

СОЛОВЕЙ АНДРІЙ

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-4593-702X>e-mail: [andre37gv8@gmail.com](mailto:andre37gv8@gmail.com)

## ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТОК ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

*В роботі досліджені та описані передумови та процеси зародження і розвитку тріщин в різних гірських породах за допомогою невибухових сумішей та спеціальних конструктивних засобів. Приводиться порівняльна дія чинників та факторів, які діють при статичному тріщиноутворенні.*

*Ключові слова: тріщиноутворення, гірська порода, статичний розкол, направлена дія, керовані пластини-вставки, НРЗ, шпур, виникнення тріщини, формування тріщини, розвиток тріщини.*

SOLOVEI ANDRII

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

### ORIGIN AND DEVELOPMENT OF CRACKS IN MOUNTAIN ROCKS UNDER STATIC LOAD

*The paper examines the occurrence and development of cracks in rocks under static loads, various conditions and factors of crack initiation and development. For comparison, such rocks as concrete, granite, sandstone, plasterboard are taken. This is said to help the cracks in the rock spread in the right direction. The technology of crack formation with the help of insert plates under the action of non-explosive mixtures is considered. When modeling, the minor and major axes of the ellipse around the insert of the plate with holes are taken. Construct isolines of rock destruction at a point in the form of ellipses. Determine the most likely direction of cracks during rock destruction. The conditions for the development of cleavage cracks relative to the axes of anisotropy with maximum and minimum strength are considered. The theoretical and experimental justifications of the rational technological parameters of mining stone blocks by the hole method by the formation of a separation crack in the rock in a given direction have been studied. The determination of the plane stress state around a hole with a 5- and 8-mm-thick insert plate is studied, and equivalent stress diagrams are given. The methods of directional destruction and the occurrence of cracks in rocks when pouring non-explosive mixtures into wells and inserting cartridges with a destructive substance into wells are considered. It clearly shows the greater efficiency of using cartridges that guarantee the appearance of cracks in a precisely specified direction. The influence of the load scheme on the development of a splitting crack in holes with stress concentrators is presented. The model for the analysis of crack formation at the tops of stress concentrators is considered. Non-explosive methods of directional destruction of monoliths using special structures are described. Considered patents for static rock splitting. The results of destruction over a certain time are given. In addition, non-explosive mining of gabbroid rock blocks using destructive mixtures together with surface-active substances is considered.*

*Keywords: crack formation, rock, static splitting, directional action, controlled insert plates, NRZ, borehole, formation of cracks, crack development.*

#### Постановка проблеми

На даний час в Україні ще й досі велика доля руйнування гірських порід припадає на вибухові способи відділення монолітів від масиву. Та одночасно з цим вже понад тридцять років розвиваються статичні способи відокремлення гірських брил. Головною їх перевагою є більша екологічність, а одночасно набагато менші втрати енергії. А в період воєнного часу в Україні це ще й безшумність роботи порівняно з вибухами.

Використовуючи невибухові методи відділення кам'яних блоків від масиву при статичних навантаженнях важливо контролювати процес тріщиноутворення, а саме виникнення та розвиток утворених тріщин. Процес керування тріщиноутворенням в гірській породі дасть змогу гірничим підприємствам здійснювати ефективний спрямований розкол для відділення і формування більш геометрично правильних частин породи та полегшення їх обробки в подальшому. В цілому це підвищить технологічність та економічні показники при видобутку.

Однак на даний час не приділена достатня і повна увага порівняльній дії, а також процесам зародження та розвитку тріщиноутворення при різних статичних умовах навантаження при використанні НРЗ безпосередньо у шпурах, НРЗ із пластинами-вставками, з патронами або ж за допомогою спеціальних конструкцій, а також умовам та факторам виникнення і розвитку тріщин при взаємодії гірського масиву, НРЗ та допоміжних пристосувань.

#### Аналіз останніх джерел

В роботах [1, 2] досліджується технологія тріщиноутворення за допомогою пластин-вставок при дії НРЗ. Причому для дослідження напружено-деформованого стану навколо шпурів в роботі [1, 3] використовували ізотропну модель суцільного середовища, а в [2] визначали умови розвитку тріщин розколу щодо осей анізотропії з максимальною та мінімальною міцністю. Додатково робота [2] спрямована на аналіз управління тріщин в шпурах.

