

Аналіз побудованої моделі Кур'янівського родовища пірофілітових сланців показав, що найбільш якісна сировина розміщена в центральній, північно-східній та південно-східній частинах родовища. Очевидно, що в межах центральної ділянки доцільно починати видобування сировини, так як вона є перспективною для отримання максимального економічного ефекту на початкових стадіях освоєння родовища.

Список використаних джерел

1. Филатова И.В. Геометризация марочного состава углей Донбасса на основе комплексного учета их качественных показателей: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01 / Ирина Викторовна Филатова; Государственное высшее учебное заведение "Донецкий национальный технический ун-т". - Донецк, 2007. - 20 с.
2. Толкач О.М. Дослідження шляхів підвищення комплексності використання пірофілітової сировини / О.М. Толкач, Р.В. Соболевський // Збірка тез доповідей XXXVIII науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню науки науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2011. – Т.І. – С. 169–170.
3. Толкач О.М. Визначення основних критеріїв якості пірофілітових сланців / О.М. Толкач, Р.В. Соболевський, С.С. Іськов // Вісник Житомирського державного технологічного університету / Серія: Технічні науки. – 2011. – № 2 (57) – С. 170–176.
4. Байдакова І.М. Формування конкурентоспроможності на основі підвищення якості / І.М. Байдакова // Товарознавчий вісник. - № 2. – 2010. - С. 24 – 30.
5. Лукашенко Н. Г. Переоценка запасов пиррофиллитового сланца Курьяновского месторождения (I ч.). - Володарск-Вольинский : Геолого-разведочная экспедиция, 1990. – 167 с.
6. Толкач О. М. Побудова регресійної моделі взаємозв'язків основних показників якості пірофілітових сланців / О. М. Толкач, Р. В. Соболевський, М. П. Стенюк // Вісник ЖДТУ. – 2012. – №1 (60). – С. 134–138.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2015 р.

УДК 622.235

О. О. Фролов, д.т.н, доц., **Ю. О. Бритвин**, інж. (НТУУ «КПІ»)

ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ ТРИЩИНУВАТИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

A. A. Frolov, J. A. Brytvyn (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

DETERMINATION OF FRACTURE PATTERNS OF FRACTURED ROCKS BY EXPLOSION

Обґрунтована правомірність використання коефіцієнту інтенсивності напружень для описання процесу руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом. Отримана узагальнена залежність для розрахунку критичних значень коефіцієнту інтенсивності напружень. Результати руйнування тріщинуватих скельних масивів умовно поділено на три групи гірських порід за характером зміни об'єму руйнування в залежності від різної ступені тріщинуватості.

Ключові слова: скельні гірські породи, вибух, руйнування, тріщина, критерії руйнування, напруження, коефіцієнт інтенсивності напружень, свердловинний заряд.

Обоснована правомерность использования коэффициента интенсивности напряжений для описания процесса разрушения трещиноватых горных пород взрывом. Получена обобщенная зависимость для расчета критических значений коэффициента интенсивности напряжений. Результаты разрушения трещиноватых скальных массивов условно разделены на три группы горных пород по характеру изменения объема разрушения в зависимости от различной степени трещиноватости.

Ключевые слова: скальные горные породы, взрыв, разрушение, трещина, критерии разрушения, напряжение, коэффициент интенсивности напряжений, скважинный заряд.

Substantiates the validity of using the stress intensity factor to describe the destruction of fractured rock explosion. The generalized dependence for calculating the critical values of the stress intensity factor. Results mountain ranges are divided into three groups of rocks on the nature change of volume of destruction, depending on the varying degrees of fracturing.

Keywords: rocky rocks, explosion, destruction, crack, fracture criteria, stress, stress intensity factor, downhole charge.

Вступ. Вивченню механізму руйнування тріщинуватих порід присвячено значна кількість досліджень. В більшості з них зазначається, що руйнування тріщинуватих середовищ обумовлено насамперед дією хвиль напружень, які поширюються в середовищі. Зокрема, В.М. Мосинець 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 [1].

Дослідженнями О.М. Ханукаєва [2] 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 [3] підкреслюють, що при оцінці якості дроблення тріщинуватих порід необхідно враховувати не тільки величину вибухового імпульсу, але й фізико-механічні властивості гірських порід.

В роботі [4] відзначається, що однією з найбільш складних проблем в механіці руйнування гірських порід є встановлення закономірностей процесу тріщиноутворення в масивах при вибухових навантаженнях.

