

**ВПЛИВ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ІНЕРТНИХ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК В ЗАРЯДІ
НА ЗНЕМІЩЕННЯ ТВЕРДИХ СЕРЕДОВИЩ****В. Д. Кулинич, І. Е. Пєєва, В. В. Воробйов, Л. Д. Воробйова, В. М. Чебенко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**ORCID: 0000-0003-1702-2989; 0000-0003-4916-7381; 0000-0002-3446-4714; 0000-0001-5333-6091;
0000-0003-1076-2562**

Фізико-механічні властивості гірських порід зумовлюють енергетичні витрати процесів руйнування, дроблення і подрібнення. При цьому слід зазначити, що для гірських порід характерні численні недосконалості і дефекти структури, які суттєво впливають на їх міцність і енергетичні витрати при механічній переробці гірничої маси. Одним із основних етапів у технології видобутку корисних копалин є буровибухові роботи, які задають інтенсивність і рівномірність дроблення, а, отже, і ефективність подальших технологічних процесів переробки мінеральної сировини. Екسкавація, механічне дроблення й інші операції гірничого виробництва безпосередньо залежать від якості вибухової підготовки гірничої маси. Зміна міцності з плином часу після вибухового впливу пов'язана з газодинамічними процесами в макро- та мікротріщинах за рахунок проникнення в них продуктів детонації. У природних умовах ефект зміни властивостей порід має неконтрольований, часом випадковий характер. Кероване збільшення щільності мікротріщин і контрольоване зниження міцності властивостей неоднорідної породи на період проведення технологічних процесів може суттєво підвищити їх ефективність. Розглянуто можливість керування міцністю підірваної гірської маси за допомогою штучного створення мостів у тріщинах, які розклинають стінки мікротріщин, що утворилися після вибухового впливу, і перешкоджають їх змиканню. Наведено аналітичні схеми та розрахунок змін напруг при дегазації без наявності мостів і з їх присутністю. Експериментально підтверджено гіпотезу про те, що тверді інертні добавки в заряді вибухової речовини (ВР) перешкоджають заліковуванню мікротріщин після вибухового руйнування гірських порід.

Ключові слова: Міцність, гірська порода, дегазація, мікротріщини, інертні компоненти, адсорбція.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. У всіх технологічних схемах видобутку і переробки корисних копалин, представлених міцними скельними породами, у якості початкової ланки передбачається їх вибухове руйнування і подальше механічне дроблення гірської маси. Скельні породи в кар'єрах піддаються імпульсному впливу, тому дроблення масиву супроводжується послабленням міжзернових зв'язків, збільшенням довжини частини мікротріщин, накопиченням нових дефектів кристалічної структури і, як наслідок, виникає зміна характеристик міцності породи.

Міцність гірських порід визначається, в основному, кількістю, розмірами і орієнтацією наявних різних дефектів атомної або молекулярної кристалічних решіток [1, 2], а саме, точкових (нуль-мірних), лінійних, а також ланцюжків точкових і лінійних дефектів, що створюють просторові структури, які, в свою чергу, формують мікро- та макротріщинуватість гірських порід.

З огляду на короткочасний характер швидкоплинного вибухового впливу, більшість мікротріщин припиняють свій розвиток до завершення макроскопічного руйнування, зумовлюючи зміну міцності уламків, що утворились. Після припинення вибухового впливу колишня структура породи може не відновлюватися, тобто зв'язки в її елементах залишаться деформованими. На цьому рівні деформування спостерігається часткове відновлення міцності породи і зв'язку зі змиканням мікротріщин.

Руйнування порід з декількома системами природних тріщин, відбувається комплексно [3]. Для таких порід характерно ще більш складне дроблення в порівнянні з монолітними масивами з огляду на заганання радіальних тріщин при їх зустрічі з природними тріщинами або іншими дефектами масиву. В таких породах тріщини при появі розтягувальних напруг починають розвиватися разом з ростом останніх.

