінію – 9,45 г. Оскільки матриця добре захищена алмазними зернами, що робить її більш стійкою до зносу при обробці зразка шліфувальним кругом, то втрата маси зразка 4 при шліфування також є найнижчою серед усіх зразків. Більше того, втрати маси шліфувального круга із оксиду алюмінію при обробці зразка 4 більші, ніж у зразків 1 та 2, що вказує на те, що продуктивність алмазного різання також покращується.

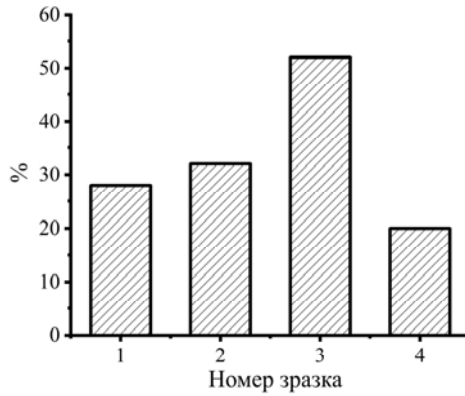


Рис. 2. Швидкість зносу алмазних зерен на одиниці площі.

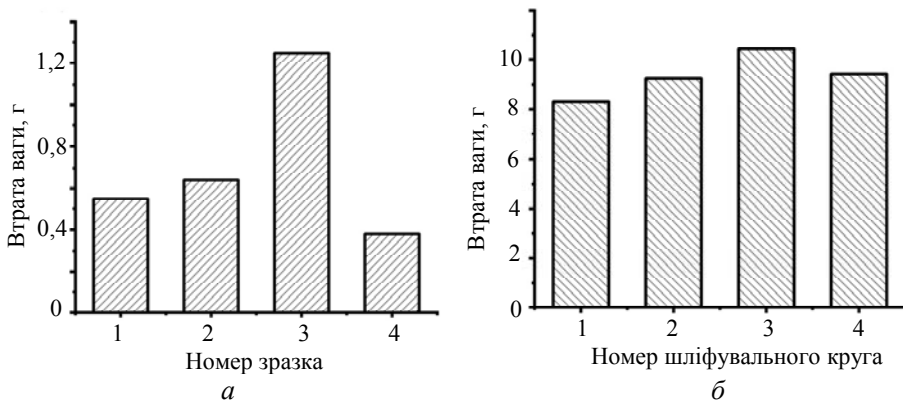


Рис. 3 Порівняння втрати маси зразком (а) і шліфувальним кругом (б).

*Морфологія зносу тертям.* Знос можна розділити на адгезійний, абразивний, втомлений, корозійний і ерозійний. Аналіз морфології поверхні зносу є ефективним методом для вивчення механізму зносу [31]. Матриця навколо оголеного алмазного зерна зазвичай зберігає свою первісну морфологію, оскільки вона захищена алмазними зернами і її не легко пошкодити в умовах потужного шліфування або гідравлічною ерозією. Тому це дослідження фокусували на спостереженні морфології зносу в периферійній зоні алмазних зерен. На рис. 4 показана морфологія зносу зразка 1, в якому тверді крихкі абразиви та алмазні зерна не контактують між собою. На поверхні матриці спостерігали мілкі борозни, а абразиви з карбіду кремнію були розподілені рівномірно. Основним режимом пошкодження абразивів з карбіду кремнію є незначний злам. На рис. 4, в видно, що між абразивами з карбіду кремнію та матрицею відсутній металевий зв'язок, але є значна тріщина. Отже, матриця слабо утримує абразиви з карбіду кремнію. Крім того, трохи потріскана поверхня карбіду кремнію покрита великою кількістю білого шламу, що в основному складається з елементів Al та O, визначених за допомогою енергодисперсійної спектроскопії, можливо це залишки круга з оксиду алюмінію. Це явище вказує на те, що абразивні матеріали з карбіду кремнію можуть збільшувати шорсткість локальної матриці, і це певною мірою сприяє збільшенню вмісту порошку гірської породи та створює сприятливі умови для оголення алмазних зерен. Незважаючи на те, що профіль зносу більшості алмазних

зерен у матриці майже не змінюється, вони все ж демонструють явище затуплення і заокруглення, що негативно впливає на продуктивність різання та коефіцієнт їх використання.

