

О.М. Ісонкін¹, О.С. Осіпов¹, О.О. Матвійчук¹¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД КОМПОЗИТАМИ, СПЕЧЕНИМИ В СИСТЕМІ АЛМАЗ-КАРБОНАТ

A. Isonkin¹, A. Osipov¹, A. Matviichuk¹¹ V. Bakul Institute for Superhard Materials of NAS of Ukraine, Kyiv

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF DESTROYING HARD ROCKS BY COMPOSITES SINTERED IN THE DIAMOND-CARBONATE SYSTEM

Метою даної роботи є обґрунтування можливості використання нового композиту, спеченого в системі "алмаз–карбонат", для оснащення алмазного бурового інструменту, що володіє високою зносостійкістю і ефективністю руйнування гірської породи.

Методика досліджень полягала у встановленні впливу зносостійкості ріжучої кромки пластин надтвердого композиційного алмазовмісного матеріалу на ефективність руйнування гірської породи, яку оцінювали по гранулометричному складу її шламу.

Результати дослідження. В результаті спікання методом просочування алмазного мікропорошку розплавами карбонатів в умовах високого тиску 8,0 ГПа і температури 2100 °С отримано двофазні надтверді композиційні матеріали алмаз–CaMg(CO₃)₂ і алмаз–SrCO₃. Зносостійкість досліджуваних зразків композитів визначали за результатами точіння керн граніту Коростишівського родовища X категорії буримості. Визначення розміру і форми частинок шламу граніту Коростишівського родовища, відібраного при його руйнуванні, проводили методами лазерної дифракції та аналізу цифрових зображень з використанням аналізатора Microtrac Sync. Після аналізу результатів дослідження зносостійкості пластин композитів і характеру зносу їх різальної кромки встановлено взаємозв'язок між ступенем її зносу та енергоємністю руйнування гірської породи, розподілом за розмірами частинок в пробі шламу та їхньою питомою поверхнею. Для пластин композиту алмаз–CaMg(CO₃)₂, що мають більш високу зносостійкість в порівнянні з іншими композитами, характерне підвищення в пробі шламу частки великих частинок та зменшення значення їх питомої поверхні, що свідчить про більш раціональне використання енергії, яка йде більшою мірою на руйнування гірської породи і в меншому ступені на тертя і знос.

Практичне значення. Результати досліджень дозволяють зробити висновок про доцільність оснащення бурового породоруйнівного інструменту пластинами композиту алмаз–CaMg(CO₃)₂ з метою підвищення його зносостійкості і ефективності руйнування гірської породи.

Ключові слова: алмаз, доломіт, карбонат стронцію, високий тиск, руйнування гірської породи, знос, зносостійкість.

Вступ. Буріння геологорозвідувальних свердловин при розвідці родовищ корисних копалин як галузь застосування алмазного породоруйнівного інструменту підвищеної працеспроможності є однією з найбільш затребуваних, але і найбільш складних з точки зору умов його роботи.

Застосування бурового породоруйнівного інструменту ріжучого типу, оснащеного АТП (алмазно-твердосплавними пластинами) дозволило суттєво збільшити швидкість буріння і глибину проходки [1, 2].

Енергія на руйнування гірської породи при алмазному бурінні розподіляється на її об'ємне деформування, непружні деформації, роботу з подолання сил тертя породоруйнівного інструменту о гірську породу, що руйнується, і створення нових поверхонь робочого торця інструменту при його зносі, забою свердловини та частинок шламу, які при цьому утворюються [3, 4].

Механічне руйнування гірської породи як фізичний процес характеризується утворенням частинок шламу, які згідно з принципом П. Кюрі мають два види енергії – об'єма і поверхні, та підкоряються закону, який відображає співвідношення лінійних розмірів з питомими витратами енергії на руйнування. Залежно від розмірів частинок шламу, що утворюються, такі співвідношення характеризуються законами Кірпічєва–Кіка, Рітінгера і ін. [5].

Згідно енергетичним уявленням при всіх видах механічного руйнування твердих тіл, в тому числі гірських порід при бурінні, фізична природа тіла залишається незмінною, а змінюється тільки площа його поверхні в залежності від гранулометричного складу частинок, що утворюються [6].

Результати аналізу процесу руйнування гірської породи алмазним буровим інструментом показують, що щільність енергії, яку його робоча поверхня в одиничних актах руйнування передає в зоні контакту гірській породі, що руйнується, залежить від конструктивних особливостей і технологічних параметрів режиму роботи. При цьому чим сильніше інтенсивність навантаження і вище ступінь подрібнення, тим більше енергоємність руйнування [6, 7].

Отримання композитів на основі алмазу для застосування в буровому породоруйнівному інструменті ріжучого типу останнім часом йшло в напрямку розвитку технології спікання композиційного матеріалу, який являє собою двошаровий компакт – алмазно–твердосплавні пластили (АТП) з алмазовмісним ріжучим шаром на твердосплавній підкладці, який формується в умовах високого тиску і температур [8].

Актуальність роботи. Через порівняно невисоку термостійкість АТП в останні роки активно розвивається науково–технічний напрям термобаричного спікання в системі алмаз–карбонат [9–13]. Підтвердженням перспективності досліджень по отриманню термостійких алмазовмісних компактів в системах на основі алмазу і карбонатів є присутність різних карбонатів в структурі природних алмазів в якості сингенетичних включень зростання, а також про їх алмазоутворюючої ефективності при синтезі алмазу в системах графіт – карбонат в умовах високого тиску і температур [14, 15].

Мета роботи. Вивчення впливу зносу ріжучої кромки пластин композитів, отриманих в системах алмаз – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ і алмаз – SrCO_3 , а також АТП на ефективність руйнування твердих гірських порід.

