

УДК 622.24.05: 621.921.34-419

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОНИ ЗАГЛИБЛЕННЯ ІНДЕНТОРА В ЧАСТИНЦІ ЗНОШУВАННЯ МАТРИЦІ АЛМАЗОВІСНОГО ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТА

О. П. ВІНОГРАДОВА¹, О. С. ВАСИЛЬЧУК¹, А. Л. МАЙСТРЕНКО¹,
А. П. ЗАКОРА¹, В. М. ТКАЧ¹, В. В. ВАПНІЧНА², Г. Д. ІЛЬНИЦЬКА¹,
Н. О. ОЛІЙНИК¹, В. В. БІЛОРУСЕЦЬ¹, О. П. ЛЮДВІЧЕНКО¹,
Л. М. БОЛОГОВА¹

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

² НТУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Розглянуто зону взаємодії гірської породи з поверхнею матричного матеріалу Ni (94%)–Sn (6%) породоруйнівного інструмента, оснащеного алмазами зі зернистістю 500/400 і відносною концентрацією 100%, у частинці зношування матричного матеріалу. У зоні заглиблення індентора у цій частинці виявлено систему мікротріщин, яка бере початок у місці безпосереднього контакту індентора з поверхнею матриці та розгалужується у напрямку його заглиблення у поверхню матриці. Встановлено, що матеріал матриці зношується крихко, а одним із способів мікроіндентування поверхні крихкої алмазовмісної матриці за динамічного навантаження є “мікроудари” об її поверхню елементів шорсткості гірської породи, з подальшим відшаруванням дискретних частинок, проєкція яких подібна до “ластівчиного хвоста”.

Ключові слова: частинка крихкого зношування, шлам, алмазовмісна матриця, породоруйнівний інструмент, зона заглиблення індентора.

The zone of interaction of the rock roughness element with the surface of the matrix material Ni (94%)–Sn (6%) of the rock-cutting element, equipped with diamonds of grain size 500/400 and their relative concentration of 100%, in the wear particle of the matrix material is considered. In the zone of indenter penetration in the wear particle a system of microcracks originating at the place of direct contact of the indenter with the surface of the matrix and branching in the direction of indenter penetration into the matrix surface was found. The material of the matrix wears out brittle and one of the methods of microindentation of the surface of a brittle diamond-containing matrix under dynamic loading is “micro-impacts” of the rock roughness elements to its surface with the subsequent delamination of discrete particles, the projection of which is similar to the projection of “swallow tail”.

Keywords: brittle wear particle, slurry, diamond-containing matrix, rock-cutting tool, zone of indenter introduction.

Вступ. Прогнозування утворення мікротріщин з позицій механіки руйнування є актуальним завданням. Першочерговими у відповідних дослідженнях є засади теорії дислокацій [1, 2]. Достатня кількість загальмованих дислокаційних площин призводить до утворення мікротріщин, які руйнують матеріали. Зношування, руйнування та відділення матеріалу з поверхні твердого тіла кількісно характеризуються швидкістю зношування – відношенням зносу до інтервалу часу, впродовж якого він виник, інтенсивністю зношування – відношенням зносу до пройденого шляху, на якому відбувся процес або виконалась робота [3]. Від спів-

відношення швидкості зношування алмазів та матриці інструмента залежать його експлуатаційні характеристики: інтенсивне зношування матриці призводить до збільшення висоти алмазів над нею, зниження міцності їх зчеплення та викришування [4]. Від вивчення механізму пошкодження матриці залежить ресурсозбереження, що є надзвичайно важливим.

Стан проблеми. Дослідивши абразивне зношування матеріалів, які характеризуються високою зносостійкістю, зробили висновок [5], що зношування інструментальних матеріалів за контакту з абразивними середовищами в гібридних парах тертя має одну загальну рису. Заглиблені в матеріал абразивні частинки створюють у поверхневому шарі пошкодження, ідентичні до тих, які виникають під час скрайбування. Подряпини на поверхні крихкого зразка, нанесені за різних навантажень індентором, мають вигляд борозенок, складених з лунок серцевидної, трикутноподібної форми.