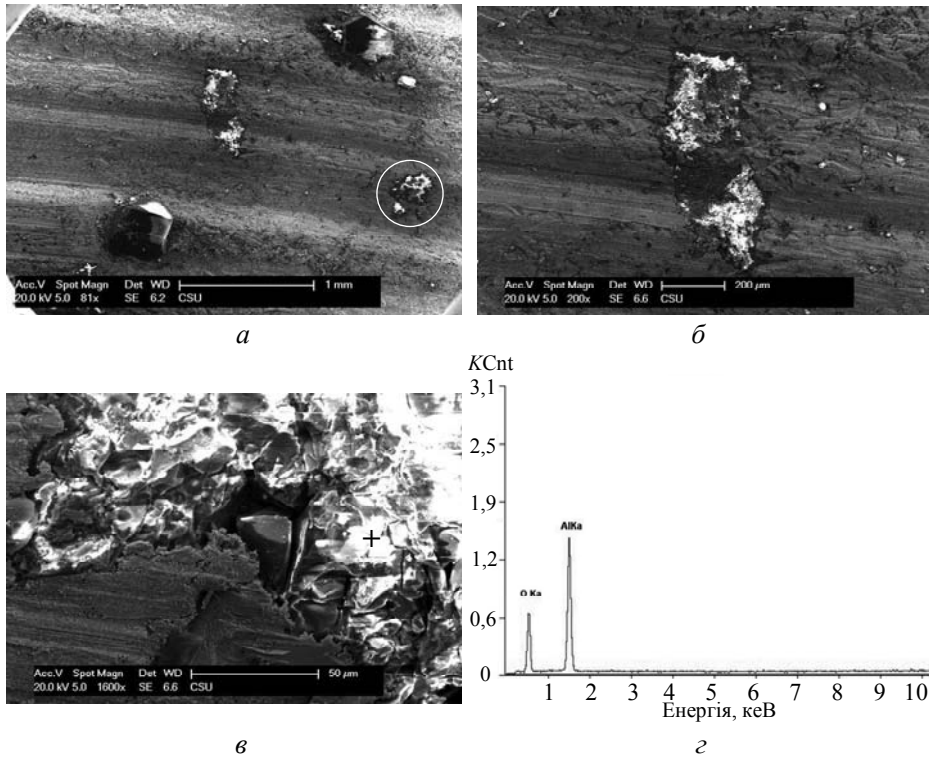


Рис. 4. Морфологія зносу зразка 1.

На рис. 5 зображено профіль зносу зразка 2, де тверді крихкі абразиви та алмазні зерна знаходяться перед алмазним зерном і контактують між собою. Як видно, в передній частині алмазного зерна в напрямку різання спостерігається різний рівень накопичення зернистого шламу та явище локального погіршення зносу. Це пов'язано з подрібненням твердих крихких абразивів, які схильні до блокування алмазним зерном, що контактує з ними. Отже, подрібнені частинки абразивів та частинки шламу зносу залишаються в передній частині алмазного зерна, що призводить до локального зносу матриці. Шорсткість матриці та висота виступу алмазних зерен покращуються порівняно зі зразком 1. Однак алмазне зерно, як і раніше, затуплюється та заокруглюється, і на поверхні відсутня морфологія суцільних борозен.

На рис. 6 представлено профіль зносу зразка 3, видно, що швидкість зносу алмазних зерен значно вища. Алмазні зерна сильно подрібнюються, і велика кількість шламу прилипає до їхньої поверхні, коли тверді крихкі абразиви та алмазні зерна контактують один з одним і знаходяться позаду алмазного зерна. Це пояснюється тим, що тверді крихкі абразиви в цьому положенні, як правило, спричиняють зменшення міцності поверхні позаду алмазного зерна, що контактує з абразивами, зменшуючи тим самим міцність утримання алмазного зерна в матриці. Алмазне зерно, яке демонструє швидкий знос або подрібнення, безпосередньо збільшує подрібнення гірської породи, ще більше

погіршуючи ступінь зносу матриці, в результаті чого втрачається захист алмазних зерен.

