

УДК 622 (035)

С.Л. Калюжний, аспір.  
Національний технічний університет України "КПІ"

### ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИКО-ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ВИДОБУВАННІ БЛОКІВ ПРИРОДНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ З РОДОВИЩ ОСНОВНИХ ПОРІД КОРОСТЕНСЬКОГО ПЛУТОНУ

(Представлено доктором технічних наук, професором М.Т. Бакка)

*В основу досліджень покладена ідея спрямованого руйнування попередньо напруженого масиву малоенергоємними динамічними впливами, що не викликають ініціювання побічної штучної тріщинуватості блочного масиву.*

Головним негативним фактором при видобуванні природного облицювального каменю є низький вихід кондиційних блоків, що досить рідко перебільшує 20–30 % балансових покладів. В процесі подальшої обробки блоків втрати складають ще 30 %. Велику частку відходів складає цінна декоративна сировина, що зруйнована сіткою тріщин. Вони утворені при вибухових роботах та важко прогнозуються як в кількісному відношенні, так і в напрямку розповсюдження. Головними проблемами, що підлягають першочерговому вирішенню, є:

- удосконалення вибухових робіт при видобуванні природного каменю в напрямку створення умов оптимізації параметрів вибухового імпульсу;
- орієнтація векторів силових полів так, щоб звести до мінімуму тріщиноутворення в тілі блока.

Перша задача може вирішуватися шляхом створення нових технологій проведення вибухових робіт, детонаційні можливості яких могли б забезпечити так званій "м'який імпульс". Він повинен бути достатній в енергетичному відношенні для відділення блоків від масиву по лінії шпурів, але без істотних тріщин в напрямках, близьких до ортогональних. Перспективним методом зниження тріщинуватості є формування статико-динамічних напруг в шпурах. Це дозволить утворити умови для першочергового зародження та розвитку тріщин в міжшпуровій площині при одночасному зниженні параметрів імпульсу в ортогональному напрямку.

В основу розробки нової технології вибухових робіт, з вказаними характеристиками з енергетики та безпеки, необхідно покласти концепцію, що управління руйнування блочного масиву можливо за рахунок взаємодії статичного поля напруг і малопотужного динамічного імпульсу, що ініціює руйнування масиву, який знаходиться в напруженому стані. Спрямоване змінення параметрів силового поля можливе за допомогою організації стрічних детонаційних хвиль сусідніх шпурових зарядів в останньому щільноутворюючому ряді. Це дозволить спрямовувати та прискорити процес руйнування гірських порід в міжшпуровому просторі, знизити амплітуду і тривалість вибухового навантаження законтурного масиву, і в напрямку, перпендикулярному площині відколювання блоків. Шляхом статико-динамічного навантаження шпурів забезпечується інтерференція вибухових хвиль, з утворенням в міжшпуровій вертикальній площині контуру силових параметрів, що допомагає росту магістральних тріщин вздовж щільноутворюючого ряду шпурів при відокремленні блоків. Це забезпечить концентрацію напруг на стінках шпуру, що розглядається, зародження та розвиток магістральної тріщини в площині розташування зарядів, за рахунок збільшених напруг взаємно-спрямовуючої дії поля напруг від вибуху в напруженому масиві.

При розгляданні кінетики руйнування анізотропних тріщинуватих гірських порід, слід мати на увазі не тільки характер напруженого стану, але й швидкість росту та глибину проростання тріщин, що пов'язано, в значній мірі, з механізмом розвитку природних тріщин, існуючих в середовищі, величиною енергії вибуху та умовами її переходу в енергію рухомих мас.

Процес розвитку тріщин проходить в три послідовних етапи, на кожному з яких характеризується своїми особливостями, що дозволяють класифікувати породи за ступенем їх крихкості та пластичності. Етап тривалого росту зародкових тріщин пов'язан, головним чином, з характером міцносних властивостей порід. Фактично, це може бути пояснено механізмом крихкого або пластичного розвитку зародкових тріщин, що природно існують в середовищі.

Етап прискороного розвитку кількості тріщин залежить від умов навантаження та настає в момент перебільшення енергії пружної деформації тіла, що звільнюється при розвитку тріщин, над енергією, що необхідна для утворення нових поверхонь зростаючої тріщини. Третій етап визначається швидкістю розповсюдження в середовищі пружних хвиль і швидкістю переходу пружної енергії, що накопичена середовищем, в поверхневу енергію тріщин.

Режим стійкого розповсюдження тріщин з постійною максимальною швидкістю може бути реалізовано за таких умов:

$$q = 1,25 \cdot \frac{\rho C_p}{Q_v}, \quad (1)$$

де  $q$  – питома витрата вибухових речовин, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_v$  – потенційна енергія вибухових речовин, кДж/кг;

$\rho \cdot C_p$  – акустична жорсткість масиву, кг/м<sup>3</sup>·км/с.