Матеріали і методи досліджень. В результаті спікання методом просочування алмазного мікропорошку розплавами карбонатів в умовах високого тиску

8,0 ГПа і температури 2100 °С отримано двофазні композиційні матеріали алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ і алмаз– SrCO_3 .

Для проведення досліджень з визначення показників зносостійкості спечених композитів і ефективності руйнування ними гірської породи шляхом шліфування і полірування поверхні вільним алмазним абразивом було виготовлено зразки діаметром $9,52 \pm 0,05$ мм і висотою $3,18 \pm 0,13$ мм (рис. 1).

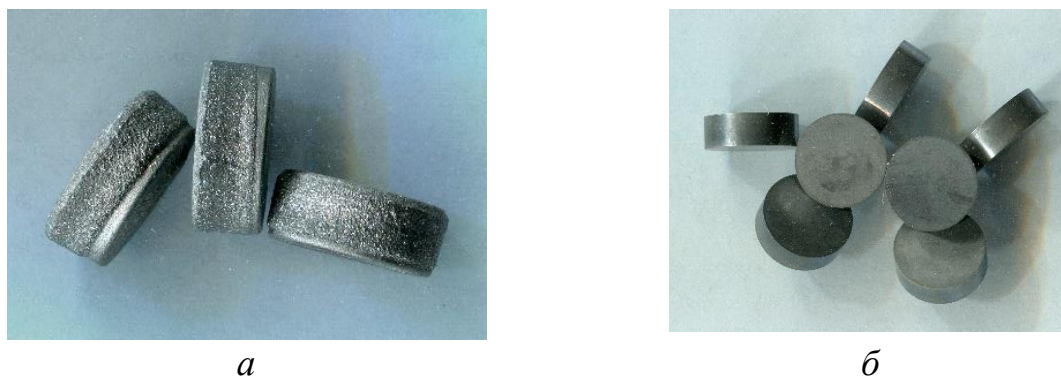


Рис. 1. Зразки композитів після спікання (а) та обробки поверхні (б)

Для порівняння проводили також випробування зразків АТП фірми Dong'e Zuanbao Diamond Corporation, призначених для оснащення бурового інструменту.

Зносостійкість досліджуваних зразків композитів визначали за результатами точіння керна граніту. Умови проведення випробувань для всіх досліджуваних зразків були однакові і відповідали наступних значень: швидкість різання циліндричного керна граніту 75 м/хв при поздовжній подачі 1,25 мм/об. і глибині різання 0,1 мм. Об'єм зруйнованого граніту становив 56 ± 2 см³.

Випробування проводили із застосуванням токарно-гвинторізного верстата моделі 1А616 (рис. 2).

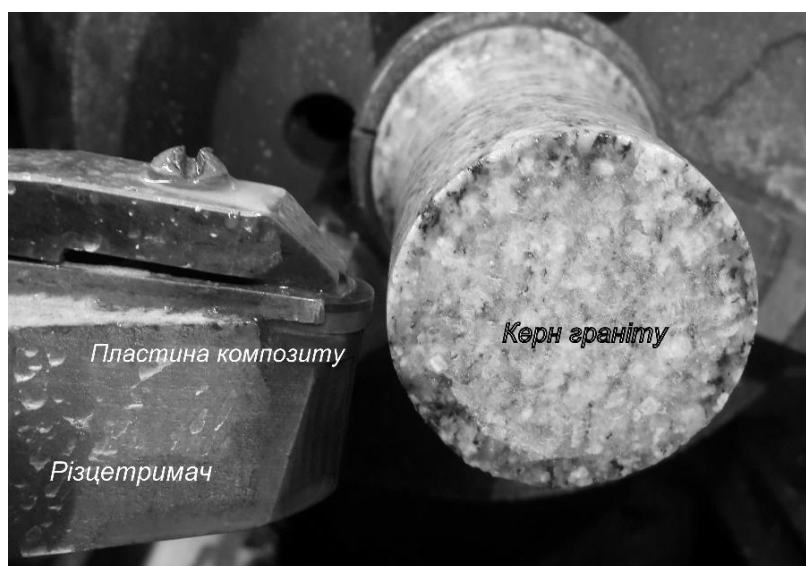


Рис. 2. Схема випробувань пластин композитів із застосуванням токарно-гвинторізного верстата моделі 1А616

Вибір в якості гірської породи граніту Коростишівського родовища X категорії буримості було обумовлено його стабільними властивостями, високою твердістю і середньою абразивністю. Граніт біотитовий порфіровидний характеризується твердістю за штампом РШ = 237 Н/мм²; абразивністю – 43; об'єднаним показником буримості $\rho_m = 34,2-51,2$. Мінералогічний склад: кварц – до 25%, польовий шпат – до 55%, біотит – 20%.

Інтенсивність зношування визначали як відношення лінійного зносу h ріжучої кромки зразків до об'єму зруйнованої ними гірської породи (рис. 3).

