УДК 622.235

УРАХУВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ СКЕЛЬНИХ ПОРІД ПРИ ПРОЕКТУВАННІ МАСОВИХ ВИБУХІВ

О. Я. Тверда, асп., В. Д. Воробйов, докт. техн. наук (НТУУ «КПІ»), І. В. Косьмин (ЗАТ „Техновибух”)

Изложены результаты аналитического определения коэффициента анизотропии скальных пород на основе энергетических показателей взрыва для различной ориентировки в горизонтальной плоскости массива пород. Приведены принципиальные схемы расположения скважин с учетом анизотропии пород.

Ключевые слова: анизотропия, взрыв, горная порода, карьер, параметры, трещиноватость.

Викладені результати аналітичного визначення коефіцієнта анізотропії скельних порід на основі енергетичних показників вибуху для різного орієнтування в горизонтальній площині масиву порід. Наведені принципові схеми розташування свердловин з урахуванням анізотропії порід.

Ключові слова: анізотропія, вибух, гірська порода, кар’єр, параметри, тріщинуватість.

The results of analytical determination of the coefficient of anisotropy of rocks based on the energy performance of explosion for different orientations in the horizontal plane of the rock mass are set. The concepts of the blastholes placement are given that take into account the anisotropy of rocks.

Key words: anisotropy, explosion, rock, quarry, parameters, fracturing.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв’язок з важливими науковими і практичними завданнями. Підготовка гірничої маси в кар’єрах є одним із результатів дії масового вибуху як необхідного процесу відкритої розробки масивів скельних порід на сучасному етапі науково-технічного прогресу. При цьому якість гірничої маси залежить від багатьох факторів і параметрів.

Родовища корисних копалин і породні масиви характеризуються значним різноманіттям генетичних типів, морфологічних особливостей, фізико-механічних і хімічних властивостей, складових гірських порід [1]. Тому ефективність конкретних способів підривання визначається їх застосуванням у відповідності до характеристик скельних масивів.

Специфіка розробки складноструктурних родовищ корисних копалин полягає в тому, що особливої уваги потребує проектування буропідривних робіт, а саме визначення параметрів розташування свердловинних зарядів та їх взаємозв’язку зі схемами підривання з урахуванням анізотропії порід.

Взаємозв’язок анізотропії і тріщинуватості в комплексі з іншими технологічними факторами диктує новий підхід до проектування БПР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв’язання даної проблеми і на які спираються автори. Основні наукові

результати досліджень впливу тріщинуватості на процес руйнування порід в масиві отримані в наукових колективах України та Росії. Зокрема, значний внесок у дослідження цієї проблеми зробили Н. Я. Рєпін, В. Д. Воробйов, В. І. Мячкін, А. А. Музиров, В. С. Прокопенко та ін. Що стосується оцінки ступеня анізотропії, то в літературі [2–12] зустрічається багато варіантів її визначення. Відомі підходи до визначення коефіцієнта анізотропії K_a (табл. 1) в основному базуються на експериментальних даних, які не забезпечують достовірності результатів при його використанні в розрахунках. Крім того, визначення величини K_a за результатами експериментів є складним і вимагає значних матеріальних затрат. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку шляхів підвищення достовірності визначення величини K_a.

Метою роботи є теоретичне визначення K_a гірських порід і його врахування при проектуванні масових вибухів при розробці родовищ корисних копалин.

Викладення основного матеріалу досліджень. Відмінності фізико-механічних властивостей гірських порід у різних напрямках зумовлені у більшості випадків їх значною неоднорідністю та анізотропією [2]. Фізичні причини анізотропності скельних порід пов'язані з їх генезисом і пов'язані, перш за все, з процесом утворення шаруватості, сланцюватості і тріщинуватості. Явище анізотропності обумовлене також тектонічними процесами, що відбуваються в скельних масивах [3].

