

**АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ
ВИБУХОВОГО ВПЛИВУ НА ГІРСЬКІ ПОРОДИ**

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

Обґрунтовано необхідність досліджень впливу вибухової дії на руйнування гірських порід для керування зміною їх міцнісних властивостей. Розглянуто аналітичні вирази, котрі є основою формування нерівномірних динамічних навантажень, що забезпечує збільшення об'єму природної мікротріщинуватості, зародження й розвиток нових систем мікротріщин і, у кінцевому підсумку, зниження міцності гірських порід.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Аналіз сучасних уявлень про керування процесом руйнування гірських порід вибухом показує, що, незважаючи на значні успіхи в цій області, на даний час немає єдиної точки зору й практично перевірених методів розрахунку для ослаблення гірського масиву енергією вибуху з метою підвищення ефективності наступної рудопереробки. Вирішення проблеми покращення показників рудопідготовки та збагачення корисних копалин досягається за умови використання спрямованої вибухової дії на властивості руди на стадії підготовки сировини до дроблення та здрібнення. Основною метою при цьому є підвищення ефективності розкриття зерен. Дана мета може бути досягнута в тому випадку, якщо в результаті вибухового впливу буде забезпечено інтенсивний розвиток мікротріщин.

Аналіз досліджень та публікацій. Експериментально встановлено, що при впливі високого тиску навколо циліндричної порожнини в ближній зоні вибуху, крім системи великих тріщин, що розділяють гірську породу, утворюється додаткова система мікротріщин, що послабляє ці шматки або зону навколо них [1, 2, 3].

Густота дислокацій мікротріщин, в основному, залежить від фізико-механічних властивостей породи й характеристик вибухових речовин [4]. Додаткова система мікротріщин не тільки знижує енергоємність подальшої переробки сировини, але й підвищує якість продукції, що переробляється.

Теоретичною передумовою ефективності методів інтенсифікації технологічних процесів ослаблення залізистих кварцитів за рахунок використання енергії ВР є аналіз критерію зародження мікротріщин на дефектах другого порядку, які впливають на цей процес [5, 6].

При вибуху заряду вибухової речовини в зарядній камері (свердловині) виникає високий тиск продуктів детонації (близько 10 Гпа) [7]. При цьому в навколишньому середовищі збуджується ударна хвиля. Незважаючи на те, що розміри області існування ударної хвилі досить малі, висока амплітуда тиску й надзвичайно швидка передача енергії вибуху в середовищі приводить до більших втрат енергії вибуху в ближній зоні на незворотні пластичні деформації й перездрібнювання породи. Причому, чим більше інтенсивність ударних хвиль, тим сильніша дисипація енергії на початковій стадії вибуху.

Руйнування гірського масиву відбувається в основному за рахунок роздавлювання середовища квазистатичним тиском у свердловині тому, що швидкість розвитку тріщин значно менше швидкості хвилі стиску. Основна частка енергії вибуху витрачається на незворотне деформування й руйнування твердого середовища на фронті хвилі й усередині зони, охопленою хвилею поблизу зарядної порожнини [8].

Таким чином, у навколишньому гірському масиві під дією вибуху ВР виникають дві істотно відмінні області руйнування. Поблизу вибуху спостерігається зона інтенсивного руйнування гірських порід. Аналіз напрямку тріщин показує, що в цій зоні переважними механізмами руйнування є роздавлювання й зрушення. За межами цієї зони розвиваються радіальні тріщини розриву. Вони спостерігаються при вибухах як у міцних, так і в слабких породах. Проведені дослідження [9,10] показують, що формування зони пластичних деформацій відбувається в області, де максимальні напруги порівняні або перевищують динамічну межу міцності гірських порід при одноосьовому стиску. На межі радіальних тріщин радіальна напруга значно знижується, однак вона ще може викликати радіальний зсув породи, при якому напруги можуть стати розтягуючими, відповідними динамічній межі міцності гірських порід на розрив.

Постановка завдання. Як видно з наведеного вище, формування зон руйнування гірських порід під вибуховим впливом відбувається різними способами. Дослідження впливу вибухової дії на руйнування та ослаблення порід мають за мету створення сприятливих передумов для керування зміною міцнісних властивостей порід у масиві або окремії його частини. Це дозволить зменшити загальні витрати на руйнування порід вибухом та подальшу переробку сировини.

Викладення матеріалу. Розглянемо деякі основні теорії міцності [11,12]. Теорія Галілея (теорія найбільшої нормальної напруги) надалі розвинена Ляме, Клебшем, Ренкином. Руйнування не відбувається в тому випадку, якщо

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < \sigma_c,$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруги;

σ_c – часовий опір.

