УДК 622.24.051:622.156

А. Л. Майстренко[1,*], М. О. Бондаренко[2], В. С. Антонюк[3], Г. А. Петасюк[1], О. П. Виноградова[1], О. С. Васильчук[1], А. П. Закора[1], О. І. Закутевський[4], Н. О. Олійник[1]

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

[2]Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна.

[3]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

[4]Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України, м. Київ, Україна

**almaystrenko46@gmail.com*

Інтенсивність зношування функціональних елементів із композиційних алмазовмісних матеріалів під час роботи інструментів в процесі руйнування гірської породи

Досліджено процес зношування функціональних елементів породоруйнівних інструментів з композиційними алмазовмісними матеріалами (КАМ) на металевій зв'язці, спечених резистивним електроспіканням під тиском, під час точіння пісковику Торезського родовища. Запропоновано характеристику "ступінь армування" робочої поверхні функціональних елементів КАМ, яка визначається із відношення загальної площі різальних зерен алмазу до площі робочої поверхні функціонального елемента. Побудовано залежність інтенсивності зношування функціональних елементів КАМ від ступеня армування алмазами їхніх робочих поверхонь. В процесі випробувань було зібрано продукти руйнування гірської породи та фрагменти зносу (шламу) функціональних елементів КАМ, які аналізували за допомогою засобів цифрової обробки зображень, в результаті чого було отримано морфометричні характеристики шламу в залежності від ступеня армування робочих поверхонь елементів КАМ зернами алмазу. З використанням методу колориметрії з загальної маси шламу виділено фрагменти металевої зв'язки КАМ та визначено розподіл їхніх розмірів. Представлено результати морфометричного аналізу продуктів зношування інструмента з алмазовмісного композита та руйнування гірської породи.

***Ключові слова**: композиційний алмазовмісний матеріал, гірська порода, продукт зношування металевої зв'язки, породоруйнівний елемент, ступінь армування, шлам, інтенсивність зношування.*

ВСТУП

Початок випуску в першій половині шістдесятих років у промислово розвинених країнах синтетичних алмазів спричинив створення потужної спеціалізованої промисловості для виготовлення різноманітних алмазних інструментів для обробки природних й штучних будівельних матеріалів.

© А. Л. МАЙСТРЕНКО, М. О. БОНДАРЕНКО, В. С. АНТОНЮК, Г. А. ПЕТАСЮК, О. П. ВИНОГРАДОВА, О. С. ВАСИЛЬЧУК, А. П. ЗАКОРА, О. І. ЗАКУТЕВСЬКИЙ, Н. О. ОЛІЙНИК, 2023

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України ім. В. М. Бакуля вперше у світовій практиці почали впроваджувати синтетичні алмази в таких інструментах. Розробці конструкцій, технології виробництва, дослідженням зносостійкості й оптимізації режимів експлуатації інструментів присвячено численні роботи співробітників інституту: В. М. Бакуля, І. Ф. Вовчановского, В. А. Олександрова, Н. В. Ципіна, А. Ю. Шило, А. А. Бугаєва, Є. К. Бондарева, В. А. Коновалова, В. Н. Лівщиця, Р. К. Богданова та багатьох інших [1]. Композиційні аламазовмісні матеріали (КАМ), які виробляли в Інституті надтвердих матеріалів, спікали практично всіма методами, розробленими на той час в галузі порошкової металургії. Функціональні елементи (вставки в долота, сегменти дискових та канатних пилок) для алмазних породоруйнівних інструментів промислово виробляли на металевих зв'язках, зокрема на основі Cu, Co, Ni, Fe, Sn, з різними добавками [2–5]. Однак дослідження процесів зношування цього класу композитів було обмежено тільки вимірюванням втрати їхньої маси або лінійного зносу після руйнування гірських порід та аналізом впливу кінематичних і силових параметрів [4–7]. Хоча працездатність породоруйнівних інструментів значною мірою обумовлена особливостями побудови їхніх робочих елементів, вивчення залежності показників зношування елементів із КАМ від ступеня армування робочих поверхонь зернами алмазу не виконували. Тому метою цього дослідження було визначення залежності інтенсивності зношування функціональних елементів із композиційного алмазовмісного матеріалу на металевій зв'язці від ступеня армування робочих поверхонь зернами алмазу.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджували зразки функціональних елементів, армованих зернами синтетичного алмазу АС300 (зернистістю від 200/160 до 630/500 і концентрацією від 25 до 100 % (ум.) у металевій зв'язці на основі 94 % (за об'ємом) Ni–6 % (за об'ємом) Sn), які використовують у різних породоруйнівних інструментах. Вибір цієї зв'язки обумовлено можливістю використання одного з перспективних методів – резистивного електроспікання під тиском [3–5]. Зразки у вигляді циліндричних вставок Ø 10 мм спікали за умов: I = 1,2–1,4 кА; V = 2,4 В, p = 300–400 МПа, температура – до 700–850 °С, тривалість спікання – 10–20 с [4, 8]. Мала тривалість процесу електроспікання і високий прикладений тиск дають можливість мінімізувати негативний вплив високої температури на зниження зерен синтетичного алмазу під час виготовлення елементів із КАМ [8]. Для трибологічних випробувань функціональних елементів використовували циліндричні блоки (керни) пісковику Торезського родовища VIII–IX категорії за буримістю, які складаються з 75–85 % кварцу, доломіту $Ca(CO_3)_2$ і піриту FeS_2, зв'язаних глинистим цементом.

