

УДК 622.063.23, 666.9.015

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-1-14>

СПРЯМОВАНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НЕВИБУХОВИМИ РУЙНУЮЧИМИ СУМІШАМИ

Сахно Іван Георгійович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8592-0572

Сахно Світлана Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3917-9143

Руйнування міцних гірських порід є одним з основних процесів у сучасній гірничодобувній промисловості. Найбільш поширеним способом руйнування скельних і напівскельних гірських порід з міцністю по шкалі проф. Протодіяконова більше 6 од. є вибуховий спосіб. Вибухове руйнування пов'язано з численними шкідливими впливами на гірський масив і довкілля. Окрім цього, ведення вибухових робіт пов'язано з ризиками пошкодження обладнання, приладів, комунікацій, які перебувають у зоні впливу вибухових робіт. Іноді вибухове руйнування не може бути використано через обмеження пило газозового режиму або з інших питань безпеки. Екологічною альтернативою традиційним вибуховим методам руйнування міцних гірських порід є невибухові технології. Серед різних методів невибухового руйнування перспективним є метод, що базується на використанні невибухових руйнуючих сумішей. Невирішеним питанням невибухового руйнування гірських порід є спрямоване руйнування в заданих напрямках. Керування напрямком руйнування ведеться переважно за рахунок оптимізації схеми розташування шпурів. При цьому не враховуються природні дефекти, ослаблення і структурні неоднорідності гірських порід. Внаслідок цього спостерігається «ухил» тріщин від проектного напрямку. Існують технічні рішення, що спрямовані на усунення наявних недоліків спрямованого невибухового руйнування, що ґрунтуються на використанні шпурових вставок і патронів. У статті розглянуто метод спрямованого руйнування гірських порід, який базується на створенні концентраторів розтягуючих напружень на поверхні шпура в необхідних місцях. Розглянуто вплив додаткового встановленого в шпур патрона невибухової руйнуючої суміші на поле напружень поблизу шпура. Запропоновано модифіковану конструкцію патрона невибухової руйнуючої суміші, що дає змогу керувати напрямком руйнування гірських порід під час коригування траєкторії руйнування, яка може бути непрямою лінією.

Ключові слова: невибухова руйнуюча суміш, спрямоване руйнування порід, концентрації напружень, патрон невибухової руйнуючої суміші, траєкторія руйнування порід, керування руйнуванням порід.

Sakhno Ivan, Sakhno Svitlana. Directional explosive-free breakage of rock by soundless chemical demolition agents

The hard rocks breakage is one of the main processes in the modern mining and mineral recovery industry. The most common method breakage of hard rock's with strength according to the scale of Prof. Protodiakonov more than 6 units, there is an explosive. Explosive breakage is associated with numerous harmful effects on the rock mass and the environment. In addition, conducting blasting operations is associated with risks of damage to equipment, devices, and communications located in the zone of impact of blasting. In some cases, explosive destruction cannot be used due to limitations of the dust-gas regime or other safety issues. Explosive-free technologies are an ecological alternative to traditional explosive methods of hard rock breakage. Among the various methods of explosive-free breakage, the method based on the use of soundless chemical demolition agents is promising. An unsolved issue of explosive-free rock breakage is directional fracturing. Control of the breakage direction is carried out mainly due to the optimization of the borehole's layout. At the same time, natural defects, weakening and structural heterogeneities of rock mass are not taken into account. As a result, a "slope" of cracks from the design direction is observed. There are technical solutions aimed at eliminating the existing disadvantages of directed non explosive-free breakage based on the additional installation in the borehole cartridges. This paper discusses the method of directional fracturing of rocks, which is based on the creation of tensile stress concentrators on the borehole surface in the necessary places. The impact of an additional soundless chemical demolition agent cartridge installed in the borehole on the stress field nearby the borehole is considered. A modified design of the explosive-free cartridge is proposed, which allows to control the direction of rock breakage while adjusting the path of fracturing, which may not be a straight line.