При досягненні певної критичної напруги зростання тріщин починає носити катастрофічний характер, а середовище руйнується [4, 5]. Руйнування проходить і від зарядної камери до вільної поверхні внаслідок концентрації напружень і деформацій на природних тріщинах, і від вільної поверхні до зарядної камери в результаті дії відбитих хвиль розтягування [6].

У середовищах з особливо інтенсивно розвинутою природною тріщинуватістю дроблення під дією розтягувальних зусиль за фронтом прямої хвилі стиснення має місце лише в області, що безпосередньо контактує з зарядом [7]. Але потрібно враховувати, що, незважаючи на те, що на деякій відстані від заряду дроблення практично припиняється, масив розпадається по природним макротріщинам [8].

Розрахунки показують [9, 10], що енергія утворення нових поверхонь становить дуже малу частку від загальної енергії вибуху. Потенційна енергія деформування, кінетична енергія переміщеної гірничої маси і залишкова тепла енергія продуктів детонації значно перевершують поверхневу енергію, проте природа явища така, що без цих «зайвих» витрат енергії не відбувається і самого руйнування. Повну енергію, що забезпечує задану ступінь дроблення, можна визначити через поверхневу енергію утворених кусків і коефіцієнт корисної дії вибуху.

В роботі [11, 12] проведено ряд експериментів, на основі яких висунута гіпотеза про те, що збільшення межі міцності зразків з плином часу після прикладення навантаження тісно пов'язане з процесом десорбції і дегазації продуктів детонації, що попередньо проникли в природні і утворені під час вибуху мікротріщини. Це також підтверджується тим, що при механічному ударному навантаженні простежувалася стабільність міцнісних властивостей випробовуваних зразків, що можна пояснити відсутністю продуктів детонації. Це дає підставу стверджувати про значний

вплив газоподібних продуктів детонації на процес змикання мікротріщин, тому важливим питанням є механізм їх поведінки безпосередньо після вибуху.

У загальному випадку можливі три форми зв'язку газу з твердою речовиною:

– адсорбція – зв'язування молекул газу на поверхні твердої речовини під дією сил молекулярного тяжіння;

– абсорбція – проникнення молекул газу в речовину без хімічної взаємодії і утворення «твердого розчину»;

– хемосорбція – хімічна сполука молекул газу і твердої речовини.

Основна кількість сорбованих породою газоподібних продуктів знаходиться в адсорбованому стані. З підвищенням тиску кількість сорбованого газу збільшується, з підвищенням температури – зменшується.

Коли при зниженні тиску в зарядній камері кількість сорбованого газу зменшується, більшість вільних від дрібнодисперсних частинок мікротріщин змикаються, витісняючи зі своїх порожнин газоподібні продукти детонації. Але частина їх адсорбційно закріплюється в мікротріщинах, ускладнюючи подальше їх змикання і сповільнюючи процес відновлення міцності гірської породи. З плином часу після вибуху за рахунок подальшої дегазації мікротріщин і релаксації напружень триває відновлення міцності гірських порід. Максимальне зменшення спостерігається безпосередньо після вибуху.

Процесу відновлення міцності кусків відбитої вибухом гірничої маси можуть перешкоджати дрібнодисперсні тверді частинки, які потрапляють всередину порожнин мікротріщин і утворюють там так звані «мости». Штучне створення мостів, які розклинюють стінки мікротріщин, що утворилися після вибухового впливу, і перешкоджають їх змиканню є актуальною задачею і потребує подальшого дослідження.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Заповнення порожнин мікротріщин твердими частинками в процесі їх розвитку при впливі імпульсних навантажень може здійснюватися трьома способами. Найбільш простий з них – переміщення інертних малодисперсних твердих частинок газовими потоками, що виникають при детонації зарядів ВР. Інертні частинки, що захоплюються газовим потоком, потрапляють в мікротріщини, сприяючи їх розвитку на початковій стадії. У тупикових мікротріщинах газові потоки гальмуються, залишаючи в їх порожнинах тверді частинки. Порожнини таких мікротріщин заповнюються цими частинками від гирла до вершини.