В дисертації [4] висвітлюються теоретичні і експериментальні обґрунтування раціональних технологічних параметрів видобутку кам'яних блоків шпуровим методом шляхом утворення в анізотропній породі тріщини відриву заданого напрямку з допомогою НРЗ і керованої пластини – вставки.

В [5] розглядається зокрема питання розколювання монолітних порід статичними методами.

В [6] досліджується і порівнюється спосіб направленої руйнування і виникнення тріщиноутворення в гірських породах при заливці НРЗ безпосередньо в шпури і при розміщенні у шпурі патрона з НРЗ.

В [7, 8] розглядаються невибухові способи спрямованого руйнування монолітів. При цьому в [7] для формування спрямованого розвитку тріщин використовують пристрій з направляючими елементами, а в [8] більш вдосконалений спосіб статичного направленою руйнування і разом з тим приведені часові результати руйнування.

В роботах [9, 10] розглядаються механіка руйнування гірських порід під дією шарошково-ланцюгових доліт та невибуховий видобуток блоків габроїдних порід за допомогою статичних методів, а саме НРЗ та ПАР.

**Мета роботи:** дослідження процесів зародження та розвитку тріщин в гірських породах, а також порівняльна дія умов та факторів їх виникнення при статичному навантаженні для різних видів порід разом з використанням невибухових руйнуючих засобів і допоміжних конструкцій.

#### Виклад основного матеріалу

Одну з головних ролей в процесах тріщиноутворення займають невибухові руйнуючі засоби (НРЗ). Їх використовують як при безпосередній заливці у шпури, так і за допомогою керуючих пластин-вставок, спеціальних патронів з НРЗ, направляючих та розпірних елементів.

Основне застосування НРЗ – це видобуток породного каменю з блоків. Переважно це відбувається разом із застосуванням пластин-вставок в шпурах. Найбільш поширений діаметр шпурів в гірській породі – 40мм. В роботі [1] досліджується технологія тріщиноутворення з пластинами-вставками при дії НРЗ на такі породи як діабаз, порфірит, чорний мармур, лабрадорит та кварцевий порфір. Беруться до уваги важливі показники кожної з порід, а саме: модуль пружності  $E$ , МПа; коефіцієнт Пуассона, а також межа міцності на розтяг  $[\sigma_p]$  та стиск  $[\sigma_c]$ , МПа; питома вага, Т/м.

Завдяки  $[\sigma_p]$  та  $[\sigma_c]$  ми можемо наближено побудувати ізолінії руйнування породи в точці у вигляді еліпсів. В [1] досліджують виникнення і розвиток тріщини при моделюванні малої і великої осей еліпса навколо шпурової пластини-вставки. Досліджуючи напружено-деформований стан навколо шпурів з керуючими пластинами [1, 3] використовували суцільну ізотропну модель середовища. Варто зазначити що в дослідженнях статичного направленою розколу і керування напрямком тріщиноутворення в подібних дослідах за основу використовують саме модель ізотропного суцільного середовища.

Отже, формула ізоліній руйнування породи в точці в еліпсному вигляді:

$$\frac{\sigma_x^2}{[\sigma_p]^2} + \frac{\sigma_y^2}{[\sigma_c]^2} = 1 \quad (1)$$

Із формули 1 слідує, що  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  визначають напрямок тріщин при руйнуванні породи. Для визначення найбільш імовірного напрямку розколу необхідно визначити розподілення  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  навколо шпурової зони з керуючою пластиною при статичній дії НРЗ. Запишемо умову пластичності для плоского навантаженого стану:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2 \quad (2)$$

З рівняння (1.2) значення  $k$  ми можемо прийняти як:

$$k = \sigma_s/2 \quad (3)$$

Де  $\sigma_s = [\sigma_p]$  – межа міцності породи при односторонньому розтягу. Тоді рівняння (2) перетворюється в третій закон міцності, що наближається до еліптичної залежності. При вирішенні конкретних завдань використовуватимемо цю міцнісну умову (2).