Випробування зразків КАМ на зносостійкість виконували на стенді, створеному на базі токарно-гвинторізного верстата моделі ДІП-200 (за швидкості взаємного переміщення у парі тертя 99 м/хв), оснащеного динамометром УДМ-600 і системою збору шламу [9–11]. Радіальне навантаження на зразок складало 300 Н. Інтенсивність зношування ω зразків КАМ визначали як відношення втрати їхньої маси до довжини шляху тертя функціонального елемента по циліндричній поверхні зразка гірської породи (табл. 1).

Ступінь армування робочих поверхонь елементів КАМ визначали за площею поверхонь розкритих (різальних) зерен алмазу $\langle s \rangle_{алм}$ відносно площі поверхні елемента, яка перебувала в контакті з оброблюваним керном породи $S_{вст}$. Габітус використаних зерен алмазу у більшості випадків відповідає фор-

мі кубооктаедра. Площа поверхні різального зерна алмазу визначається за радіусом кола описаного навколо шестикутної проекції кубооктаедра на площину робочої поверхні елемента з КАМ $R = a$ (де a – довжина сторони шестикутника). Тому для визначення площі поверхні розкритого зерна достатньо виміряти діаметр кола, що описує шестикутник перерізу розкритого кубооктаедра і визначати площу його розкритої поверхні

$$S_{\text{кубоок}} = a^2(3 + \sqrt{3}\,).$$

Таблиця 1. Морфометричні характеристики продуктів руйнування гірської породи та частинок зв'язки КАМ і ступінь армування робочої поверхні функціонального елемента КАМ зернами алмазу

Зернистість	Концентрація, % (ум.)	Медіана розподілу розмірів частинок шламу $\langle D \rangle$, мкм	Медіана розподілу розмірів фрагментів зв'язки $\langle d \rangle$, мкм	Вміст фрагментів зв'язки в шламі, % (за масою)	Інтенсивність зношування елемента КАМ ω, мг/км	Ступінь армування робочої поверхні функціонального елемента КАМ зернами алмазу, $\langle s \rangle_{\text{алм}}/S_{\text{вст}}$
630/500	100	225,0	163	2,556	103,3	–
630/500	50	282,5	175	1,426	186,0	0,0834
630/500	25	308,9	168	0,414	301,5	0,0290
500/400	100	235,2	184	1,034	66,3	0,1097
500/400	50	290,7	174	0,757	117,7	0,0488
500/400	25	338,0	227	0,409	197,9	0,0290
400/315	50	331,7	116	0,166	34,6	0,0561
400/315	25	357,5	215	0,482	88,0	0,0363
200/160	100	275,7	245	0,839	45,7	0,1254
Зв'язка	–				350,0	0

Також визначали відстань W_i між розкритими зернами алмазу (ортогонально напряму борозенки зносу на поверхні елемента з КАМ) за допомогою цифрового мікроскопа Levenhuk DTX 50 з програмним забезпеченням Adobe Autocad. За співвідношенням $\langle s \rangle_{\text{алм}}/S_{\text{вст}}$ визначали "ступінь армування" робочої поверхні функціонального елемента зернами алмазу (див. табл. 1).

Під час дослідження продуктів руйнування гірської породи та фрагментів зносу робочих елементів із КАМ (шлам) використовували методи хімічної, магнітної обробки (електромагнітом УЕМ-1Т) [9–11], сепарації складових шламу та віртуальної морфометричної їхньої сепарації [12]. Вміст в шламі складових гірської породи і фрагментів металевої зв'язки з КАМ визначали за рентгенівськими спектрами, отриманими з використанням рентгенівського флуоресцентного спектрометра ElvaX і фотометра фотоелектричного КФК-3-01 (ЗОМЗ).

