

В.В. Бешеvecь, аспір.  
Криворізький технічний університет

## ЛОКАЛІЗАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ ЗА РАХУНОК ВПЛИВУ РОЗДРІБНЕНОЇ ПОРОДИ НА ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ НАПРУЖЕНЬ

(Представлено д.т.н., проф. Жуковим С.О.)

*Розглянуто механізм поширення хвиль напружень при проходженні їх через границю розподілу середовищ з різними фізико-механічними властивостями. Наведена методика розрахунку напружень та енергії при перетинанні границі розподілу хвилями напружень.*

Значна частина гірських порід, які розроблюються буровибуховим способом на залізородних кар'єрах України, представлена міцними і дуже міцними різновидами, що характеризуються високою щільністю і великою акустичною жорсткістю.

Механізм передачі енергії пружних хвиль через тріщини, які заповнені цементуючим матеріалом з вираженими пружними властивостями, вивчений досить добре, однак в умовах діючих кар'єрів, як правило внаслідок частого вибухового струсу всі системи макротріщин мають завершений розвиток і представлені повітряними проміжками або заповнені здрібненим матеріалом. Поряд з цим зцементовані тріщини залежно від властивостей їхнього заповнювача не завжди володіють чітко виявленими властивостями, що екранують пружні хвилі, які поширюються у масиві порід.

Відповідно до відомих досліджень руйнування цих порід дією вибуху відбувається з переважною участю енергії хвиль напружень [1]. Напружений стан, що створюється у гірському масиві при проходженні хвилі стиску, призводить до виникнення радіальних і концентричних тріщин, що у результаті тиску газів розширюються і порушують суцільність будови масиву.

При проходженні через середовище хвилі напружень з криволінійним фронтом частки середовища переміщуються в напрямку нормалей до еквіпотенціальних поверхонь (рис. 1). При цьому в середовищі виникають розтяжки напруження у напрямках, дотичних до еквіпотенціальної поверхні. За рахунок цих тангенціальних напружень і відбувається утворення розривів, що призводить до руйнування середовища. Найбільші розтяжки напруження виникають у площинах найменшої кривизни еквіпотенціальних поверхонь; у будь-якому випадку немає умов для утворення тріщин у площинах, перпендикулярних до осі заряду [2].

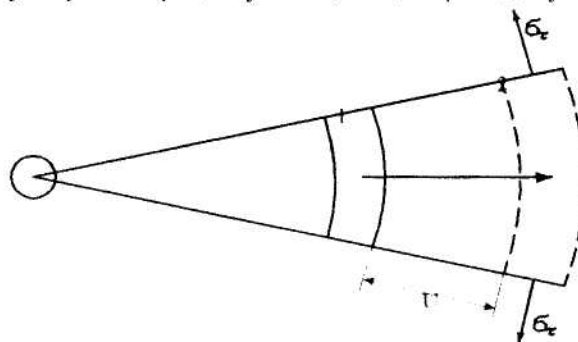


Рис. 1. Механізм утворення розтяжних напружень у середовищі при проходженні вибухової хвилі: 1 – положення до проходження хвилі; 2 – положення після проходження хвилі

У зв'язку з цим необхідно враховувати вплив фізико-механічних властивостей середовища зі зруйнованою гірською масою на механізм проходження пружних хвиль через таке середовище.

Таким чином, вивчення процесу поширення хвиль напружень через шар зруйнованої гірської породи та локалізація енергії вибуху за рахунок впливу роздрібненої породи на поширення хвиль напружень являє собою досить актуальне науково-практичне завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що при видобуванні міцних і високоміцних різновидів залізних руд науковцями переважно приділяють увагу вивченню механізму передачі енергії пружних хвиль вибуху тріщинуватим масивам, в яких природні тріщини заповнені цементуючим матеріалом з добре вираженими пружними властивостями. Разом з цим недостатньо уваги приділяється вивченню механізму проходження пружних хвиль через масив, який вже представлений частково зруйнованою гірською масою. Вивченню цієї проблеми і присвячена дана стаття.

