

С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

С.В. КАЛЬЧУК, канд. техн. наук, доц., Житомирський державний технологічний університет

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПАСИРУВАННЯ БЛОКІВ КАМЕНЮ ШПУРОВИМИ МЕТОДАМИ В СУБДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕННЯ

Проаналізовано стан, досягнення та недоліки в теоретичному обґрунтуванні технології, яка забезпечує виробництво високоякісної продукції з гірських порід високої міцності. Визначено конкретні задачі подальшого розвитку теоретичних основ руйнування кристалічного середовища, представленого лицювальним каменем. Досліджено фізико-механічні параметри кам'яних зразків та вплив їх властивостей на процеси утворення і розростання мікро- і макротріщин в монолітному мінеральному середовищі. Описано суть теоретичного підходу щодо вирішення поставленої задачі та методи експериментальної перевірки адекватності вихідних припущень і покладеної в основу дослідження ідеї. Розглянуто аналітичну модель процесу пасирування блоків природного каменю. Обґрунтовано допустимі геометричні параметри процесу, за якого забезпечується керований відкол каменю заданої якості. Розглянуто математичний апарат створення моделі субдинамічного руйнування кристалічних порід на основі енергетичного підходу. Визначено напрями подальших досліджень означених процесів.

Ключові слова: природний камінь, кристалічне середовище, блоки, тріщини, розколювання, напруження, пасирування, математичне моделювання.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Пасирування являє собою один з різновидів відокремлення блочного каменю при його видобуванні шпуровими способами. У технологічному відношенні він реалізовується як процес попереднього буріння стрічки шпурів верстатами стрічкового буріння з подальшим розколюванням механічними клинами або гідроклинами біля устя шпурів. Цей спосіб порівняно з алмазноканатним різанням є значно дешевшим, однак не позбавленим недоліків. При пасируванні виконують рівний відкол за заданою площиною, відокремлюючи, як правило, частину каменю нерівної форми. Проблема ефективного застосування шпурового методу відколу при пасируванні полягає саме у неконтрольованому процесі розвитку та поширенні магістральних тріщин від місця прикладення навантажень (устя шпурів) та високій ймовірності діагонального сколювання в найтоншій частині блоку. У результаті неконтрольованої швидкості росту тріщини відриву досить часто мають місце діагональні сколи частини блоку – в формі сходинок (рис. 1). У зв'язку з цим виникає потреба в розвитку більш ефективних технологій, зважаючи на вартість даної продукції.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанням руйнування кристалічних гірських порід присвячено багато наукових праць [1-6], в тому числі й природного каменю [7]. Дослідженням процесів видобутку та пасирування блоків на кар'єрах займалися такі вчені, як М.Т. Бака [8-10], Ю.Г. Карасьов [10-12], К.К. Ткачук [13], О.Б. Синельников [14] й ін. [15-17]. Існуючі інженерні формули розрахунків пасирування блоків каменю засновані на емпіричних залежностях процесів відколу при відокремленні моноліту від масиву та розділенні його на товарні блоки та не відображають механізму протікання процесу відокремлення в часі. Складність процесу пасирування блоків каменю полягає в тому, що відокремленню підлягає відносно тонкий шар каменю який у багатьох випадках досить складно рівно відокремити. Це обмеження потребує розкриття механізму росту тріщини в субдинамічному режимі руйнування по наміченій лінії відколу та врахування висоти блоку при якій забезпечується якісний відкол та мінімальна товщина шару відокремлення. Актуальність даного дослідження обумовлена поширеністю даної операції на усіх кар'єрах блочно-го каменю, а такою майже повною відсутністю досліджень цього процесу.