Для дослідження розмірів та форм окремих частинок зруйнованої породи та фрагментів зносу із КАМ використовували растровий електронний мікроскоп Zeiss EVO 50 XVP, оснащений енергетично-дисперсійним рентгенівським аналізатором Oxford Instruments Ultim Max 100. Для визначення розподілу розмірів часток шламу на основі вимірювань великої їхньої кількості використовували метод діагностики морфометричних характеристик засобами цифрової обробки зображень діаметрів кіл, описаних навколо проекцій час-

тинок шламу, використовували прилад DiaInspect.OSM з відповідним програмним забезпеченням [11–13].

Для морфометричного аналізу частинок двофазного шламу було запропоновано новий підхід, який базується на використанні методу колориметрії [14], в основі якого лежить відмінність кольору світла галогенної лампи, відбитого від різних складових шламу. Це дозволило цифровим методом виділити в матриці з результатів вимірювань частинок загальної маси шламу, утвореному під час тертя пари елемент із КАМ–гірська порода, частинки руйнування гірської породи та фрагменти зв'язки.

Фрактографічне дослідження поверхонь руйнування зв'язки у функціональних елементах із КАМ виконано з використанням атомно-силового мікроскопа (АСМ) NT-206V [15–18]. Сканування зони зносу у вигляді борозенок виконували в 128 точках у напрямку довжини растру 13 мкм на ширини кожного растра 13 мкм (всього зшивались п'ять растрів), тобто, розміри ділянки, що досліджували, становили 65(68)×13 мкм.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Інтенсивність зношування робочих елементів з КАМ

Проаналізовано основні складові побудови робочої зони алмазовмісного функціонального елемента із КАМ, які впливають на інтенсивність його зношування, а саме армування робочої поверхні зернами алмазу, та гранулометричні характеристики складових шламу, що утворюється в процесі різання гірської породи. Після точіння керну породи за втратою маси функціонального елемента та довжиною шляху тертя визначали інтенсивність його зношування ω [9–11], а також характеристики армування робочих поверхонь функціональних елементів зернами алмазу, тобто визначали кількість різальних зерен алмазу, розміри розкриття їхніх частин, висоту вильотів, а також склад та морфометрію частинок зібраного шламу (див. табл. 1)

На рис. 1 показано характерну зношену робочу поверхню функціонального елемента з КАМ, де видно, що втрата його маси відбувається за рахунок зносу металевої зв'язки в проміжках між зернами алмазу, результатом чого є утворення борозенок, а також поступове розкриття зерен алмазу з наступним їхнім видаленням.

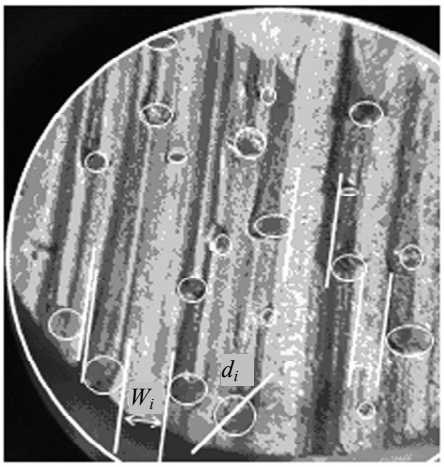
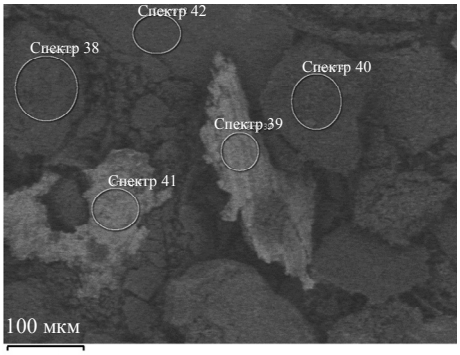


Рис. 1. Зношена робоча поверхня функціонального елемента КАМ; виділено місця розташування різальних зерен алмазу (АС300 630/500; 25 % (ум.)).