Key words: soundless chemical demolition agent, direction rock breakage, stress concentrations, cartridge of soundless chemical demolition agent, trajectory of rock fracturing, rock breakage control.

Руйнування гірських порід є одним з основних процесів у сучасній гірничодобувній промисловості. Найпоширенішим способом руйнування міцних гірських порід (з міцністю більше 6 од. по шкалі проф. Протодіяконова) є вибуховий спосіб. Руйнування гірських порід вибухом пов'язано з численними шкідливими впливами на навколишній масив і середовище, такими як вібрація, утворення пилу, розвиток природної тріщинуватості і ослаблення порід [1]. До того ж ведення вибухових робіт пов'язано з ризиками пошкодження обладнання, приладів, комунікацій, які перебувають у зоні впливу вибухових робіт. Тому розроблення та застосування більш екологічних і нединамічних методів руйнування міцних порід як альтернативи вибуховому руйнуванню порід є актуальними завданнями. Цією альтернативою є використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС), які широко застосовуються для руйнування скельних порід або бетонних конструкцій, проведення виробок та нетрадиційних способів розвідки газу.

НРС – це порошкоподібна речовина, яка має тенденцію до об'ємного розширення під час гідратації за рахунок утворення гідроксиду кальцію або етрінгіту. Тиск розширення НРС залежить від діаметра отвору, вмісту води, температури довкілля, властивостей породи і може перевищувати 50–80 МПа. Основними характеристиками НРС, що визначають ефективність його використання в гірництві, є розширювальний тиск, час руйнування, стійкість до різних температур і води. На це спрямовані основні зусилля вчених.

Розширення НРС зумовлене гідратацією CaO [2; 3]. Таким чином, тиск розширення НРС прямо пропорційний вмісту CaO в суміші. Проте спроби збільшити величину розширювального тиску та швидкість його генерації за рахунок збільшення частки CaO виявились неефективними. Наслідком збільшення частки CaO в суміші є неконтрольоване підвищення температури, википання хімічно не зв'язаної води із суміші та викид НРС зі шпуру [3; 4].

Багато досліджень показали, що співвідношення води та НРС обернено пропорційне значенню та швидкості створення тиску розширення, тоді як вища температура довкілля приводить до раннього та більшого тиску розширення [5]. Проте регулювання швидкості утворення розширювального тиску та його величини шляхом нагрівання води (перед змішуванням) або суміші НРС неефективно, оскільки призводить до неконтрольованого збільшення тепла та викиду НРС зі шпуру. Причиною цього явища є екзотермічний тип реакції гідратації CaO.

Сьогодні очевидно, що для підвищення швидкості створення експансивного тиску без викиду НРС зі свердловини необхідно відкоригувати систему НРС, які виготовляються шляхом змішування з іншими цементуючими сумішами. Як прискорювачі запропоновано численні добавки, такі як гідроксиди лугів, силікати, фторосилікати, органічні сполуки, які по-різному впливають на процес гідратації в'язучих. Dessouki та ін. [6] пропонують прискорити швидкість об'ємного розширення НРС шляхом додавання 15% CaSO₄. De Silva та ін. [7] запропонували додати домішку для підвищення в'язкості (VEA) для покращення стійкості до вимивання модифікованого НРС, який можна ефективно використовувати у підводних умовах. Maneepoi та ін. [8] показали, що додавання 4% мас. MgCl₂ і 3% мас. CaCl₂ прискорило початок руйнування на 47,4% і 61,2% відповідно.

У згаданих дослідженнях значні позитивні результати були отримані в галузі вивчення та модифікації властивостей НРС. Проте механізм руйнування та оптимальні параметри руйнування ще потребують подальшого вивчення для підвищення ефективності невибухового руйнування. Основними параметрами технології невибухового руйнування є діаметр шпурів та відстань між ними. Більшість дослідників і виробників НРС рекомендує використовувати діаметри шрупів в діапазоні від 30 до 60 мм. Для розрахунку відстані між шпурами отримані емпіричні співвідношення та рівняння на основі механіки суцільного середовища.