Анізотропність гірських порід зазвичай характеризується величиною K_a, яка є відношенням показника однієї з властивостей порід вздовж напластування до показника тієї ж властивості перпендикулярно напластуванню [4]. Виходячи з цього, запишемо коефіцієнт анізотропії через густини потоків енергії:

$$K_a = \bar{\varepsilon}_{\max} / \bar{\varepsilon}_{\min}, \qquad (1)$$

де $\bar{\varepsilon}_{\max}$ і $\bar{\varepsilon}_{\min}$ – максимальна і мінімальна густина потоку енергії.

На основі формули визначення сумарної густини $\bar{\varepsilon}$ прямого та відбитого потоків енергії [11] після низки математичних перетворень отримаємо:

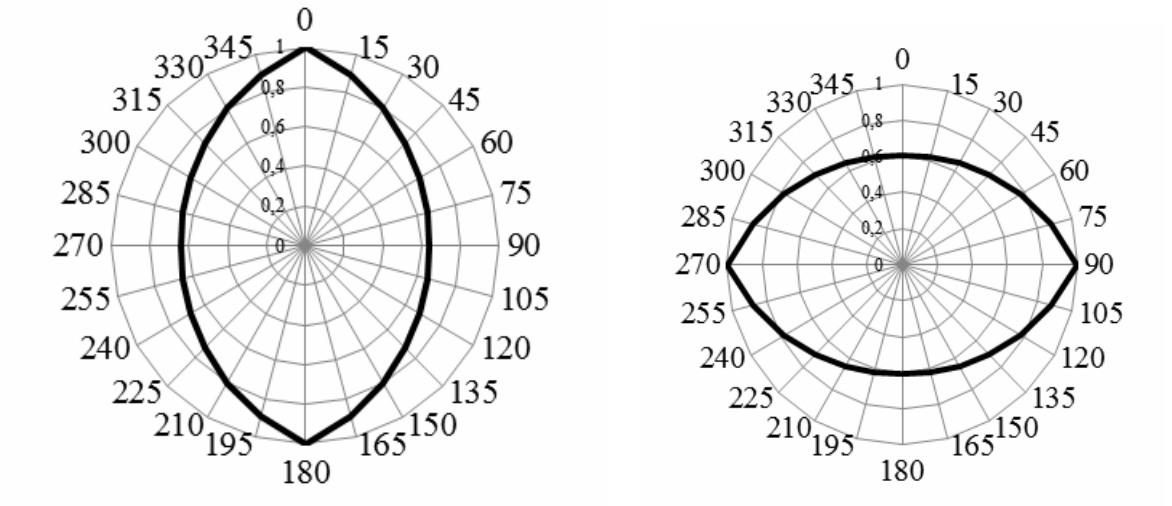
$$K_a = \left(L^{\frac{l_y \cos(\theta)}{d_{\text{сер}}}} \right)_{\max} \Big/ \left(L^{\frac{l_y \cos(\theta)}{d_{\text{сер}}}} \right)_{\min}, \qquad (2)$$

де $\beta - 180 \le \theta \le \beta$, β – азимут простягання системи тріщин; L – коефіцієнт провідності енергії одиничної тріщини; l_y – довжина потоку; $d_{\text{сер}}$ – середня нормальна відстань між тріщинами в системі; θ – кут між напрямком потоку енергії і площиною тріщин системи.

Нехай в масиві присутня одна система тріщин, азимут простягання якої $\beta = 270°$, коефіцієнт провідності енергії одиничної тріщини $L = 0{,}8$, $l_y = 2$ м, середня нормальна відстань між тріщинами в системі $d_{\text{сер}} = 1$ м. За формулою (2) визначаємо, що $K_a = 1{,}56$. Аналогічно визначаємо K_a для масиву, в якому присутня система тріщин, азимут простягання якої $\beta = 360°$, коефіцієнт провідності енергії одиничної тріщини $L = 0{,}8$, $l_y = 2$ м, середня нормальна відстань між тріщинами в системі $d_{\text{сер}} = 0{,}9$ м. Воронку вибуху у двох випадках можна зобразити графічно через розподіл густин потоку енергії в різних напрямках (рис. 1).