Плавлений кварц вважають [6] типовим крихким матеріалом, який утворює поверхневі і підповерхневі тріщини під час шліфування або різання [7–9], припускають, що за дуже малої глибини різання у крихких матеріалах утворюватиметься пластична стружка [10, 11]. Для визначення механізму вилучення матеріалу з плавленого кварцу [6] експериментували з нанодряпанням: на зразок впливали трибоіндентором, наноіндентором та алмазним індентором Берковича. Спочатку зразок змінюється в пластичній області, потім, коли глибина дряпання перевищує критичну, на поверхні з'являються мікротріщини, а з подальшим її збільшенням з'являються бокові тріщини, злами та відколи, відбувається крихкий злам частинки матеріалу. Проте у праці [6] не акцентують увагу на характерну трикутно-подібну форму частинки руйнування матеріалу.

Для дослідження механізму зношування крихких матеріалів відокремили у відібраній методом магнетної сепарації пробі шламу (продуктів руйнування), яка отримана після точіння блоку гірської породи алмазним породоруйнівним інструментом за виробничого режиму експлуатації, дискретну частинку зношування алмазовмісної матриці на основі Ni (94%)–Sn (6%), хімічний склад якої відповідає складу матричного матеріалу інструмента [12–14] зі зоною заглиблення індентора, боковими частинами та кінцевою зоною. Під час динамічного навантаження інденторів на поверхню зношування дискретні частинки після відколювання залишають мікролунки, які утворюють низку мікроборозенок на ній. Отже, відколота від поверхні матриці інструмента дискретна частинка свідчить про втрату маси інструмента.

Мета роботи – дослідити зону заглиблення індентора у відколотій від робочої поверхні алмазовмісного елемента частинці матричного матеріалу із NiSn після його відпрацювання на гірській породі та порівняти її з відповідною зоною заглиблення індентора у частинці руйнування скла алмазною голкою під час дряпання.

Методика досліджень. Для відбору шламу (після відпрацювання пісковиком Торезького родовища, VIII–IX категорії буримості) з продуктами зношування матричного матеріалу циліндричного породоруйнівного інструмента $\varnothing 10$ mm (спікали його згідно з працею [15], який оснащений алмазами AC 300 зі зернистістю 500/400 і відносною концентрацією 100% в металевій матриці на основі Ni (94%)–Sn (6%)), використали стенд на базі токарно-гвинторізного верстата ДП-200 [16]. В результаті взаємодії інструмента з керном пісковика зі швидкістю подачі 0,148 mm/rot з частотою обертання 355 min^{-1} та охолоджувальної рідини 5 l/min, за радіального навантаження 300 N (визначали 3D динамометром УДМ-600) шлам у вигляді суспензії відбирали у відповідні шламоприймачі [16], сушили, піддавали магнетній сепарації та досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа ZEISS EVO 50 XVP (SEM), оснащеного енерге-

тично-дисперсійним рентгенівським аналізатором Oxford Instruments' Ultim Max 100. Вивчали зону заглиблення індентора у визначеній за хімічним складом частинці зношування матричної складової. Для моделювання взаємодії індентора з матрицею алмазного інструмента та порівняння одержаних результатів з отриманими стандартизованими методами скретч-випробувань дослідили зону заглиблення індентора в частинці руйнування скла (ДСТУ Б В.2.7-122-2003) внаслідок дряпання за різних осьових (10; 20 і 30 N) навантажень його поверхні до відколювання кромки (Scratch + Edge Fracture метод) відповідно до методики [17, 18] з використанням обладнання для дряпання алмазною голкою Ø 8 mm зернистості 800/630 (ГОСТ 17564-85).

Результати досліджень. Встановлено, що хімічний склад частинок зношування матриці досліджуваного елемента та матеріалу матриці з NiSn збігаються. Як бачимо (див. таблицю), у спектрах № 14, 16, 18 однієї з частинок (рис. 1а) переважає нікель, кількість стануму максимально наближена до вмісту в матриці (6%) у спектрах № 14 та 16 (4,59 та 4,11%, відповідно). Навпаки, у спектрах № 13, 15, 17 переважає вміст кремнію та кисню, що відповідає частинкам шламу – складовій пісковика (діоксиду кремнію SiO₂). Кількість вуглецю у локальному хімічному аналізі пояснюємо так. Оскільки за електроспикання зразків присутня підкладка (лускуватий графіт) як присипка для запобігання припаювання пуансонів до зразка, можливо, що деяка кількість залишається на його поверхні, хоча перед випробуваннями знімається верхній шар для розкриття ріжучих алмазів.