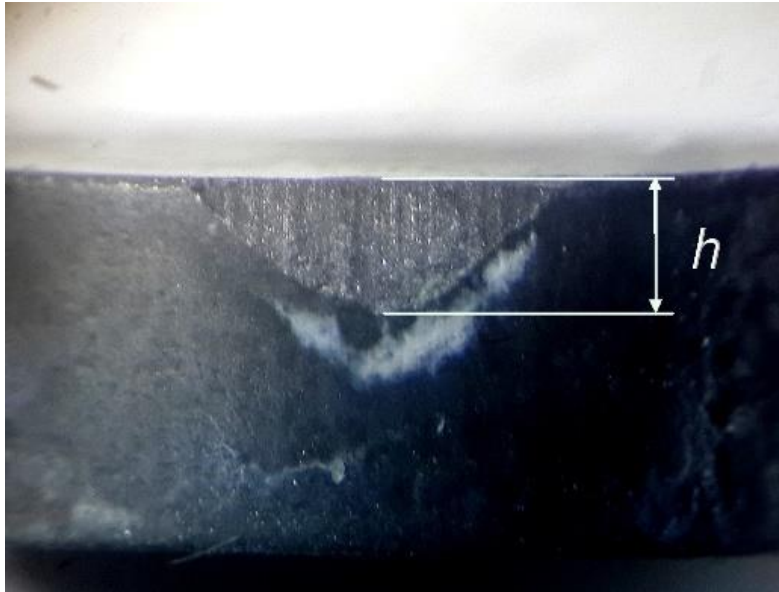


Рис. 3. Схема вимірювання лінійного зносу

Шлам зруйнованого граніту Коростишівського родовища відбирали під час досліджень зносостійкості зразків композиту.

Визначення розміру і форми частинок шламу граніту Коростишівського родовища, відбраного при його руйнуванні, проводили методами лазерної дифракції та аналізу цифрових зображень з використанням аналізатора Microtrac Sync. Розміри частинок шламу відповідно стандартам ISO 13320 (лазерна дифракція) і ISO 13322 (аналіз цифрових зображень) діагностували у діапазоні від 1 до 4000 мкм. Отримані результати у вигляді середньо-числового і об'ємного значення розподілу частинок за розмірами, за вкладом в питому поверхню та інші статистичні дані зберігали в форматі баз даних Microsoft Access з можливістю обробки в сторонніх програмах.

У якості показника, що дозволяє додатково характеризувати гранулометричний склад шламу та ефективно використання енергії, що підводиться до забою свердловини, прийняли питому поверхню його частинок. Визначення питомої поверхні частинок шламу проводили статичним манометричним методом по азоту з використанням приладу Акусорб–2100 фірми "Культренікс" (Франція). Дегазацію зразків шламу здійснювали у вакуумі $10^{-5} \times 1,33$ Па при температурі 200 °С. Об'єм адсорбованого в моношарі азоту V_a (мл / г) розраховували згідно рівняння БЕТ [16, 17].

Результати досліджень. На рис. 4 представлено ділянки ріжучих кромок зразків досліджуваних композитів і АТП після точіння ними керна граніту.

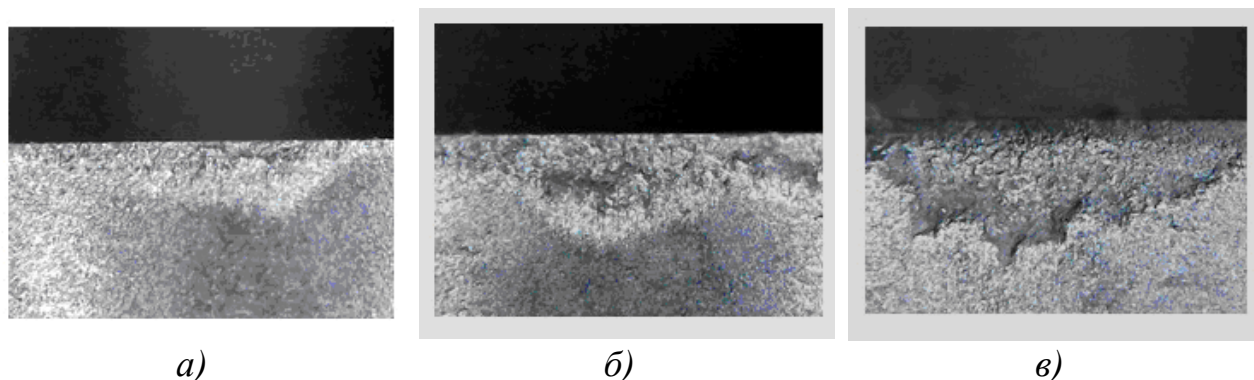


Рис.4. Зображення ділянки зносу ріжучої кромки пластин композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (а), алмаз– SrCO_3 (б) та АТП (в) після точіння граніту

Аналіз зображення ріжучої кромки пластин композитів і АТП після точіння граніту показав, що характер зносу зразків композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, алмаз– SrCO_3 однорідний та рівномірний. У АТП спостерігався нерівномірний знос з наявністю відколів і викришування на площині зносу (рис. 4 в).

За результатами випробувань, наведеними на рис. 5, найбільшу зносостійкість з усіх досліджених зразків мали пластини композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