В [1] йде мова про те, що умовою виникнення тріщини в точці будемо вважати досягнення напруг в даній точці, що рівні  $[\sigma_p]$ . З умови (1.2) випливає, що максимальна розтягуюча напруга  $\sigma_y$  досягається на торцях пластини-вставки, а вісь пластини визначає напрямок тріщиноутворення. Деякі гірські породи мають природні тріщини, напрямок яких збігається з напрямками, по яким виконується відкол блоків з найменшими енерговитратами. Наприклад, це граніти.

В [1, літ. 12] теоретично доведено, що завдяки збільшенню навантажень на стінки шпура під час реакції кристалізації НРЗ в шпурі з керуючою пластиною розміри внутрішнього еліпса 2 збільшаться (рис. 1).

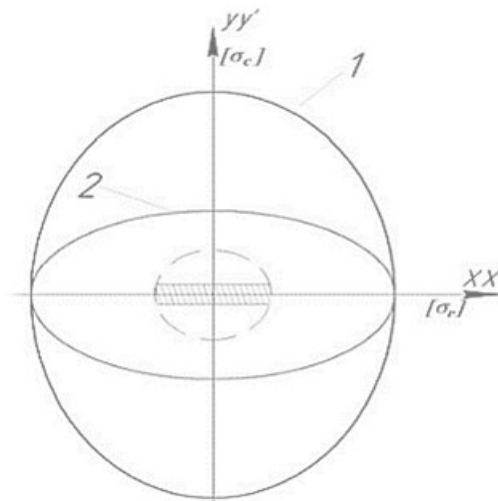


Рис. 1. Виникнення тріщини в шпурі по осі меншого еліпса X

При цьому менший еліпс 2 відповідає умові міцності для плоского випадку з рівняння (1.2). Тріщина утвориться по осі X, коли менший еліпс 2 торкнеться вершини більшого еліпса 1 для управління напрямом тріщиноутворення в секторі між осями ортотропії.

Безпосередньо в момент торкання більшої вершини еліпса 1 малим еліпсом 2 формула матиме вигляд:

$$\frac{x'^2}{a_1^2} + \frac{y'^2}{[\sigma_p]^2} = 1 \tag{1.4}$$

В роботі [4] згідно з формулою (2) йде мова про те, що гірська порода є крихким матеріалом. А відповідно можна припустити, що межа плинності – це кінцева точка межі міцності породи на розтяг, тобто точка зародження тріщини  $k = [\sigma_p]$ .

В даній роботі також визначали плоский напружений стан навколо шпура з пластиною-вставкою товщиною від 5 до 8 мм під дією НРЗ в програмі ANSYS Workbench. В якості результатів досліджень побудовані епюри напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  навколо шпурів з керованими вставками (рис. 2).

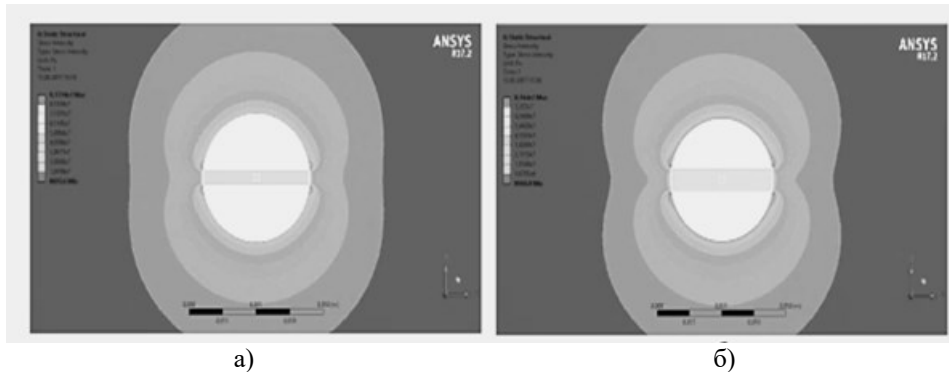


Рис. 2. Епюра еквівалентних напружень з пластиною-вставкою товщиною 5 мм (а) та 8 мм (б) для кварцевого порфіриту

З рисунка 2 слідує, що  $[\sigma_{pmax}]$  формуються на торцях пластини. І відповідно на осі вставки зароджується тріщина розриву. При зростанні товщини вставки  $h$  умови для створення тріщиноутворення в заданому пластиною напрямку будуть більш сприятливими.