Складові та морфометричні характеристики шламу

Дослідження зносу елементів із КАМ проводили за допомогою аналізу складу шламу, в результаті чого було визначено масові частки його складових та їхні морфометричні характеристики (див. табл. 1). У зв'язку з тим, що втрата маси зношеного елемента з КАМ відносно маси зруйнованої гірської породи дуже мала, для визначення форми та розміру частинок шламу виконували попередню сепарацію металевих частинок зв'язки із загального складу продуктів руйнування пари тертя, яку на першому етапі здійснювали за

допомогою хімічної й магнітної (електромагнітом УЕМ-1Т) обробки [9–11] (рис. 2). Аналіз складу продуктів руйнування гірської породи й складових із КАМ з використанням енергодисперсійного дослідження підтверджує, що металеві частинки Ni–Sn у складі шламу є саме фрагментами зв'язки елементів із КАМ (див. рис. 2).



Елемент	Концентрація елемента, % (за масою)				
	Спектр				
	38	39	40	41	42
C	16,59	14,72	73,29	9,88	
O	50,99	4,13	21,13	11,68	46,92
Mg	2,18				
Al	1,56	1,27	0,66		1,74
Si	12,90	2,63	4,92	7,34	50,64
Ca	8,87				0,70
Fe	6,91			0,81	
Ni		72,99		66,56	
Sn		4,27		3,74	
Усього	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Рис. 2. Загальний вигляд шламу, отриманого в процесі точіння керна гірської породи інструментом з фукціональним елементом із КАМ (темні частинки пісковику та світлі фрагменти зв'язки КАМ) і визначені концентрації елементів в різних частинах шламу.

Масовий вміст фрагментів металевої зв'язки КАМ в загальному шламі, тобто кількість нікелю й олова в шламі, визначали на підставі рентгенівських спектрів продуктів руйнування гірської породи й зносу зразків КАМ, отриманих з використанням рентгенівського флуоресцентного спектрометра ElvaX і фотометра фотоелектричного КФК-3-01 (ЗОМЗ) (табл. 2).

Таблиця 2. Результати визначення вмісту складових шламу в продуктах руйнування гірської породи та зносу елемента з КАМ (АС300 400/315; 25 %)

Елемент	Інтенсивність лінії рентгенівського спектра, відн. од.	Концентрація, % (за масою)
Si	17708	24,480
Cl	1658	1,645
K	1054	15,976
Ca	2893	36,730
Ti	138	0,466
Fe	13052	9,130
Ni	3047	1,251
Zn	148	0,040
Zr	1968	0,108
Sn	1342	0,175

Після узагальнення отриманих результатів вимірювання втрати маси елементів КАМ і порівняння з масою зруйнованої породи (див. табл. 1) можна зробити висновок, що розташування зерен алмазу на поверхні робочого елемента, зокрема збільшення відстані між зернами алмазу W_i від 0,48 до 2,5 мм, приводить до збільшення масового вмісту фрагментів зв'язки в шламі до

10 разів. Водночас вміст металевих частинок зв'язки у досліджених зразках КАМ з різними ступенями армування робочих поверхонь елементів змінювався в діапазоні від 0,120 до 0,741 % (за масою) (див. табл. 2). Крім зазначених складових також виявляли одиничні зерна алмазу, масовий вміст яких через мале значення не брали до уваги.

Морфометричний аналіз параметрів розподілу розмірів частинок шламу, визначених під час дослідження елементів із КАМ, виконували за розподілом діаметрів кіл, описаних навколо проекцій частинок шламу <*D*>. Водночас слід відзначити, що в шламі аналізували кількість частинок продуктів руйнування гірської породи та зносу елементів із КАМ, що складали від 500 до 2000, це дало можливість кількісно оцінити їхні морфометричні характеристики [11, 12]. Вимірювали розміри частинок руйнування гірської породи та фрагментів зв'язки за допомогою їхнього сканування до 1800 мкм (рис. 3).

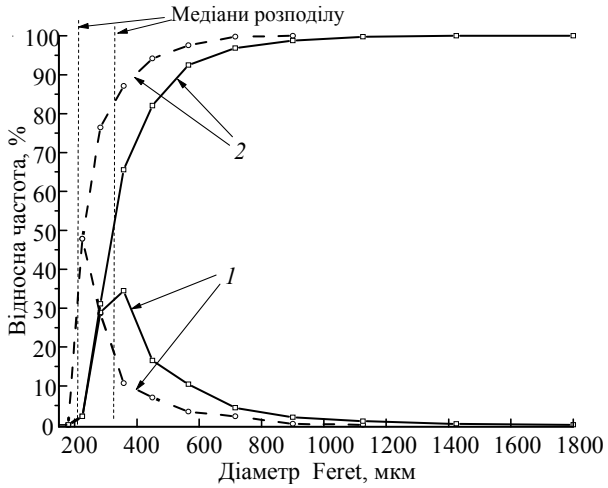


Рис. 3. Розподіли максимальних (—) та мінімальних (– – –) діаметрів Feret [12] частинок гірської породи під час руйнування інструментом з елементом із КАМ (АС300 500/400; 50 % (ум.)): криві диференціальної (*1*) та інтегральної (*2*) функцій розподілу.