Як приклад можна розглядати цементний пил, який, потрапивши в мікротріщини в процесі вибуху, практично повністю заповнює порожнини і перешкоджає подальшому їх змиканню і відновленню міцності породи. При наявності навколо заряду вибухової речовини шару дрібнодисперсного інертного пилу після вибуху не зафіксовано процеси відновлення міцності гірської породи з плином часу.

При падінні тиску в зарядній камері мікротріщини прагнуть замкнутися, але ділянки конденсації йоду служать проміжними опорами для утвореної системи своєрідних важелів, які при зближенні стінок порожнин і їх схлопуванні біля гирла створю-

ють розтягувальні зусилля поблизу вершини. Зусилля, що виникають в вершинах мікротріщин, сприяють їх розвитку, що є причиною подальшого зниження міцності породи після завершення вибуху.

Залежно від інтенсивності силового поля на поверхні гірської породи і умов детонаційного процесу можуть утворюватися адсорбційні шари товщиною в одну або кілька молекул.

При цьому:

1) адсорбційні сили подібні силам основних хімічних зв'язків і діють лише на малих відстанях;

2) адсорбційну активність проявляє не вся поверхня адсорбенту, а тільки лише певні активні центри, розташовані на опуклих ділянках, виступах, зламах, тобто на найбільш доступних місцях;

3) молекули газоподібних продуктів детонації фіксуються на адсорбційних центрах, не переміщуються по поверхні породи і не взаємодіють один з одним, утворюючи формально ще один поверхневий шар.

При високих температурах одночасно з адсорбцією відбувається десорбція внаслідок дії молекулярно-кінетичних сил. При вирівнюванні швидкостей згаданих процесів в системі встановлюється динамічна рівновага і тоді процеси адсорбції йоду або свинцю в мікро- і макротріщинах можуть підкорятися в першому наближенні рівнянню Ленгмюра, хоча в дійсності процес більш складний [21]:

$$A = K \frac{bP}{1 + bP}, \quad (1)$$

де K та b – постійні для даного процесу і заданих умов; P – рівноважний парціальний тиск газоподібних продуктів детонації, що адсорбуються, разом з інертними добавками, Па.

Слід зазначити, що кількість адсорбованих газоподібних компонентів не залежить від тиску, а всього лише від швидкості детонації використовуваної ВР. Стан динамічної рівноваги можна описати константою рівноваги адсорбції, яка тим більше, чим сильніше виражена спорідненість продуктів детонації і інертних добавок з природою гірської породи. З підвищенням температури посилюється процес десорбції, тому що зростає ентропія, а, відповідно, кінетична енергія зв'язування частинок твердих інертних добавок з адсорбційно-активними центрами гірської породи. Одночасно з цим, тиск в неоднорідностях гірської породи падає, що також сприяє адсорбції і сублімації інертних добавок.

В роботах [7, 8] показано, що міцність фрагментів підірваної гірничої маси з часом збільшується на 10–15 %. Це пояснюється поступовою дегазацією мікротріщин і, як наслідок, частковим їх змиканням.

Разом з тим, наявність в заряді ВР пилоподібних частинок навпаки призводить до деякого зменшення міцності уламків. Механізм цього зменшення не є очевидним, особливо, якщо міцність зменшується з часом. На перший погляд складається враження, що пилоподібні частинки після вибуху деякий час продовжують рухатися до вершини тріщини. Але таке припущення є невірним, оскільки потенційна енергія системи в цьому випадку безпричинно збільшується [9].

Для того, щоб пояснити зменшення міцності окремих частин розглянемо ідеальну кристалічну середу з кубічними решітками (рис. 1, а). В результаті дії вибуху в ній утворюються тріщини. Мікротріщина, при розгляді на молекулярному рівні, являє собою область, де стався розрив молекулярних зв'язків. Тому вершину тріщини можна схематично уявити, як показано на рис. 1, б.