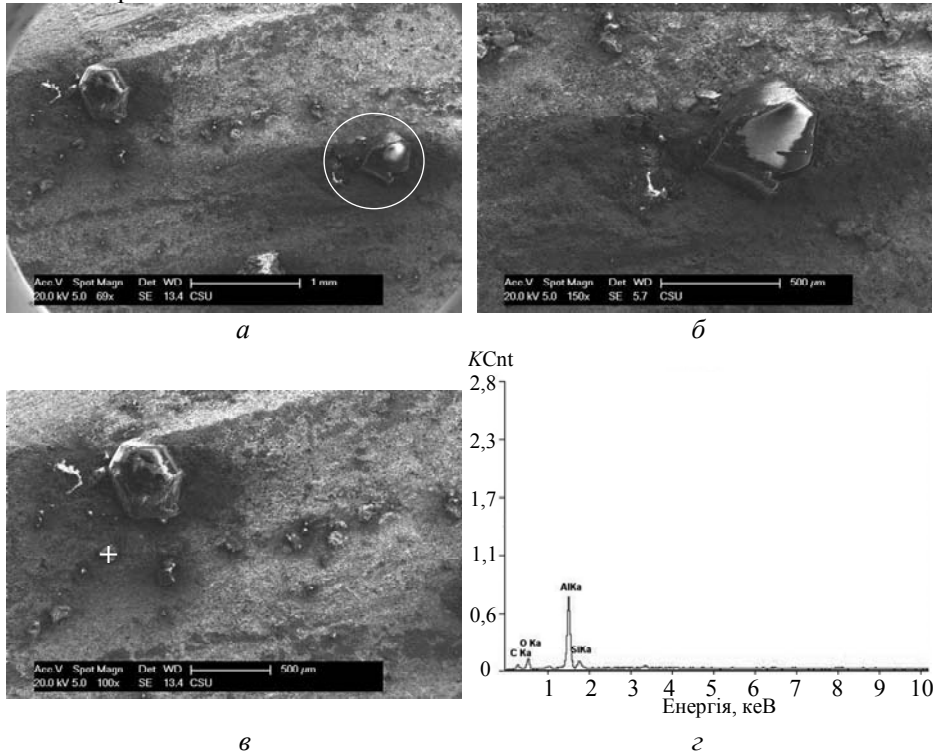


Рис. 5. Морфологія зносу зразка 2.

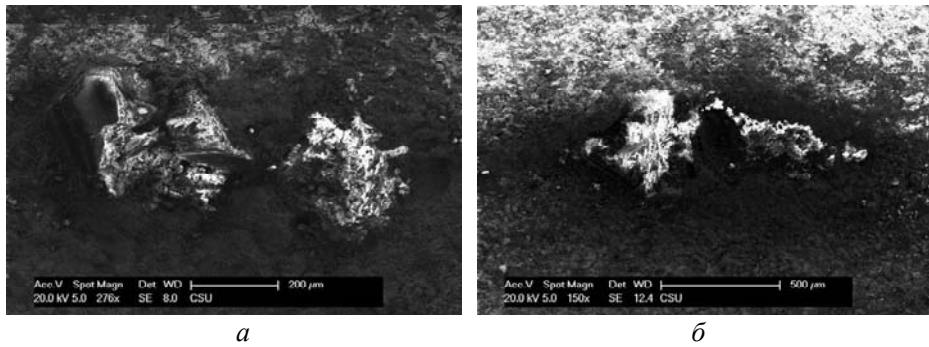


Рис. 6. Морфологія зносу зразка 3.

На рис. 7 представлено профіль зносу зразка 4, видно, що коли тверді крихкі абразивні частинки контактують з алмазним зерном і розташовані збоку від нього, то поверхня позаду алмазного зерна нагадує пуголовку. Цей вид виступу алмазних зерен допомагає збільшити міцність їхнього утримання в матриці і збільшити коефіцієнт використання алмазних зерен, тим самим покращуючи термін служби долота [32]. На поверхні матриці з'являються глибокі борозни. Багато зернистого шламу та пошкодженої морфологічних мікропор розподіляється в борозні біля алмазних зерен. Шихта в основному складається з елементів C, O, Al та Si, що впливає з аналізу енергетичного спектра, які потім визначаються як подрібнювальні абразиви з карбиду кремнію та шихти шліфувального круга із оксиду алюмінію. Характер зносу алма-



зного зерна в основному пов'язаний з мікроподрібненням. Крім того, площа виступу та висота його виступу біля сторони накопичення зернистої шихти є більшою. Це явище вказує на те, що тверді крихкі абразиви за такою схемою розподілу можуть безпосередньо збільшити висоту виступу сторони алмазного зерна в результаті дроблення. Мікрозаглиблення, утворені руйнуванням твердих крихких абразивів, сконцентровані в зазорі між сусідніми двома алмазними зернами і легко утворюють групу мікрозаглиблень, в яких шихта концентрується в локальній області. Це явище посилює ступінь стирання матриці трьома тілами в цій області. Відповідно, незалежні мікрозаглиблення, найбільш імовірно, утворюють безперервну борозну, що збільшує питомий поверхневий тиск долота, збільшує глибину різання алмазного зерна та продуктивність алмазного різання.