Основна мета статті полягає в забезпеченні локалізації енергії вибуху за рахунок вивчення впливу роздрібненої породи на поширення хвиль напружень.

Хвилі напружень, за рахунок яких відбувається утворення тріщин і розривів, при проходженні через порушені вибухом ділянки на границі розподілу двох середовищ відбиваються і переломлюються (рис. 2). Відповідно до законів відбиття і переломлення акустичних хвиль відомі такі співвідношення:

$$\sin \alpha = \sin \alpha'; \tag{1}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_{p2}}{C_{p1}} = n; \tag{2}$$

де  $\alpha$  – кут падіння хвилі напружень;  $\alpha'$  – кут відбиття хвилі напружень;  $\beta$  – кут переломлення хвилі напружень;  $C_{p1}$  і  $C_{p2}$  – швидкості подовжніх хвиль відповідно в першому (з більшою акустичною жорсткістю) і в другому (з меншою акустичною жорсткістю) середовищах;  $n$  – показник переломлення.

Процес відбиття і переломлення хвиль напружень відбувається таким чином. Частина енергії падаючої хвилі напружень, спрямована до границі розподілу двох середовищ під кутом  $\alpha$ , відіб'ється від поверхні з іншими акустичними властивостями вихідної, під кутом  $\alpha'$ . Частина енергії буде передано в масив у вигляді пружних хвиль: подовжньої хвилі, що поширюється зі швидкістю  $C_p$  під кутом  $\beta_p$ , і поперечної, що поширюється зі швидкістю  $C_s$ , під кутом  $\beta_s$ . Раніше встановлено [3], що більшу величину має кут переломлення подовжньої хвилі  $\beta_p$ , і руйнівна дія відбувається саме за рахунок проходження подовжніх хвиль, тому при розрахунках використовують кут переломлення подовжніх хвиль  $\beta$ , який дорівнює  $\beta_p$ .

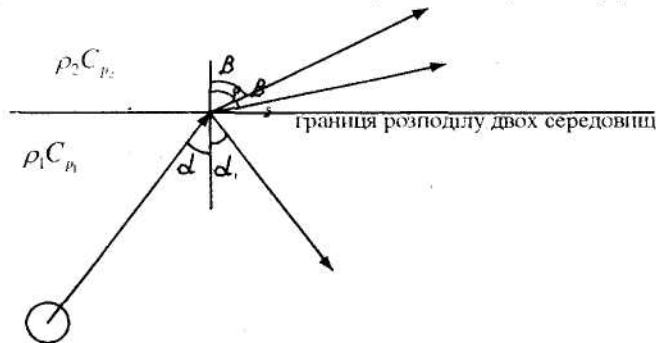


Рис. 2. Відбиття і переломлення хвилі напруження на границі розподілу двох середовищ

При переході хвилі напружень від середовища більш щільної до менш щільної на границі розподілу двох середовищ кут переломленої хвилі  $\beta$  буде більше кута падіння  $\alpha$  [4]. Для деяких визначених умов з відомими щільністю гірських порід –  $\rho$  і швидкістю проходження подовжньої хвилі –  $C_p$  існує граничне значення кута падіння  $\alpha_{cp}$ , при якому переломленої хвилі напруження на границі розподілу двох середовищ не буде, а хвиля цілком відіб'ється від границі. Для умов, при яких  $\alpha < \alpha_{cp}$ , можна визначити величину напружень і енергію переломленої хвилі. Величину напружень переломленої хвилі  $\sigma_{пер}$  можна визначити з виразу:

$$\sigma_{пер} = \sigma_0 \frac{2\rho_2 C_{p2}}{\rho_1 C_{p1} + \rho_2 C_{p2}}; \tag{3}$$

де  $\sigma_0$  – напруження на фронті хвилі, що падає на границю розподілу двох середовищ.