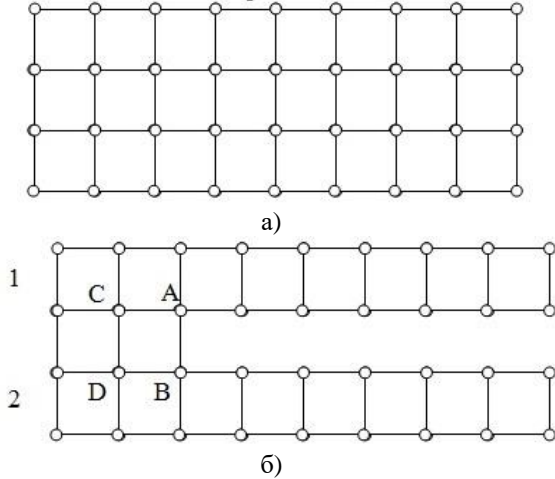


Рисунок 1 – Кристалічне середовище з кубічними решітками для розгляду мікротріщини на молекулярному рівні: а) – ідеальна кристалічна решітка; б) – кристалічна решітка з розривом молекулярних зв'язків

При формуванні тріщини вибухом її порожнина заповнюється газоподібними продуктами детонації. Їх дія на береги тріщини створює розподілене навантаження q , в області вершини тріщини створюється як розтягувальна та стискаюча напруги. Дійсно, представивши область 1 і 2 у вигляді жорстких балок, можна прийти до розрахункової схеми для визначення зусиль у зв'язках, що з'єднують ці балки (рис. 2).

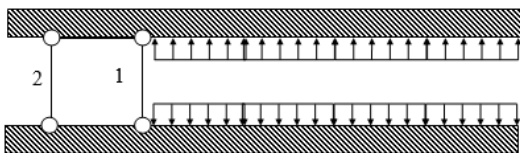


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення зусиль у зв'язках, що з'єднують балки

Зв'язки 1 та 2 (рис. 2) не слід розглядати як молекулярні зв'язки АВ і CD, показані на рис. 1, б. Дійсно, області розтягувальних і стискаючих напруг в вершині тріщини можуть поширюватися на десятки і сотні міжатомних відстаней. А вже при трьох зв'язках задача стає статично невизначеною. Проте зв'язок 1 цілком обґрунтовано може відображати сукупність міжатомних зв'язків, що знаходяться в розтягнутому стані. Зв'язок 2 являє собою сукупність стиснутих зв'язків.

Всі ці припущення є цілком допустимими, оскільки ми не ставимо завдання детального розрахунку напружено-деформованого стану навколо тріщини, а тільки хочемо показати на якісному рівні, як можуть змінюватися напруги при дегазації без наявності мостів і з їх присутністю.

Розглянемо верхню балку. Розподілене навантаження замінимо зосередженим, зобразимо опорні реакції (рис. 3).

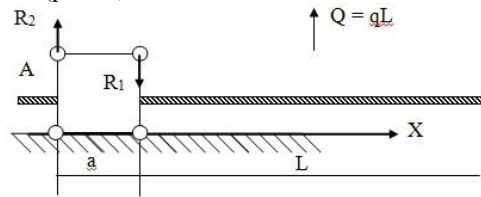


Рисунок 3 – Зображення опорних реакцій

Складемо рівняння рівноваги:

$$R_2 - R_1 + qL = 0 \text{ – лінійне відносно осі } Y, \quad (2)$$

$$qL(L/2 + a) - R_1 a = 0 \text{ – моментів відносно полюса } A \quad (3)$$

З (3) маємо:

$$R_1 = qL(L/(2a) + 1).$$

З (2):

$$R_2 = qL(L/(2a) + 1) - qL = qL(L/(2a)).$$

Значення реакцій вийшли позитивними, отже у зв'язку 1 є напруження розтягу, а в зв'язку 2 – стиску.

По міру дегазації сила Q зменшується практично до нуля. Напруги також зменшуються, що створює сприятливі умови для відновлення міжатомних зв'язків в вершині тріщини («заліковування» тріщини) і зростання міцності з часом, відповідно.

Інакше відбувається цей процес при наявності мостів (рис. 4).