Партон В.З. зазначає, що процес руйнування крихких та квазікрихких тіл складається з двох послідовних стадій: зародження тріщини та її зростання [5]. Умова повного руйнування гірської 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 проблеми та мета досліджень. Вищенаведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що ефективність вибухового руйнування тріщинуватих скельних масивів залежить насамперед від міцнісних і структурних характеристик гірських порід та особливостей формування, взаємодії та поширення хвиль напружень в скельному середовищі. Також встановлено, що в основі сучасних положень механіки руйнування тріщинуватих масивів гірських порід вибухом закладено визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), який вважається основним параметром тріщиноутворення. З його допомогою отримують основні закономірності, що описують поля напружень і переміщень у вершині тріщини. Тому метою роботи є встановлення закономірностей і дослідження процесу руйнування тріщинуватих скельних гірських порід вибухом з урахуванням основних положень механіки руйнування.

Викладення матеріалу досліджень. Сучасні дослідження в області механіки руйнування показали, 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 у випадку, коли враховуються в породі існуючі початкові тріщини [6]. Оскільки процес руйнування складається з двох стадій – зародження тріщини та її поширення, причому кожна з цих стадій описується своїми законами, то серед критеріїв міцності гірської породи є такі, які описують як умови зародження тріщини, так і умови поширення тріщини. Перші критерії описують умови настання небезпечного стану в точці в даний момент. Другі виходять з наявності в тілі тріщини, тобто в них використовується відповідна модель.

Критерії початку поширення тріщини в гірській породі можуть бути отримані як на основі енергетичних критеріїв, так і силових. Спочатку А. А. Гріффітсом був запропонований енергетичний критерій руйнування, а потім Дж. Р. Ірвіном – силовий критерій [7]. Ірвін також показав еквівалентність цих двох критеріїв. Таким чином, маємо два еквівалентні формулювання критерію руйнування скельних гірських порід.

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:

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

З урахуванням цих критеріїв критичне значення напруження при пласкому напруженому стані для тріщин відриву можна записати у вигляді:

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

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 його усереднене значення K має вигляд [7, 8]:

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

Y – « K -тарировка», згідно [7] знаходиться в межах від 1,0 до 2,0; l – напівдовжина тріщини; σ – напруження, яке виникає в масиві гірських порід.

Формула (4) добре узгоджується з (3) для визначення критичного значення напруження при плоскому напруженому стані для тріщин відриву. Різниця лише полягає в безрозмірному множнику « K -тарировки» Y , який визначає розміри (довжину та товщину перерізу) існуючої тріщини в породі.

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

$$S = \sqrt{\frac{1}{N \cdot l}}, \text{ де:} \quad (5)$$

N – кількість тріщин в одиниці об'єму масиву; l – напівдовжина тріщини.

З урахуванням (4) отримаємо:

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

Згідно з силовим критерієм 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.

У разі настання критичного стану напруження руйнування становить:

$$\sigma_{кр} = \frac{K_c \cdot S}{Y} \sqrt{\frac{N}{\pi}}. \quad (7)$$

Припустимо, що тріщини розподілені в об'ємі гірської породи рівномірно і орієнтовані ізотропно. Для встановлення об'єму руйнування необхідно усереднити напруження на розтягнення за усіма напрямками:

$$\sigma_{сер} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma \cdot \cos^2 \varphi d\varphi = \frac{1}{2} \sigma. \quad (8)$$

Якщо ж 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 локальному (розрахунковому) об'ємі реалізується наступна 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 усіма напрямками (тобто $\sigma_{сеп} = 1/2 \sigma_1$), потім по $\sigma_{сеп}$ розраховується з (6) значення КІН K , і далі розрахунок виконується по ньому;

3) якщо $\sigma_1 > 0$ і $\sigma_2 > 0$, то вони усереднюються обидва, загальне $\sigma_{сеп} = 1/2(\sigma_1 + \sigma_2)$, розраховується КІН, і далі розрахунок проводиться по K .

Розрахунок параметрів зон 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 порід наведено у табл. 1. Чисельні значення КІН обрано з [9, 10]. « K -тарировка» прийнята $Y = 1,9$. Вплив тріщинуватості досліджувався через зміну кількості тріщин на одиницю об'єму та початкової тріщинуватості гірського масиву.

Результати розрахунків значень об'єму руйнувань тріщинуватих порід наведено в табл. 2.