Хімічний склад шламу (mass%), отриманого після відпрацювання алмазовмісного породоруйнівного інструмента з матрицею на основі системи Ni (94%)–Sn (6%), згідно з результатами спектрального аналізу

Елемент	Спектр					
	13	14	15	16	17	18
C	18,07	12,33	18,37	14,18	19,60	13,65
O	48,44	4,84	25,69	6,63	37,08	9,26
Na	–	–	–	–	5,70	–
Al	1,96	0,91	1,09	1,18	5,17	0,89
Si	31,53	2,60	7,70	–	13,73	2,96
P	–	–	–	1,25	–	–
Ca	–	–	–	1,51	–	0,68
Mn	–	–	0,86	–	–	–
Fe	–	–	46,30	–	–	–
Ni	–	74,74	–	71,14	17,91	69,39
Sn	–	4,59	–	4,11	0,81	3,18
Всього	100	100	100	100	100	100

Зона заглиблення індентора 1, бокові 2 та кінцева ділянки 3 частинок матричного матеріалу відповідають як формі частинки зношування алмазного інструмента за аналогічних умов відпрацювання [12], так і формі частинки руйнування гірської породи [14]. Крім того, в зоні заглиблення індентора в частинці зношування матричного матеріалу виявлено систему мікротріщин, яка починається у місці безпосередньої взаємодії індентора з поверхнею матриці та поширюється вглиб частинки (рис. 1). Частинка зношування дає змогу визначити за

діаметром зони заглиблення індентора 1 діаметр елемента шорсткості гірської породи ($\sim 57,14 \mu\text{m}$). Саме мікроудар індентора об поверхню матриці спричиняє утворення мікротріщин у зоні його заглиблення, що підтверджує гіпотезу [19] про пошкодження матриці алмазовмісного інструмента елементами шорсткості гірської породи.

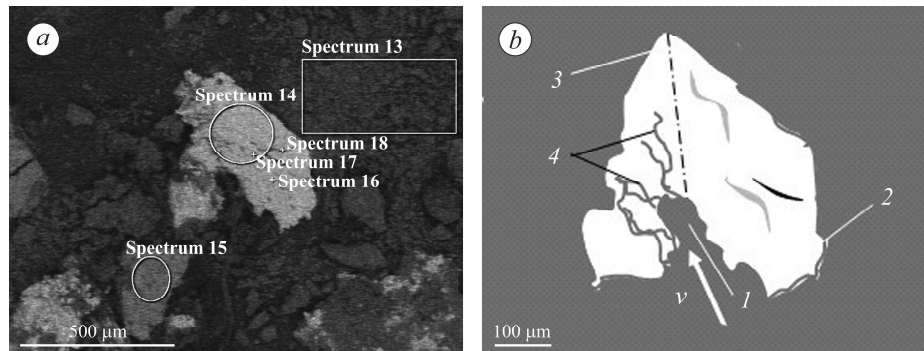


Рис. 1. СЕМ зображення частинки зношування матриці з NiSn на тлі частинок шламу після відпрацювання алмазовмісного інструмента на блоці гірської породи (а) та схематичне (b): 1 – зона заглиблення індентора; 2, 3 – бічна та кінцева частини; 4 – система тріщин у зоні заглиблення індентора; v – вектор швидкості заглиблення індентора.

Fig. 1. The SEM image of a wear particle of a NiSn matrix on the background of sludge particles after working out a diamond-containing element by block of the rock (a) and its schematic image (b): 1 – indenter penetration zone; 2, 3 – side and end parts; 4 – system of cracks in the indenter penetration zone; v – indenter penetration speed vector.