В експериментальних дослідженнях [4] показано, що тріщина відколювання у визначеному наперед напрямку зароджується швидше для пластин-вставок з більшою товщиною. Лабораторні дослідження проводились на бетонних моделях. Як і в [1] блоки імітували ізотропну гірську породу. Досліджували питання геометрії тріщини розколу, яка залежить від співвідношень напружень  $[\sigma_{pmin}]$  та  $[\sigma_{pmax}]$ . Якістю геометрії тріщини розколу є 50% суми відхилень кінців тріщини від осі, по якій встановлена пластина, тобто осі Y (рис. 3):

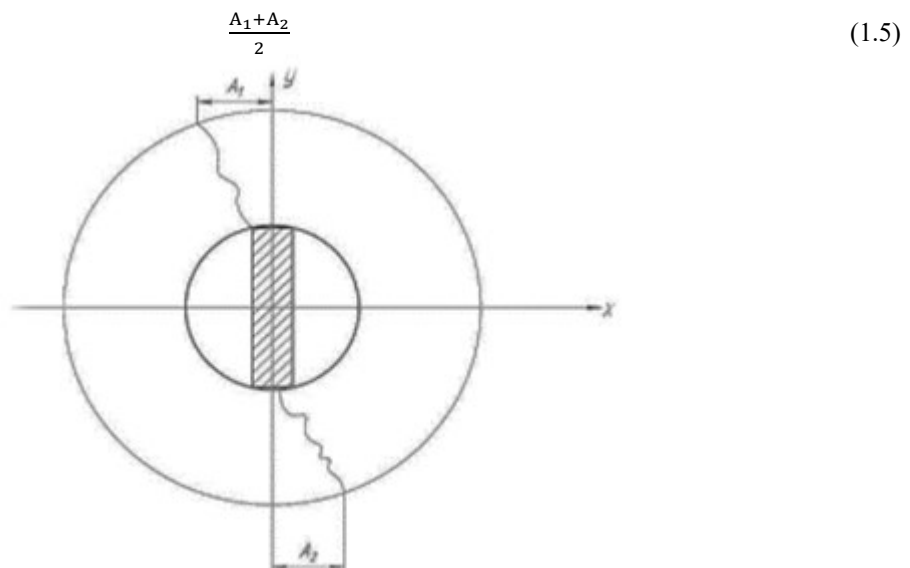


Рис. 3. Схема розвитку тріщини відколу відносно площини пластини (по осі Y)

В роботі [11] розглядається розробка моделі руйнування гірських порід за допомогою НРЗ з урахуванням існуючого поля напружень. Додатково в геометризації тріщини вкажемо вираз для довжини тріщини:

$$L_{тр} = \frac{Q^2 * \pi * \gamma_0^2}{8 * E_{НРС} * \gamma_p} \tag{1.6}$$

Де  $Q$  – кількість теплової енергії породи, Дж;

$r_0$  – радіус шпура, м;

$E$  – модуль пружності, МПа;

$\gamma_p$  – поверхнева енергія породи, Дж/м<sup>2</sup>.

В роботі [2] проаналізовано особливості управління утворення тріщин в шпурах при відділенні кам'яних блоків з використанням НРЗ в комплексі з керуємими вставками. Визначено умови розвитку розколюючих тріщин щодо осей анізотропії з  $[\sigma_{min}]$  та  $[\sigma_{max}]$ .

В роботі [2] аналогічно роботі [1] використовують еліпсоїдну модель для визначення тріщиноутворення під час кристалізації НРЗ та будують епюри міцності породи та розтягуючих напружень (відповідно зовнішній та внутрішній еліпси). При цьому найкращі умови для зародження відривної тріщини повинні співпадати або ж з більшим еліпсом, або ж з напрямком осі, по якій більша анізотропія.