Зусилля щодо контролю процесу руйнування також були зосереджені переважно на оптимізації схеми розташування шпурів. Наприклад, Narada [2] рекомендував гексагональний тип схеми шпурів для оптимізації щільності тріщинуватості породи. Така оптимізація зазвичай полягає в досягненні максимального руйнування мінімальною кількістю шпурів. При цьому спрямоване руйнування, яке є досить актуальним для видобутку корисних копалин, практично не досліджується. Ідея використання НРС для спрямованого руйнування порід полягає в тому, щоб контролювати ініціацію та поширення тріщин. На відміну від інших методів руйнування, які утворюють численні радіальні тріщини, НРС зазвичай створюють три або рідко чотири тріщини навколо шпуру. Однак НРС може створити й одну або дві тріщини з необхідною орієнтацією, якщо контролювати цей процес.

Бажане поширення мережі тріщин зазвичай досягається зміною розміру та відстані між шпурами та їх розташуванням. У процесі гідратації НРС створюється рівномірний тиск

на внутрішню поверхню шпура в усіх напрямках. У цьому випадку місця зародження тріщин і їх поширення визначаються властивостями порід і їх неоднорідністю, які мають випадковий характер. Тому важко виключити небажану тріщинуватість за напрямками, які не збігаються з необхідними. При цьому можлива поява на поверхні шпура додаткових тріщин, які не збігаються з необхідним напрямком.

У дослідженні запропоновано спосіб невибухового спрямованого руйнування порід. Запроваджено принцип направленої руйнування породи за рахунок використання патрона НРС, що дає можливість керованого спрямованого руйнування.

Принцип спрямованого руйнування породи за допомогою НРС.

Об'ємний тиск розширення НРС створює рівновелике поле напружень в навколошпуровій ділянці за традиційного способу використання НРС – заливки в шпур. У такому випадку в зоні контакту з поверхнею шпура порода стискається. Однак, оскільки розширення НРС призводить до збільшення діаметра шпура, навколо нього виникають напруження розтягування (рис. 1а). Коли напруження розтягування перевищує міцність гірських порід на розрив, виникають тріщини. Вони є результатом розтягувальних напруг, спрямованих під прямим кутом до тріщини. Напруження стиску, розташовані паралельно тріщині, не мають суттєвого впливу на руйнування, оскільки міцність гірських порід на стиск значно перевищує міцність

на розтягування, а швидкість трансформації напружень низька (рис. 1а). У випадку одиночного шпура місце зародження тріщини визначається відстанню до вільної поверхні, неоднорідностями породи, прихованими тріщинами та дефектами. У випадку двох або більше шпурів тріщини виникають і поширюються між ними, якщо відстань між отворами розрахована правильно і в породі немає дефектів.

Ідея методу спрямованого руйнування, удосконалення якого наведено в роботі, полягає у штучному створенні концентраторів розтягувальних напружень на поверхні шпура в необхідному місці. Реалізація цієї ідеї здійснюється шляхом додаткової установки в шпур патрона з НРС, розміщеним всередині патрона, як показано на рис 1б.

Сьогодні відомий метод спрямованого руйнування, у якому патрон складається з двох елементів. Кожен елемент являє собою половину сталеві труби із зовнішнім діаметром, рівним діаметру шпура, отриману поздовжнім розрізом [9; 10]. Під час використання такого патрона тиск НРС створює підвищені напруження розтягування в одному з діаметральних напрямків шпура, що збігається із зазором патрона. Водночас в інших напрямках патрон захищає від виникнення високих розтягувальних напружень біля поверхні шпура (рис. 1б). Концентрації напружень розтягування є місцями зародження тріщин у породі. Коли напруження розтягування перевищує міцність породи на розрив, тріщина зароджується в необхідному напрямку.