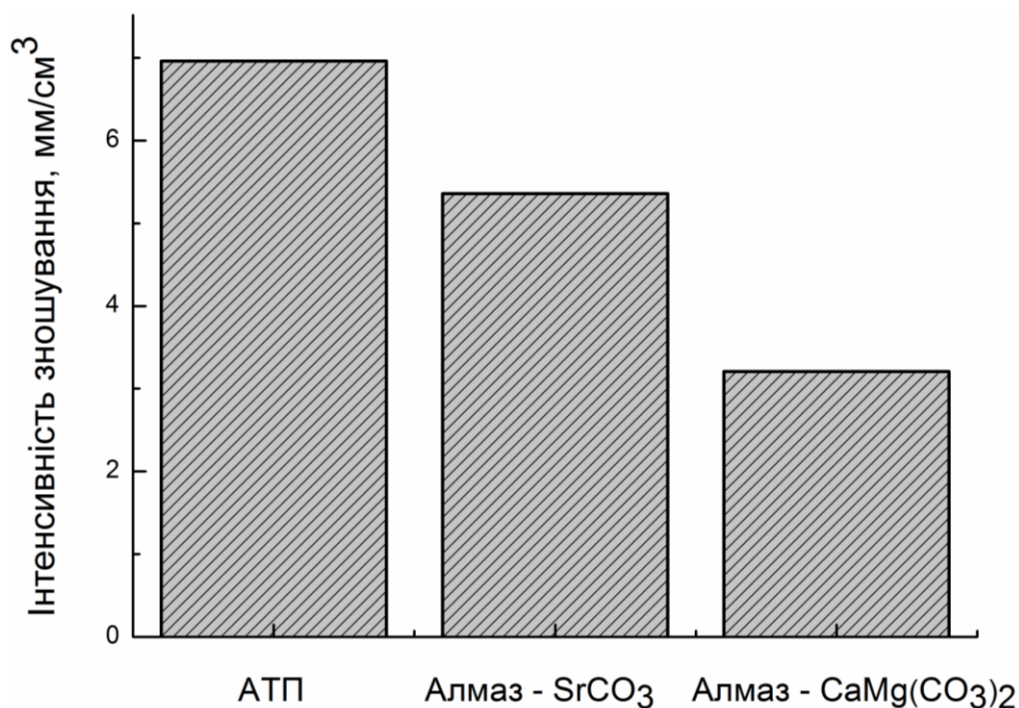


Рис. 5. Інтенсивність зношування зразків композитів після точіння граніту

Характер зносу ріжучої кромки істотно вплинув на ефективність руйнування граніту, що підтверджується результатами аналізу форми частинок і гранулометричного складу його шламу (рис.6 –11).

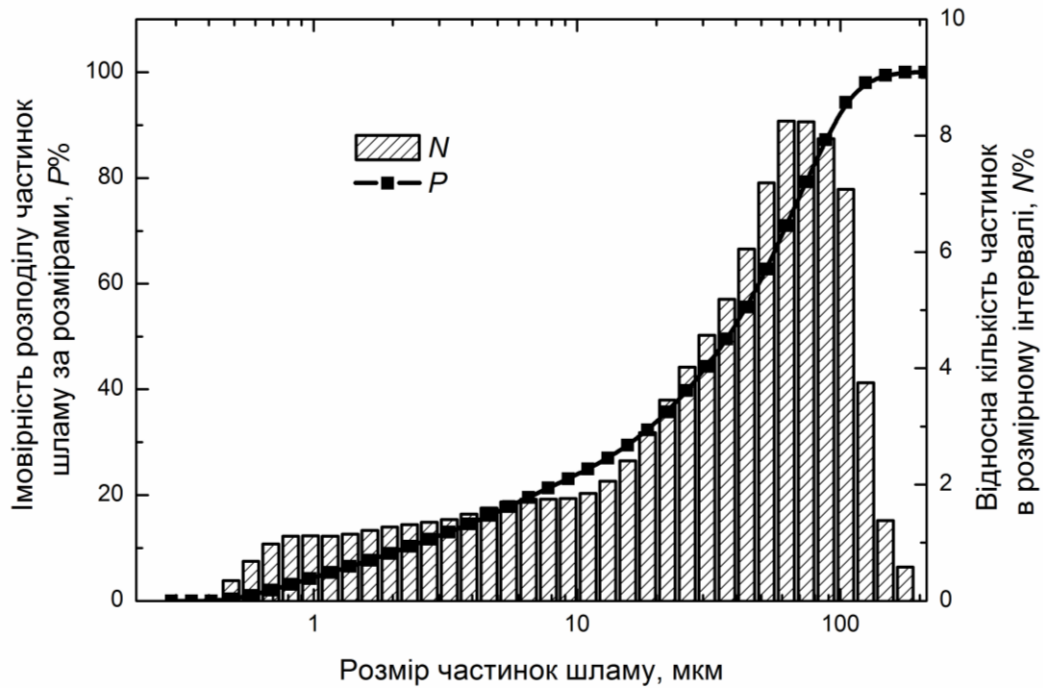


Рис. 6. Розподіл частинок шламу, отриманого при руйнуванні граніту зразком композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