Таблиця 1. Варіанти визначення коефіцієнта анізотропії K_a гірських порід за результатами досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених

Формула для визначення K_a	Показники в формулі	Спосіб визначення K_a	Джерело
$K_a = \sqrt{1 - \frac{N_2^2}{N_1^2}}$	N_1 – максимальна величина відповідної властивості по одному із головних напрямків; N_2 – величина цієї ж властивості по іншому головному напрямку	Теоретично або експериментально	[5]
$K_a = \sqrt{\frac{V_{\parallel}}{V_{\perp}}}$	$V_{\parallel}$ – швидкість пружних хвиль, заміряна вздовж шаруватості, м/с; $V_{\perp}$ – швидкість пружних хвиль, заміряна поперек шаруватості, м/с	Експериментально	[5, 6, 7, 8]
$K_a = \frac{k}{n}$	$k = \sqrt{k_1^2}$, $k_1^2 = \frac{E_1 / E_2 - \mu_2^2}{1 - \mu_1^2}$, $n = \sqrt{2k + m}$, $m = \frac{E_1 / G_2 - 2\mu_2(1 + \mu_1)}{1 - \mu_1^2}$	Експериментально	[9]
$K_a = \sqrt{\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}}}$	$E_{\parallel}$ – модуль Юнга, обчислений вздовж шаруватості, кгс/см^2; $E_{\perp}$ – модуль Юнга, обчислений поперек шаруватості, кгс/см^2	Теоретично	[2]
$K_a = \frac{R_{\text{ст}}^{\perp}}{R_{\text{ст}}^{\parallel}}$	$R_{\text{ст}}^{\perp}$ – середнє значення опору стисненню перпендикулярно шаруватості, кГ/см^2; $R_{\text{ст}}^{\parallel}$ – середнє значення опору стисненню паралельно шаруватості, кг/см^2	Експериментально	[10]
$K_a = \frac{R_{\text{роз}}^{\perp}}{R_{\text{роз}}^{\parallel}}$	$R_{роз}^{\perp}$ – середнє значення опору розтягу перпендикулярно шаруватості, г/см^2; $R_{роз}^{\parallel}$ – середнє значення опору розтягу паралельно шаруватості, кг/см^2	Експериментально	[10]
$K_a = \frac{r''}{r'}$	r''– найбільша частота тріщин, яка досягається в напрямку головної осі анізотропії; r' – частота тріщин в напрямку, перпендикулярному головній осі анізотропії	Графічно за експериментальними даними	[3]
$K_a = \overline{r_a} / \overline{r_b}$	$\overline{r_a}$, $\overline{r_b}$ – радіуси воронки вибуху в напрямках великої і малої осей відповідно	Експериментально	[12]



а

Рис. 1. Розподіл густини потоку енергії від центру вибуху за наявності системи тріщин в масиві, що підривається, з азимутом простягання: *а* – 270°; *б* – 360°

Як бачимо, формула (2) дає можливість визначити коефіцієнт анізотропії в залежності від наявної в масиві системи тріщин та її параметрів, проте в більшості випадків у масиві присутні дві та більше систем тріщин і необхідно враховувати одночасний вплив усіх цих систем на значення коефіцієнта анізотропії, розмір та форму воронки вибуху.

Таким чином, враховуючи [11], формулу (2) можна записати в такому вигляді:

$$K_a = \prod_{i=1}^{m} L_i^{\frac{l_y \cdot \left(|\cos\theta_i|_{\max} - |\cos\theta_i|_{\min}\right)}{d_{\text{сер}i}}}, \qquad (3)$$

де β_i – азимут простягання i-ї системи тріщин, $\beta_i - 180 \le \theta_i \le \beta_i$; L_i – коефіцієнт провідності енергії одиничної тріщини; l_y – довжина потоку; $d_{\text{сер}i}$ – середня нормальна відстань між тріщинами в i-й системі; θ_i – кут між напрямком потоку енергії і площиною тріщин i-ї системи.

