**1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ПІДРИВАННЯ В’ЯЗКИХ СКЕЛЬНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

* 1. **Гірничо - технологічні властивості гірських порід**

Гірські породи в природних умовах знаходяться в складному напружено - деформованому стані (НДС), що формується під дією гравітаційних сил, геотектонічних зрушень, умов насичення, геотермії. Сукупність цих факторів здатна різко змінити фізико-механічні властивості порід (тверді породи з яскраво вираженим крихким руйнуванням на великих глибинах стають пластичними, текучими тілами). Остання обставина різко звужує можливість вивчення властивостей гірських порід в умовах максимального наближення до натури. Оскільки, по-перше, неможливо витягти зразок гірської породи з глибоких горизонтів, не спотворивши його механічних властивостей, тому що зняття природного поля напруг приводить до видозміни мікротріщинуватості, а, по-друге, усебічне моделювання глибинних процесів у лабораторних умовах неможливе, як унаслідок складності модельованих явищ, так і в силу неповноти даних про них.

Перераховані вище особливості фізичного стану ГП визначають їхні механічні властивості. Тому гірські породи можна розділити на два основних класи: пухкі породи (ґрунти), що відрізняються високою об'ємною стискальністю і здатністю до пластичного плину, і скельні, стискальність яких відносно невелика, а втрата несучої здатності носить характер крихкого руйнування. Напівскельні породи, яким властиві риси згаданих основних класів, по поширенню в породі мають другорядне значення.

Різний опір руйнуванню різновидів гірських порід обумовлено їх фізико-механічними властивостями, які визначаються виключно мінеральним складом і їх текстурно-структурними особливостями, тобто їх мінерально-петрографічних типом. Різні мінерально-петрографічні типи порід, що володіють близькими фізико-механічними властивостями, об'єднуються в один інженерно-геологічний тип. Вирішальний вплив на руйнування порід має їх міцність. Вона оцінюється інтегральним показником по-спротиву порід руйнуванню - *коефіцієнтом міцності по М.М. Протодьяконову (f)*, що дорівнює, відповідно до формули (1.1):

(1.1)

Ці два показники (f і σ сж), входять в більшість розрахункових формул для визначення параметрів підривання. Чим вище міцність порід, тим більше енергоємність їх руйнування. Додаткові фізико-механічні властивості порід, що впливають на їх руйнування:

- в'язкість, яка підвищує енергоємність, їх руйнування;

- хрупкість, зменшує цей показник;

- стисливість і пористість, збільшують втрати енергії вибуху на пластичні деформації;

- щільність, яка визначає витрати енергії на подолання сил інерції (це властивість порід впливає головним чином при вибуху на викидання).

Коефіцієнт міцності більшості петрографічних типів скельних порід в тій чи іншій мірі інтегрально враховує всі зазначені вище фізико-механічні властивості. При однаковій блочності порід більш міцні їх різновиди вибухають гірше, ніж менш міцні. Це правило порушується в виключних випадках при підриванні, наприклад, у дуже вузьких або в дуже крихких породах. В'язкі породи вибухають значно гірше, ніж звичайні породи з однаковою міцністю, а крихкі, навпаки, вибухають краще звичайних порід. Залізисті кварцити і супутні їм метаморфічні сланці, гнейси і т.п. відносяться за подрібненням до нормальних порід, для оцінки руйнування яких, крім блочності, необхідно і достатньо знати їх міцність.

*Міцність* - властивість гірських порід у певних умовах, не руйнуючись, сприймати вплив механічних навантажень, температурних, магнітних, електричних і інших полів.

*Буримість* гірських порід - опірність руйнуванню в процесі буріння. Оцінюється швидкістю буріння (проходка в одиницю часу), часом і енергоємністю буріння одиниці довжини стовбура свердловини або шпуру при стандартних умовах проведення досвіду для кожного типу бурової машини. Буримість погіршується зі збільшенням щільності, міцності, в'язкості, твердості, абразивності і залежить також від мінерального складу, будови порід і термодинамічних умов, у яких вони знаходяться. Буримість враховується при нормуванні праці робітників, оцінці продуктивності буріння, виборі інструмента для руйнування породи, плануванні організації бурових робіт у конкретних гірничо-геологічних умовах.

