

УДК 622.235

Лисенко М.А., студ. гр.ОС-41м, Фролов О.О., д.т.н., проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ВИБУХУ ДЛЯ РУЙНУВАННЯ ТРІЩИНУВАТИХ СКЕЛЬНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Згідно з основними положеннями механіки руйнування процес руйнування матеріалу належить до одного з видів порушення міцності, які можуть відбуватися в результаті: 1) надмірної (пружної або пластичної) деформації; 2) втрати стійкості; 3) безпосередньо руйнування [1].

Руйнування гірських порід вибухом належить до безпосереднього руйнування і може бути частковим або повним. При частковому руйнуванні в тілі виникають пошкодження у вигляді окремих тріщин або розподілених по об'єму дефектів, які призводять до зміни механічних властивостей матеріалу. При повному руйнуванні відбувається поділ тіла на частини.

За видами руйнування може бути пластичним, крихким, сталим, корозійним та руйнуванням при повзучості. При пластичному руйнуванні відбувається порушення цілісності при значній пластичній деформації, яка протікає по всьому (або майже по всьому) об'єму тіла. Крихке руйнування відбувається в результаті поширення магістральної тріщини при пластичній деформації, зосередженій в малій області дії механізму руйнування. Ідеально крихке (пружне) руйнування відбувається без пластичної деформації, причому з уламків можна знову скласти тіло колишніх розмірів. Квазікрихке руйнування передбачає наявність пластичної зони перед краєм тріщини у поверхні тріщини (останній, і значно більший за величиною, об'єм тіла знаходиться в пружному стані). Стале руйнування спостерігається при циклічному (повторному) навантаженні в результаті накопичення незворотних пошкоджень [2].

На підставі вищенаведеного процес руйнування гірських порід вибухом можна віднести до квазікрихкого руйнування, що відбувається під дією ударних навантажень. Масив гірських порід, який підлягає такому руйнуванню, є недосконалим з точки зору механіки суцільного середовища, оскільки в ньому існують, як мінімум, макро- та мікротріщини, і, як максимум, – система видимих тріщин, яка характеризується показником «питомої тріщинуватості». Тому при побудові моделей та розв'язанні задач про руйнування тріщинуватих гірських порід необхідно враховувати наявність початкових тріщин. А сам процес руйнування повинен описуватися обраними критеріями міцності.

Оскільки процес руйнування складається з двох стадій – зародження тріщини та її поширення, причому кожна з цих стадій описується своїми законами, то серед критеріїв міцності 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.

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. Ірвін також показав еквівалентність цих двох критеріїв. Таким чином, маємо два еквівалентні формулювання критерію руйнування скельних гірських порід [3]. Тріщина дістає можливість поширення у тому випадку, коли:

- 1) інтенсивність енергії G , що звільняється, досягає критичної величини

$$G_c = \delta\Gamma/\delta S = \text{const}; \quad (1)$$

- 2) коефіцієнт інтенсивності напруження K досягає критичної величини

$$K_c = \text{const}, \quad (2)$$

де G_c – питома (ефективна) робота руйнування; K_c – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень.

Отже, енергетичний критерій початку зростання тріщини має вигляд

$$G = G_c. \quad (3)$$

Силовий критерій

$$K = K_c. \quad (4)$$

Відповідно до концепції Гріффітса-Орована-Ірвіна виразимо критичне значення напруження в масиві гірських порід. Припустимо, що існує необмежена площа, яка послаблена одиночною прямолінійною тріщиною з координатами $y = 0$, $|x| \leq l$ (рис. 1). Площа розтягується рівномірним напруженням σ в напрямку осі y перпендикулярно до лінії тріщини. Розтягнення в цьому випадку не впливає на умови поширення тріщини в гірській породі вздовж осі x у напрямку лінії тріщини. Встановимо, при якому значенні зовнішнього напруження σ тріщина даної довжини $2l$ стане нестійкою, тобто почне поширюватися в масиві при постійному зовнішньому навантаженні.

Потенційна енергія деформації гірської породи без тріщини більше за потенційну енергію матеріалу з тріщиною, оскільки навколо тріщини існує зона зменшених напружень, тому що на вільних поверхнях тріщини напруження дорівнюють нулю.