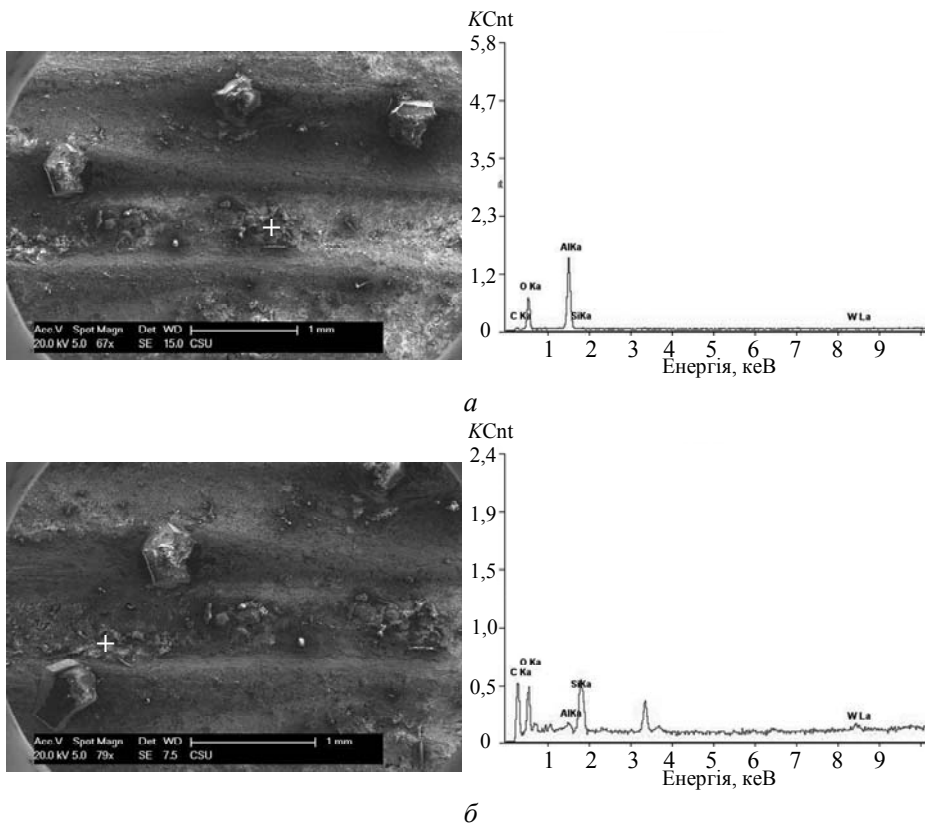


Рис. 7. Морфологія зносу зразка 4.

### Синергетичний вплив твердого крихкого абразиву в різних положеннях на продуктивність алмазного різання

В результаті випробування можна встановити, що вплив твердих крихких абразивів на продуктивність алмазного різання в різних місцях різний. Вплив твердих крихких абразивів на продуктивність алмазного різання можна в основному класифікувати за трьома типами: вплив мікрозаглиблень, вплив локального зносу та вплив ослаблення міцності. На рис. 8 показано принципову схему розподілу твердих крихких абразивів та алмазних зерен в матриці.

*Вплив мікрозаглиблення.* Оскільки тверді крихкі абразиви не утворюють хімічного або металургійного зв'язку з металом матриці в процесі зношування, ймовірно, відбуватиметься мікродроблення та знос, утворюючи в матриці хаотично розподілені мікрозаглиблення. Як показано на рис. 8, а, коли тверді крихкі абразиви не контактують з алмазними зернами, вплив крихких абразивів на продуктивність алмазного різання в основному базується на ефекті мікрозаглиблення. Мікрозаглиблення на поверхні матриці корисні для залишкового порошку породи на дні отвору, опосередковано створюючи сприятливі умови для нормального виступу алмазних зерен [33]. Крім того, тверді крихкі абразиви, які трохи подрібнюються і відшаровуються, певною мірою збільшують кількість твердої фази промивної рідини, покращуючи продуктивність ерозійного зносу. Однак тверді крихкі абразиви не створюють подрібнення у великих обсягах і мають обмежену об'ємну концентрацію в матриці. Отже, мікрозаглиблення дуже обмежено впливає на покращення продуктивності різання алмазними зернами.

