

УДК 622.235

Ю.О. БРИТВИН, інженер, О.О. ФРОЛОВ, д-р техн. наук,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРІЩИНУВАТОСТІ ГІРСЬКИХ МАСИВІВ НА РЕЗУЛЬТАТИ РУЙНУВАННЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Висвітлена проблема математичного опису руйнування тріщинуватих скельних гірських порід вибухом. Відзначено, що процес руйнування гірських порід вибухом можна віднести до квазікрихкого руйнування з точки зору механіки руйнування. Проведено аналіз досліджень і публікацій в області руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом. Для описання процесу руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом обґрунтована правомірність використання коефіцієнту інтенсивності напружень, який вважається основним параметром тріщиноутворення. Аналіз досліджень в області механіки руйнування показав, що використання критеріїв міцності, які обираються в залежності від типу матеріалу та умов його руйнування, при розрахунках тіл на міцність недостатньо. Рішення проблеми крихкого і квазікрихкого руйнування може бути надійним лише тоді, коли враховуються в породі існуючі початкові тріщини.

Отримана узагальнена залежність для розрахунку критичних значень коефіцієнту інтенсивності напружень, що впливають на формування полів напружень у вершині тріщини при прикладенні вибухового навантаження. Розроблено алгоритм визначення об'єму руйнування тріщинуватих скельних порід вибухом системи свердловинних зарядів. Для найпоширеніших порід України досліджено вплив тріщинуватості гірського масиву на об'єм його руйнування при вибуховому навантаженні. За результатами розрахунків побудовані графіки залежності об'єму зруйнованого гірського масиву від відстані між тріщинами в досліджуваному об'ємі порід. Встановлені закономірності зміни об'єму руйнування вибухом залежно від різної ступені тріщинуватості гірських порід. За характером змін об'ємів руйнування породи, які досліджувалися, умовно поділено на дві групи.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Сучасні дослідження закордонних та вітчизняних вчених в області механіки руйнування показали, що використання тих чи інших критеріїв міцності, які обираються в залежності від типу матеріалу та умов його руйнування, при розрахунках тіл на міцність недостатньо. Рішення проблеми крихкого і квазікрихкого руйнування може бути надійним лише в тому випадку, коли враховуються в матеріалі (зокрема, в гірській породі) існуючі початкові тріщини [1, 2].

У зв'язку з цим важливе значення набувають задачі про рівновагу тіла з тріщиною. При цьому важливо не саме рішення такої складної математичної задачі, а існування або відсутність рішення про рівновагу тіла з тріщиною при прикладеному навантаженні на досліджуваний матеріал. Таким чином, з математичної точки зору руйнування відбувається при виконанні певних граничних умов, які забезпечують відсутність рішень відповідної задачі про рівновагу тіла. Ці умови є інтегральними узагальнюючими характеристиками процесу руйнування [3].

Процес руйнування гірських порід вибухом можна віднести до квазікрихкого руйнування, що відбувається під дією ударних навантажень. Масив гірських порід, який підлягає такому руйнуванню, є недосконалим з точки зору механіки суцільного середовища, оскільки в ньому існують, як мінімум, макро- та мікротріщини, і, як максимум, – система видимих тріщин, яка характеризується тріщинуватістю. Тому при побудові моделей та розв'язанні задач про руйнування тріщинуватих гірських порід необхідно враховувати наявність початкових тріщин.

Сам процес руйнування повинен описуватися обраними критеріями міцності з урахуванням довжин та геометрії початкових тріщин.

Аналіз досліджень та публікацій. Проблема руйнування скельних тріщинуватих порід досліджувалась багатьма вченими. Більшість дослідників зазначають, що руйнування тріщинуватих середовищ обумовлено насамперед дією хвиль напружень, які поширюються в середовищі. Зокрема, В.М. Мосинець в роботі [4] теоретичним шляхом встановив, що якщо ширина тріщини дорівнює 1 мм, то на відстані 100 радіусів заряду напруження в масиві майже в тисячу разів менше порівняно з напруженням на межі заряд-середовище.

Дослідженнями, які наведено в роботі [5] доведено, що тріщина шириною 2 мм, яка заповнена повітрям, знижує інтенсивність хвиль напружень в 25 разів порівняно з монолітним середовищем. При заповненні тріщини водою напруження складають 0,85-0,9 величини напружень в монолітному середовищі і 0,7-0,75 - при ширині тріщини порядку 20 мкм.