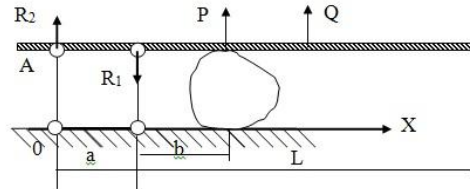


Рисунок 4 – Розподіл навантажень при наявності мостів

Частинки можуть рухатися до вершини тріщини, поки не утворюють щільний контакт з берегами тріщини. В результаті цього при дегазації сила P буде збільшуватися, і з часом стане рівною Q . Цей процес можна трактувати, як переміщення сили Q в нове положення. Рівняння рівноваги зміняться, отже, зміняться і значення опорних реакцій, тобто відбудеться зміна напруженого стану в вершині тріщини. Склавши рівняння рівноваги для цього випадку можна якісно дослідити зміну реакцій в залежності від положення інертних частинок (мосту) по довжині тріщини:

$$R_2 - R_1 + P = 0 \text{ – лінійне відносно осі } Y \quad (4)$$

$$P(b + a) - R_1 a = 0 \text{ – моментів відносно полюса } A \quad (5)$$

З (5):

$$R_1 = P(b/a + 1).$$

З (4):

$$R_2 = P(b/a + 1) - P = P(b/a).$$

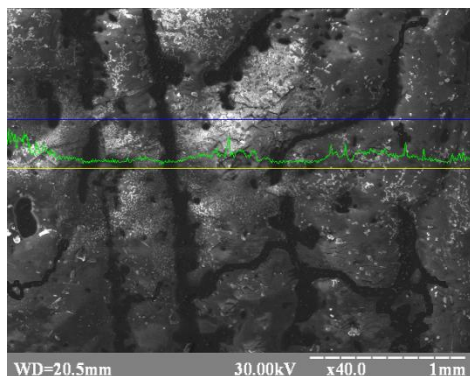
Розрахунок було зроблено (рис. 4) для значень b , що складають деяку частину L . Довжина тріщини і величина сили Q прийняті за одиницю.

Для розподіленого навантаження (без мосту і до дегазації) значення реакцій складо: $R_1 = 6Q$, $R_2 = 5Q$.

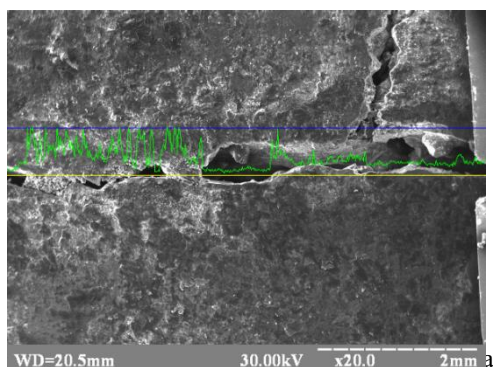
При наявності мосту, реакції істотно залежать від положення частинок. Так, якщо так званий міст знаходиться на відстані $b = 0,1L$, то напруги розтягу в вершині тріщини після дегазації стануть в три рази меншими. Тому міцність фрагментів повинна бути приблизно такою (дещо меншою), як і міцність відразу після вибуху без застосування пилоподібних включень.

Якщо міст знаходиться на початку тріщини, то напруги розтягу в вершині тріщини після дегазації стануть в два рази більшими. Тому міцність підірваних фрагментів повинна бути менше міцності фрагментів, отриманих без пилу, тобто має спостерігатися посилення дроблення після вибуху.

Для того, щоб підтвердити це припущення проводили серію експериментальних досліджень, де в якості дрібнодисперсної інертної добавки використовували будівельний цемент. Після вибуху в шпурі неруйнівного заряду вибухової речовини, що містить в якості оболонки дрібнодисперсний пил, модель була розділена на частини за допомогою металевого клина, а поверхні розколу вивчали на електронному мікроскопі (рис. 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Дослідження заповнення тріщин під час вибуху: а) – заряду без інертних добавок і без оболонки; б) – заряду з оболонкою з цементного пилу

На знімках поверхні розколу зразка, що був прийнятий за еталон (рис. 5, а) є характерна тріщина, що нічим не заповнена. Ймовірно, що з часом вона зімкнеться під дією зовнішніх сил. В той час, як на рис. 5, б зафіксовані заповнені частинками цементу порожнини мікротріщин, о підтверджує видвинуту гіпотезу і є підставою для подальших промислових досліджень. Отже, процесу змикання мікротріщин можуть перешкодити тверді частинки в їх порожнинах, куди вони можуть потрапити разом з газоподібними продуктами детонації.