Із [5] відомо, що зародження тріщини відбувається завдяки розтягуючим зусиллям, а розповсюдження – від стиснутого середовища. З практики і експериментальних даних [5] слідує, що тріщини зароджуються на контурі шпура в момент досягнення межі міцності породи на розтяг статичними розтягуючими напруженнями.

Розглядається [5] вплив навантажуючої схеми на розвиток тріщини розколу у шпурах з концентраторами напружень. Для цього використовують два агрегати: гідропоршневий 1 та для розколу блокових каменів за допомогою гідророзриву 2. При цьому для тріщиноутворення у шпурах великих блоків на першій стадії техпроцесу використовують 2, а вже після отримання тріщини для її розвитку 1. А при розколі малогабаритних блоків як для утворення тріщин, так і для подальшого розвитку отриманої тріщини використовували виключно агрегат 1.

Будувалася геометрична модель шпура з концентратором напружень. За досягнення моменту тріщиноутворення при вершині концентратора відповідали нормальні напруження. Розробили модель для аналізу тріщиноутворення при вершинах концентраторів напружень. Далі вивчали розвиток тріщини. Розраховували дві зосереджені сили для розвитку отриманої тріщини. На рисунку 4 представлена схема з закріпленими положеннями точок поступового розвитку тріщини.

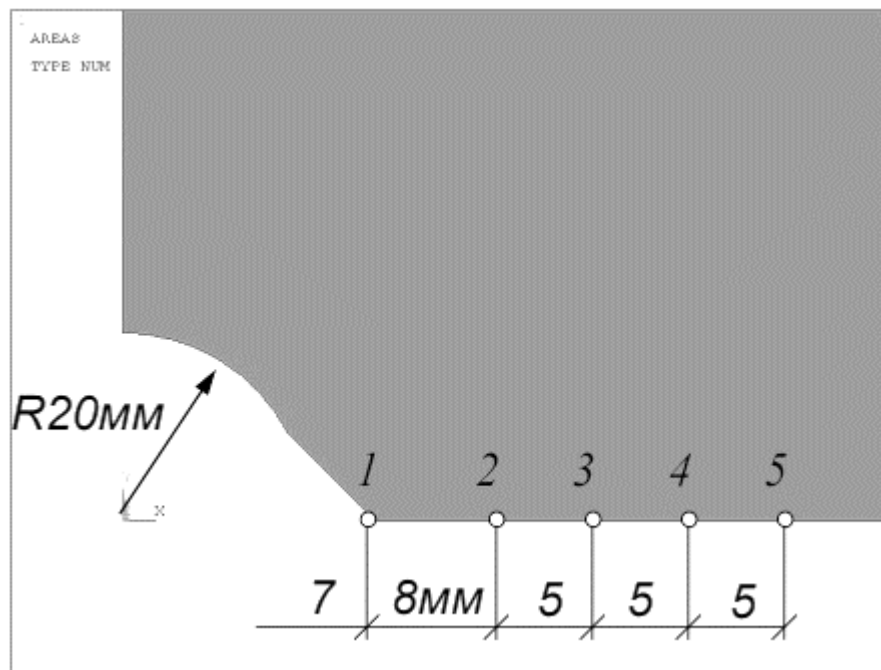


Рис. 4. Схема розташування розрахункових точок для поетапного аналізу процесу розвитку тріщини

Аналізували розвиток тріщин агрегату 1, припускаючи, що до утворення тріщини при вершині концентратора накопичилася певна потенціальна енергія. Це відбулось завдяки пружним властивостям робочої рідини та гранітного блоку. Далі в концентраторі в момент утворення тріщини відбувся її стрибок на 8 мм (від точки 1 до точки 2) за рахунок потенціальної енергії (рис. 4). Точка 2 буде вершиною нової тріщини. Також в [5] наведені і зображені сили при тріщиноутворенні та їх подальший розвиток.

В [6] досліджується і порівнюється виникнення тріщин в гірських породах, коли суміш НРЗ заливають безпосередньо в шпури або при способі розміщення патрона зі складом НРЗ у шпурі. Дослідження проводили для різних матеріалів гірських порід, а саме піщаник, гіпсові плити, гранітні блоки.