Виділені хімічною або магнітною сепарацією металеві частинки зв'язки отримували у вигляді конгломерату, що не дозволяє визначати їхні морфометричні характеристики. Застосування методу колориметрії [14], який базується на відмінності відбитого кольору проникаючого нижнього потоку світла та верхнього підсвічування від джерела галогенного світла від різних складових досліджуваного продукту (рис. 4), дозволив (з використанням програмного забезпечення приладу для діагностики порошків DiaInspect OSM) виконати цифровій відбір значень розмірів частинок зв'язки з матриці розмірів частинок загальної маси шламу і таким способом визначити розподіл їхніх розмірів, залежно від ступеня армування робочої поверхні елементів із КАМ зернами алмазу (рис. 5, табл. 1).

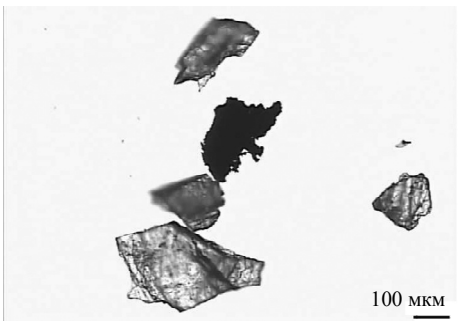


Рис. 4. Загальний вигляд частинок шламу, що складаються з частинок гірської породи (світлі) та фрагмента зв'язки КАМ (темна).

Це дозволило визначити вплив зернистості й концентрації зерен алмазу, розкритих на робочих поверхнях вставок, тобто ступеня армування

робочих поверхонь елементів із КАМ, на зміну морфометричних характеристик частинок шламу. На підставі отриманих даних морфометричних вимірювань частинок у шламі встановлено, що значення медіан розподілів розмірів частинок шламу $<D>$ змінювались у межах від 225 до 357 мкм (див. рис. 3, табл. 1), тоді як розміри фрагментів зв'язки – в межах 116–245 мкм (див. рис. 5). Очевидно, якщо розміри частинок гірської породи насамперед залежать від розмірів різальних зерен алмазу та глибини їхнього заглиблення в породу, то розміри плоских фрагментів зв'язки визначаються розташуванням зерен алмазу на робочій поверхні функціонального елемента, зокрема відстанями між зернами алмазу в ортогональному перерізі поверхні елемента з КАМ відносно напрямку різання, та їхніми фізико-механічними властивостями. Середня відстань між розкритими зернами алмазу на робочих поверхнях елементів із КАМ, не захищених від абразивного впливу гірської породи на зв'язку, у дослідженому діапазоні армування їхніх поверхонь зернами алмазу змінювалась від 0,29 до 2,1 мм, що перевищує розміри фрагментів зносу зв'язки елементів із КАМ до 8 разів. Збільшення відстані W_i між зернами алмазу в наведеному діапазоні приводить також до збільшення масового вмісту частинок зв'язки в шламі до 10 разів. Експериментальні значення інтенсивності зношування функціональних елементів із КАМ з різними ступенями армування робочих поверхонь наведено в табл. 1 і на рис. 6.

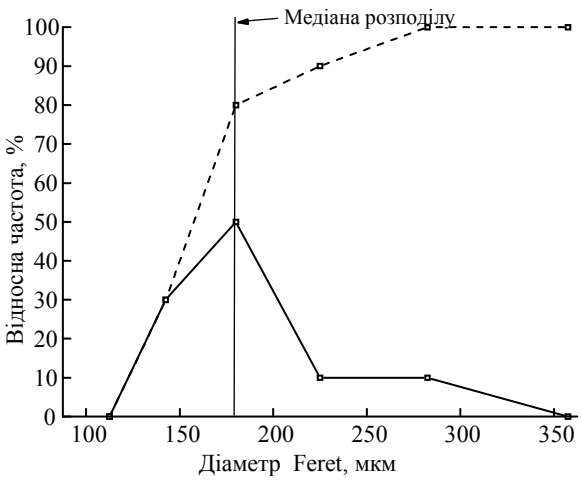


Рис. 5. Розподіл максимальних (—) та мінімальних (– – –) діаметрів Feret [12] частинок фрагментів зв'язки елемента КАМ (АС300 500/400; 50 % (ум.)) в шламі.