Рис. 1. Результат неконтрольованої швидкості розповсюдження магістральної тріщини

Постановка завдання. Вирішення проблеми забезпечення якості пасирувальних робіт в кар'єрі потребує розв'язання двох типів задач. Встановлення силових параметрів протікання процесу та визначення його динаміки. Мінімізувати ймовірність появи діагонального сколу є можливим за рахунок збільшення товщини відокремлюваного шару породи при пасируванні, але при цьому з'являється

додаткові втрати продуктивної частини. Крім того, з метою оптимізації процесу пасирування шпуровими методами постає необхідність у встановленні меж ефективного застосування шпурового способу пасирування блоків каменю в кар'єрі, дослідження режимів дії руйнуючих зусиль для забезпечення максимальної якості пасирування. Досить важливим є встановлення геометричних форм підготовлених до пасирування блоків з метою виявлення найбільш ефективних схем застосування шпурового способу пасирування.

Викладення матеріалу та результати. Направлене руйнування каменю по магістральним тріщинам з деякими спрощеннями можна розглядати, як задачу росту тріщини в середовищі при дії зусиль розтягу [15] (рис. 2)

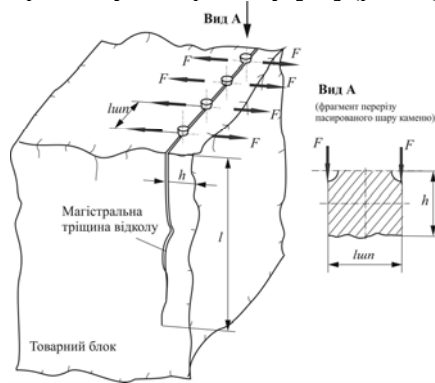


Рис 2. Схема прикладення навантажень при пасируванні (відокремленні нерівної частини) блоку каменю

На етапі зародження магістральної тріщини біля устя шпурів та з ростом її вздовж наміченої лінії відколу відокремлений шар каменю можна розглянути як консольну балку, яка є консольно закріпленою біля вістря тріщини. За подібністю прикладених навантажень до кожного шпура вважатимемо, що діють однакові сили розпору F та за принципом паралельних перерізів розглянемо тільки частину консольної балки цього шару з перерізом, величиною h (товщина шару, що підлягає пасируванню) та $l_{ун}$ (відстань між шпурами) (рис.1. Вид А).

Напруження вигину, що діють біля вістря тріщини, прагнуть змінити напрям росту тріщини з виходом її до найближчої поверхні з утворенням виколу. Їх можна представити як напруження в консольній балці, навантаженої силою на один її кінець (1)

$$\sigma = M_{\max} / W, \quad (1)$$

де M_{\max} - максимальний момент на вістрі магістральної тріщини відколу, $M=l \cdot F$, Нм; l - довжина консолі (тріщини), м; W - момент опору перерізу зразка на згин, Нм (2)

$$W = (l_{ун} \cdot h^2) / 6. \quad (2)$$

Підставивши вираз (2) в залежність (1), отримаємо значення критичного напруження на вістрі тріщини (3)

$$\sigma = 6lF / l_{ун} h^2. \quad (3)$$

За відомими значеннями технологічних та геометричних параметрів операції пасирування блоку каменю можна встановити мінімальне значення товщини відокремлюваного шару породи від пасированого блоку (4)

$$h = \sqrt{6lF / l_{ун} \sigma}. \quad (4)$$

Іншим ключовим параметром операції пасирування є висота блоку, від якої залежить максимальна величина керованої тріщини, що має розповсюдитися від устя шпура до самого низу, повністю відокремлюючи нерівну частину блоку.

Енергія пружної деформації, що вивільняється при рості магістральної тріщини, визначається як (5)

$$G = \pi \sigma^2 l / E, \quad (5)$$

де l - довжина магістральної тріщини, м.

Енергія, що витрачається на поширення тріщини [5], виражається через (6)

$$R = dW / dl. \quad (6)$$

Вираз (6) в даному контексті характеризує опір росту тріщини.

Умовою початку росту тріщини є те, що G повинно бути рівним або більшим R , при тому, що R є константою.