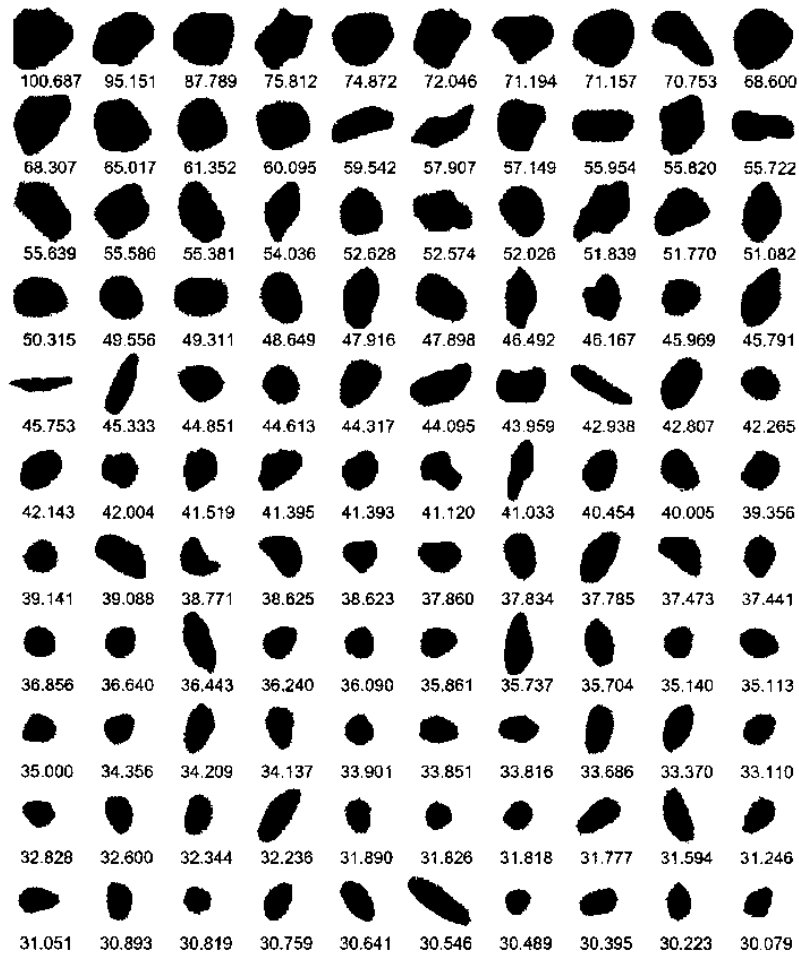


Рис. 7. Форма частинок шламу граніта при його руйнуванні зразком композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

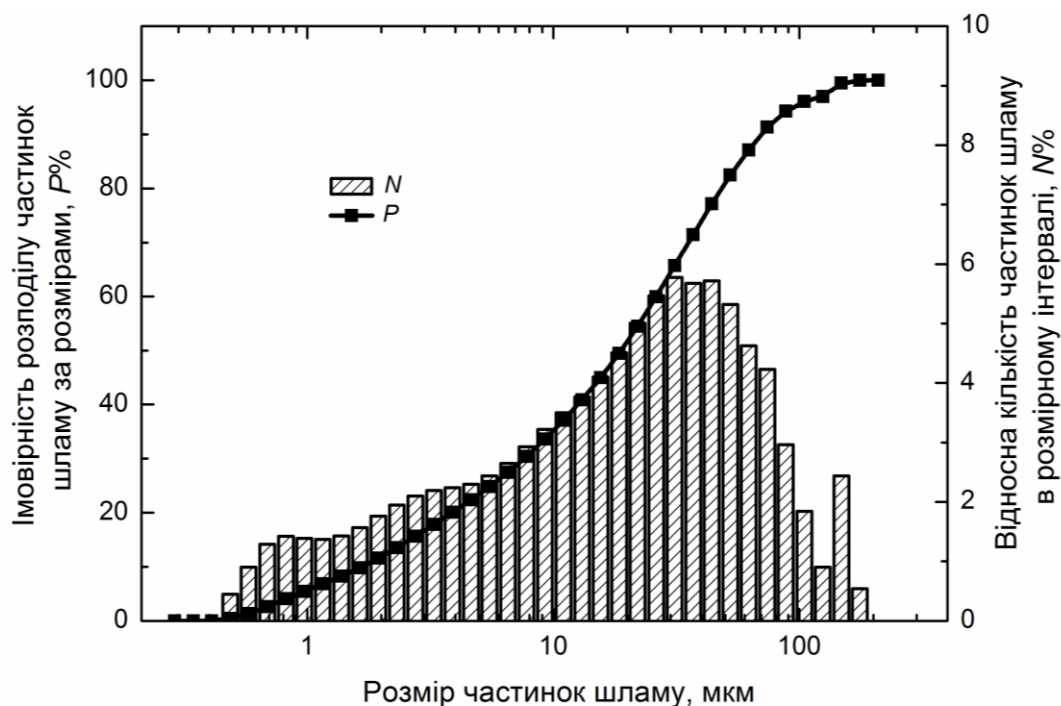


Рис. 8. Розподіл частинок шламу, отриманого при руйнуванні граніту зразком композиту алмаз– SrCO_3

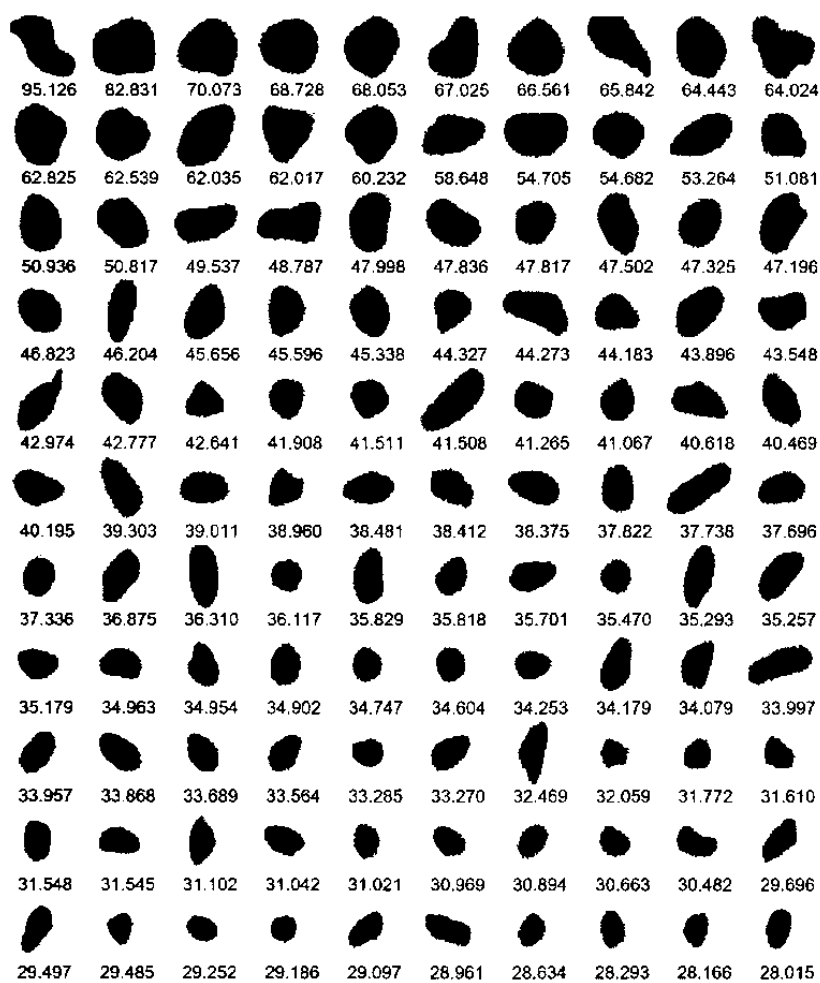


Рис. 9. Форма частинок шламу граніту при його руйнуванні зразком композиту алмаз– SrCO_3