Руйнування гірських порід настає в тому випадку, коли найбільша головна напруга досягає певної критичної величини, при цьому не має значення, якими за своєю абсолютною величиною є дві менші головні напруги.

Таким чином, коли всі три головні напруги не дорівнюють нулю, то за цією теорією необхідно враховувати величину лише найбільшої розтягуючої або стискаючої напруги.

Граничною поверхнею напруг, що представляє цю теорію, є куб, гранями якого служать шість площин $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, симетрично розташованих відносно початку прямокутної системи координат, і паралельних координатним площинам.

Точки на поверхні цього куба відповідають рівноміцнісним граничним напруженим станам. Точки, що перебувають усередині області, обмежені цією поверхнею, визначають напружені стани з надлишком міцності. Точки, розташовані поза областю, визначають напружені стани з недостатньою міцністю (матеріал повинен руйнуватися).

Теорія Маріотта (теорія найбільших деформацій), розвинена Грасгофом, Понселе й Сен-Венаном. Руйнування не відбувається, якщо

$$\max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) < \varepsilon_e,$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації;

ε_e – гранично припустима деформація.

Головні лінійні деформації визначаються за формулами:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \left(\frac{\sigma_2}{E} + \frac{\sigma_3}{E} \right); \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \mu \left(\frac{\sigma_1}{E} + \frac{\sigma_3}{E} \right); \quad \varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \mu \left(\frac{\sigma_2}{E} + \frac{\sigma_1}{E} \right).$$

Залежно від співвідношення величин головних напруг одна із цих деформацій буде чисельно найбільшою. Нехай це буде ε_1 . Тоді

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)].$$

У випадку ж лінійного напруженого стану, знаючи величину гранично припустимої напруги, для найбільших відносних деформацій допускаємо величину

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E},$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга.

Як і теорія Галілея, теорія Маріотта застосовна в основному в тих випадках, коли руйнування гірських порід походить від розтягання.

Теорія Кулона (теорія максимального дотичного напруження), розвинена Гестом, Тріску й ін.

Руйнування не відбувається, якщо

$$\max(\tau_n - |\sigma_n| \operatorname{tg} \rho) < K,$$

де τ_n, σ_n – дотичне й нормальне зусилля на площадці з вектором нормалі \bar{n} , максимум є серед всіх можливих орієнтувань вектора в даній точці;

K – молекулярне зчеплення;

ρ – кут внутрішнього тертя.

За цією теорією руйнування відбувається, коли напруга досягає граничного значення.

Поверхня плинності за теорією максимального дотичного напруження в системі координат $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ являє собою пряму шестигранну призму. Поперечними перерізами призми є правильні шестикутники.

Теорія Губер-Мізеса-Генкі (теорія постійної пружної енергії формозміни або теорія постійного октаедричного дотичного напруження). Руйнування не відбувається, якщо

$$\max \left[U_\phi - \frac{\sigma_e^2}{6G} \right] < 0,$$

де U_ϕ – енергія пружної деформації формозміни;
 G – модуль зрушення, $G = E/[2(1 + \mu)]$.

Енергія пружної деформації формозміни являє собою повну енергію одиниці об'єму за винятком енергії об'ємного розширення, тобто

$$U_\phi = \frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{12G},$$

або

$$U_\phi = \frac{1 + \mu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1].$$

Величина потенційної енергії, що допускається, зміни форми для випадку простого розтягання дорівнює:

$$U_\phi = \frac{1 + \mu}{3E} [\sigma]^2.$$

Умова міцності за енергетичною теорією має вигляд:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} \leq [\sigma],$$

або

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma],$$

а розрахункова (наведена) напруга буде дорівнювати:

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}.$$

За цією теорією руйнування відбувається, коли напруга досягає граничного значення.

Теорія пластичності [13]. Особливістю співвідношень теорії пластичності є їх неголономний (неінтегровальний) характер. На відміну від пружного, пластичний стан матеріалу залежить не тільки від остаточних величин навантажень, але й від характеру навантаження тіла.

Плоске завдання теорії ідеальної пластичності має наступну особливість: три рівняння – два рівняння рівноваги й рівняння умови пластичності – щодо трьох компонентів напруги визначають замкнуту систему рівнянь.

Якщо для плоскої деформації з умови $\varepsilon_z = 0$ треба

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y),$$

то третій інваріант девіатора напруг дорівнює нулю й умова пластичності зводиться до виду:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau + y = 4K^2,$$

де ε_z – деформація уздовж осі z ;

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – відповідно компоненти нормальних і дотичних напружень по осі x і y .