Механізм утворення тріщини аналізували за допомогою розподілення виникаючих напруг навколо ділянки масиву з піщаником. Спосіб дослідження – метод кінцевих елементів. Межа міцності піщаника на одноосьовий стиск 80 МПа та 8 МПа на одноосьовий розтяг. Масив містив у собі шпур 45 мм з НРЗ. Порівнювали розміщення НРЗ напряму в шпурі та патрон із сумішшю певного складу у шпурі.

В даній роботі [6] була прийнята перша теорія міцності (на відмінну від третього закону міцності в роботі [1]). Для піщаника  $[\sigma_p]$  та  $[\sigma_c]$  різняться, а тому умова міцності буде:

$$\begin{cases} \sigma_1 \leq [\sigma_p] \\ \sigma_3 \leq [\sigma_c] \end{cases} \quad (1.7)$$

Експериментальні дані [6] дослідження характеру руйнування блоків при заливці НРЗ в шпур та з розміщенням в патроні показали наступні результати (рис. 5)

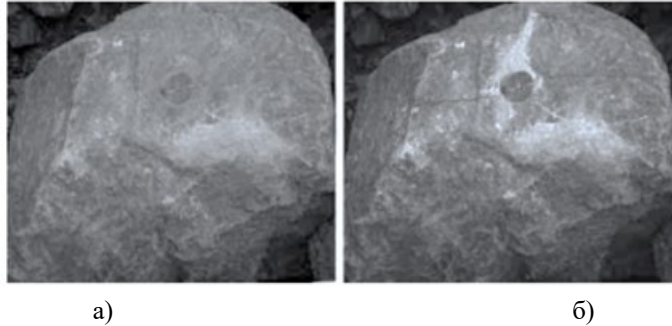


Рис. 5. Характер руйнування гранітних блоків при заливці НРЗ в шпур (а) та при розміщенні в шпурі патрона із сумішшю НРЗ (б)

Аналізуючи результати, отримуємо наступні висновки. Заливаючи НРЗ в шпур (рис. 5а), можна спостерігати виникнення декількох тріщин в різному напрямку від стінок шпура. В них різна траєкторія зростання і в основному їх налічується три. Це не завжди дає нам змогу забезпечити руйнування в шпурах по лінії очікуваного розколу. Натомість використання патронів гарантує магістральну тріщину в заданому напрямку (рис. 5б). Це забезпечує направлене руйнування і унеможливує виникнення тріщин в іншій частині масиву.

Розглянемо використання спеціальних пристроїв та засобів в шпурах для формування та розвитку тріщин в гірських породах. Аналізувалися способи спрямованого руйнування монолітів, з яких з метою направленого і точного розколу пропонується використовувати більш вдосконалений статичний спосіб спрямованого руйнування монолітних об'єктів [8]. Експерименти проводили на гранітних негабаритних блоках з діаметром шпурів 43мм [8]. Потріскування в блоці виникали за 4 години після саморозширення НРЗ. Поява тріщин від кутових частин направляючих елементів з'являлася через 5 годин і на протязі 30 хвилин досягала границі блока. Тріщини виникали у площині направленого руйнування.

В іншому досліді [8] в шпурі використовували направляючі елементи разом із гумовими еластичними елементами. Потріскування породи з легким шипінням відбулося за 6 годин. Далі за 45 хвилин еластичні елементи сходили зі своїх місць з виникненням просвіту між стінками шпура та направляючими елементами. Ще за 15 хвилин направляючі притискалися до стінок шпура зі зміщенням площини спрямованого руйнування. Негабаритний блок зруйнувався за повних 8 годин.

Одночасно з використанням НРЗ розглянемо доцільність застосування ПАР та їх ефективність в роботі утворення та розвитку тріщин в гірських породах.

В роботі [10] розглядаються питання невибухового видобутку блоків габроїдних порід за допомогою статичних методів, а саме невибухових руйнуючих засобів разом з поверхнево-активними речовинами (ПАР). У таких порід розвинена природна система тріщин та наявні невидимі сліпі тріщини разом з добре розвинуеною мікротріщинуватістю.