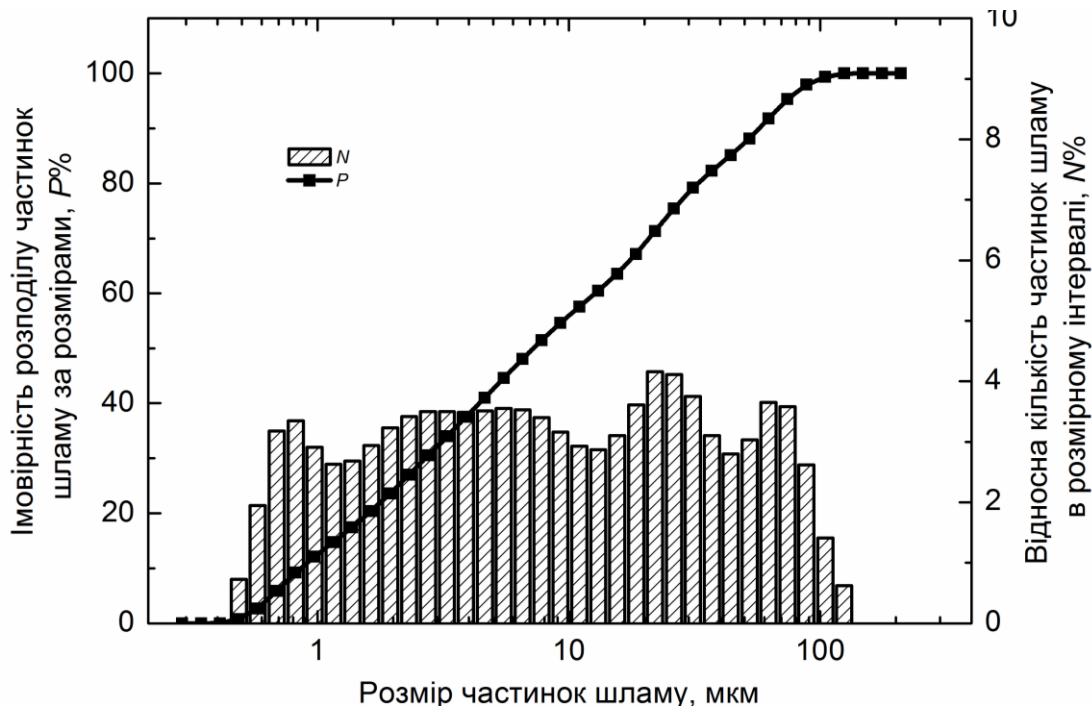


Рис. 10. Розподіл частинок шламу, отриманого при руйнуванні граніту АТП

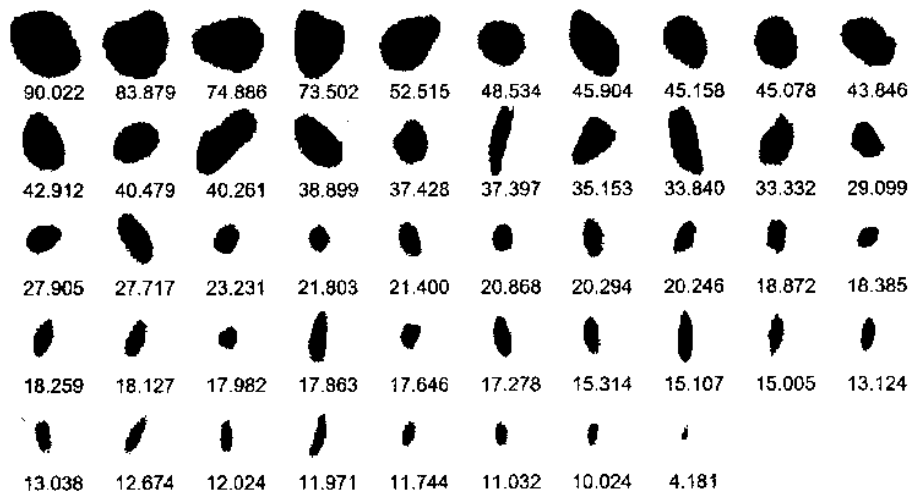


Рис. 11. Форма частинок шламу граніта при його руйнуванні АТП

Для всіх досліджених породоруйнуючих зразків композитів характерно створення частинок неправильної форми з обрисами, що наближаються при деякому допущенні до форми витягнутого еліпсоїда обертання. При цьому для великих частинок в пробі проаналізованого шламу характерно наближення їх до сферичної форми, а для дрібних – до голчастої.

У міру зниження зносостійкості і, як наслідок, погіршення гостроти і форми ріжучої кромки зразків АТП і алмаз– SrCO_3 в отриманих при точенні ними граніту пробах шламу збільшується частка дрібних частинок.

Для зразка композиту алмаз– $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ характерне підвищення в пробі шламу частки великих частинок і, як наслідок, зменшення їх питомої поверхні, що свідчить про більш раціональне використання енергії, яка йде на руйнування

породи (рис. 12).