За виразом (5) знаходимо значення критичного напруження, за якого буде відбуватися розростання тріщини (7)

$$\sigma_c = \sqrt{EG / \pi l}. \quad (7)$$

Щоб встановити максимальну довжину магістральної тріщини, за якої ще буде відбуватися відкол каменю, необхідно прирівняти значення напружень, які виникають на вістрі тріщини (3), та напружень, необхідних для початку її росту (7)

$$\left(6lF/l_{un}h^2\right) = \sqrt{EG/\pi l}.$$

Дана рівність дає можливість розрахувати максимальні значення довжини магістральної тріщини, за якої ще буде відбуватися її розростання без зупинки (8)

$$l = \sqrt[3]{EGl_{un}^2 h^4 / 36\pi F^2} \quad (8)$$

Встановлені геометричні параметри процесу пасирування блоків каменю h та l дозволяють визначати лише допустимі межі використання даного способу, при цьому залишається актуальним питання встановлення оптимальних часу та швидкості прикладення навантаження, за яких буде забезпечуватися контрольоване розростання тріщини.

Серед теорій, що розкривають питання крихкого руйнування каменю як функції часу (довговічності), заслуговує на увагу енергетична теорія [16]

$$t_l = t_p \exp\left(\frac{E_a - v_a \sigma}{kT}\right) \quad (9)$$

де k - постійна Больцмана; $t_p \cdot 10^{-3}$ с/час, за порядком величин близький до періоду коливань атомів в твердих тілах (період коливань максимальної частоти в дебаєвському спектрі); v_a - структурний коефіцієнт; T - постійна температура, К; E_a - енергетичний параметр атомарного рівня; σ - діючі напруження, за яких відбувається руйнування, МПа.

Дану залежність для зручності доцільно переписати у вигляді виразу (10)

$$t_l = t_p \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E'_a}{kT}\right] \quad (10)$$

Співвідношення (9), (10) за своєю суттю виражають середнє значення довговічності в статичних випробуваннях, коли значення напруг є константою в часі.

При постановці цієї задачі в субдинамічному діапазоні [17] прикладення руйнуючих навантажень вирази (9) та (10) запишемо, як рівняння швидкості росту тріщини при руйнуванні в динамічних та субдинамічних режимах (11), (12)

$$v_c = v_e \exp\left(-\frac{E_a - bK_1}{kT}\right) \quad (11)$$

$$v_c = v_e \left(\frac{K_1}{K_S}\right)^n \exp\left(-\frac{E'_a}{kT}\right) \quad (12)$$

де K_1 та K_S - коефіцієнти інтенсивності напружень, що діють в межах закону Гука.

Вирази (11) та (12) дають опис динаміки поведінки тріщин на основі швидкості руйнування на елементарному рівні v_e , яку можна знайти, встановивши час руйнування елементарних мікроруйнувань каменю по мікротріщинам (контактам міжмінеральних зв'язків), підставивши залежність (7) у вирази (9) та (10)

$$v_e = \frac{t_p}{\Delta l} \exp\left(E_a - v_a \sqrt{\frac{EG}{\pi l}} / kT\right), \quad (13)$$

$$v_e = \frac{t_p}{\Delta l} \left(\sqrt{\frac{EG}{\pi l}} / \sigma_p\right)^{-n} \exp\left[\frac{E'_a}{kT}\right], \quad (14)$$

де Δl - довжина контакту мікротріщини в камені у напрямі руйнування, м.

Одержані залежності вказують на те, що швидкість росту тріщини в субдинамічному діапазоні буде величиною змінною, оскільки параметр l в формулах (13) та (14) є постійно зростаючою величиною, яка на певному етапі приведе до росту швидкості тріщини до некерованих меж. Тому доцільним є прикладення навантаження з поступовим зменшенням напружень розтягу з дотриманням критерію постійної швидкості росту тріщини.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Оскільки процес направленої руйнування каменю складається з ряду складних процесів мікро- та макроруйнування, а також процесу росту магістральних тріщин, які протікають за різними законами, в субдинамічній постановці задачі руйнування описуються аналітично з використанням енергетичної теорії руйнування, статистичного розподілу та теорії безструктурних моделей.