За умови присутності в масиві порід, що підривається, двох згаданих вище систем тріщин розрахунок проводитиметься за формулою (3). Таким чином ми отримаємо коефіцієнт анізотропії, що дорівнює 1,25, а форма воронки вибуху прийме вигляд еліпсоподібної фігури. Розподіл густини потоку енергії від центру вибуху за наявності в масиві, що підривається, систем тріщин з азимутами простягання 270° та 360° зображений на рис. 2. На рис. 3 зображена залежність величини K_a від θ.

Нижче, як приклад, наведено результати принципового підходу до визначення параметрів розташування свердловинних зарядів та їх взаємозв’язок зі схемами підривання з урахуванням анізотропії порід.

Геометричні співвідношення елементів сітки свердловинних зарядів повинні визначатися такими умовами:

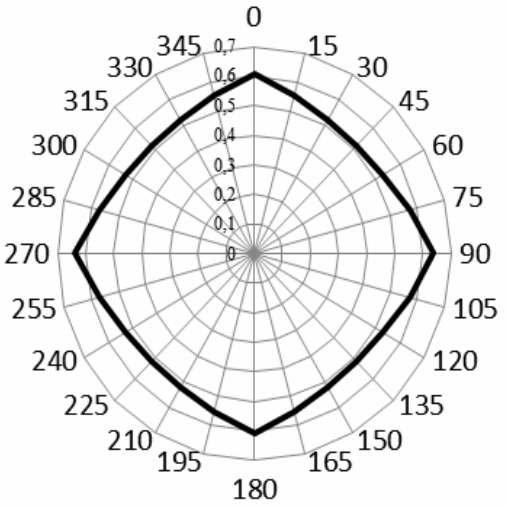


Рис. 2. Розподіл густини потоку енергії від центру вибуху за наявності в масиві, що підривається, систем тріщин з азимутами падіння 270° та 360°

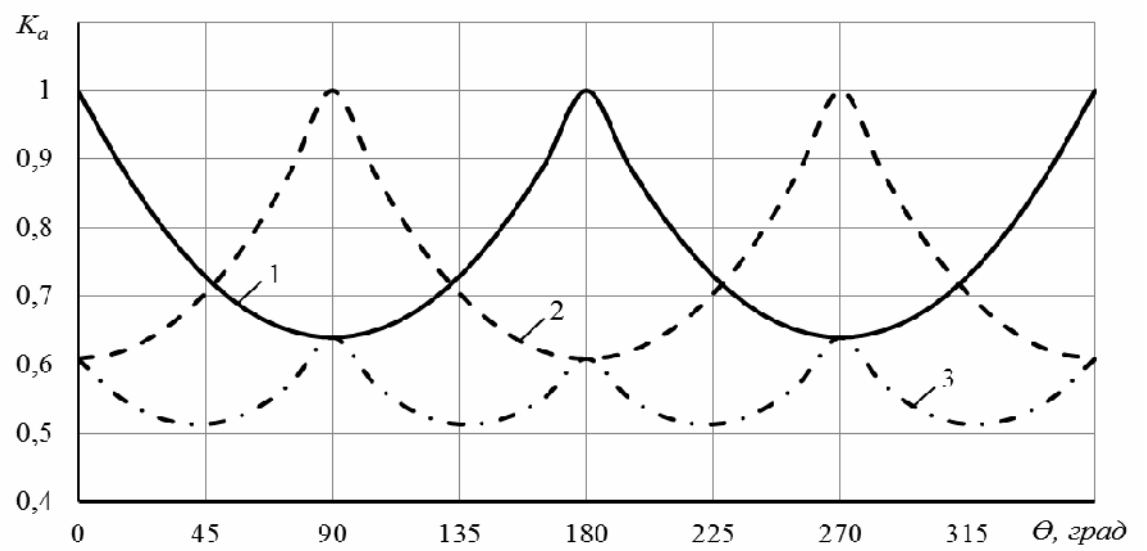


Рис. 3. Зміна величини K_a в залежності від θ: *1* – при β = 270°; *2* – 360°; *3* – суміщена при β = 270° і 360°

ряди свердловин повинні бути паралельні фронту гірничих робіт;

необхідно враховувати вплив анізотропних властивостей масиву на форму зони подрібнення (напрямок великої осі зони подрібнення потрібно прийняти таким, що збігається з простяганням основної системи тріщин);

заряди ВР треба розміщувати так, щоб забезпечити рівномірність розподілення полів напружень при їх вибуховій взаємодії.