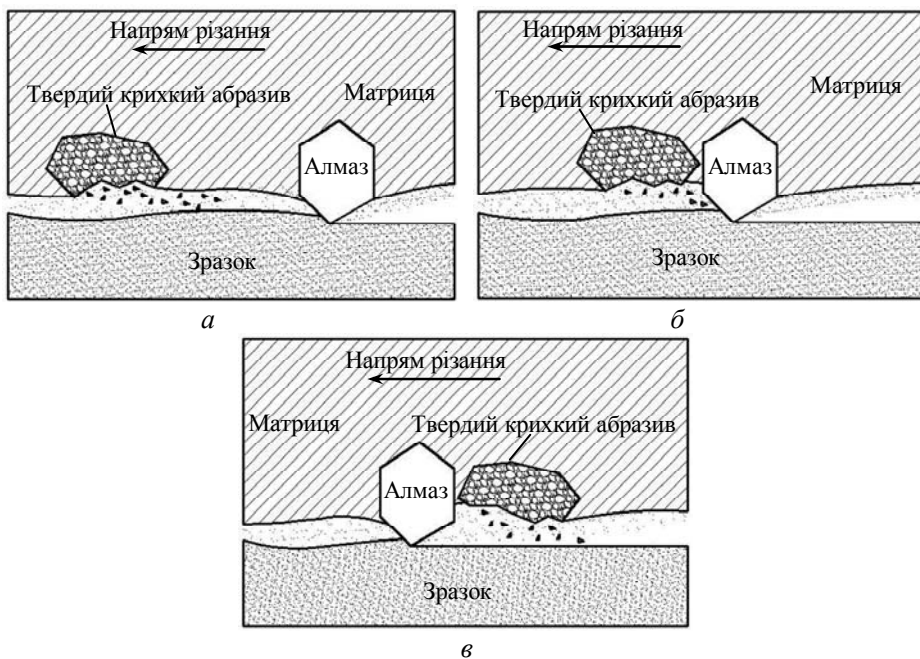


Рис. 8. Принципова схема розподілу твердих крихких абразивів і алмазних зерен в матриці: тверді крихкі абразиви не контактують з алмазним зерном (а), розташовані в передній частині і контактують з алмазним зерном (б), розташовані в задній частині і контактують з алмазним зерном (в).

*Вплив локального зносу.* Як показано на рис. 8, б, коли тверді крихкі абразиви контактують з алмазними зернами і знаходяться перед алмазними зернами у напрямку різання, зміна характеристики мікродроблення та зносу твердих крихких абразивів може безпосередньо збільшити до певної міри висоту переднього виступу алмазного зерна, що контактує з ними. Крім того, тверді крихкі абразивні залишки, які подрібнюються і зношуються, швидше за все, будуть зосереджені в області перед алмазним зерном завдяки алмазному зерну, який контактує з ним, посилюючи ступінь зносу матриці в локальній області. Якщо тверді крихкі абразиви розташовані з боку алмазного зерна в напрямку різання, висота виступу бічного краю алмазного зерна без-

посередньо збільшується, таким чином тверді крихкі абразиви сприяють дробленню та зносу. Сформовані мікрозаглиблення зосереджені в зазорі між сусідніми двома алмазними зернами, що посилює ступінь зносу матриці в локальній зоні та прискорює виникнення незалежних мікрозаглиблень, що призводить до формування безперервної борозни. Тому локальний знос має більш значний вплив на продуктивність алмазного різання, ніж вплив мікрозаглиблення. Крім того, локальний знос має менший вплив на міцність утримування алмазних зерен і є корисним для поліпшення використання алмазного зерна.

*Вплив ослаблення утримуючої сили.* Як показано на рис. 8, в, коли тверді крихкі абразиви контактують з алмазними зернами і знаходяться за алмазним зерном у напрямку різання, випадіння або знос твердих крихких абразивів збільшує оголену площу тильної частини алмазного зерна, створюючи ефект перетягування на алмазне зерно. Ці ефекти зменшують міцність утримання між алмазним зерном і матрицею, збільшуючи ймовірність передчасного випадіння алмазного зерна та змушуючи нове алмазне зерно піддаватися впливу. Передчасне випадіння алмазного зерна сильно збільшує подрібнюючу здатність гірської породи, ще більше збільшуючи ступінь зносу матриці. Отже, вплив послаблення міцності утримання на продуктивність різання алмазного зерна значно вищий, ніж вплив локального зносу та мікрозаглиблення. Висота виступу алмазного зерна однакова протягом усього процесу, оскільки його оголення є безперервним процесом, що досягається за рахунок синхронного зносу алмазного зерна і матриці. Виступ алмазного зерна, що виникає в результаті ослаблення сили утримання, є перехідним процесом, і висота його виступу раптово збільшується за дуже короткий період часу. Отже, ослаблення сили утримання має найбільш значний вплив на характеристики буріння алмазного долота в складній і спеціальній породі, якій властиві надтвердість, компактність і слабка абразивність. Відповідно цей вплив зменшує коефіцієнт використання алмазного зерна і потенційно зменшує час буріння, якщо концентрацію складових неправильно підібрано.