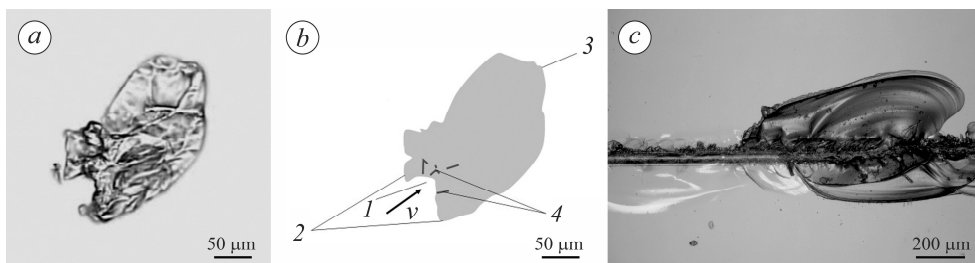


Рис. 2. Частинка скла, яка відкололась в результаті дряпання (осьове навантаження 20 N) поверхні алмазною голкою (а); її схематичне зображення (1 – зона заглиблення індентора; 2, 3 – бокові та кінцева частини; 4 – система тріщин у зоні заглиблення індентора; v – вектор швидкості заглиблення індентора) (b) та поверхня скла з борозенкою, утвореною дряпанням алмазною голкою за осьового навантаження 30 N (c).

Fig. 2. A particle of glass which broke off as a result of scratching (axial loading 20 N) on its surface with a diamond needle equipped with a diamond grain of 800/630 (a); its schematic image (1 – zone of indenter penetration; 2, 3 – side and end parts; 4 – system of cracks in the zone of indenter penetration; v – velocity vector of indenter penetration) (b) and a glass surface with a groove formed by scratching with a diamond needle under axial load 30 N (c).

Дослідження зони заглиблення індентора в частинці руйнування скла алмазною голкою, згідно з описаною методикою, показали, що в результаті дряпання його поверхні є всі ознаки геометричної подібності з частинкою матричного матеріалу (рис. 2а, b). Основною подібністю, яка є домінантною у цьому досліджен-

ні, є наявність системи розгалужених углиб частинки тріщин у зоні заглиблення індентора, утворених алмазною голкою. Отже, згідно з теорією подібності [20], геометричний критерій відповідає фізичному: ідентичність геометричних параметрів частинок руйнування або зношування матеріалів, які дряпають індентором, та системи мікротріщин у зоні заглиблення індентора в дискретно відколотих частинках відповідної конфігурації, що свідчить про подібність механізмів їх відколювання, а ідентичність геометричних параметрів борозенок, утворених лунками подібної форми на поверхні таких матеріалів (рис. 2с) – про подібність механізму руйнування незалежно від їх хімічного складу та індентора.

ВИСНОВКИ

У частинці матричного матеріалу, вилученій зі шламу після відпрацювання алмазовмісного інструмента на абразивному пісковикі, за допомогою мікроскопа виявлено систему мікротріщин, яка бере початок у місці безпосереднього контакту індентора з боку гірської породи з поверхнею матриці та розгалужується у напрямку заглиблення індентора у поверхню матриці. Частинки руйнування скла за динамічного навантаження на алмазну голку (дряпання) мають всі ознаки конфігурації частинок зношування матриці із NiSn в алмазному породоруйнівному інструменті. У них виявлено систему мікротріщин, яка починається у місці безпосереднього контакту алмазної голки з поверхнею скла за дряпання та розгалужується у напрямку заглиблення індентора і є ідентичною до системи тріщин у зоні заглиблення індентора в частинці зношування матричного матеріалу. Встановлено, що матеріал матриці алмазного інструмента зношується крихко, а одним із способів мікроіндентування її поверхні за динамічного навантаження є мікроудари об її поверхню елементів шорсткості гірської породи з подальшим відшаруванням дискретних частинок, проєкція яких подібна до “ластівчиного хвоста”.