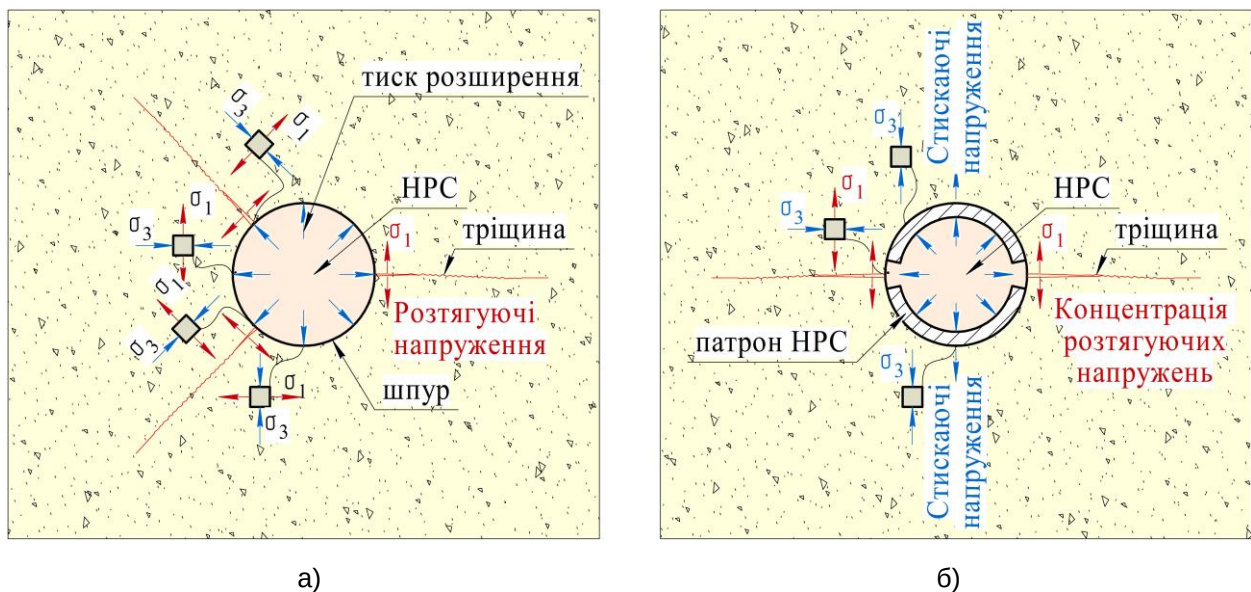


Рис. 1. Механізм руйнування за допомогою НРС: (а) некероване руйнування НРС; (б) спрямоване руйнування НРС

Поширення тріщини забезпечується впливом розтягувальних напружень під час розширення НРС. Таким чином, забезпечується направлений розрив породи.

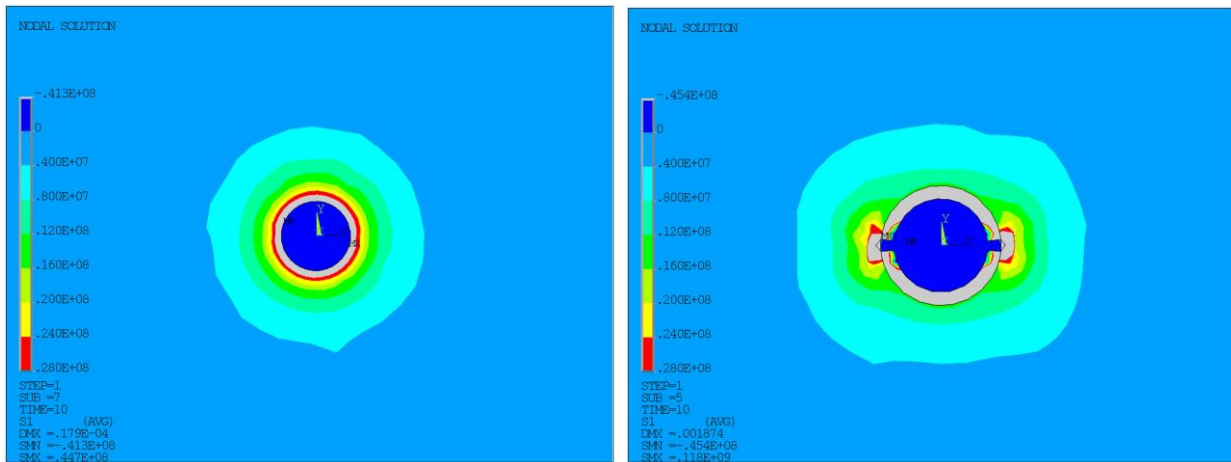
Підтвердженнями наведеному механізму є результати чисельного моделювання. Розподіл максимальних головних напружень на контурі шпура за традиційного варіанта використання НРС і з використанням патрону наведено на рис. 2. Тиск саморозширення НРС під час моделювання складав 45 МПа.