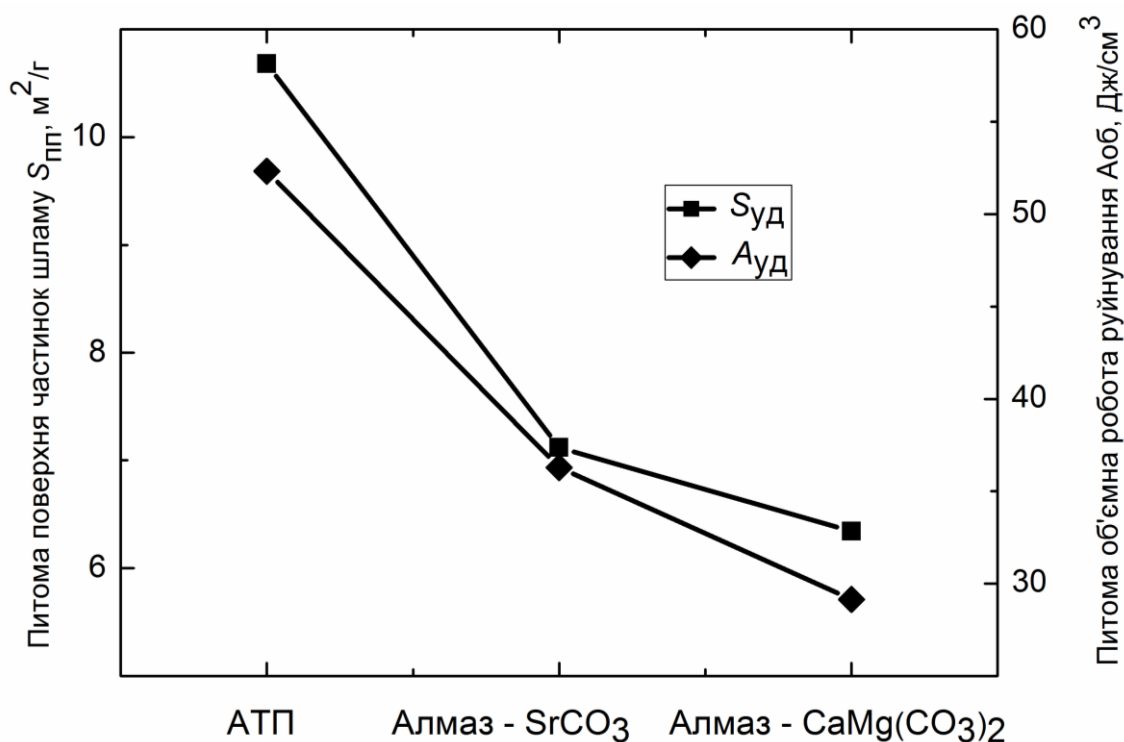


Рис. 12. Зміна питомої поверхні шламу і питомої об'ємної роботи руйнування від складу композиту

Зіставлення ступеня зносу зразків композиту з даними аналізу гранулометричного складу шламу показує, що чим менше ступінь зносу ріжучої кромки породоруйнівного елемента, тим крупніше за розмірами утворюються частинки шламу. При однакових умовах випробувань це свідчить про більш ефективне використання енергії, яка підводиться до забою, та йде більшою мірою на руйнування гірської породи і в меншому ступені на тертя та знос.

Підтвердженням даного припущення є більш висока зносостійкість композиту алмаз–CaMg(CO₃)₂ у порівнянні з АТП та композитом алмаз–SrCO₃.

Висновки. 1. Результатами досліджень зносостійкості пластин з надтвердого композиту алмаз–CaMg(CO₃)₂ у порівнянні з АТП і композитом алмаз–SrCO₃ підтверджено можливість його використання для оснащення породоруйнівного інструменту для підвищення його зносостійкості та ефективності руйнування гірської породи.

2. Збереження гостроти ріжучої кромки пластини надтвердого композиту алмаз–CaMg(CO₃)₂ сприяє підвищенню ефективності руйнування нею гірської породи, що підтверджується утворенням шламу гірської породи, що руйнується, з вмістом частки більш великих його частинок, зниженням їх питомої поверхні та питомої роботи руйнування. Це свідчить про більш ефективне використання енергії, яка підводиться до забою, та йде більшою мірою на руйнування гірської породи і в меншому ступені на тертя та знос.