Автори роботи [6] відзначають, що при оцінці якості дроблення тріщинуватих порід необхідно враховувати не тільки величину вибухового імпульсу, але й фізико-механічні властивості гірських порід.

В [7] відмічено, що однією з найбільш складних проблем в механіці руйнування гірських порід є встановлення закономірностей процесу тріщиноутворення в масивах при вибухових навантаженнях. Автор роботи [8] зазначає, що процес руйнування крихких тіл складається з двох послідовних стадій: зародження тріщини та її зростання. Умова повного руйнування породи передбачає необхідність поширення тріщини, що утворилась в одному її елементі, на інший елемент. Існує певне граничне напруження, яке необхідно здолати, щоб поширення тріщини розпочалось.

Постановка завдання. Вищенаведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що ефективність вибухового руйнування тріщинуватих скельних масивів залежить насамперед від міцнісних і структурних характеристик порід, які визначають особливості поширення хвиль напружень в середовищі. Встановлено також, що основні положення механіки руйнування тріщинуватих масивів вибухом ґрунтуються на визначенні коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН), який вважається основним параметром тріщиноутворення. З його допомогою отримують основні закономірності, що описують поля напружень у вершині тріщини. Тому метою роботи є встановлення закономірностей руйнування тріщинуватих скельних порід вибухом та встановлення впливу тріщинуватості на результати вибухового дроблення.

Викладення матеріалу та результати. Дослідження в області механіки руйнування показали, що рішення проблеми руйнування тріщинуватих гірських масивів може бути надійним лише тоді, коли враховуються в породі існуючі початкові тріщини [1]. Оскільки процес руйнування складається з двох стадій – зародження тріщини та її поширення, причому кожна з цих стадій описується своїми законами, то серед критеріїв міцності породи є такі, які описують як умови зародження тріщини, так і умови її поширення. Перша група критеріїв описує умови настання небезпечного стану в точці в даний момент. Друга група враховує вже існуючі в тілі тріщини [9].

Критерії початку поширення тріщини в гірській породі можуть бути отримані як на основі енергетичних критеріїв, так і силових, тобто існує два еквівалентні формулювання критерію руйнування скельних гірських порід [10, 11].

Енергетичний критерій (інтенсивність звільненої енергії G досягає критичної величини G_c) початку зростання тріщини має вигляд

$$G = G_c. \quad (1)$$

Силовий критерій (КІН K досягає критичної величини K_c) описується як

$$K = K_c. \quad (2)$$

На підставі цих критеріїв критичне значення напруження для тріщин відриву можна записати у вигляді

$$\sigma_{кр} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi l}}. \quad (3)$$

де l - напівдовжина тріщини.

Оскільки за допомогою рівнянь лінійної механіки руйнування можна описати руйнування скельних гірських порід вибухом, що відбувається в результаті зростання тріщини, то в цьому разі задачу про поширення тріщини в гірському масиві можна сформулювати в термінах КІН.

Аналіз формул з визначення КІН для найбільш часто використовуваних схем навантаження показує, що усереднене значення K має вигляд [9,12]

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi l}, \quad (4)$$

де Y - безрозмірний множник « K -тарировка»; σ – напруження, яке виникає в масиві.

Формула (4) майже ідентична з (3) для визначення критичного значення напруження для тріщин відриву. Різниця лише полягає в « K -тарировці» Y , яка визначає розміри (довжину та товщину перерізу) існуючої тріщини в породі та змінюється від 1,0 до 2,0 [9].

Припустимо, що в масиві вже містяться рівномірно розподілені тріщини, що характеризуються середньою відстанню між тріщинами S

$$S = \sqrt{1/NL}, \quad (5)$$

де N – кількість тріщин в одиниці об'єму масиву.

З урахуванням (5) формула (4) отримає вигляд

$$K = \frac{Y \cdot \sigma}{S} \sqrt{\frac{\pi}{N}}. \quad (6)$$

Згідно силового критерію руйнування при $K < K_c$ (K_c – критичне порогове значення КІН) тріщина в локальному об'ємі не росте. Якщо $K_c < K < K_k$ (K_k – власне критичне значення КІН), то відбувається контрольоване зростання тріщини. Якщо ж $K > K_k$, то в даному об'ємі тріщина росте лавиноподібно, тобто настає руйнування.

Припустимо, що тріщини розподілені в об'ємі гірської породи рівномірно і орієнтовані ізотропно. Під час розрахунку об'єму руйнування необхідно усереднити напруження на розтягнення за усіма напрямками. При наявності напруження стиснення в розрахунковому об'ємі, вони порівнюються з критичним напруженням руйнування породи на стиснення.