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що, на відміну від рівномірного поля напружень, що виникає у навколошпуровій ділянці після заливки НРС (рис. 2а), після використання патрону формуються концентрації напружень, що перевищують межу міцності порід у декілька разів (рис. 3б).

Описаний спосіб досліджено у лабораторних умовах, а також підтверджено результатами випробування в реальних виробничих умовах.

Лабораторні експерименти з руйнування за допомогою НРС були проведені на пінобетонних плитах (розміри 200 × 150 × 70 мм) зі шпуром 12 мм у центрі. В половину шпурів заливали НРС (рис. 2а), а в другу половину додатково встановлювали патрони з металопластикової труби, діаметрально розрізаної по поздовжній осі (рис. 3б). Патрони встановлювалися таким чином, щоб зазори були орієнтовані по довгій стороні пластини, щоб виключити випадковість результату.

Результати випробувань підтвердили ефективність використання патронів. У тих плитах, у яких не були встановлені патрони, зароджувалися і поширювалися, як правило, три тріщини,



а)

б)

Рис. 2. Розподіл максимальних головних напружень навколо шпура за традиційного руйнування НРС (а) і за використання патрона (б)



а)

б)

Рис. 3. Руйнування невибуховими руйнуючими сумішами: (а) традиційний метод заливкою НРС в шпур; (б) метод спрямованого руйнування з використанням патронів НРС

як показано на рис. 3а. Тріщини були випадково орієнтовані. У разі встановлення патрона плита руйнувалась в напрямку, що збігається із зазором патрона, як показано на рис. 3б.

Однак практичне використання розробленого авторами способу спрямованого руйнування показало, що наведене технічне рішення має недоліки. Патрон не дає змоги створювати спрямоване руйнування в напрямку, що не збігається з діаметральним, тому неможливо забезпечити руйнування по ламаній лінії. Це обумовлено діаметральною орієнтацією прорізів у патроні. Окрім того, оскільки патрон містить тільки два прорізи і обидва вони орієнтовані вздовж однієї прямої, неможливо створити руйнування по більш ніж одній лінії. Під час використання описаного патрона керування напрямком руйнування обмежено магістральною тріщиною. Тому метою подальших досліджень є вдосконалення наведеного способу спрямованого руйнування.

Відомі пристрої для спрямованого руйнування [9] не забезпечують досягнення наведеного технічного результату. Під час реалізації відомого пристрою рівномірний тиск, який виникає всередині патрона в процесі саморозширення НРС, передається на стінки шпуру через оболонки патрона, а в місцях, що збігаються з подовжніми розрізами в патроні, виникають зони концентрації розтягувальних напружень. Ці зони є місцями зародження тріщин і подальшого руйнування матеріалу. Оскільки розрізи у відомому патроні розташовані діаметрально, концентрації розтягувальних напружень виникають лише в діаметральному напрямку біля розрізів. Це не дає змоги керувати напрямком руйнування порід, якщо необхідна лінія руйнування є ламаною або потрібно створити більше однією магістральної тріщини.

В основу запропонованого патрону НРС покладено завдання удосконалення патрона невибухової руйнуючої суміші, в якому за рахунок зміни форми конструктивних елементів та їх кількості забезпечується керування розподілом напружень навколо шпуру і створення концентраторів розтягувальних напружень в необхідних напрямках, що дає змогу досягти надійного направленного руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією, або по різних траєкторіях, а також приводить до спрощення виготовлення патронів.