Разом з тим комплексний підхід до аналітичного опису процесу субдинамічного руйнування каменю при пасируванні дозволив установити граничні співвідношення параметрів такого руйнування, за якого є доцільним застосування даного методу відколу, а встановлення швидкості росту тріщини як функції напружень та довжини дозволяє встановити регресію напружень з забезпеченням постійної (керованої) швидкості росту тріщини.

Список літератури

1. **Власов О.Е.** Основы теории действия взрыва. - М.: ВИА, 1957. - 408 с.
2. **Мухелишвили Н.И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М.: Наука, 1966. - С. 75-79.
3. **Мячина Н.Н., Родак С.Н., Сердюк А.И.** Новые методы разрушения и механика горных пород. - К.: Наукова думка, 1981. - 67 с.
4. **Кузнецов В.М.** Математические модели взрывного дела. - Новосибирск: Наука, 1977. - 262 с.
5. **Мосинцев В.Н.** Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. - М.: Недра, 1976. - 270 с.
6. **Кутузов Б.Н.** Взрывное и механическое разрушение горных пород. - М.: Недра, 1973. - 310 с.
7. **Жуков С.А.** Расчет рабочего процесса пироклинового раскалывающего устройства // Разраб. рудн. месторождений. - Кривой Рог, 1998. - Вып. 64. - С. 42-55.
8. **Бакка Н.Т.** Разработка технологии и комплексов оборудования добычи блоков из высокопрочных трещиноватых пород: Дис. докт. техн. наук: 05.15.03. – Житомир: 1986. - 337 с.
9. **Бакка Н.Т., Карасев Ю.Г.** Природный камень. Добыча блочного и стенового камня – С-Пб. : Санкт-Петербургский горный институт, 1997. – С 74–81.
10. **Карасев Ю.Г.** Технология горных работ на карьерах облицовочного камня. - М.: Недра, 1995. - 112 с.
11. **Карасев Ю.Г.** Формирование технологии горных работ по структурно-технологическим зонам на карьерах облицовочного камня высокой прочности: Дис. докт. техн. наук: 05.15.03 - М., 1995. - 316 с.
12. **Ткачук К.К., Гребенюк Т.В.** Откол каменных блоков с помощью статической нагрузки // Проблемы недропользования. Международный форум – конкурс молодых ученых. Сборник научных трудов. Часть 1. Санкт-Петербург 2012. – С 82 – 85.
13. **Ткачук К.Н.** Методика визначення технологічних параметрів видобутку гранітних блоків невибуховими методами / К.Н. Ткачук, О.І. Фоменко // Сб. науч. трудов НИГРИ. –2009. – С. 112–117.
14. **Синельников О.Б.** Добыча природного облицовочного камня / О.Б. Синельников. – М. : РАСХН, 2005. – С 93–108.
15. **Кальчук С.В., Шлапак В.О.** Обгрунтування параметрів пасирування блоків каменю в кар'єрі квазістатичними методами відколу. Вісник НУВГП: 36. наук. праць. – Рівне, 2014. – Випуск 2 (66). – С. 127-133.
16. **Жуков С.О., Кляцький В.І., Кальчук С.В.** Математичне моделювання спрямованого руйнування природного каменю в субдинамічному режимі. Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. Кривий Ріг: КНУ, 2014. – Випуск 36. - С. 40-44.
17. **Кальчук С.В.** Особливості формування поля напружень при видобуванні блочного облицовального каменю. Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірнична справа». Київ: НТУУ КПІ, 2014. – Випуск 26. - С. 80-84.

Рукопис подано до редакції 28.03.15