У наслідок дії твердих крихких абразивів в процесі різання три ефекти синергетично впливають на продуктивність алмазного різання через невпорядкований розподіл твердих крихких абразивів в матриці. Коли концентрація твердих крихких абразивів низька, вони, ймовірно, розподіляються рівномірно і рідше контактують з алмазними зернами. Ефект мікрозаглиблення крихких абразивів є головним впливовим фактором на продуктивність алмазного різання, а ефект локального зносу грає допоміжну роль. Ймовірність контакту між крихкими абразивами та алмазними зернами зростає зі збільшенням концентрації абразиву, коли вплив локальних ефектів зносу та ефекту послаблення утримуючої міцності поступово покращується. Ці ефекти в поєднанні з ефектом мікрозаглиблення покращують продуктивність алмазного різання. Коли концентрація абразиву перевищує порогове значення, ймовірність контакту крихких абразивів з алмазними зернами значно зростає, при цьому продуктивність різання в основному визначається ефектом ослаблення утримуючої сили і ефектом локального зносу.

На дію трьох ефектів все ще впливає порушення розподілу твердих крихких абразивів у матриці, коли їх концентрація залишається незмінною. Це також є однією з причин нестабільності продуктивності буріння тієї самої партії алмазного долота з твердими крихкими абразивами в тому ж пласті. Тому варто провести подальші дослідження з метою оптимізації розподілу крихких абразивів у матриці під час виготовлення алмазних доліт, враховуючи вплив економічних витрат, складності виробничого процесу та інших фак-

торів, а також досягнення оптимальної пропорції впливу трьох факторів, щоб зменшити об'ємну концентрацію крихких абразивів та вплив на міцність матриці за умови дотримання вимог до використання.

## ВИСНОВКИ

Ступінь впливу твердих крихких абразивів у різних положеннях на зносостійкість матриці та продуктивність алмазного різання різняться – вплив більший, коли тверді крихкі абразиви та алмазні зерна контактують між собою, ніж коли вони розділені та не контактують.

Коли твердий крихкий абразив та алмазне зерно контактують і абразив розміщується в передній частині алмазного зерна, шлам, ймовірно, буде сконцентрований на передньому краї алмазного зерна, що є наслідком прискорення зносу локальної області. Коли твердий крихкий абразив розміщений збоку однієї із сторін алмазного зерна, утворений шлам, швидше за все, розподіляється в зазорі між двома сусідніми алмазними зернами, де увесь шлам прискорює злиття незалежних мікрозаглиблень, що призводить до утворення суцільної борозни.

Коли твердий крихкий абразив і алмазне зерно знаходяться в контакті і абразив поміщається на задньому краї алмазного зерна, випадіння або знос твердого абразиву збільшує відкриту площу на задній частині алмазного зерна, створюючи ефект захоплення алмазом. Це знижує утримуючу здатність між алмазним зерном і матрицею і збільшує ймовірність передчасного випадіння алмазного зерна.

## ПОДЯКИ

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду природничих наук Китаю (No.41702390), Хунаньського провінційного фонду природних наук Китаю (No.2018JJ3173) та Програми відкритого фонду досліджень Ключової лабораторії металогенного прогнозування кольорових металів та моніторингу геологічного середовища (Центральний Південний університет), Міністерство освіти (No.2019YJSJ15).