*Тріщинуватість* - явище поділу гірських порід земної кори тріщинами різної довжини, форми і просторового орієнтування. За походженням тріщинуватість позділяється на нетектонічну, тектонічну і планетарну. Нетектонічна тріщинуватість - наслідок розтріскування гірських порід у процесі охолодження (для магматичних порід), ущільнення, дегідратації, розвитку екзогенних процесів (гравітаційного оповзання, різких коливань температури), ведення гірських робіт ("технологічна" тріщинуватість) і т.п.

Тектонічна тріщинуватість розвивається в зв'язку з навантаженнями, що виникають у гірських породах під впливом глибинних тектонічних сил. Виділяються тріщини відриву і тріщини сколювання, що утворять системи, закономірно орієнтовані стосовно великих тектонічних структур; у зв'язку з розвитком останніх відбувається розтріскування ГП. При планетарній тріщинуватості навантаження в земній корі виникають під дією планетарних явищ (наприклад зміни частоти обертання і форми Землі, "твердих припливів").

Тріщинуватість у залежності від методів виміру характеризується: розміром окремості ГП; інтенсивністю (сумарною шириною розкриття тріщин на одиницю довжини щелини, мм/м); питомим водопоглиненням (поглинанням води масивом на одиницю довжини шпари й одиницю гідростатичного напору в одиницю часу, л/см2); реометричною проникністю (падінням тиску повітря при його розтіканні в свердловині на одиницю довжини в одиницю часу, Па/мс) і іншими параметрами.

Явище тріщинуватості має як позитивні, так і негативні практичні наслідки. Розсічення гірських порід тріщинами сприяє проникності земної кори для глибинних розчинів (флюїдів), що несуть рудні компоненти, що, відкладаючись в тріщинах і формують родовища корисних копалин. Глибинні обрії тріщинуватих порід можуть бути колекторами прісної води, нафти і газу. Тріщинуватість забезпечує гарне подрібнення ГП при відбійці, сприяє застосуванню економічних систем розробки із самообваленням руди. Тріщинуваті породи позбавлені схильності до динамічних проявів гірського тиску. Негативний вплив тріщинуватості складається в зниженні стійкості масивів ГП.

В'язкість часто виражається через роботу деформації - роботу, необхідну для руйнування породи. В'язкість залежить від міцності і пластичності породи. В однорідних породах в'язкість рівномірна у всіх напрямках. У неоднорідних породах в'язкість уздовж шарів менша, ніж у напрямку, перпендикулярному до них [ ].

Додатковими характеристиками механічних властивостей матеріалів служить ударна в'язкість, яка характеризує здатність матеріалу пручатися зосередженим ударним навантаженням і визначається кількістю роботи, затрачуваної нa злам зразка у фіксованому місці за допомогою насічки місці. Робота, віднесена до площі перетину зразка, характеризує одиничну ударну роботу на злам, названу питомою ударною в'язкістю. Вона має практичне значення при оцінці якості металів, азбестоцементних виробів, наприклад покрівельних аркушів і плит [ ].

*Крихкість* - здатність гірських порід до руйнування без помітних пластичних деформацій (не більш 5 % від величини деформацій руйнування). Абсолютна більшість гірських порід схильна до такого руйнування і тому відноситься до крихких матеріалів.

Крихкість визначається їхнім мінеральним складом, структурно-текстурними характеристиками і зовнішніми умовами руйнування: температурою, швидкістю прикладання навантаження, його видом (розтягуючим; стискаючим, здвигаючим). Зміна навіть одного з параметрів істотно змінює характер руйнування породи, наприклад при підвищенні температури або зниженні швидкості прикладання навантаження крихке руйнування гірських порід може перейти у в’язке.

Для кількісної оцінки крихкості запропоновано багато різних показників. На практиці найбільш часто застосовуються два показники, що одержали назву коефіцієнта крихкості: дорівнює відношенню σр/σсж і , який дорівнює відношенню питомої енергії пружного деформування породи до питомої енергії її руйнування при одноосьовому стиску. Більш повно з фізичної точки зору характеризує крихкість породи , тому що базується на комплексі фізичних властивостей (міцністних, пружних, пластичних), прямо зв'язаних із процесом руйнування. Ідеально пластичні і крихкі породи мають відповідно = 0 і = 1,0. У реальних порід = 0,05 - 0,6 (наприклад у мармуру 0,067; роговика 0,19; джеспіліту 0,5). Як правило, більш високі значення мають породи з великими σсж і модулями Юнга. Більш об'єктивно оцінювати схильність гірських порід до крихкого руйнування в процесах гірничого виробництва дозволяє (буріння, дроблення, висадження, керування гірським тиском, прогнозування гірських ударів і викидів).