На рис. 6 видно, що відносна інтенсивність зношування ω/ω_0 елементів із КАМ (інтенсивність зношування подається спеціально у безрозмірному вигляді відносно інтенсивності зношування ω_0 зв'язки із КАМ, щоб шукана функція ω/ω_0 та змінна $<s>_{алм}/S_{вст}$ були безрозмірними) залежить від розміру зерен алмазу і знаходиться в обернено пропорційній залежності від ступеня армування робочої поверхні елементів, тобто, якщо зменшення розмірів зерен алмазу приводить до зменшення інтенсивності зношування елемента із КАМ (див. табл. 1), то зменшення ступеня армування робочої поверхні елемента – навпаки до її збільшення (див. рис. 6). Слід також зазначити, що зменшення ступеня армування поверхні робочого елемента $<s>_{алм}/S_{вст}$ призводить до підвищення інтенсивності його зношування, яке проявляється, як у збільшенні масового вмісту в шламі фрагментів зв'язки, так і їхніх розмірів (див. рис. 6, табл. 1).

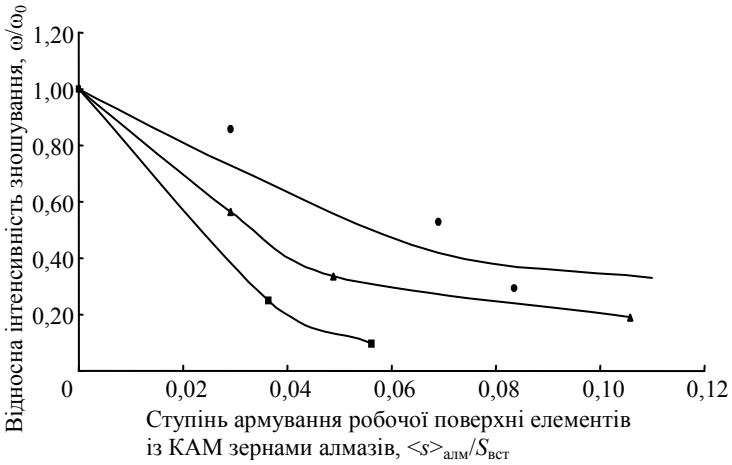


Рис. 6. Вплив ступеня армування робочих поверхонь елементів із КАМ зернами алмазу (630/500 (●), 500/400 (▲), 400/315 (■)) на відносну інтенсивність їхнього зношування ω/ω_0.

Отримані результати показали, що найбільшу інтенсивність зношування функціональних елементів із КАМ спостерігали у разі армування елементів зернами алмазу більшого розміру, що знаходиться у протиріччі з прийнятою практикою використання в бурових інструментах функціональних елементів, оснащених крупними зернами алмазу.

Крім розподілів розмірів частинок шламу, визначали також і форму їхньої проекції з використанням пошуково-аналогового методу [19] частинок шламу, що дозволило отримати уявлення про вірогідні механізми руйнування матеріалів складових пари тертя елемент із КАМ–керн пісковику. На прикладі морфометричного аналізу форм частинок шламу, який отриманий під час точіння гірської породи інструментом з елементом із КАМ (АС 300, 630/500, 50 %), можна зробити висновок, що в загальному обсязі шламу переважають частинки, які мають форму трапеції та правильного шестикутника, що характерно для крихкого руйнування контактних ділянок інструмента і зразка пісковику (табл. 3).

З врахуванням вище наведеного було розглянуто вірогідний механізм ініціювання мікротріщин та їхнього розповсюдження в поверхневому шарі зв'язки елемента з КАМ під час тертя у присутності вільного абразиву. Під час циклічного контакту між поверхнями елементів пари тертя формуються локальні герцевські нормальні до контактної поверхні тиски з дотичною компонентою, внаслідок дії яких у поверхневому шарі складових пари тертя ініціюються мікротріщини втоми, що поширюються вглиб масивів з утворенням раковин фретінг-корозії [15]. Частинки шламу переміщуються в прошарку між поверхнями елемента з КАМ та керну гірської породи і в результаті циклічної дії герцевського нормального до контактної поверхні тиску на контактній поверхні зв'язки елемента з КАМ розповсюджуються мікротріщини втоми. Фрактографічне дослідження поверхонь руйнування зв'язки у функціональних елементах із КАМ було виконано з використанням атомно-силового мікроскопа (АСМ) NT-206V [16–18]. На аксонометричних зображеннях поверхонь руйнування зв'язки (рис. 7) показано почергове ініціювання тріщин втоми та їхнє розповсюдження з кожним наступним відокремленням фрагментів від поверхневого шару зв'язки елемента із КАМ.