Поставлене завдання вирішується тим, що в патроні невибухової руйнуючої суміші, що містить водонепроникну оболонку, виготовлену з труби, усередину якої поміщена невибухова руйнуюча суміш, водонепроникна оболонка

патрона виконана не менш ніж з двох частин труби, отриманих поздовжніми прорізами, які мають один глухий торець.

Виконання водонепроникної оболонки патрона НРС не менш ніж з двох частин труби, отриманих поздовжніми прорізами, забезпечує утворення навколо шпуру нерівномірного поля напружень, що виникає внаслідок саморозширення НРС всередині патрона, з формуванням у місцях, що збігаються з прорізами в патроні, концентрацій розтягувальних напружень, ріст яких призводить до зародження тріщин і руйнування матеріалу в необхідному напрямку або напрямках. Оскільки положення прорізів не обмежено діаметральним напрямком, за допомогою патрону може бути досягнуто руйнування матеріалу по необхідній нелінійній траєкторії, а також створення в необхідних напрямках більше однієї тріщини. Це дає змогу досягти надійного направленного руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією. На рис. 4 (а, б) наведено загальний вигляд патрона НРС в ізометрії. Поперечний і подовжній перетини патрона наведено на рис. 4в.

Розроблений патрон НРС працює таким чином. У гірській породі пробурюють шпури, глибина, діаметр і розташування яких визначаються розрахунковою схемою. Наружний діаметр патрону невибухової руйнуючої суміші узгоджується з діаметром шпуру, а саме має бути на 1–3 мм менше діаметра шпуру. Для пропонуваніх патронів доцільно використовувати невибухові руйнуючі суміші на основі грубо молотого вапна.

У змішувальній ємності перемішуються компоненти невибухової руйнуючої суміші 4. Елементи патрона, що являють собою водонепроникні оболонки 1, з'єднуються й фіксуються між собою кріпильною стрічкою. Приготована пластикна суміш 4 поміщається всередину порожнини патрона, що утворилась з'єднаними водонепроникними оболонками 1. Зібраний у такий спосіб патрон поміщують у шпур таким чином, щоб діаметральні прорізи 2 збігалися з необхідними напрямками руйнування матеріалу, що визначені проєктною траєкторією руйнування. За розміщення патрона у висхідних шпурах його додатково фіксують за допомогою розпорних пристроїв, наприклад клинів. Зазначені операції повторюються у всіх шпурах.

Саморозширення НРС 4 в процесі її гідратації створює внутрішній тиск на водонепроникні оболонки 1, що спричиняє тиск оболонок на стінки шпуру. Водонепроникні оболонки переміщуються, в результаті чого зазори між ними, в місцях прорізів 2, збільшуються. Внаслідок