Перетворимо вираз (3):

$$\frac{1}{\sigma_{пер}} = \frac{1}{\sigma_0} \frac{\rho_1 C_{p1} + \rho_2 C_{p2}}{2\rho_2 C_{p2}} = \frac{1}{2\sigma_0} \left( \frac{\rho_1 C_{p1}}{\rho_2 C_{p2}} + 1 \right).$$

Використовуючи відоме співвідношення  $u_1 = u_2 K_p$ , де  $K_p$  – коефіцієнт руйнування, можна записати:

$$\frac{1}{\sigma_{пер}} = \frac{1}{2\sigma_0} \left( \frac{\rho_2 K_p C_{p1}}{\rho_1 C_{p2}} + 1 \right) = \frac{1}{2\sigma_0} \left( K_p \frac{C_{p1}}{C_{p2}} + 1 \right).$$

Одержуємо:

$$\sigma_{пер} = \sigma_0 \frac{2}{K_p \frac{C_{p1}}{C_{p2}} + 1}. \tag{4}$$

Підставивши співвідношення  $\frac{C_{p2}}{C_{p1}} = n$ , формула (4) отримує такий вигляд:

$$\sigma_{пер} = \sigma_0 \frac{2}{K_p \frac{1}{n} + 1} = \frac{2\sigma_0}{\frac{K_p}{n} + 1} = 2\sigma_0 \frac{n}{K_p + n}. \tag{4, а}$$

Кількість переданої енергії в  $W_{пер}$  можна обчислити з виразу:

$$W_{пер} = W_0 \frac{4\rho_1 C_{p1} \rho_2 C_{p2}}{(\rho_1 C_{p1} + \rho_2 C_{p2})^2}, \tag{5}$$

де  $W_0$  – кількість енергії на фронті хвилі, що падає на границю розподілу двох середовищ.

Виконуючи аналогічні перетворення, маємо:

$$\begin{aligned} \frac{1}{W_{пер}} &= \frac{1}{W_0} \frac{(\rho_1 C_{p1})^2 + 2\rho_1 C_{p1} \rho_2 C_{p2} + (\rho_2 C_{p2})^2}{4\rho_1 C_{p1} \rho_2 C_{p2}}; \\ \frac{1}{W_{пер}} &= \frac{1}{W_0} \left( \frac{\rho_1 C_{p1}}{4\rho_2 C_{p2}} + \frac{1}{2} + \frac{\rho_2 C_{p2}}{4\rho_1 C_{p1}} \right); \\ \frac{1}{W_{пер}} &= \frac{1}{W_0} \left( \frac{K_p}{4} \frac{C_{p1}}{C_{p2}} + \frac{1}{2} + \frac{1}{K_p} \frac{1}{4} \frac{C_{p2}}{C_{p1}} \right); \\ W_{пер} &= \frac{4W_0}{K_p \frac{C_{p1}}{C_{p2}} + 2 + \frac{1}{K_p} \frac{C_{p2}}{C_{p1}}}. \end{aligned}$$

Замінивши відношення  $\frac{C_{p2}}{C_{p1}}$  на коефіцієнт  $n$  (показник переломлення), можна записати:

$$W_{пер} = \frac{4W_0}{2 + \frac{K_p}{n} + \frac{n}{K_p}} = \frac{4W_0}{\left(\frac{K_p}{n} + n\right)^2} = 4W_0 \frac{nK_p}{(K_p + n)^2}. \tag{6}$$

Аналіз отриманих виразів (4, а) і (6) показує, що величини напружень і енергії, пройдених у середовище, що мають відмінну від вихідної щільність ( $\rho$ ) і швидкість проходження подовжніх хвиль ( $C_p$ ), залежать і можуть бути визначені за допомогою коефіцієнтів  $K_p$  (коефіцієнта руйнування) і  $n$  (показника переломлення). Визначивши всі ці параметри, можна обчислити величину напруження хвилі й енергії, що передана в масив через шар зруйнованої породи, а це, у свою чергу, впливає на якість вибухової підготовки гірської маси.

При падінні фронту пружної хвилі на шар зруйнованої породи в масиві гірських порід (рис. 3) відбиття і переломлення хвиль відбувається у такій послідовності.