Згідно розробленого алгоритму визначення об'єму руйнування тріщинуватих порід вибухом, в кожному локальному (розрахунковому) об'ємі реалізується наступна процедура:

якщо головні напруження $\sigma_1, \sigma_2 < 0$ (стиснення), то їх значення порівнюються з критичним напруженням руйнування породи на стиснення. Якщо $|\sigma_1| > |\sigma_{кр}|$ або/і $|\sigma_2| > |\sigma_{кр}|$, то порода в даному елементарному об'ємі зруйнована;

якщо $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$, то σ_2 порівнюється з $\sigma_{кр}$. Якщо $|\sigma_2| > |\sigma_{кр}|$, то порода зруйнована. Якщо ні, то σ_1 усереднюється за всіма напрямками, потім по $\sigma_{ср}$ розраховується з (6) значення КІН K , і далі розрахунок виконується по ньому;

якщо $\sigma_1 > 0$ і $\sigma_2 > 0$, то вони усереднюються обидва, розраховується КІН, і далі розрахунок проводиться по K .

Розрахунок об'єму руйнувань тріщинуватого масиву проведено для наступних умов: довжина свердловини - 15 м; діаметр заряду ВР - 200 мм; відстань між зарядами - 5,0 м; тип ВР - грамоніт 79/21: щільність заряджання ВР - 950 кг/м³; швидкістю детонації ВР - 3600 м/с.

Для встановлення впливу тріщинуватості на об'єм скельних гірських порід при вибуховому руйнуванні було проведено дослідження для найпоширеніших порід України, фізичні властивості яких наведено у таблиці 1. Чисельні значення КІН обрано з [13,14]. « K -тарировка» прийнята $Y=1,9$. Вплив тріщинуватості досліджувався через зміну кількості тріщин на одиницю об'єму та початкової тріщинуватості гірського масиву.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості гірських порід

Назва гірської породи	Щільність породи ρ , кг/м ³	Критичне значення напруження руйнування на розтягнення, МПа	Критичне значення напруження руйнування на стиснення, МПа	Швидкість поширення поздовжніх хвиль у породі c_l , м/с	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуасона ν	Пороговий КІН, K_c , МПа·м ^{1/2}	Критичний КІН, K_k , МПа·м ^{1/2}
Гранітоїди	2690	4,5	52	4350	46	0,09	7,7	9,63
Сланці	2870	9,9	88	2250	74	0,12	6,8	8,5
Амфіболіти	3025	16,2	91	6388	82	0,23	6,6	8,25
Андезит	2480	9,6	98,6	5324	55	0,28	2,1	2,63
Піщаник	2460	10,7	106,5	2100	31	0,19	0,86	1,07
Доломіт	2850	11,6	115	5759	50,5	0,38	0,52	0,65
Кварцит	2840	12,8	130	5600	64	0,22	2,4	3,0
Вапняк	2730	15,6	143	4300	09	0,30	0,35	0,44
Сієніт	2675	20,0	150	4950	74	0,30	3,2	4,0
Туф	2660	21,2	161	4337	47	0,16	0,4	0,5
Мрамур	2350	14,0	170	4950	40	0,12	0,5	0,63
Магнетитові кварцити	3470	20,8	210	5409	83	0,26	8,0	10,0
Габро	3005	14,5	220	6250	71	0,33	0,8	1,0
Базальт	2745	22,1	230	5400	85	0,20	0,57	0,71

За результатами розрахунків побудовані графіки залежності об'єму зруйнованого гірського масиву від відстані між тріщинами в досліджуваному об'ємі порід (рис. 1, 2).