Перелік посилань

1. Clark, I. E., & Bex, P. A. (1999). The use of PDC for petroleum and mining drilling. *Industrial diamond review*, (1), 43–49.
2. Skott, D. E. (2006). The history and impact of synthetic diamond cutters and diamond enhanced inserts on the oil and gas industry. *Industrial diamond review*, (1), 48–55.
3. Ребиндер, П.А. (1971). *Исследование процессов образования дисперсных структур*. Наука и техника.
4. Ржевский, В.В., & Новик, Г.Я. (1978). *Основы физики горных пород*. Недра.
5. Ходаков, Г.С. (1972). *Физика измельчения*. Наука.
6. Спивак, А.И. (1967). *Механика горных пород*. Недра
7. Присташ, В.В., & Чирков, С.Е. (2000). Энергоемкость разрушения горных пород при различных видах механических воздействий. *Горн. информ.–аналит. бюл. Горная кн.*, (10), 85–87.
8. Kanyanta V., Dormer A., Murphy N., Ivankovic A. (2014). Impact fatigue fracture of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters and the effect of microstructure. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, (46), 145–151.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.06.003>
9. Westraadt, J. E., Sigalas, I., & Neethling, J. H. (2015). Characterisation of thermally degraded polycrystalline diamond. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48, 286–292.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.08.008>
10. Qian, J., McMurray, C. E., Mukhopadhyay, D. K., Wiggins, J. K., Vail, M. A., & Bertagnolli, K. E. (2012). Polycrystalline diamond cutters sintered with magnesium carbonate in cubic anvil press. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31, 71–75.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.09.008>
11. Qian, J., McMurray, E., & Mukhopadhyay, D. (2013). *Polycrystalline diamond compact including a carbonate-catalyzed polycrystalline diamond table and applications therefor* (Pat. 2013/0043078 A1 USA, IC B24D 3/06)
12. Osipov, A. S., Klimczyk, P., Cygan, S., Melniychuk, Y. A., Petrusha, I. A., Jaworska, L., & Bykov, A. I. (2017). Diamond-CaCO₃ and diamond-Li₂CO₃ materials sintered using the HPHT method. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(7), 2553–2558.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.02.028>
13. Bao Y., Garan A., France M.D., Belnap J.D. (2014) Pat. 2014/0130418 A1 USA, IC E21B 10/567. Method of making carbonate PCD and sintering carbonate PCD on carbide substrate.
14. Akaishi, M., Kanda, H., & Yamaoka, S. (1990). Synthesis of diamond from graphite-carbonate system under very high temperature and pressure. *Journal of Crystal Growth*, 104(2), 578–581.
[https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90159-1](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90159-1)
15. Sato, K., Akaishi, M., & Yamaoka, S. (1999). Spontaneous nucleation of diamond in the system MgCO₃–CaCO₃–C at 7.7 GPa. *Diamond and Related Materials*, 8(10), 1900–1905.
[https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(99\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(99)00157-0)
16. Грег, С., & Синг. К. (1970) *Адсорбция, удельная поверхность, пористость*. Мир.
17. *Измерение удельной поверхности порошковых материалов и построение изотермы адсорбции–десорбции на приборе «Акусорб» фирмы «Культреникс»* (1985), ИСМ АН УССР.

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является обоснование возможности использования нового композита, спеченного в системе "алмаз–карбонат", для оснащения алмазного бурового инструмента, обладающего высокой износостойкостью и эффективностью разрушения горной породы.

Методика исследований заключалась в установлении влияния износостойкости режущей кромки вставок сверхтвердого композиционного алмазосодержащего материала на эффективность разрушения горной породы, оцениваемую по гранулометрическому составу ее шлама.

Результаты исследования. В результате спекания методом пропитки алмазного микропорошка расплавами карбонатов в условиях высокого давления 8,0 ГПа и температуры 2100 °С получены двухфазные сверхтвердые композиционные материалы алмаз–CaMg(CO₃)₂ и алмаз–SrCO₃. Износостойкость исследуемых образцов композитов определяли по результатам точения керна гранита Коростышевского месторождения X категории буримости. Определение размера и формы частиц шлама гранита Коростышевского месторождения, отобранного при его разрушении, проводили методами лазерной дифракции и анализа цифровых изображений с использованием анализатора Microtrac Sync. После анализа результатов исследования износостойкости вставок композитов и характера износа их режущей кромки установлена взаимосвязь между степенью ее износа и энергоемкостью разрушения горной породы, распределением по размерам частиц в пробе шлама и их удельной поверхностью. Для пластин композита алмаз–CaMg(CO₃)₂, имеющих более высокую износостойкость по сравнению с другими композитами, характерно повышение в пробе шлама доли крупных частиц и уменьшения значения их удельной поверхности, что свидетельствует о более рациональном использовании энергии, идущей в большей степени на разрушение горной породы и в меньшей степени на трение и износ.

Практическое значение. Результаты исследований позволяют сделать заключение о целесообразности оснащения бурового породоразрушающего инструмента вставками композита алмаз–CaMg(CO₃)₂ с целью повышения его износостойкости и эффективности разрушения горной породы.

Ключевые слова: алмаз, доломит, карбонат стронция, высокое давление, разрушение горной породы, износ, износостойкость.

ABSTRACT

The purpose of this work is to substantiate the possibility of using a new composite sintered in the "diamond-carbonate" system for equipping diamond drilling tools with high wear resistance and efficiency of rock destruction.

The research technique consisted in establishing the influence of the wear resistance of the cutting edge of the samples of a superhard composite diamond-containing material on the efficiency of rock destruction, assessed by the granulometric composition of its sludge.

Research results. The two-phase superhard composite materials diamond – CaMg(CO₃)₂ and diamond – SrCO₃ were obtained as a result of sintering by the method of impregnation of diamond micropowder with carbonate melts under conditions of a high pressure of 8.0 GPa and a temperature of 2100 °C. Wear resistance of the investigated composite samples was determined by based on the results of turning the core of granite from the Korostyshevskoye deposit of the X category of drilling. Determination of the size and shape of particles of granite fragments of the Korostyshevskoye deposit, taken during its destruction was carried out by laser diffraction and digital image analysis using a Microtrac Sync analyzer. The relationship between the degree of its wear of the cutting edge of composite samples and the energy consumption of rock destruction, the size distribution of particles in the cuttings sample and their specific surface was established after analyzing the results of the study of wear resistance and the nature of their wear. Plates of the diamond–CaMg(CO₃)₂ composite, which have a higher wear resistance compared to other composites, are characterized by an increase in the proportion of large particles in the cuttings sample and a decrease in the value of their specific surface,

which indicates a more rational use of energy, which goes to a greater extent for destruction rock and to a lesser extent for friction and wear.

Practical value. The research results allow us to make a conclusion about the advisability of equipping a drilling rock cutting tool with samples of a diamond–CaMg(CO₃)₂ composite in order to increase its wear resistance and the efficiency of rock destruction.

Keywords: *diamond, dolomite, strontium carbonate, high pressure, destruction of rocks, wear, wear resistance.*