

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ РУЙНУВАННЯ ТРІЩИНУВАТИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ

О. О. Фролов, канд. техн. наук (НТУУ «КПІ»)

Предложена методика расчета объема разрушений трещиноватых горных пород с учетом коэффициента интенсивности напряжений как основной характеристики тела с трещиной. Получены численные значения объема разрушений в зависимости от начальной трещиноватости горного массива.

Ключевые слова: напряжение, трещиноватость, коэффициент интенсивности напряжений, массив горных пород, разрушение, взрыв, скважинный заряд.

Запропонована методика розрахунку об'єму руйнування тріщинуватих гірських порід з урахуванням коефіцієнта інтенсивності напружень як основної характеристики тіла з тріщиною. Отримані чисельні значення об'єму руйнувань в залежності від початкової тріщинуватості гірського масиву

Ключові слова: напруження, тріщинуватість, коефіцієнт інтенсивності напружень, масив гірських порід, руйнування, вибух, свердловинний заряд.

Method of calculation the level of destructions seamy rocks in view of stress intensity factor as a basic characteristic of a body with a crack is offered. Numerical values of level of destructions depending on initial fracturing of rock massif are received.

Key words: stress, fracture, stress intensity factor, rock mass, destruction, explosion, deep-hole charge.

Вступ. Встановлення міцності будь-якого тіла обов'язково пов'язане з визначенням його напруженого стану. Це необхідно не тільки для знаходження точки руйнування і компонент напруженого стану в ній, але й для встановлення міцності матеріалу в цій точці, оскільки більшість критеріїв настання небезпечного стану виражаються через компоненти напруженого стану. Для багатьох тіл і схем навантаження визначення напруженого стану в точці руйнування зводиться до обчислення коефіцієнтів концентрації напружень.

Якщо в тілі існує тріщина, то для встановлення закономірності її поширення, тобто для оцінки міцності тіла, також необхідне знання напруженого стану. Визначення напруженого стану біля кінця тріщини відрізняється від звичайного визначення концентрації напруження тим, що геометрично лінеаризована постановка крайових умов і лінійна теорія пружності призводять до нескінченних напружень і нескінченних градієнтів напруження в кінці тонкого розрізу. В цьому випадку поняття коефіцієнта концентрації напружень втрачає сенс.

При розв'язанні задачі про тріщину необов'язково знати детальні процеси, що проходять у досить малому околі кінця розрізу [1, 2]. Достатньо знати характер та інтенсивність напруженого стану в області, що оточує кінець розрізу разом з малим об'ємом, де зосереджений механізм руйнування. Це означає відмову від використання коефіцієнта концентрації напружень на користь асимптотичного представлення напруженого стану в кінці розрізу.

Таким чином, можна стверджувати, що процеси руйнування матеріалу визначаються інтенсивністю поля напружень, яке оточує кінець тріщини. Ця інтенсивність характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень K (КІН).

Постановка задачі досліджень. Для проектування буропідричних і гірничих робіт необхідно правильно встановити міцність гірських порід, які зазвичай є тріщинуватими. Слід визнати, що для визначення міцності тіл з тріщинами застосовуються складні методи математичної теорії тріщин. Тому задача досліджень – розробити спрощені прийоми обчислень міцності тріщинуватих гірських порід, в яких зниження точності розрахунку виправдовується малою трудомісткістю, тобто звести оцінку міцності до рівня звичайних інженерних розрахунків.

Викладення матеріалу досліджень. Згідно з роботою [3] для кожної схеми навантаження матеріалу застосовується відповідна формула для визначення КІН. В табл. 1 наведені значення коефіцієнтів інтенсивності напружень для схем навантаження, що використовуються найчастіше.