Варто зазначити, що для кожного виду каменю значно відрізняються параметри протікання головного процесу зародження і розвитку тріщин. В [10] випробування здійснювались з використанням синтетично-миючих засобів (СМЗ) як виду ПАР.

Видобуток кам'яної продукції завдяки НРЗ базується на тому, що в ряді шпурів і лінії наміченого розколу навколо блоку зароджуються відривні тріщини. Енергія від суміші, яка розширюється, здійснює роботу з утворення тріщини збоку в шпурі і далі розвиває її на половину відстані між шпурами. Згідно з цим приведемо рівняння енергетичного балансу при квазікрихкому руйнуванні гірничої породи:

$$P_p * (\delta_{max}/2 + \Delta) = U + \gamma_p * S_p \quad (1.8)$$

де  $P_p$  – сила, нормальна для поверхні розриву;

$\delta_{max}$  – переміщення, обумовлене максимальною деформацією розтягу;

$\Delta$  – переміщення, обумовлене розкриттям тріщини розриву;

$U$  – потенційна енергія деформації масиву від дії зовнішніх сил;

$\gamma_p$  – питома поверхнева енергія гірської породи;

$S_p$  – площа поверхні розриву.

### Висновки

Отже, дослідивши процес розвитку і утворення тріщин в гірських породах при статичних навантаженнях, можна більш гарантовано і надійно отримувати розкол в потрібному місці породи. Це в свою чергу дасть змогу гірничим підприємствам ефективніше керувати гірничими роботами, їх тривалістю, економічністю та безпечністю. Одночасно з цим керування тріщиноутворенням з допоміжними засобами, як от патрони з НРЗ чи пластини-вставки підвищить загальну технологічність експлуатаційних робіт при видобутку та розділенні монолітів.

## Література

1. Луговой П. З. Управление трещинообразованием в горных породах при использовании невзрывчатых разрушающих смесей / Луговой П. З., Прокопенко Н. Я., Орленко С. П. / Институт механики им. С. П. Тимошенко НАНУ, Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского». – Том 54. – 2018. – № 6. – (Прикладная механика).
2. Стовпник С. М. Формування тріщин відриву при видобутку блокового каменю / Стовпник С. М., Ковтун А. І., Качинська Н. Ф., Прит О. С. // Вісник ЖДТУ. – 2017. – № 2 (80).
3. Кравець В. Г. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами / Кравець В. Г., Стовпник С. М., Ковтун А. І. / Національний технічний університет України «КПИ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – № 2 (20).
4. Ковтун А. І. Удосконалення технології керованого розколу кам'яних блоків невибуховими руйнуючими сумішами : дис. ... кандидата технічних наук : 31.05.2018 / Ковтун Андрій Іванович. – Київ : Національний технічний університет України «КПИ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 144 с.
5. Ощадливі способи відділення кам'яних блоків / [Кравець В. Г., Ткачук К. К., Гребенюк Т. В., Ган А. Л.]. – Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2016.
6. Сахно І.Г. Исследование механизма направленного разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно // Научный вестник НГУ. – 2013. – № 6.
7. Патент на винахід № 45873 E21C37/00 E21C37/06. Спосіб спрямованого руйнування монолітних об'єктів та пристрій для його здійснення / Леяков І. І., Малушка О. І. ; заявл. 06.08.2001 ; опубл. 15.04.2002, Бюл. № 4.
8. Патент на винахід №102937 МПК E21C 37/00. Спосіб спрямованого руйнування монолітних об'єктів / Сахно І. Г., Шуляк Я. О. – Номер заявки: а 2012 05612 ; дата подання заявки: 07.05.2012 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16.
9. Давиденко О. М. Механіка ефективного руйнування гірських порід шарошково-ланцюговими долотами / Давиденко О. М., Ігнатів А. О. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2019. – № 22.
10. Ломаков Г. М. Перспективні використання невибухових руйнуючих засобів (НРЗ) при видобуванні блоків габроїдних порід / Ломаков Г. М., Яворська С. В. // Вісник ЖДТУ. – 2005 – № 2 (33).
11. Сахно І. Г. Научные основы управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений : дис. ... доктора технических наук – Красноармейск : Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», 2015.
12. Сахно І. Г. Обоснование параметров разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих составов / Сахно І. Г. // Геотехнічна механіка : міжвід. зб. наук. праць. – 2011. – № 93. – С. 245–253.