Jialiang Wang<sup>1</sup>, Shaohe Zhang<sup>2,3</sup>, Xian Yang<sup>4</sup>, Fenfei Peng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hunan University of Science and Technology, National Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Xiangtan, P. R. China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha, P. R. China

<sup>3</sup>School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, P. R. China

<sup>4</sup>School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, P. R. China

The Influence of hard-brittle abrasive distribution on diamond cutting performance

*The hot-pressed sintered samples of which the hard-brittle abrasives and diamond are distributed in different positions were prepared using template method. The friction-wear test, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), and other testing methods combined with the theory of tribology and principles of micromachining were used to analyze the impact of the relative position of hard-brittle abrasives and diamonds*

on the cutting performance and failure mode of the diamond. The results show that the hard-brittle abrasives in different positions significantly impact the wear resistance and the diamond protrusion performance, though in different ways and degrees. The influence is greater when the hard-brittle abrasives and the diamond are in contact with one another than when they are separated and contactless. The influence when the hard-brittle abrasives and the diamond are in contact on the cutting performance in the rear, side, and front of the diamond is in descending order. The influence can be divided into three categories: the micro-pit effect, the local wear effect, and the weakening effect of the holding force, which synergistically affect the cutting performance.

**Keywords:** impregnated diamond bit, hard-brittle abrasives, cutting performance, distribution morphology, friction wear

1. Mostofi M., Richard T., Franca L., Yalamanchi S. Wear response of impregnated diamond bits. *Wear*. 2018. Vol. 410–411. P. 34–42.
2. Wu J., Li Z., Li Z., et al. Technological methods of reducing impact on environment by exploration engineering in green exploration. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2016. Vol. 43, no.10. P. 112–116.
3. Tan S., Fang X., Yang K., Duan L. A new composite impregnated diamond bit for extra-hard, compact, and nonabrasive rock formation. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2014. Vol. 43, no. 3. P. 186–192.
4. Duan L., Pang F., Xie L., et al. Effect of graphite on the matrix under friction performance of the diamond bit low temperature and pressure. *J. Beijing University Technology*. 2015. Vol. 16, no. 5. P. 776–782.
5. Zhao X., Li J., Duan L., Tan S., Fang X. Effect of Fe-based pre-alloyed powder on the micro-structure and holding strength of impregnated diamond bit matrix. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019. Vol. 79. P. 115–122.
6. Pang F., Duan L. Effect of pore-forming agent on drilling performance of impregnated diamond bits for slipping formation. *Mater. Sci. Eng. Powder Metall.* 2014. Vol. 19, no. 5. P. 790–794.
7. S. Tan, W. Zhang, L. Duan, Pan B., Rabiei M., Li C. Effects of MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> on the matrix performance of WC based impregnated diamond bit. *Tribol. Int.* 2019. Vol. 131. P. 174–183.
8. Mechnyk V.A. Regularities of structure formation in diamond–Fe–Cu–Ni–Sn–CrB<sub>2</sub> systems. *Mater. Sci.* 2013. Vol. 49, no. 1. P. 93–101.
9. Mechnik V.A. Effect of hot recompaction parameters on the structure and properties of diamond–(Fe–Cu–Ni–Sn–CrB<sub>2</sub>) composites. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2014. Vol. 52, nos. 11–12. P. 709–721.
10. Bondarenko M.O., Mechnik V.A., Suprun M.V. Shrinkage and shrinkage rate behavior in C<sub>diamond</sub>–Fe–Cu–Ni–Sn–CrB<sub>2</sub> system during hot pressing of pressureless-sintered compacts. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no 4. P. 232–240.
11. Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kolodnitskiy V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Ignatovich S.R., Dub S.N., Kuzin N.O. Formation of Fe–Cu–Ni–Sn–VN nanocrystalline matrix by vacuum hot pressing for diamond-containing composite. Mechanical and tribological properties. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no 6. P. 388–401.
12. Mechnyk V.A. Regularities of structure formation in diamond–Fe–Cu–Ni–Sn–CrB<sub>2</sub> systems. *Mater. Sci.* 2013. Vol. 49, no. 1. P. 93–101.
13. Mechnik V.A., Bondarenko, N.A., Kolodnitskiy V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Ignatovich S.R., Dub S.N., Kuzin N.O. Effect of vacuum hot pressing temperature on the mechanical and tribological properties of the Fe–Cu–Ni–Sn–VN composites. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2020. Vol. 58, nos. 11–12. P. 679–691.
14. Aleksandrov V.A., Akekseenko N.A., Mechnik V.A. Study of force and energy parameters in cutting granite with diamond disc saws. *Sov. J. Superhard Mater.* 1984. Vol. 6, no. 6. P. 46–52.
15. Zhukovskij A.N., Majstrenko A.L., Mechnik V.A., Bondarenko N.A. The stress-strain state of the bonding around the diamond grain exposed to normal and tangent loading components. Part 1. Model. *Trenie i Iznos*. 2002. Vol. 23, no. 2. P. 146–153.
16. Zhukovskij A.N., Majstrenko A.L., Mechnik V.A., Bondarenko N.A. Stress-strain state of the matrix around the diamond grain exposed to the normal and tangent loading components. Part 2. Analysis. *Trenie i Iznos*. 2002. Vol. 23, no. 4. P. 393–396.