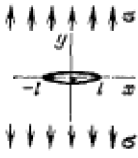
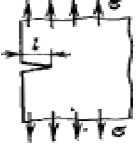
Якщо проаналізувати всі розрахункові формули для КІН (див. табл. 1), то можна стверджувати, що узагальнена формула для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень буде мати такий вигляд:

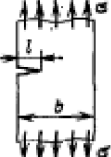
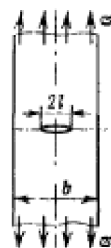
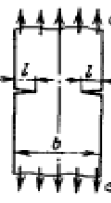
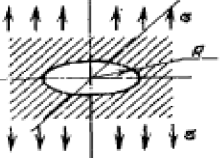
$$K = Y\sigma\sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

де Y – геометричний коефіцієнт (змінюється в межах 1...2); l – довжина тріщини; σ – напруження розтягнення, яке виникає в масиві гірських порід.

Для розрахунку об'єму руйнування тріщинуватого масиву гірських порід використовуємо такий самий алгоритм розрахунку об'єму руйнувань, як і для руйнування суцільного середовища [4, 5]. Тріщинуватість гірського масиву враховується параметрами, в основі яких лежить коефіцієнт інтенсивності напружень.

Таблиця 1. Коефіцієнти інтенсивності напружень

Форма зразка та схема навантаження матеріалу	Формула для визначення коефіцієнту інтенсивності напружень
	$K = \sigma\sqrt{\pi l}$
	$K = 1,12\sigma\sqrt{\pi l}$

	$K = \sigma \sqrt{lY},$ $Y = (1,99 - 0,41\lambda + 18,7\lambda^2 - 38,48\lambda^3 + 53,85\lambda^4)$ $(\lambda = l/b, \quad \lambda \leq 0,7)$
	$K = \sigma \sqrt{\pi l Y}$ $Y = \frac{1,77 + 0,45\lambda - 2,04\lambda^2 + 21,6\lambda^3}{\sqrt{\pi}}, \quad (\lambda < 1)$ $Y = \sqrt{\frac{1}{\pi\lambda} \operatorname{tg}\pi l}, \quad (\lambda \leq 0,7)$ $Y = \sqrt{\sec \pi l}, \quad (\lambda \leq 0,8)$
	$K = \sigma \sqrt{lY},$ $Y = (1,98 + 0,72\lambda - 8,48\lambda^2 + 27,36\lambda^3)$ $Y = \sqrt{\frac{1}{\pi\lambda} (\operatorname{tg}\pi\lambda + 0,1\pi\lambda)}$
	$K = 2\sigma \sqrt{\frac{R}{\pi}}$

Припустимо, що в гірському масиві вже містяться рівномірно розподілені тріщини, які можна охарактеризувати тріщинуватістю, тобто середньою відстанню між тріщинами s . В загальному вигляді тріщинуватість гірського масиву можна представити як

$$s = \sqrt{\frac{1}{N \cdot l}}, \quad (2)$$

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

З урахуванням (2) формула (1) набуде вигляду

$$K = \frac{Y \cdot \sigma}{s} \sqrt{\frac{\pi}{N}}. \quad (3)$$

Введемо поняття порогового K_{Π} та критичного $K_{\text{кр}}$ значень КІН. Припустимо, що при $K < K_{\Pi}$ тріщина в локальному об'ємі не збільшується. Якщо $K_{\Pi} < K < K_{\text{кр}}$, то тріщина збільшується; якщо ж $K > K_{\text{кр}}$, то в даному об'ємі тріщина росте лавиноподібно (до ∞ довжини), тобто настає руйнування. Таким чином, зміну чисельних значень КІН в залежності від тріщинуватості можна представити графіком, представленим на рис. 1.