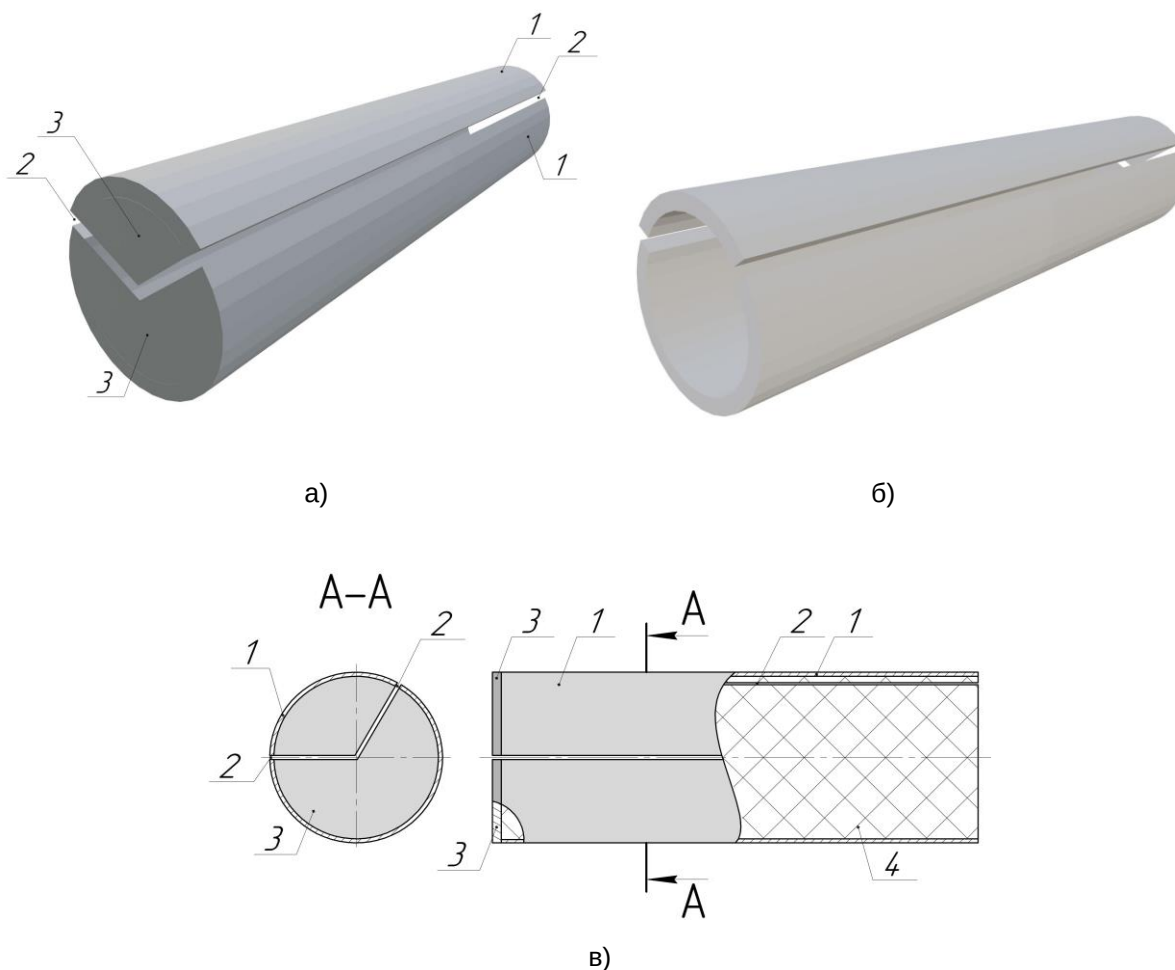


Рис. 4. Патрон НРС в ізометрії (а, б), поперечний і подовжній перетини (в)

Примітка: 1 – водонепроникна оболонка з частин труби; 2 – подовжні прорізи; 3 – глухий торець патрона; 4 – невибухова руйнуюча суміш

цього в навколошпуровій області матеріалу, що руйнується, формується нерівно компонентне поле напружень з концентраціями розтягувальних напружень вздовж прорізів 2 патрона НРС. Після перевищення розтягувальними напруженнями межі міцності матеріалу на розтягування відбувається розрив міжатомних зв'язків і утворення тріщин, орієнтація яких збігається з напрямками прорізів 2 у патроні НРС. Розкриття і ріст тріщин призводить до руйнування матеріалу за проектною траєкторією або траєкторіями.

В роботі запропоновано модифікований патрон НРС, робота якого дає змогу забезпечити керування розподілом напружень навколо шпуру з моменту розширення НРС, що дає можливість досягти надійного направленої руйнування матеріалів по траєкторії, яка не обмежується прямою лінією, або по різних траєкторіях. Подальші дослідження будуть спрямовані на обґрунтування параметрів способу руйнування гірських порід з використанням розробленого патрона, лабораторні і виробничі випробування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Dai Y., Khandelwal M., Qiu Y., Zhou J., Monjezi M., Yang P. A hybrid metaheuristic approach using random forest and particle swarm optimization to study and evaluate backbreak in open-pit blasting. *Neural Comput Appl.* 2022. № 34. P. 6273–6288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06776-z>.
2. Harada T., Soeda K., Idemitsu T., Watanabe A. Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers.* 1993. № 478. P. 95–109. DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478_91.