Результати даних експериментів дозволили також отримати емпіричну залежність відносної глибини тріщини від акустичної жорсткості середовища, що заповнює зазор:

$$\bar{h}_{mp} = 0,7 \cdot 10^{-4} (c\rho) + 0,75874 ; \quad (6)$$

де коефіцієнт кореляції – 0,98; \bar{h}_{mp} – відносна глибина утвореної тріщини.

Отримані результати дають підставу стверджувати, що інертні частки (які мають більшу густину та вагу), що заповнюють мікротріщини, оберігають від вильоту газоподібні продукти детонації, сприяючи проникненню їх в тріщини, що утворилися від проходження ударної хвилі

ВИСНОВКИ. Проведені дослідження дають підставу стверджувати, що процесу відновлення міцності кусків відбитої вибухом гірничої маси можуть запобігати мікрочастинки, які потрапляють усередину порожнин мікротріщин з продуктами детонації й утворюють на стінках мікротріщин формування (мости), що перешкоджають їх змиканню. Оскільки по мірі дегазації напруги в тріщинах зменшуються, що створює сприятливі умови для відновлення міжатомних зв'язків в вершині тріщини («заліковування» тріщини) і зростання міцності з часом, відповідно, то наявність мостів в мікротріщинах призводить до того, що з часом міцність фрагментів підірваної гірничої маси залишається приблизно такою (дещо меншою), як і міцність відразу після вибуху без застосування пилоподібних включень.

Додатково отримано емпіричну залежність відносної глибини тріщини від акустичної жорсткості середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долударева Я. С. Исследование изменения степени разупрочнения горных пород с течением времени после неразрушающего взрывного воздействия. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук : КДПУ, 2004. Вип. 6/2004(29). С. 118–120.
2. Долударева Я. С. Изменение размеров зоны разупрочнения образцов с течением времени после импульсного неразрушающего нагружения. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КДПУ, 2008. Вип. 5/2008 (52), част. 2. С. 136–139.
3. Viktorov S. D., Odintcev V. N., Kochanov A. N., Osokin A.A. Phenomenon of the Emission of Microparticles under Quasi-Static Loading of Rocks Chi-

na. Metallurgical Industry Press, China, 2011. P. 3–5.

4. Kabwe E., Wang Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2015. Vol. 5. P. 104–121.

5. Долударева Я. С., Комир В. М., Ключко И. И., Пеева И. Э. Характер изменения прочностных свойств горных пород в результате воздействия на них взрывов зарядов взрывчатых веществ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий збірник*. Кременчук : КНУ, 2011. Вип. 1/2011(7). С. 16–21.

6. Пеева И. Э., Мыслицкий С. М., Пеев А. М. Методика исследований влияния взрывного и механического нагружений на изменение прочностных свойств хрупких материалов. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук : КДПУ, 2002. Вип. 6(17). С. 40–44.

7. Лемижанская В. Д., Комир В. М., Комир А. И., Долударева Я. С., Долударев В. Н., Козловская Т. Ф. Особенности поведения крепких скальных пород при импульсном воздействии взрыва зарядов промышленных взрывчатых веществ. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ, 2011. Вип. 6(71), С. 123–127.

8. Лемижанская В. Д., Долударева Я. С., Козловская Т. Ф., Комир А. И. Влияние поверхностно-активных веществ в зоне разрушения горных пород на интенсивность их дробления при воздействии импульсных нагрузок. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. Дніпро : НГУ, 2012. № 4(130). С. 93–97

9. Фролов О. О., Бритвин Ю. О. Встановлення закономірностей руйнування тріщинуватих гірських порід вибухом. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"* : Зб. наук. праць. 2015. Вип. 27. С. 81–89.