Хвиля напружень від дії вибуху подовженого заряду ВР, що падає на границю розподілу двох середовищ під кутом  $\alpha$ , відбивається від поверхні розподілу під кутом  $\alpha'$  і переломлюється під деяким кутом  $\beta$ . Розглянемо окремі випадки проходження хвиль напружень через шар зруйнованої гірської маси. При падінні хвилі на поверхню розподілу двох середовищ під прямим кутом частина енергії хвилі відіб'ється під тим же кутом ( $90^\circ$ ), частина буде поширюватись в масиві під кутом  $\beta$ , що буде дорівнювати куту падіння. При подальшому проходженні хвилі в середовище, що не було порушене дією вибуху, частина хвилі відіб'ється від поверхні, а частина напружень, що залишилися, перейде в масив. При падінні хвиль напружень під кутом  $u$ , що має значення в межах  $\alpha_p < \alpha < 90^\circ$ , процеси поширення хвиль

напружень відбуваються таким чином. Падавальна хвиля відіб'ється під кутом  $\alpha$ , який дорівнює куту падіння хвиль напружень  $u$ , і переломиться під кутом  $u$ , величину якого можна визначити з виразу (1). При проходженні через зруйноване середовище переломлена хвиля на границі розподілу буде падати під кутом  $\beta'$ , знову відіб'ється від поверхні під кутом  $\beta''$  і переломиться під деяким кутом  $\alpha''$ , що – за ідеальних умов повинна дорівнювати куту падіння  $\alpha$ . У третьому випадку, коли кут падіння хвиль  $\alpha$  має значення в межах  $\alpha < \alpha_{cr}$ , майже вся енергія хвиль напружень буде відбита, і переломлення хвиль спостерігатися не буде. Тут має місце повне відбиття хвиль напружень і проходження поверхневої хвилі по границі розподілу двох середовищ.

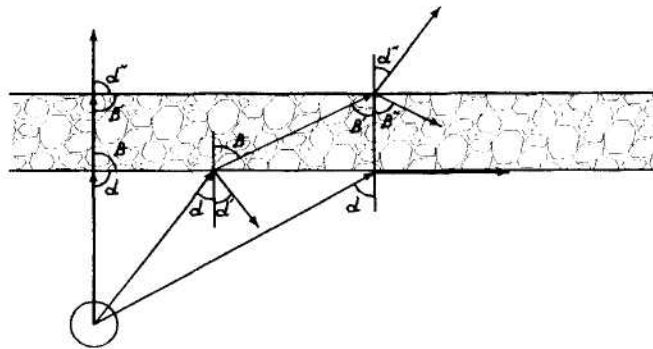


Рис. 3. Перехід хвилі напруження з одного середовища в інше при підірванні подовженого заряду ВР

Таким чином, з аналізу отриманих формул (4, а) і (6) та вивченого процесу поширення хвиль напружень можна зробити такі висновки:

1. Напруження, передані через шар зруйнованої гірської породи, які за своїми акустичними показниками різко відрізняються від суцільного масиву, залежать від властивостей вихідного масиву гірських порід і порушеного вибухом шару порід, а саме від коефіцієнта руйнування і коефіцієнта переломлення, що визначається із співвідношення (2).

2. Шар зруйнованої гірської маси є екраном для хвиль напружень, що поглинає і відбиває їх енергію. При виборі схеми комутації свердловинних зарядів необхідно застосовувати діагональні схеми, що забезпечують формування фронту хвиль напружень під якомога більшим кутом до зруйнованого середовища (рис. 2), використовувати посвердловинне уповільнення при проведенні масових вибухів для зниження як сейсмічної, так і руйнівної дії вибуху.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 199 с.
2. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1982. – 334 с.
4. Миндели Э.О. Исследование волн напряжений при взрыве в горных породах. – М.: Недра, 1978. – 224 с.

БЕШЕВЕЦЬ Віталій Володимирович – аспірант кафедри маркшейдерської справи Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

– розробка ефективних технологій вибухових робіт у кар'єрах.

Подано 21.04.2003