Аналіз наведених даних табл. 2 показує, що в цілому зі зменшенням середньої відстані між природними тріщинами (або збільшенням кількості тріщин на одиницю об'єму) об'єм руйнувань зростає. За характером зменшення об'єму руйнування в залежності від збільшення відстані між тріщинами розглянуті скельні породи можна поділити на три групи.

Для першої групи порід (амфіболіт, сієніт, сланці) відбувається стрімка зміна об'єму. Зокрема, збільшення об'єму руйнування середньо тріщинуватого гірського масиву в порівнянні з монолітним відбувається в 3,15 рази, а надзвичайно тріщинуватого – в 3,51 рази (так, наприклад, для кварциту зміна відбувається з 3195,7 до 6330,7 м³ та з 3195,7 до 6585,4 м³).

Для групи, яка складається з габро, андезиту, кварциту, магнетитових кварцитів, відбувається повільна зміна об'єму в порівнянні монолітного середовища з середньо тріщинуватим масивом в 1,67 рази, а монолітного з надзвичайно тріщинуватим – в 1,77 рази (зокрема, у андезіта зміна відбувається з 3205,078 до 6207,5 м³ та 3205,1 до 6475,5 м³ відповідно).

Для третьої групи (вапняк, гранітоїд, базальт, пісчаник, туф, мармур та доломіт) відбувається незначна зміна об'єму руйнувань. Порівнюючи моноліт з середньо тріщинуватим масивом зменшення об'єму відбувається в 1,08 рази, а з надзвичайно тріщинуватим – в 1,13 рази.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості гірських порід

№ ц/п	Гірська порода	Щільність породи ρ , кг/м ³	Критичне значення напруження на руйнування на розтягнення σ_{xp}^t , МПа	Критичне значення напруження на руйнування на стиснення σ_{xp}^c , МПа	Швидкість поширення поздовжніх хвиль у породи c_t , м/с	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт Пуасона ν	Пороговий кофіцієнт інтенсивності напружень, K_c , МПа·м ^{1/2}	Критичний кофіцієнт інтенсивності напружень, K_k , МПа·м ^{1/2}
1	Гранітоїди	2690	4,5	52	4350	46	0,09	7,7	9,63
2	Сланці	2870	9,9	88	2250	74	0,12	6,8	8,5
3	Амфіболіти	3025	16,2	91	6388	82	0,23	6,6	8,25
4	Андезит	2480	9,6	98,6	5324	55	0,28	2,1	2,63
5	Щіпанки	2460	10,7	106,5	2100	31	0,19	0,86	1,07
6	Доломіт	2850	11,6	115	5759	50,5	0,38	0,52	0,65
7	Кварцит	2840	12,8	130	5600	64	0,22	2,4	3,0
8	Вапняк	2730	15,6	143	4300	09	0,30	0,35	0,44
9	Сієніт	2675	20,0	150	4950	74	0,30	3,2	4,0
10	Туф	2660	21,2	161	4337	47	0,16	0,4	0,5
11	Мармур	2350	14,0	170	4950	40	0,12	0,5	0,63
12	Магнетитові кварцити	3470	20,8	210	5409	83	0,26	8,0	10,0
13	Габро	3005	14,5	220	6250	71	0,33	0,8	1,0
14	Базальт	2745	22,1	230	5400	85	0,20	0,57	0,71

Таблиця 2. Об'єм руйнувань скельних гірських порід, м³, для різних значень початкової тріщинуватості