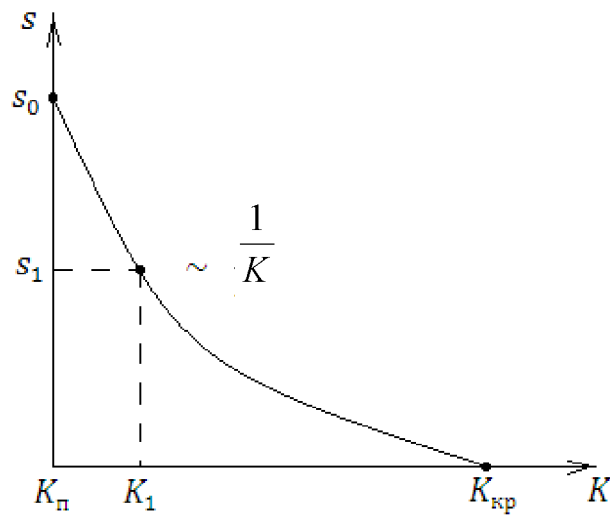


Рис. 1. Графік залежності між тріщинуватістю s та КІН K : s_0 – початкова тріщинуватість; K_1 , s_1 – відповідно, поточні значення КІН та тріщинуватості

Якщо припустити, що тріщини розподілені в об’ємі гірської породи однорідно і орієнтовані ізотропно, то для проведення розрахунків по визначенню напружень необхідно усереднити розтяжні напруження в локальному об’ємі за всіма напрямками, оскільки саме напруження розтягнення підставляється в формулу для K :

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{2\pi} \sigma \cdot \cos^2 \varphi d\varphi}{2\pi} = \frac{1}{2} \sigma. \quad (4)$$

У випадку, коли напруження в даному об’ємі від’ємні (тобто це напруження стиснення), то вони порівнюються з критичним напруженням руйнування породи на стиснення.

Таким чином, в кожному розрахунковому об’ємі масиву гірських порід реалізується така процедура:

1) 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;

2) 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 (тобто $\sigma_{ср} = 1/2\sigma_1$), потім по $\sigma_{ср}$ розраховується K , і далі розрахунок робиться по K ;

3) якщо $\sigma_1 > 0$ і $\sigma_2 > 0$, то вони усереднюються обидва, загальне $\sigma_{ср} = 1/2(\sigma_1 + \sigma_2)$, розраховується K , і далі як в п. 2.

Визначення об’єму руйнувань тріщинуватого масиву гірських порід було виконано для таких параметрів буропідричних робіт: відстань між свердловинами – 5 м; довжина заряду – 15 м; діаметр свердловини – 200 мм; тип вибухової речовини (ВР) – грамоніт 79/21; щільність заряджання ВР – 950 кг/м³; швидкість детонації ВР – 3600 м/с.

Свердловинні заряди ВР руйнували магнетитові кварцити щільністю $\rho = 3100$ кг/м³. Критичне значення напруження руйнування на розтягнення – $1,8 \cdot 10^7$ Па; критичне значення напруження руйнування на стиснення – $1,9 \cdot 10^8$ Па; швидкість поширення поздовжніх хвиль у гірському масиві –

5300 м/с; модуль пружності – $8,3 \cdot 10^{10}$ Па; коефіцієнт Пуассона – 0,26; ступінь затухання хвиль напружень при поширенні в гірському масиві – 1,35; порогове значення КІН $K_{II} = 10000000$; критичне значення КІН $K_{кр} = 8000000$; $Y = 1,9$.

Чисельні значення КІН були вибрані на основі даних з літературних джерел по механіці руйнування, тому їх значення є орієнтовними.