## References

1. Lugovoj P. Z. Upravlenie treshinoobrazovaniem v gornyh porodah pri ispolzovanii nevzryvchatyh razrushayushih smesey / Lugovoj P. Z., Prokopenko N. Ya., Orlenko S. P. / Institut mehaniki im. S. P. Timoshenko NANU, Nacionalnyj tehniceskij universitet Ukrainy «KPI im. Igorya Sikorskogo». –Tom 54. – 2018. – № 6. – (Prikladnaya mehanika).
2. Stovpnyk S. M. Formuvannia trishchyn vidryvu pry vydobutku blokovooho kameniu / Stovpnyk S. M., Kovtun A. I., Kachynska N. F., Pryt O. S. // Visnyk ZhDTU. – 2017. – № 2 (80).
3. Kravets V. H. Teoretychne vyznachennia tekhnolohichnykh parametriv kерованого розколу hирської породи nevybukhovomy ruiniuichymy sumishamy / Kravets V. H., Stovpnyk S. M., Kovtun A. I. / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «KPI im. Ihoria Sikorskoho», 2017. – № 2 (20).
4. Kovtun A. I. Udoskonalennia tekhnolohii kерованого розколу kamianykh bloktiv nevybukhovomy ruiniuichymy sumishamy : dys. ... kandydata tekhnichnykh nauk : 31.05.2018 / Kovtun Andrii Ivanovych. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «KPI im. Ihoria Sikorskoho», 2018. – 144 s.
5. Oshchadlyvi sposoby viddilennia kamianykh bloktiv / [Kravets V. H., Tkachuk K. K., Hrebeniuk T. V., Han A. L.]. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», 2016.
6. Sahnо I.G. Issledovanie mehanizma napravlennoho razrusheniya gornyh porod nevzryvchatymi razrushayushimi smesyami / I.G. Sahnо // Naikovij visnik NGU. – 2013. – № 6.
7. Patent na vynakhid № 45873 E21S37/00 E21S37/06. Sposib spriamovanoho ruinuvannia monolitnykh ob'ektiv ta prystrii dlia yoho zdiisnennia / Leliakov I. I., Malushka O. I. ; zaiavl. 06.08.2001 ; opubl. 15.04.2002, Biul. № 4.
8. Patent na vynakhid №102937 MPK E21S 37/00. Sposib spriamovanoho ruinuvannia monolitnykh ob'ektiv / Sahnо I. H., Shuliak Ya. O. – Nomer zaiavky: a 2012 05612 ; data podannia zaiavky: 07.05.2012 ; opubl. 27.08.2013, Biul. № 16.
9. Davydenko O. M. Mekhanika efektyvnoho ruinuvannia hirs'kykh porid sharoshkovo-lantsiuhovomy dolotamy / Davydenko O. M., Ihnatov A. O. / Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Dniprovskа politekhnika», 2019. – № 22.
10. Lomakov H. M. Perspektyvni vykorystannia nevybukhovyykh ruiniuichyykh zasobiv (NRZ) pry vydobuvanni bloktiv habroidnykh porid / Lomakov H. M., Yavorska S. V. // Visnyk ZhDTU. – 2005 – № 2 (33).
11. Sahnо I. G. Nauchnye osnovy upravleniya sostoyaniem gornyh porod nevzryvchatymi razrushayushimi smesyami pri podzemnoy razrobotke mestorozhdenij : dis. ... doktora tehniceskikh nauk – Krasnoarmejsk : Gosudarstvennoe vysshee uchebnoe zavedenie «Doneckij nacionalnyj tehniceskij universitet», 2015.
12. Sahnо I. G. Obosnovanie parametrov razrusheniya gornyh porod s pomoshyu nevzryvchatyh razrushayushih sostavov / Sahnо I. G. // Geotekhnichna mehanika : mizhvid. zb. nauk. prac. – 2011. – № 93. – S. 245–253..