Порода	Початкова тріщинуватість гірського масиву, м										
	60	50	40	30	20	10	5	1	0,5	0,1	
Гранітоїди	5872,8	5914,2	5949,2	5998,5	6044,8	6112,2	6161,0	6226,2	6241,6	6265,5	
Сланці	1005,2	1076,0	1159,3	1280,2	1451,1	1751,5	2039,5	2369,7	2440,2	2525,1	
Амфіболіти	1969,7	2107,7	2289,2	2498,6	2832,6	3492,2	4222,9	5694,6	6040,6	6456,3	
Андезит	3535,5	3734,5	3950,9	4252,9	4627,2	5236,2	5682,3	6207,5	6325,8	6475,5	
Пісчаники	2204,6	2221,1	2237,5	2255,0	2294,6	2305,2	2325,3	2357,0	2364,6	2374,0	
Доломіт	4622,6	4710,5	4799,5	4891,6	4996,6	5141,5	5250,7	5405,2	5442,3	5493,7	
Доломіт	4622,6	4710,5	4799,5	4891,6	4996,6	5141,5	5250,7	5405,2	5442,3	5493,7	
Кварцит	3531,5	3734,9	3964,4	4267,7	4660,9	5307,3	5787,8	6330,7	6442,9	6585,4	
Вапняк	5137,7	5185,8	5234,4	5290,8	5351,8	5432,4	5486,3	5562,0	5580,7	5605,6	
Сієніт	1535,4	1673,5	1826,5	2045,0	2363,9	2985,9	3642,3	4762,0	5006,9	5336,7	
Туф	6050,5	6090,8	6128,9	6172,6	6224,2	6290,6	6335,8	6402,4	6414,6	6497,2	
Мармур	6315,2	6382,5	6449,8	6521,3	6604,9	6709,7	6785,2	6885,1	6909,3	6940,5	
Магнетитові кварцити	4347,6	4348,9	4383,8	4458,4	4599,2	4941,2	5383,0	6590,8	7013,3	7435,8	
Габро	4978,9	5102,1	5219,2	5351,8	5491,0	5682,3	5825,6	6006,2	6050,4	6108,7	
Базальт	5796,8	5882,9	5972,5	6072,4	6174,3	6308,3	6395,2	6513,0	6538,8	6577,2	

Висновки

1. Ефективність вибухового руйнування тріщинуватих скельних масивів залежить від міцнісних і структурних характеристик гірських порід та особливостей формування, взаємодії та поширення хвиль напружень в скельному середовищі. Обґрунтована правомірність використання коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) для описання процесу руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом.

2. Отримана узагальнена залежність для розрахунку критичних значень КІН, що впливають на формування енергетичних потоків при прикладенні вибухового навантаження на тріщинуватий гірський масив.

3. Отримані результати об'ємів руйнування в залежності від тріщинуватості гірського масиву розділено на три групи гірських порід. Для першої групи відбувається збільшення об'єму руйнування середньо тріщинуватого масиву в порівнянні з монолітним відбувається в 3,15 рази, а надзвичайно тріщинуватого – в 3,51 рази. Для другої групи відбувається повільна зміна об'єму руйнування монолітного середовища в порівнянні з середньо тріщинуватим масивом в 1,67 рази, а монолітного з надзвичайно тріщинуватим – в 1,77 рази. Для третьої групи спостерігається незначна зміна об'єму руйнувань. Порівнюючи монолітне середовище з середньо тріщинуватим масивом зменшення відбувається в 1,08 раз, а з надзвичайно тріщинуватим – в 1,13 рази.

4. Аналіз змін об'ємів руйнування в залежності від тріщинуватості гірського масиву показує, що вплив фізико-механічних властивостей досліджуваних гірських порід на результати дроблення є комплексним. Вплив окремої властивості на об'єм руйнування не спостерігається. Тому необхідно проводити подальші дослідження в цьому напрямку.

Список використаних джерел

1. Мосинетс В.Н., Тангаев И.А. Некоторые особенности процесса разрушения горных пород взрывом // Проблема разрушения горных пород взрывом. – М.: Недра, 1967, с. 109-125.

2. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200с.

3. Симанов В.Г., Безматерных В.А. О зависимости давления продуктов детонации в скважине от естественной тресчиноватости массива. – Гор. журн., 1973, № 3, с. 57-61.

4. Фролов О.О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різноміцнісних масивів гірських порід на кар'єрах / Дис. докт. тех. наук: 05.15.03.- К. 2014. – 369.

5. Партон В.З. Механика разрушения: От теории к практике / В.З. Партон. – М.: Наука, 1990. – 240 с.

6. Морозов Е. М. Введение в механику развития трещин / Е. М. Морозов. – М.: МИФИ, 1977. – 91с.
7. Партон В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
8. Фролов О. О. Використання коефіцієнту інтенсивності напружень для оцінки трищинуватості гірського масиву при руйнуванні його вибухом свердловинних зарядів / О. О. Фролов // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць. –2010. – № 2. – С. 247–252.
9. Исаков А.Л. О направленном разрушении горных пород взрывом / А.Л. Исаков // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. иск-мых. – 1983. – №6. –С. 41-52.
10. Фролов А.А., Бритвин Ю.А. Определение объёма разрушения трещиноватых горных пород взрывом скважинных зарядов с использованием коэффициента интенсивности напряжении // Материалы международной конференции «Проблемы недропользования» – Част 1. 2014 .-С. 121-123.

Стаття надійшла до редакції 18.03.2015 р.