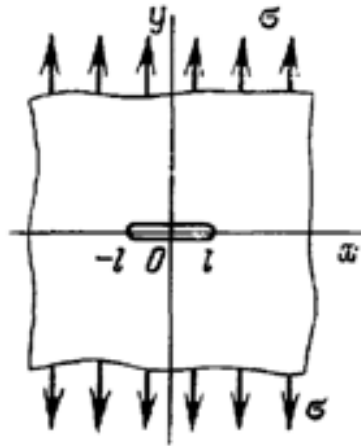


Рис. 1. Схема матеріалу з одиночною тріщиною

Припустимо, що точки прикладання зовнішніх сил не зміщуються зі зростанням тріщини, тобто робота зовнішніх сил дорівнює нулю. В результаті появи тріщини потенційна енергія матеріалу зменшується на величину [3]

$$\Delta W = W_0 - W = \frac{\pi \sigma_{\text{кр}}^2 l^2}{E}, \quad (5)$$

де W_0 – потенційна енергія пружної деформації пластини без тріщини; W – потенційна пружна енергія пластини з тріщиною; $\sigma_{\text{кр}}$ – критичне напруження; E – модуль пружності.

Звільнена пружна енергія ΔW надходить до вершини тріщини, де виникла концентрація напружень, і там витрачається на руйнування гірської породи (на утворення нової поверхні тіла). Якщо вважати питому роботу руйнування на одиницю площі нової поверхні тіла постійною $\gamma = \text{const}$, то робота, яка витрачається на утворення тріщини довжиною $2l$, дорівнює

$$\Gamma = 4\gamma l. \quad (6)$$

Припустимо, що довжина тріщини збільшується на величину Δl , то енергія, яка вивільнилася буде приблизно дорівнювати

$$\Delta W = \frac{2\pi \sigma_{\text{кр}}^2 l \Delta l}{E}. \quad (7)$$

Водночас на збільшення довжини тріщини в матеріалі повинна бути витрачена енергія $\Delta \Gamma$:

$$\Delta \Gamma = 4\gamma \Delta l. \quad (8)$$

Таким чином, умова настання критичного стану буде мати вигляд:

$$\Delta W = \Delta G. \quad (9)$$

З урахуванням (7) та (8) умова Гриффітса буде записана як

$$\frac{2\pi\sigma_{кр}^2 l \Delta l}{E} = 4\gamma \Delta l. \quad (10)$$

З (10) отримаємо формулу Гриффітса для визначення критичного напруження при плоскому напруженому стані для тріщин відриву[4]

$$\sigma_{кр}^2 = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} \quad (11)$$

Якщо зважити на те, що інтенсивність пружної енергії G , що звільняється, можна прийняти за подвійне значення інтенсивності поверхневої енергії γ , що витрачається на руйнування масиву гірських порід, а саме $G = 2\gamma$, то критичне значення напруження при плоскому напруженому стані для тріщин відриву, з урахуванням того, що

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (12)$$

де K – коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщин відриву, та формули (4), можна записати [5]:

$$\sigma_{кр} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi l}}. \quad (13)$$

Вищенаведені дослідження відображають основні положення квазістатичної механіки руйнування, яка визначає граничний стан стійкості магістральної тріщини в гірській породі. Руйнування ж гірських порід вибухом відбувається під дією ударних навантажень, які характерні для квазідинамічної механіки руйнування. Тому однією з основних задач динамічної механіки руйнування є встановлення залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень від часу і швидкості поширення тріщин.

Таким чином, проведений аналіз досліджень в рамках квазістатичної механіки руйнування гірських порід вибухом дозволили встановити, що поля напружень, які формуються у вершині тріщини, описуються за допомогою коефіцієнтів інтенсивності напружень, а критерії рівноваги, початку, зупинки і розповсюдження тріщин описуються рівняннями енергетичного балансу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Морозов Е. М. Введение в механику развития трещин / Е. М. Морозов. – М.: МИФИ, 1977. – 91с.
2. Работнов Ю.Н. Механика твердого тела и пути ее развития / Ю.Н. Работнов // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1960, № 2.
3. Партон В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
4. Фролов О. О. Використання коефіцієнту інтенсивності напружень для оцінки тріщинуватості гірського масиву при руйнуванні його вибухом свердловинних зарядів / О. О. Фролов // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць. –2010. – № 2. – С. 247–252.
5. Фролов О. О. Визначення об'єму руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом свердловинних зарядів з використанням коефіцієнту інтенсивності напружень // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 20. – С. 82-87.