Таблиця 3. Розподіл зерен шламу за формою прийнятих можливих базових фігур-аналогів [19] їхніх проекції ($f_k^{(д)}$, % – диференціальний показник формоподібності, $\Delta_k^{(д)}$, % – відносна похибка формозміни) та однорідність за диференціальною формоподібністю проекції зерен для зразка КАМ (АС 300, 630/500, 50 %)

Назва базової фігури-аналога	< 500 мкм		> 200 мкм	
	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$	$f_k^{(д)}$	$\Delta_k^{(д)}$
Овалоподібні фігури (коло, еліпс)	0,00	22,42	0,00	40,28
Прямокутник	12,92	11,94	0,43	27,07
Ромб	0,59	61,84	0,43	49,91
Трапеція	32,65	42,67	1,29	72,90
Квадрат	2,14	82,51	38,20	22,51
Правильний п’ятикутник	0,00	85,76	0,00	85,80
Правильний шестикутник	43,49	10,52	55,36	15,44
Правильний восьмикутник	0,05	18,95	0,00	27,26
Трикутник	5,23	37,10	1,29	21,90
Паралелограм	2,94	43,37	3,00	67,91
Однорідність за диференціальною формоподібністю проекції зерен, %	33,44		45,18	

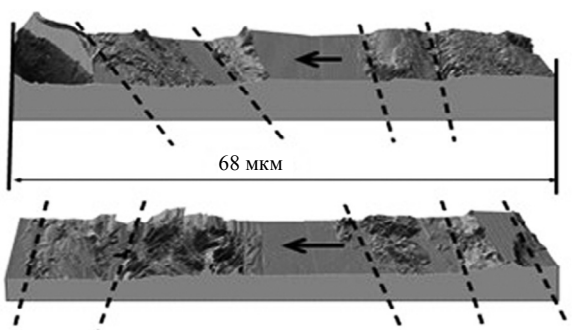


Рис. 7. Аксонометричні проекції ділянок фрагменту зв’язки (стрілкою показано напрямок поширення тріщини втоми з наступним відривом фрагменту зв’язки).

ВИСНОВКИ

Експериментально визначено залежність впливу ступеня армування робочої поверхні функціональних елементів із КАМ (на металевій зв’язці на основі Ni–Sn) зернами алмазу на інтенсивність їхнього зношування, яка змінювалась від 34,6 до 301,5 мг/км. Значення медіан розподілів розмірів частинок зруйнованої гірської породи під час точіння пісковику Торезського родовища змінюється в діапазоні 225–357 мкм.

З використанням методу колориметрії з загальної маси шламу виділено продукти зносу металевої зв’язки елементів із КАМ, завдяки чому визначено медіани розподілів їхніх розмірів, які змінювалися від 116 до 245 мкм.

Вміст частинок металевої зв’язки в шламі для досліджених ступенів армування робочих поверхонь елементів із КАМ змінюється в діапазоні від 0,120 до 0,741 % (за масою).

A. L. Maystrenko[1], M. O. Bondarenko[2], V. S. Antonyuk[3],
G. A. Petasyuk[1], O. P. Vinogradova[1] , O. S. Vasylchuk[1],
A. P. Zakora[1], O. I. Zakutevsky[4], N. O. Oleinyk[1]
[1]Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[3]National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
[4]Institute of Sorption and Problems of Endoecology,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Intensity of wear of functional elements made of diamond-containing composite materials during the operation of tools in the process of rock destruction

The process of wear of functional elements of rock-destructive tools with composite diamond-containing materials (DCM) on a metal bond, sintered by resistive electro-sintering under pressure, during turning of sandstone of the Torez deposit was studied. A characteristic of the "degree of reinforcement" of the working surface of the functional elements of DCM is proposed, which is determined from the ratio of the total area of the diamond cutting grains to the area of the working surface of the functional element. The dependence of the intensity of wear of the functional elements of the DCM on the degree of diamond reinforcement of their working surfaces is plotted. During the tests, rock destruction products and fragments of wear (sludge) of functional elements of DCM were collected, which were analyzed using digital image processing tools, as a result of which morphometric characteristics of the sludge were obtained depending on the degree of reinforcement of the working surfaces of DCM elements with grains diamond. Using the colorimetry method, fragments of the DCM metal bond were isolated from the total mass of sludge and their size distribution was determined. The results of the morphometric analysis of the wear products of the diamond-containing composite tool and rock destruction are presented.