1. Griffiths A. A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. A. – 1921. – 221, № 2. – P. 163–198.
2. Stashchuk M. H. Microcrack on the continuation of the dislocation core // Materials Science. – 2022. – 58, № 2. – P. 245–254.
3. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. Трибология процесса шлифования и вопросы совершенствования алмазного инструмента // Синтетические алмазы. – 1974. – № 6. – С. 40–42.
4. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходаровский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Харьков: Выща шк., 1978. – 232 с.
5. Майстренко А. Л., Дуб С. Н. Прогнозирование износостойкости хрупких материалов по твердости и износостойкости // Заводская лаборатория. – 1991. – № 2. – С. 52–54.
6. An analysis of the effect of abrasive/tool wear on the ductile machining of fused silica from the perspective of stress / Ming Li, Xiaoguang Guo, Song Yuan, Bingyao Zhao, Yongnian Qi, Shuohua Zhang, Dongming Guo and Ping Zhou // Micromachines. – 2022. – 13, № 6. – Article number 820.
7. Crack-free ductile mode grinding of fused silica under controllable dry grinding conditions / W. Wang, P. Yao, J. Wang, C. Z. Huang, B. Zou, H. L. Liu, and J. W. Yan // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 2016. – № 109. – P. 126–136.
8. Wang J., Jia Z. X., and Guo Y. B. Shape-cutting of quartz glass by spark discharge-assisted diamond wire sawing // J. Manuf. Processes. – 2018. – № 34. – P. 131–139.
9. An Q. L., Ming W. W., and Chen M. Experimental Investigation on cutting characteristics in nanometric plunge-cutting of BK7 and fused silica glasses // Materials. – 2015. – № 8. – P. 1428–1441.
10. Bifano T. Ductile regime grinding of brittle materials: Experimental results and the development of a model // Int. Soc. Opt. Photonics. – 1989. – № 966. – P. 108–115.
11. Formation of subsurface cracks in silicon wafers by grinding / J. F. Yin, B. Qian, Y. N. Li, and B. Zhang // Nanotechnol. Precis. Eng. – 2018. – 1. – P. 172–179.

12. *Аналіз продуктів зношування композиційного алмазовмісного матеріалу* / О. П. Виноградова, А. Л. Майстренко, Р. С. Шмегера, А. С. Манохін, Г. Д. Ільницька, Н. О. Олійник, Г. А. Петасюк, В. М. Ткач, О. С. Васильчук, Л. М. Бологова // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения.* – 2019. – № 22. – С. 93–102.
13. *The analysis of nature of damage of the matrix material used in production of diamond drilling and stone working tools during destruction of a rocks* / О. Р. Vynohradova, О. S. Vasylychuk, А. Р. Zakora, G. А. Petasyuk, and V. V. Garashchenko // *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions.* – Petrosani: Universitas Publ., 2021. – 506 p.
14. *Прикладні аспекти використання геостатичних методів дослідження в гірництві* / Н. В. Зуєвська, Р. В. Соболевський, О. П. Виноградова, О. В. Горобчишин. – К.: Інтерсервіс, 2019. – 152 с.
15. *Wear of diamond composite materials during rock destruction* / А. S. Vasylychuk, А. L. Maystrenko, G. А. Petasyuk, Е. Р. Vynohradova, G. D. Initska, N. А. Oleinyk, О. I. Zakutevsky, А. Р. Zakora, and А. S. Manohin // *J. of Friction and Wear.* – 2021. – **42**, № 6. – Р. 454–460.
16. *Новый ультратвердый поликристаллический композиционный материал* / А. А. Шульженко, Е. Е. Ашкинази, А. Н. Соколов, В. Г. Гаргин, В. Г. Ральченко, В. И. Конов, Л. И. Александрова, Р. К. Богданов, А. П. Закора, В. Н. Ткач, Н. И. Заика, И. И. Власов, И. А. Артюков, Ю. С. Петронюк // *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения.* – 2009. – № 12. – С. 143–153.
17. *Хворостяный В. В. Механическое поведение керамики и стекла при локальных разрушениях кромок образцов индентором Роквелла* // *Пробл. прочности.* – 2014. – № 3. – С. 106–115.
18. *Разрушение стекла при краевом скалывании* / Г. А. Гогоци, В. И. Галенко, С. П. Мудрик, Б. И. Озерский, В. В. Хворостяный, Т. А. Христович // *Пробл. прочности.* – 2007. – № 6. – С. 103–112.
19. *Блинов Г. А. Алмазосберегающая технология бурения.* – Л.: Недра, 1989. – 184 с.
20. *Кирпичев М. В. Теория подобия.* – М.: Изд. АН СССР, 1953. – 96 с.

Одержано 27.04.2023