Вплив тріщинуватості досліджувався шляхом зміни кількості тріщин на одиницю об'єму з урахуванням початкової тріщинуватості гірського масиву. Результати наведених розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові об'єми руйнування тріщинуватого масиву гірських порід

Тріщинуватість, м	87	80	70	60	50	40	30	20	10	5	1	0,5	0,1
Кількість тріщин, шт	0,011	0,012	0,014	0,017	0,02	0,025	0,033	0,05	0,1	0,2	1	2	10
Об'єм руйнувань, м ³	1405	1444	1505	1582	1674	1783	1950	2206	2731	3324	4782	5285	5892

За чисельними даними табл. 2 побудована залежність об'єму руйнувань гірського масиву від початкової тріщинуватості досліджуваного об'єму (рис. 2). Аналіз залежності показує, що зі зменшенням середньої відстані між природними тріщинами (або збільшенням кількості тріщин на одиницю об'єму) об'єм руйнувань гірського масиву зростає за залежністю

$$V = -719,3 \ln s + 4512,4. \quad (5)$$

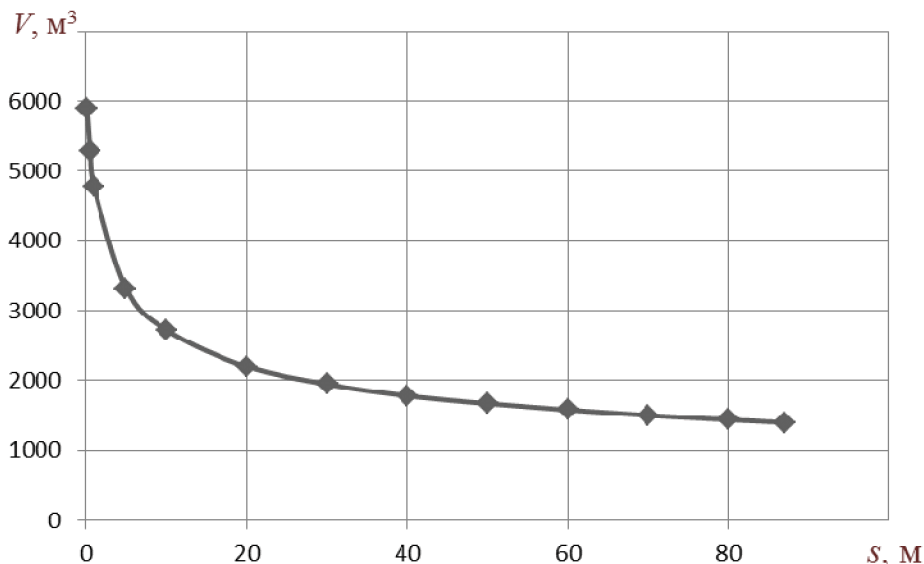


Рис. 2. Залежність об'єму (V) підірваної гірничої маси від початкової тріщинуватості (s) досліджуваного об'єму

Висновки

1. Процеси руйнування тріщинуватих гірських порід визначаються інтенсивністю поля напружень, яке оточує кінці тріщин. Ця інтенсивність характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень.

2. Запропоновано враховувати тріщинуватість гірського масиву параметром тріщинуватості, в основу якого закладено коефіцієнт інтенсивності напружень.

3. Отримано розрахункові значення об'єму руйнувань тріщинуватого гірського масиву під час вибуху системи свердловинних зарядів для значень початкової тріщинуватості досліджуваного об'єму.

4. Результати досліджень потребують подальшого детального аналізу та удосконалення, зокрема методики розрахунку руйнувань тріщинуватих гірських масивів.

1. *Морозов Е. М.* О соответствии между энергетическим критерием разрушения и математическим моделированием явлений деформаций в конце разрезом–трещин. – ПММ, 1970, Т. 34. – № 4. – С. 768–776.

2. *Морозов Е. М., Партон В. З.* Об одном обосновании критерия Ирвина на конце трещины. – М.: Инж. журнал. – МГТ. – 1968. – № 6. – С. 147–152.

3. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.

4. *Фролов О. О.* Теоретичні передумови розрахунку об'єму руйнування гірських порід під час вибуху систем подовжених зарядів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2008. – Вип. 16. – С. 13–16.

5. *Фролов О. О.* Дослідження параметрів зони руйнування при вибуху системи свердловинних зарядів // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг: КТУ – 2009. – Вип. 23. – С. 186–189.