Якщо прийняти в якості показника енергоємності процесу руйнування  $W_c$  добуток маси заряду на питому потенційну енергію  $Q_v$ , то розміри зон руйнування масиву  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (м) можуть бути визначені таким чином:

$$R_1 \leq 0,58 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_c}{\rho \cdot C_p}}. \quad (2)$$

В даній зоні проходить подрібнення по всій мережі природних макро- і мікротріщин зі швидкістю, близькою до Релеївської. Перехідна зона – швидкість росту тріщин – нижче, ніж в першій зоні, а її радіус знаходиться в діапазоні

$$0,58 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_c}{\rho \cdot C_p}} \leq R_2 \leq 1,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_c}{\rho \cdot C_p}}. \quad (3)$$

Зона нерегульованого руйнування, що характеризується зменшенням питомої щільності енергії, внаслідок чого руйнування тут проходить лише по більш слабким дефектам. Ця зона знаходиться за межами перехідної, тобто:

$$R_3 \geq 1,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{W_c}{\rho \cdot C_p}} \quad (4)$$

і переходить в зону пружних коливань.

Особливість процесу вибуху складається в тому, що для руйнування тіла достатньо, щоб виконувалася така вимога:

$$\varepsilon > \varepsilon_p, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – відносна деформація матеріалу від дії вибухового навантаження;

$\varepsilon_p$  – найбільш можлива відносна деформація для даного матеріалу.

В свою чергу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S_2}{S_2}, \quad (6)$$

де  $\Delta S_2$  – абсолютне переміщення стінок шпuru в заданий момент часу  $\Delta t_2$ ;

$S_2$  – довжина масиву, напруженого впливом вибуху в напрямку від заряду в бік пересування в прийнятий момент часу  $\Delta t_2$ ;

$$S_2 = C \cdot \Delta t_2, \quad (7)$$

де  $C$  – швидкість розповсюдження напруженого поля в масиві.

Якщо  $\Delta S_2$  спрямовано в бік лінії найменшого опору (зокрема, в бік заповненого вибуховою речовиною шпuru), то  $S_2 = const$ , а відносні деформації збільшуються в бік лінії найменшого опору. Тому в цьому напрямку руйнування починаються раніше та розвиваються більш інтенсивно. Однією з характеристик масиву, що руйнується, є модуль коефіцієнта інтенсивності напруг у вершині тріщин  $K$ .

З урахуванням вищевикладених поглядів, розглянемо параметри руху середовища в міжшпуровому просторі та механізм тріщиноутворення в масиві з розташованими шпуровими зарядами глибиною  $l$ , діаметром  $D$  і відстанню між шпурами в ряду  $a_p$  та лінією найменшого опору. При статико-динамічному ініціюванні фронти хвиль напруг від вибуху шпурових зарядів мають вигляд усічених конусів, вершини яких знаходяться з боку ініціювання. Отже, якщо в необмеженій площині маєтся отвір, до контуру якого прикладають тиск  $P(t)$ , то при

досягненні азимутальних розтягуючих напруг величини межі міцності середовища  $G_p$  зароджується система радіальних тріщин, яка збільшується з середньою швидкістю  $V_t$ , що дорівнює  $(0,2-0,4)C_p$ , тобто:

$$V_t = (0,2 \div 0,4)C_p. \quad (8)$$

Напружено-деформаційний стан середовища в циліндричній симетрії визначається із сумісного розв'язання системи рівнянь в пружній зоні та зоні тріщиноутворення.

При навантаженні отвору статичним напруженням залежність максимальних напружень від відстані оцінюють такими співвідношеннями:

а) стискаючих радіальних напружень:

$$\sigma_r(r) = A - B \left( \frac{r}{R} \right)^{-2}; \quad (9)$$

б) азимутальних напружень:

$$\sigma_\theta(r) = A + B \left( \frac{r}{R} \right)^{-2}, \quad (10)$$

де

$$A = P \frac{R^2}{R_{сн}^2 - R^2}; \quad (11)$$

$$B = P \frac{R_{сн}^2}{R_{сн}^2 - R^2}; \quad (12)$$

$R$  – відстань між статичними навантаженнями;

$R_{сн}$  – відстань від осі порожнини до границі моделі.

Розподіл напруг за найкоротшою відстанню між порожнинами напруг визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = A_0 + A_l - R^2 [B_0 \cdot r^{-2} + B_l (L-r)^{-2}] \\ \sigma_\theta(r) = A_0 + A_l + R^2 [B_0 \cdot r^{-2} + B_l (L-r)^{-2}] \end{cases} \quad (13)$$

“0” – індекс вказує, що величина відноситься до порожнини напружень, вісь якої співпадає з віссю розташування шпурів;

“L” – індекс вказує, що величина відноситься до порожнини, яка віддалена від осі розташування шпурів на відстань  $L$ .