3. Natanzi A.S., Laefer D.F., Connolly L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. *Constr Build Mater.* 2016. № 110. P. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016>.
4. Hinze J., Brown J. Properties of Soundless Chemical Demolition Agents. *J Constr Eng Manag.* 1994. № 120 (4). P. 816 DOI: 827. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1994)120:4(816)).
5. Laefer D., Natanzi A., Zolanvari S. Impact of thermal transfer on hydration heat of a soundless chemical demolition agent. *Constr Build Mater.* 2018. № 187. P. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.168>.
6. Dessouki A., Mitri H. Rock Breakage Using Expansive Cement. *Engineering.* 2011. № 3 (2). P. 168–173. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2011.32020>.
7. De Silva V.R.S., Ranjith P.G., Perera M.S.A., Wu B., Rathnaweera T.D. The influence of admixtures on the hydration process of soundless cracking demolition agents (SCDA) for fragmentation of saturated deep geological reservoir rock formations. *Rock Mech Rock Eng.* 2019. № 52. P. 435–454. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1596-9>.
8. Maneenoi N., Bissen R., Chawchai S. Influence of admixtures on the performance of soundless chemical demolition agents and implications for their utilization. *J Sustain Min.* 2022. № 21 (2). P. 3. DOI: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1350>.
9. Пат. вин. № 100062, МПК (2006.01) E21C 37/06 Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючимим складами й патрон для його реалізації / І.Г. Сахно, М.М. Касьян (Україна). а2011 00476; заявл. 17.01.2011, опубл. 12.11.2012, бюл. № 21. 5 с.
10. Sakhno S., Kobylanskyi B., Sakhno I. Destruction of rocks by the non-explosive depleting compounds during mining. *Mining of Mineral Deposits.* 2016. № 10 (1). P. 25–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.025>.

REFERENCES:

1. Dai, Y., Khandelwal, M., Qiu, Y., Zhou, J., Monjezi, M., Yang, P. (2022). A hybrid metaheuristic approach using random forest and particle swarm optimization to study and evaluate backbreak in open-pit blasting. *Neural Comput Appl.*, 34, P. 6273–6288. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06776-z>.
2. Harada, T., Soeda, K., Idemitsu, T., Watanabe, A. (1993). Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 478, P. 95–109. https://doi.org/10.2208/jsej.1993.478_91.
3. Natanzi, A.S., Laefer, D.F., Connolly, L. (2016). Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. *Constr Build Mater.*, 110, P. 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016>.
4. Hinze, J., Brown, J. (1994). Properties of Soundless Chemical Demolition Agents. *J Constr Eng Manag.*, 120 (4), P. 816–827. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(1994)120:4(816)).
5. Laefer, D., Natanzi, A., Zolanvari, S. (2018). Impact of thermal transfer on hydration heat of a soundless chemical demolition agent. *Constr Build Mater.*, 187, P. 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.168>.
6. Dessouki, A., Mitri, H. (2011). Rock Breakage Using Expansive Cement. *Engineering*, 03 (02), P. 168–173. <https://doi.org/10.4236/eng.2011.32020>.
7. De Silva, V.R.S., Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., Wu, B., Rathnaweera T.D. (2019). The influence of admixtures on the hydration process of soundless cracking demolition agents (SCDA) for fragmentation of saturated deep geological reservoir rock formations. *Rock Mech Rock Eng.*, 52, P. 435–454. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1596-9>.
8. Maneenoi, N., Bissen, R., Chawchai, S. (2022). Influence of admixtures on the performance of soundless chemical demolition agents and implications for their utilization. *J Sustain Min.*, 21 (2), P. 3. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1350>.
9. Sakhno, I., Kasyan, M. (2006). *The method of destruction of rocks by non-explosive destructive compositions and a cartridge for its implementation* (UA. Patent No. 100062). Ukrpatent.
10. Sakhno, S., Kobylanskyi, B., Sakhno, I. (2016). Destruction of rocks by the non-explosive depleting compounds during mining. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (1), 25–30. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.025>.