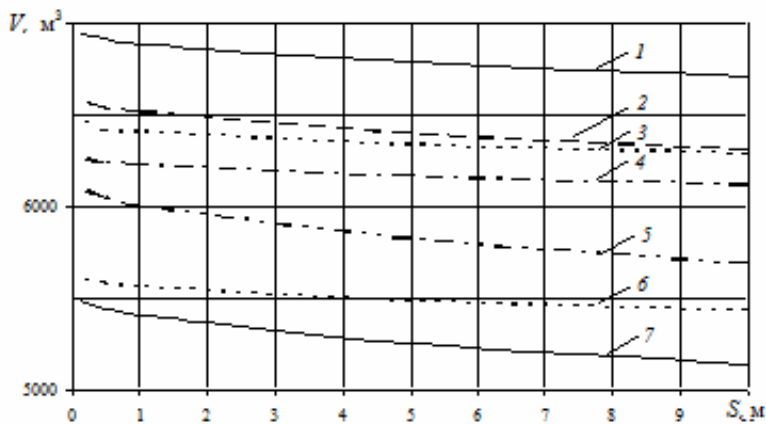


Рис. 1. Графіки залежності об'єму (V) зруйнованого гірського масиву вибухом від відстані між тріщинами (S) в породи: 1 – мармур; 2 – базальт; 3 – туф; 4 – гранітоїди; 5 – габро; 6 – вапняк; 7 – доломіт

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 1 і 2 дозволяє поділити вищенаведені гірські породи за характером зміни об'єму руйнувань в залежності від відстані між тріщинами на дві групи.

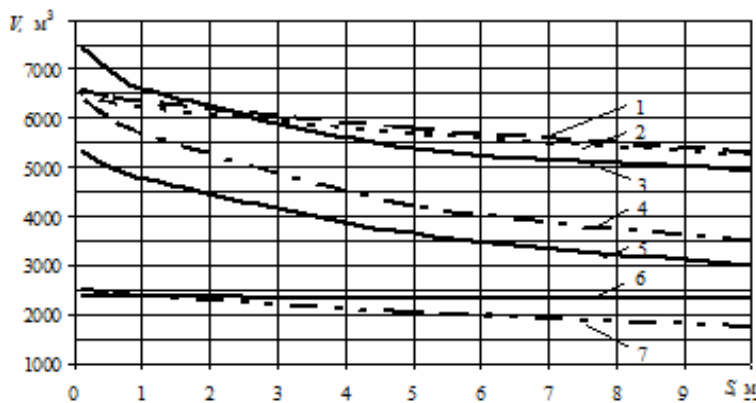


Рис. 2. Графіки залежності об'єму V зруйнованого гірського масиву вибухом від відстані між тріщинами S в породи: 1 – кварцит; 2 – андезит; 3 – магнетитові кварцити; 4 – амфіболіти; 5 – сієніт; 6 – піщаник; 7 – сланці

До першої групи слід віднести гранітоїди, піщаник, доломіт, вапняк, туф, мармур, габро, базальт.

Дана група порід характеризується незначною зміною об'єму руйнування залежно

від зміни тріщинуватості. Зокрема, якщо порівнювати надзвичайно тріщинуваті породи (відстань між тріщинами 0,1 м) з практично монолітними, то збільшення об'єму руйнування спостерігається: для габро - 8 %; доломіту - 7%; базальту - 4 %; гранітоїдів, піщанику, вапняку, туфу і мармуру - 3%. Відповідно, для сильно тріщинуватих порід (відстань між тріщинами 0,5 м) збільшення об'єму руйнувань буде становити: габро - 6,5 %; доломіту - 5,9 %; базальту - 3,7 %; гранітоїдів - 2,1 %; піщанику - 2,6 %; вапняку - 2,7 %; туфу - 2,0 %; мармуру - 3,0 %. Для середньо тріщинуватих порід (відстань між тріщинами 1,0 м) ці значення будуть дорівнювати для: габро - 5,7 %; доломіту - 5,1 %; базальту - 3,2 %; гранітоїдів - 1,9 %; піщанику - 2,2 %; вапняку - 2,4 %; туфу - 1,8 %; мармуру - 2,6 %.

До другої групи належать породи зі значним збільшенням об'єму руйнувань при порівнянні тріщинуватого масиву з монолітним: кварцит; андезит; магнетитові кварцити; амфіболіти; сієніт; сланці.

Порівнюючи надзвичайно тріщинуваті породи з монолітними, відмічаємо, що збільшення об'ємів руйнування спостерігаються для амфіболітів - на 85 %; сієніту - 79 %; магнетитових кварцитів - 51 %; сланців - 44 %; андезиту і кварцитів - 24 %.

Для сильно тріщинуватих порід збільшення об'ємів руйнувань будуть становити: амфіболітів - на 73 %; сієніту - 67,7 %; магнетитових кварцитів - 41,9 %; сланців - 39,3 %; кварцитів - 21,4 %; андезиту - 20,8 %.

Для середньо тріщинуватих порід збільшення об'ємів руйнувань в порівнянні з монолітним середовищем наступне: для амфіболітів - на 63,1 %; сієніту - 59,5 %; магнетитових кварцитів - 33,4 %; сланців - 35,3 %; кварцитів - 19,3 %; андезиту - 18,6 %.