При динамічних навантаженнях розподілення напружень має такий вигляд:

$$\sigma_\theta(r) = P \left( \frac{r}{R} \right)^{-\alpha}, \quad (14)$$

де  $P$  – амплітуда внутрішньопорожнинного тиску;

$$\alpha = 0,985 + 5,5 \cdot 10^{-3} P, \quad (15)$$

де  $\alpha$  – експериментально встановлено для основних порід Коростенського плутону (МПа).

На базі гірничодобувного каменесобробного комбінату “Біличі” в 1994 році для встановлення загальних закономірностей розвитку руйнування при відокремленні блочного каменю від масиву були проведені лабораторні експерименти із застосуванням комбінованих, статико-динамічних напружень. Експерименти проводилися на гранітних зразках розмірами 150x150x150 мм з центральним отвором діаметром 18 мм. Отвір зразків заповнювали НРР-1 харківського виробництва. Зразки руйнувалися на 2-3 частини. Бетонні блоки розмірами 200x200x200 мм ( $\sigma_{ст} = 60$  МПа) з центральними отворами діаметром 40 мм заповнювали мінімальною навескою порошу (динамічне руйнування). Бетонні блоки руйнувалися на 4-6 частин. Це свідчить про те, що ні статистичне, ні динамічне навантаження не гарантують руйнування масиву тільки в одній площині.

При наявності концентраторів напруг довжиною 3-15 мм в бетонних блоках, їх руйнування мінімальною необхідною навескою порошу визначалося орієнтацією зародкових тріщин. Зі збільшенням довжини концентратора напруг ймовірність руйнування тільки в заданому напрямку збільшувалась в 2 рази, а необхідні витрати вибухових речовин при цьому зменшувалися. Така сама, в якісному відношенні, залежність спостерігалася при руйнуванні моделей статичними навантаженнями. Тобто, існує взаємозв'язок між протяжністю тріщин і

розмірами концентраторів. Після аналізу експериментів можна зробити висновок, що мінімальне відхилення площини тріщиноутворення при дії поодиноких статичних або динамічних навантажень спостерігається при співпаданні осі шпуру з вертикальною орієнтацією зерен, а напрямком сколення – з їх горизонтальною орієнтацією.

Руйнування габрових зразків при статико-динамічних навантаженнях проводилося на Сліпчицькому дрібнозернистому габро. Розміри блоків – 400x200x30 мм, два центральних отвори діаметром 18 мм, відстань між отворами 120 мм. Один отвір заповнювався НРР-1, що розвивало тиск, достатній для руйнування моделі через 6 годин. А у другому отворі 2–6 годин генерувалося динамічне навантаження.

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що мінімальне відхилення лінії руйнування спостерігалось тоді, коли динамічне навантаження прикладалося в період досягнення статичними навантаженнями 60...90 % від межі міцності матеріалу. Динамічне навантаження при цьому було мінімальним. Якщо мінімально необхідне навантаження генерувалося раніше вказаного часу, тобто при менших статичних напругах, руйнування по лінії отворів не спостерігалось, а зі збільшенням навантажень відбувалося руйнування моделі в трьох і більш напрямках. Якщо мінімально необхідне навантаження прикладалося під час тріщиноутворення або пізніше, то тріщини, що утворювалися в 2 прийоми в процесі розвитку, не завжди стикувалися за найкоротшими відстанями між отворами. При цьому, застосування комбінованого статико-динамічного напруження дозволяє скоротити час руйнування зразків на 3–5 годин, збільшити відстань між шпурами на 20–40 %, забезпечити розташування площини відколу каменя чітко в площині шпурів, виключить тріщиноутворення навколо шпуру, в якому генерується динамічне навантаження в напруженому моноліті за рахунок зменшення амплітуди внутрішньопорожнинного тиску, що свідчить про значні переваги такого способу утворення тріщин, порівняно з руйнуванням порід тільки з застосуванням НРР.

Висновком проведених теоретичних досліджень та експериментів можна вважати те, що управління тріщиноутворенням при відокремленні блоків від масиву можливо за рахунок концентраторів напруг та обраного напрямку взаємодії статико-динамічних навантажень. Гарантований розкол порід в заданому напрямку досягається при створенні в шпурі зародкових тріщин (концентраторів напруг), що дозволить збільшити відстань між шпурами, зменшити амплітуду граничного тиску старту тріщини.

КАЛЮЖНИЙ Сергій Леонідович – аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

- технологія розробки родовищ корисних копалин;
- фізичні процеси руйнування гірських порід.

Подано 21.12.1999.