10. Vorobyov V., Pomazan M., Shlyk S., Vorobyova L. (2017), Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 1(87), pp. 53–62.

11. Фролов О. О., Бритвин Ю. О. Дослідження впливу тріщинуватості гірських масивів на результати руйнування скельних порід вибухом. *Вісник Криворізького технічного університету* : Зб. наук. праць. Кривий Ріг.: КТУ, 2015. Вип. 39. С. 14–19.

12. Konoval V. N., Kratkovsky I. L., Ishchenko K. S. Resource-saving methods of polymineral rocks explosive destruction. Petrosani : UNIVERSITAS Publishing University of Petrosani, 2018. P. 229–250.

INFLUENCE OF FINE DISPERSED INERT SOLID PARTICLES IN CHARGE ON SOLID MEDIA SOFTENING

V. Kulynych, I. Pieieva, V. Vorobyov, L. Vorobyova, V. Chebenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ORCID: 0000-0003-1702-2989; 0000-0003-4916-7381; 0000-0002-3446-4714; 0000-0001-5333-6091; 0000-0003-1076-2562

Purpose. Effectiveness evaluation the artificial creation of bridges that wedge the microcracks walls formed after the explosive effect and prevent their closure to implement the rock strength control. **Methodology.** Analytical schemes and calculation of stress changes during degassing without bridges and with their presence on the basis of material resistance basic dependences and rules are given. The presence of inert particles in the cracks was experimentally evaluated using an electron microscope. **Findings.** Controlling possibility the exploded rock mass strength by means of bridges in cracks artificial creation, which wedge the microcracks walls formed after the explosive effect and prevent their closure, is considered. Analytical schemes and calculation of voltage changes during degassing without bridges and with their presence are given. The hypothesis that solid inert additives in the explosive charge prevent the healing of microcracks after the rocks explosive destruction has been experimentally confirmed. **Originality.** For the first time, it is analytically described the behavior of inert particles inside the microcracks, the adsorption processes that occurs there. **Practical value.** The obtained results could be used during planning and realization rock mass blasting operations. **Conclusions.** Studies suggest that the process of restoring the strength the pieces reflected by the rock mass explosion can be prevented by microparticles that enter the microcracks cavities with detonation products and form on the walls of microcracks formation (bridges) that prevent their closure. Since as the degassing stresses in the cracks decrease, which creates favorable conditions for the restoration of interatomic bonds at the crack tip ("healing" of the crack) and increase strength over time, accordingly, the bridges presence in microcracks leads to the fact that over time the strength of fragments the exploded rock mass remains approximately the same (slightly less) as the strength immediately after the explosion without the use of pulverulent inclusions. Additionally, the empirical dependence of the relative crack depth on the medium acoustic stiffness the is obtained.

Key words: Strength, rock, degassing, microcracks, inert components, adsorption.

REFERENCES

1. Doludareva, Ya. S. (2004). Issledovanie izmeneniya stepeni razuprochneniya gornyh porod s techeniem vremeni posle nerazrushajushhego vzryynogo vozdeystviya [Investigation of the change in the degree of softening of rocks over time after non-destructive explosive action]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky] KDPU. Kremenchuk, issue 6 (29), pp. 118–120. [in Russian]

2. Doludareva, Ya. S. (2004). Izmenenie razmerov zony razuprochneniya obrazcov s techeniem vremeni posle impul'snogo nerazrushajushhego nagruzheniya [Change in the size of the softening zone of samples with time after impulse non-destructive loading]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky] KDPU. Kremenchuk, issue 5 (52), part 2, pp. 136–139. [in Russian]