В залежності від вказаних умов взаємне розташування свердловин може бути різним (рис. 4). Воно характеризується:

кутом орієнтування лінії поперечних рядів свердловин відносно фронту гірничих робіт (α_c);

відносною відстанню між свердловинами в різних напрямках (a' і b').

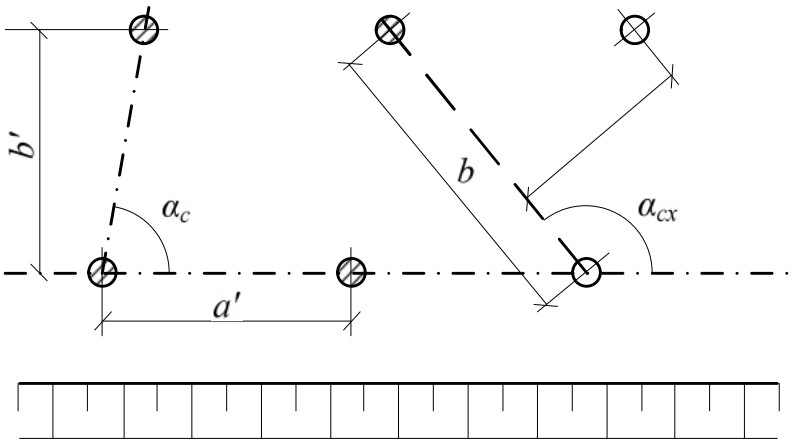


Рис. 4. Схема до визначення геометричних співвідношень елементів сітки свердловин: α_c – кут простягання поперечних рядів свердловин відносно фронту забоя

Для прийнятої сітки свердловин можна визначити кілька напрямків (α_{cx}) з'єднання зарядів (рис. 5), кожен з яких визначає фронт відбійки.

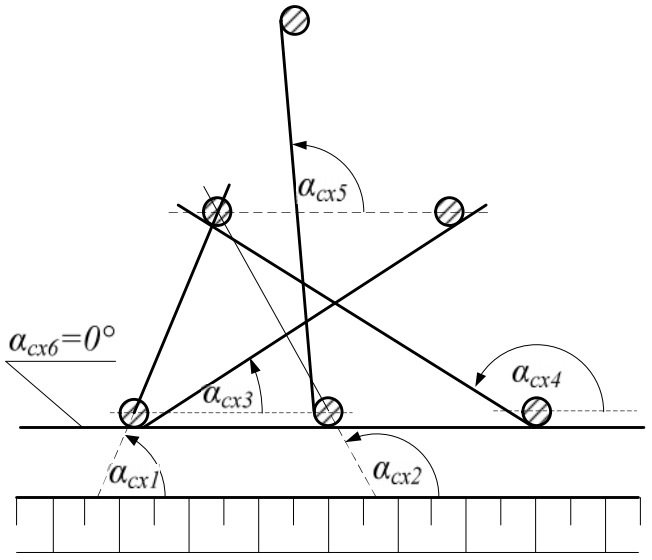
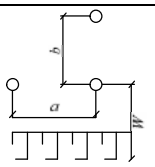
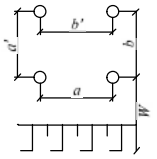
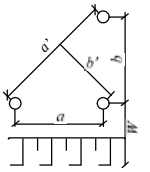
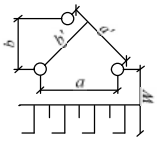
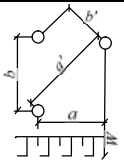


Рис. 5. Прийняті напрямки з'єднання зарядів для формування схем підривання: α_{cx_i} – кут до фронту гірничих робіт; індекси *1*, *2…6* – номери напрямків

Основні геометричні співвідношення елементів схеми з'єднання зарядів та сітки свердловин наведені в табл. 2.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку. Отримана в роботі формула для визначення коефіцієнта анізотропії дозволяє визначати його теоретично і враховувати в масиві, що підривається, параметри і показники структурно-текстурних особливостей. Дані, отримані за цією формулою, є основою для розрахунку параметрів сітки свердловин та її геометрії, при цьому орієнтування діаметра воронки подрібнення зумовлює напрямок фронту відбійки зарядів у схемі короткосповільненого підривання.