17. Aleksandrov V.A., Zhukovskij A.N., Mechnik V.A. Temperature field and wear of heterogeneous diamond wheel under conditions of convective heat transfer. Part 2. *Trenie i Iznos*. 1994. Vol. 15, no. 2. P. 196–201.
18. Dutka V.A., Kolodnitskij V.M., Zabolotnyj S.D., Sveshnikov I.A., Lukash V.A. Simulation of the temperature level in rock destruction elements of drilling bits. *Sverkhverdye Materialy*. 2004. Vol. 26, no. 2. P. 66–73.
19. Dutka V. A., Kolodnitskij V. M., Mel' nichuk O. V., Zabolotnyj S.D. Mathematical model for thermal processes occurring in the interaction between rock destruction elements of drilling bits and rock mass. *Sverkhverdye Materialy*. 2005. Vol. 27, no. 1. P. 67–77.
20. Sveshnikov I.A., Kolodnitsky V.N. Optimization of the hard alloy cutter arrangement in the drilling bit body. *Sverkhverdye Materialy*. 2006. Vol. 28, no. 4. P. 70–75.
21. Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kuzin N.O., Lyashenko B.A. The role of structure formation in forming the physicomaterial properties of composites of the diamond–(Fe–Cu–Ni–Sn) system. *J. Frict. Wear*. 2016. Vol. 37, no. 4. P. 377–384.
22. Kolodnits'kyi V.M., Bagirov O.E. On the structure formation of diamond containing composites used in drilling and stone working tools (A review). *J. Superhard Mater*. 2017. Vol. 39, no. 1. P. 1–17.
23. Novikov M.V., Mechnyk V.A., Bondarenko M.O., Lyashenko B.A., Kuzin M.O. Composite materials of diamond–(Co–Cu–Sn) system with improved mechanical characteristics. Part 1. The influence of hot re-pressing on the structure and properties of diamond–(Co–Cu–Sn) composite. *J. Superhard Mater*. 2015. Vol. 37, no. 6. P. 1–17.
24. Wang K., Zhu Y. Study on the grinding of sapphire using fixed abrasive with free silicon carbide particles. *J. Synth. Cryst*. 2015. Vol. 44, no. 11. P. 2938–2942.
25. Kim H.M., Manivannan R., Moon D.J., Xiong H., Park J.G. Evaluation of double sided lapping using a fixed abrasive pad for sapphire substrates. *Wear*. 2013. Vol. 302, no. 1. P. 1340–1344.
26. Wang J., Zhang S. Effects of hard abrasive particles on matrix resistance of diamond impregnated bit wear. *The Chinese J. Nonferrous Metals*. 2017. Vol. 27, no. 9. P. 1872–1878.
27. Shen L., Lu Y., Yin J., et al. Study and application of high efficiency NBS impregnated bit for hard formation. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017. Vol. 44, no. 1. P. 84–87.
28. Shen L., Ruan H., Li C., et al. Study on a new type self-sharpening diamond bit for drilling in hard-compact-slipping formation. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2014. Vol. 41, no. 11. P. 57–59.
29. Cai J., Jia M., Shen L., et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017. Vol. 44, no. 2. P. 67–73.
30. Franca L.F.P., Mostofi M., Richard T. Interface laws for impregnated diamond tools for a given state of wear. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*. 2015. Vol. 73. P. 184–193.
31. Li C., Duan L., Tan S., Pan B. Effect of CaF<sub>2</sub> and hBN on the mechanical and tribological properties of Fe-based impregnated diamond bit matrix. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*. 2018. Vol. 75. P. 118–125.
32. Wang D., He Y., et al. Geological Drilling Manual. Changsha: Central South University Press, 2014. P. 257–262.
33. Wang Z., Gao K., Sun Y., Zhang Z., Zhang S., Liang Y., Li X., Ren L. Effects of bionic units in different scales on the wear behavior of bionic impregnated diamond bits. *J. Bionic Eng*. 2016. Vol. 13, no. 4. P. 659–668.

Надійшла до редакції 07.08.20

Після доопрацювання 24.09.20

Прийнята до опублікування 28.09.20