3. Viktorov, S. D., Odintcev, V. N., Kochanov, A. N., Osokin, A. A. Phenomenon of the Emission of Microparticles under Quasi-Static Loading of Rocks China. Metallurgical Industry Press, China, 2011. P. 3–5. [in English]
4. Kabwe, E., Wang, Y. Review on Rockburst Theory and Types of Rock Support in Rockburst Prone Mines. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2015. Vol. 5. P. 104–121. [in English]
5. Doludareva, Ya. S., Komir, V. M., Klochko, I. I., Pieieva, I. E. (2011). Harakter izmenenija prochnostnyh svojstv gornyh porod v rezul'tate vozdeystvija na nih vzryvov zarjadov vzryvchatyh veshhestv [The nature of the change in the strength properties of rocks as a result of the impact on them of explosions of explosive charges]. Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobnictva: naukovno-virobnichij zbirnik [Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry] KNU. Kremenčuk, issue 1 (7), pp. 16–21. [in Russian]
6. Pieieva, I. E., Myslitskyi, S. M., Pieiev, A. M. (2002). Metodika issledovanij vlijanija vzryvnogo i mehanicheskogo nagruženij na izmenenie prochnostnyh svojstv hrupkih materialov [Methodology for investigating the effect of explosive and mechanical loading on the change in the strength properties of brittle materials]. *Visnik Kremenčuc'kogo derzhavnogo politehničnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo* [Bulletin of the Kremenčug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky] KDPU. Kremenčuk, issue 6 (17), pp. 40–44. [in Russian]
7. Lemizhanskaya, V. D., Komir, V. M., Komir, A. I., Doludareva, Ya. S., Doludarev, V. N., Kozlovskaya, T. F. (2011). Osobennosti povedenija krepkih skal'nyh porod pri impul'snom vozdeystvii vzryva zarjadov promyshlennyh vzryvchatyh veshhestv [Features of the behavior of hard rocks under the impulse impact of the explosion of charges of industrial explosives]. *Transactions of kremenčuk mykhailo ostrogradskyi national university* [Visnik of the KrNU named by Mykhailo Ostrogradskiy]. Kremenčuk, issue 6 (71), pp. 123–127. [in Russian]
8. Doludareva, Ya. S., Lemizhanskaya, V. D., Kozlovskaya, T. F., Komir, A. I. (2013). Vlijanie poverhnostno-aktivnyh veshhestv v zone razrushenija gornyh porod na intensivnost' ih droblenija pri vozdeystvii impul'snyh nagruzok [The influence of surface-active substances in the region of rock destruction on the intensity of their fragmentation under the action of pulsed loads], *Scientific Bulletin of the National Mining University* [Naukovij visnyk Natsionalnogo girnichogo universytetu], vol. 4, no. 130, pp. 93–97. [in Russian]
9. Frolov, O. O., Britvin, Yu. O. (2015) Vstanovlennja zakonmirnostej rujnuvannja trishhinuvatih girs'kih porid vibuhom. [Establishing patterns of destruction of fractured rocks by explosion] *Visnik NTUU "KPI". Serija "Girnictvo": Zb. nauk. Prac* [Bulletin of NTUU "KPI". Mining series: Collection of scientific works], vol. 4, no. 130, pp. 81–89. [in Ukrainian]
10. Vorobyov, V., Pomazan, M., Shlyk, S., Vorobyova, L. (2017), Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 1(87), pp. 53–62. [in English]
11. Frolov, O. O., Britvin, Yu. O. (2015) Doslidzhennja vplivu trishhinuvatosti girs'kih masiviv na rezul'tati rujnuvannja skel'nih porid vibuhom. [Investigation of the influence of rock fractures on the results of rock destruction by explosion] *Vi`snik Krivori`z'kogo tekhnichnogo uni`versitetu: Zb. nauk. Prac* [Bulletin of Kryvyi Rih Technical University: Collection of scientific works], issue 39, pp. 14–19. [in Ukrainian]
12. Konoval, V. N., Kratkovsky, I. L., Ishchenko, K. S. Resource-saving methods of polyminerall rocks explosive destruction. *Petrosani : UNIVERSITAS Publishing University of Petrosani*, 2018. P. 229–250. [in English]

Стаття надійшла 05.04.2021.