Таблиця 2. Принципові схеми розташування і підривання свердловинних зарядів з урахуванням анізотропії порід

Азимут простягання великої осі воронки подрібнення, град	Схема, сітка	Значення елементів
0		$a = 1{,}05W$; $b = 0{,}952\ W$; $\alpha_{cx} = 0°$.
90		$a' = 1{,}05W$; $b' = 0{,}952W$; $a = b'$; $b = a'$; $\alpha_{cx} = 90°$.
45		$a = b = W$; $a' = 1{,}42W$; $b' = 0{,}705W$; $\alpha_{cx} = 45°$.
60(0)		$a = 1{,}07W = a'$; $b = 0{,}925W = b'$; $\alpha_{cx} = 60°$ (0°).
30(90)		$a = 0{,}925W = b'$; $b = 1{,}07W = a'$; $\alpha_{cx} = 30°$ (90°).

Напрямком подальших досліджень є наукове обґрунтування способу проектування параметрів підривних робіт на основі використання фізико-механічних властивостей та структурних характеристик в процесі буріння блоків порід, що підриваються, за допомогою програмного забезпечення.

1. *Додис Я. М.* Проявление структурных уровней прочности массива горных пород в задаче управления надежностью его разрушения / Я. М. Додис, В. И. Нифадьев // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – № 6. – С. 102–107.

2. *Артыкбаева З. К.* Учет анизотропии массива горных пород при изучении его напряженного состояния / З. К. Артыкбаева, Ш. А. Мамбетов // Исследования по механике скальных пород. – 1974. – С. 59–75.

3. *Репин Н. Я.* Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов / Репин Н. Я.. – М.: Недра, 1978. – 256 с.

4. *Друкованый М. Ф.* Исследование анизотропности горных пород железорудных карьеров Кривбасса / М. Ф. Друкованый, Э. И. Ефремов, В. Н. Калиниченко [и др.] // Разработка рудных месторождений. – 1973. – № 15. – С. 56–59.

5. *Современные методы* комплексного определения физических свойств горных пород [И. А. Турчанинов, Р. В. Медведев, В. И. Панин]. – Л.: Недра, 1967. – 200 с.

6. *Скорикова М. Ф.* Упругие свойства горных пород Южной части Сахалина и их использование в интерпретации геофизических наблюдений / Скорикова М. Ф. – Л.: Наука, 1970. – 176 с.

7. *Силаева О. И.* О природе анизотропии упругих свойств горных пород / О. И. Силаева, Е. И. Баюк // Известия АН СССР. Серия «Физика Земли». – 1967. – № 12.

8. *Мячкин В. И.* Изучение распространения упругих волн ультразвуковой частоты на малых базах в горных породах в условиях естественного залегания / В. И. Мячкин, Р. П. Соловьева // Известия АН СССР. Серия «Геофизика». – 1960. – № 1.

9. *Лехницкий С. Г.* Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения / С. Г. Лехницкий // Тр. по вопросам горного давления, сдвижения горных пород и методики маркшейдерских работ. – 1962. – № 45. – С. 155–179.

10. *Исследования прочности* и деформируемости горных пород / [А. И. Берон, Е. С. Ватолин, М. И. Койфман и др.]; под ред. А. И. Берона. – М.: Наука, 1973. – 207 с.

11. *Воробьев В. Д.* Влияние параметров трещиноватости горного массива на характер распределения энергии взрыва цилиндрического заряда ВВ / В. Д. Воробьев, В. С. Прокопенко // Известия вузов. Горный журнал. – 1977. – № 3. – С. 33–37.

12. *Воробьев В. Д.* Взрывные работы в скальных породах / В. Д. Воробьев, В. В. Перегудов. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.