Значення параметра K за теорією найбільших дотичних напружень дорівнює:

$$K = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}};$$

за теорією октаедричних дотичних напружень:

$$K = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}},$$

де σ_s – межа плинності гірських порід при однобічному розтяганні.

Рівняння, що визначає напруги в пластичній області, можна представити у вигляді:

$$\left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} - \frac{\partial U_1}{\partial y^2} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial U_1}{\partial x \partial y} \right) = 4K^2,$$

де U_1 – бігармонічна функція напруг у пластичній зоні.

На контурі пластичної й пружної зон повинна задовольнятися умова:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2}; \quad \frac{\partial^2 U_1}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial x \partial y}.$$

Висновки. Наведені вище аналітичні вирази є основою для розвитку уявлень про вибуховий вплив на гірські породи. Нерівномірні динамічні навантаження викликають збільшення об'єму природної мікротріщинуватості, зародження й розвиток нової системи мікротріщин, незворотну зміну міцнісних характеристик породи. Найбільше зниження міцності в результаті нерівномірного динамічного стиску

спостерігається в міцних породах з яскраво вираженим крихким руйнуванням. При цьому створюються сприятливі передумови для керування зміною міцнісних властивостей порід у масиві або окремих його частині, що повинно використовуватися при підготовці гірничої маси до виїмки в залізородних кар'єрах для поліпшення показників подальшої переробки залізородної сировини на рудозбагачувальній фабриці.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Михалюк А.В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1980. – 154 с.
2. *Ковтун И.Н., Федоренко П.И.* Внедрение и исследование рациональных параметров взрывной отбойки горной массы. – Киев: О-во "Знание", 1979. – 36 с.
3. *Лукишов Б.Г., Родионов В.Н., Сизов И.А.* Исследование дробящего действия взрыва на модели // Взрывное дело. – М.: Недра, 1976. – Вып. 76/33. – С. 7–14.
4. *Михалюк А.В., Белинский И.В.* Напряженно-деформированное состояние породных массивов при внутренних взрывах // Взрывное дело. – М.: Недра, 1976. – Вып. 76/33. – С. 15–24.
5. *Ревнивцев В.И., Костин И.М., Яшин В.П.* Основные направления развития подготовки руд к обогащению // Цветные металлы. – 1984. – № 5. – С. 96–100.
6. Влияние интенсивных взрывных нагрузок на технологические свойства железистых кварцитов / Ю.С. Мец, В.Я. Шварцер, П.А. Гонтаренко, Т.Н. Гапич // Обогащение руд. – 1981. – № 1. – С. 5–8.
7. *Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н.* Ударные и детонационные волны. Методы исследования. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 256 с.
8. *Кочетков А.П.* Механизм разупрочнения горного массива при распространении взрывных волн // Изв. вузов. Горный журнал. – 1987. – № 4. – С. 63–66.
9. Деформационные свойства горных пород при высоких давлениях и температурах / Шрейнер Л.А., Байдюк В.В., Павлова Н.Н. и др. – М.: Недра, 1988. – 158 с.
10. *Ставрогин А.Н., Повзнер Е.Д.* Физико-механические свойства горных пород при динамических нагрузках в условиях сложных напряженных состояний // Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах. – Киев: Наук. думка, 1971. – С. 204–206.
11. *Савин Г.Н.* Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 387 с.
12. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
13. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.

ПЕРЕГУДОВ Володимир Володимирович – магістр з гірництва, аспірант кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького технічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво;
- буропідривні роботи при відкритій розробці родовищ корисних копалин.

Подано 19.01.2009

Перебудов В.В. Аналіз теоретичних передумов вибухового впливу на гірські породи
Перебудов В.В. Анализ теоретических предпосылок взрывного воздействия на горные породы
Perehudov V.V. The Analysis of Theoretical Pre-conditions of Explosive Influence on Rock Massive

УДК 622.235

Анализ теоретических предпосылок взрывного воздействия на горные породы / В.В. Перебудов

Обоснована необходимость исследований влияния взрывного воздействия на разрушение горных пород для управления изменением их прочностных свойств. Рассмотрены аналитические выражения, которые являются основой формирования неравномерных динамических нагрузок, обеспечивающих увеличение объема естественной микротрещиноватости, зарождение и развитие новых систем микротрещин, и в конечном итоге, снижение прочности горных пород.

УДК 622.235

The Analysis of Theoretical Pre-conditions of Explosive Influence on Rock Massive / V.V. Perehudov

Necessity of researches of the explosive action influence on destruction of rocks to manage the change of their properties is grounded. Analytical expressions are, which are basis for forming of the dynamic loadings, which provides the increase of natural microcracks volume, origins and development of the new systems of microcracks, are considered, and in an eventual result, decline of durability of rock mass.