Висновки та напрямок подальших досліджень. 1. Ефективність вибухового руйнування тріщинуватих скельних масивів залежить від міцнісних і структурних характеристик гірських порід, які визначають особливості поширення хвиль напружень в середовищі.

Обґрунтована правомірність використання коефіцієнту інтенсивності напружень для описання процесу руйнування тріщинуватих порід вибухом.

2. Рекомендована формула для розрахунку критичних значень КІН, які впливають на формування полів напружень у вершині тріщини при прикладенні вибухового навантаження.

3. За отриманими результатами розрахунків досліджувані гірські породи за характером зміни об'єму руйнувань в залежності від відстані між тріщинами поділено на дві групи.

Перша група порід характеризується незначною зміною об'єму руйнування залежно від зміни тріщинуватості.

При порівнянні надзвичайно тріщинуватих порід з практично монолітними, збільшення об'єму руйнування спостерігаються в межах 3-8 %, сильно тріщинуватих - у межах 2-6,5 %; середньо тріщинуватих порід з монолітними - 1,8-5,7 %.

До другої групи належать породи зі значним збільшенням об'єму руйнувань тріщинуватого масиву в порівнянні з монолітним.

При порівнянні надзвичайно тріщинуватих порід з практично монолітними збільшення об'єму руйнування спостерігаються від 24 до 85 %, сильно тріщинуватих - у межах 20,8-73,0 %; середньотріщинуватих порід - 18,6-63,1 %.

4. Аналіз змін об'ємів руйнування залежно від ступеня тріщинуватості гірського масиву показує, що вплив фізико-механічних властивостей досліджуваних порід на результати дроблення є комплексним.

Окремий вплив певної характеристики породи на об'єм руйнування на даній стадії досліджень не виявлено. Тому необхідно проводити подальші дослідження.

Список літератури

1. **Морозов Е. М.** Введение в механику развития трещин / **Е. М. Морозов.** – М.: МИФИ, 1977. – 91с.
2. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов / **Я. Б. Фридман**– М.: Машиностроение, 1974, Т. 1. – 472с; Т. 2. – 368с.
3. **Работнов Ю.Н.** Механика твердого тела и пути ее развития / **Ю.Н. Работнов** // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1960, № 2.
4. **Мосинец В.Н., Тангаев И.А.** Некоторые особенности процесса разрушения горных пород взрывом // Проблема разрушения горных пород взрывом. – М.: Недра, 1967, с. 109-125.
5. **Ханукаев А.Н.** Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом.– М.: Госгортехиздат, 1962.– 200с.
6. **Симанов В.Г., Безматерных В.А.** О зависимости давления продуктов детонации в скважине от естественной трещиноватости массива. – Горн. журн., 1973, № 3, с. 57-61.
7. **Фролов О.О.** Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різномісних масивів гірських порід на кар'єрах / Дис. ...докт. Техн. наук: 05.15.03.- К. 2014. – 369.
8. **Партон В.З.** Механика разрушения: От теории к практике / **В.З. Партон.** – М.: Наука, 1990. – 240 с.
9. **Партон В. З.** Механика упругопластического разрушения / **В.З. Партон, Е.М. Морозов.** – М.: Наука, 1985. – 504 с.
10. **Irwin G. R.** Relation of stresses near a crack to the crack extension force. – In: Proc. 9th Int. Congr. Appl. Mech., Brussels, 1957, v. 8, P. 245-251.
11. **Orowan E. O.** In: Proc. Symposium on internal stresses in metals and alloys/ **E.O.Orowan.** – London: Institute of Metals, 1948. - p. 451.
12. **Фролов О. О.** Використання коефіцієнту інтенсивності напружень для оцінки тріщинуватості гірського масиву при руйнуванні його вибухом свердловинних зарядів / **О. О. Фролов** // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць. –2010. – № 2. – С. 247–252.
13. **Исаков А.Л.** О направленном разрушении горных пород взрывом / **А.Л. Исаков** // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. иск-мыш. – 1983. – №6. –С. 41-52.
14. **Фролов А.А., Бритвин Ю.А.** Определение объёма разрушения трещиноватых горных пород взрывом скважинных зарядов с использованием коэффициента интенсивности напряжений // Материалы международной конференции «Проблемы недропользования» – Часть 1, 2014 . -С. 121-123.

Рукопис подано до редакції 26.02.15