***Keywords**: diamond-containing composite material, rock, metal bond wear product, rock-destructive element, degree of reinforcement, slurry, wear intensity.*

1. Синтетические сверхтвердые материалы / под редакцией Н.В. Новикова. В трех томах. Киев: Наук. думка, 1986.
2. Галицкий В.Н., Курищук А.В., Муровский В.А. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали. Киев: Наук. думка, 1986. 144 с.
3. Hou Ming, Guo Shenghui, Yang Li, Gao Jiyun, Peng Jinhui, Hu Tu, Wang Liang, Ye Xiaolei. Fabrication of Fe–Cu matrix diamond composite by microwave hot pressing sintering. *Powder Technol.* 2018. Vol. 338, no. 4. P. 36–43.
4. Shmegera R.S., Kushch V.I., Maistrenko A.L. Metal binder based on nickel for an intensive electrosintering of diamond-containing composites. *J. Superhard Mater*. 2014. Vol. 36, no. 6. P. 393–400.
5. Ratov B.T., Mechnik V.A., Bondarenko N.A., Kolodnitskyi V.M., Gevorkyan E.S. Physical and mechanical properties of composite diamond-containing materials based on Fe–Cu–Ni–Sn–VN matrices sintered by vacuum hot pressing. *J. Superhard Mater*. 2022. Vol. 44, no. 2. P. 79–90.
6. Цыпин Н.В. Износостойкость композиционных алмазсодержащих материалов для бурового інструмента. Киев: Наук. думка. 1993. 191 с.
7. Boland J.N., Li X.S. Microstructural characterisation and wear behaviour of diamond composite materials. *Materials (Basel)*. 2010. Vol. 3, no. 2. P. 1390–1419.
8. Майстренко А.Л. Формирование структуры композиционных алмазсодержащих материалов в технологических процессах. Киев: Наук думка, 2014. 328 с.
9. Vasylchuk A.S., Maystrenko A.L., Petasyuk G.A., Vynohradova E.P., Ilnitska G.D., Oleinyk N.A., Zakutevsky O.I., Zakora A.P., Manohin A.S. Wear of diamond composite materials during rock destruction. *J. Friction Wear.* 2021. Vol. 42, no. 6. P. 454–460.

10. Oleinyk N., Maystrenko A., Petasyuk G., Ilnytska H., Vynohradova O., Zakora A., Vasylchuk O., Zakutevskyi O., Bazaliy G., Kovtun M. Influence of the reinforcing component of experimental inserts made of a composite diamond containing material on the characteristics of the products of destruction of rocks. *HighMatTech-2021 5–7 October 2021*. Kyiv: Ukraine Book of Abstracts, 2021. P. 19.
11. Виноградова О.П., Майстренко А.Л., Шмегера Р.С., Манохін А.С., Ільницька Г.Д., Олійник Н.О., Петасюк Г.А., Ткач В.М., Васильчук О.С., Бологова Л.М. Аналіз продуктів зношування композиційного алмазовмісного матеріалу. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2019. Вып. 22. С. 93–102.
12. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. https://vdiamant.de/ languages/diainspect-osm.html
13. Петасюк Г.А. Діагностика морфометричних характеристик порошків надтвердих матеріалів засобами цифрової обробки зображень. *Відбір і обробка інформації*. 2009. Вип. 30 (106). С. 138–145.
14. Sandell E.B. Colorimetric Determination of Traces of Metals. 3rd ed. New York: Interscience Publishers, Inc., 1959.
15. Дацишін О.П., Панасюк В.В. Контактна довговічність і руйнування елементів конструкцій за циклічного навантаження. Київ: Наук. думка. 2018. 287 с.
16. Antonyuk V.S., Bilokin' S.O., Bondarenko M.O., Bondarenko Y.Y., Kovalenko Y.I. Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation. *J. Superhard Mater.* 2015. Vol. 37, no. 2. P. 112–119.
17. Antonyuk V.S., Bondarenko M.O., Bondarenko Yu.Yu. Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 4. P. 248–255.
18. Antonyuk V.S., Bondarenko Y.Y., Bilokin' S.O., Andrienko V.O., Bondarenko M.O. Research of microhardness of thin ceramic coatings formed by combined electron-beam method on dielectric materials. *J. Nano Electron. Phys*. 2019. Vol. 11, art. 06024.
19. 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.

Надійшла до редакції 26.10.22
Після доопрацювання 22.01.23
Прийнята до опублікування 28.01.23