Протилежністю крихкості є пластичність. Крихкість гірської породи визначається числом ударів *n*, що витримують зразки породи до руйнування.

Види гірських порід відповідно до цієї методики представлені в   
таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Класифікація гірських порід по виду

|  |  |
| --- | --- |
| Вид | Число ударів *n*, |
| дуже крихкі | n < 2; |
| крихкі | n = 2-5; |
| в’язкі | n = 5-10; |
| дуже в’язкі | n > 10. |

**1.2 Сучасний стан дослідження властивостей в’язких скельних гірських порід**

Для твердого тіла, зокрема гірської породи, в'язкість - властивість не зворотно поглинати енергію в процесі її деформування. В'язкість зумовлена пластичною деформацією і непружністю гірських порід. При пластичній деформації в'язкість кількісно характеризується відношенням величини дотичних напружень, які виникають у шарі породи, що підлягає зсуву, до швидкості пластичної течії, що змінюється від 1013 до 1020 Па·с. Величина в'язкості, яка пов’язана з непружністю (пружна післядія, термопружний ефект, пружний гістерезис) [гірських порід](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%96%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D1%96_%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8), пропорційна коефіцієнту механічних втрат (декременту згасання), значення якого коливаються від 10–1 до 10–3. При руйнуванні в'язкість оцінюється як [робота](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0) деформування гірської породи, віднесена до одиниці площі зразка і визначається за результатами ударних випробувань зразків на копрі (ударна в'язкість). Може бути розрахована як добуток коефіцієнта пластичності на межу міцності гірських порід. На практиці визначають коефіцієнт відносної в'язкості (спеціальними зарядами, які закладаються в досліджуваний масив), як відношення зусилля, що необхідне для відділення деякої частини гірської породи від масиву, до величини зусилля, необхідного для відділення від масиву вапняку, взятого за еталон. Величина цього коефіцієнта змінюється від 0,5 до 3 (наприклад, для [мармуру](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%BC%D1%83%D1%80) 0,7; [пісковика](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BA)1,2; [граніту](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%82) 1,3; [кварциту](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%86%D0%B8%D1%82) 1,9; [базальту](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%82) 2,2). Із збільшення в'язкості зростає поглинання пружних хвиль, зменшуються повзучість і набрякання порід, зростає енергоємність процесів дроблення і розкришення порід під час переробки корисних копалин і вибухових робіт.

В'язкість твердих тіл і рідин обернено пропорційна [коефіцієнту самодифузії](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B5%D1%84%D1%96%D1%86%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82_%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%83%D0%B7%D1%96%D1%97) і з підвищенням температури зменшується за експоненціальним законом. В'язкість залежить від періоду релаксації пружних дотичних деформацій.

Згідно із законом Ньютона для внутрішнього тертя в'язкість характеризується коефіцієнтом пропорційності \eta між [напруженням зсуву](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%BE%D1%80_%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D1%8C)  \tau  і [градієнтом](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82) швидкості руху шарів у перпендикулярному до деформації зсуву напрямку (поверхні шарів) згідно формули (1.2):

, (1.2)

де коефіцієнт \eta - це динамічний коефіцієнт в’язкості або абсолютна в'язкість, [Пуаз](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%B0%D0%B7) (0,1Па·с).

Кількісно динамічний коефіцієнт в'язкості дорівнює силі F, яку треба прикласти до одиниці площі зсувної поверхні шару S, щоб підтримати в цьому шарі [ламінарну течію](http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B0_%D1%82%D0%B5%D1%87%D1%96%D1%8F) із сталою одиничною швидкістю відносного зсуву.

Усі породи за твердістю за штампом розділено на три групи: м’які, середні, тверді. Кожна група в свою чергу розділена на чотири категорії, тобто прийнято всього дванадцять категорій твердості (табл. 1.2) [ ].

Таблиця 1.2 Класифікація гірських порід за твердістю

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | І (м’які) | | | | ІІ (середні) | | | ІІІ (тверді) | | | | |
| Категорія | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Твердість за штампом, Мпа | <100 | 100 -250 | 250-500 | 500-1000 | 1000-1500 | 1500-2000 | 2000-3000 | 3000-4000 | 4400-5000 | 5000-6000 | 6000-7000 | >7000 |

До І групи переважно відносяться породи сильно пластичні і дуже пористі. З порід, що зустрічаються при бурінні нафтових і газових свердловин належать глинисті породи, аргіліти, найбільш пористі різновиди гладжуатів, пісковиків та вапняків.

До ІІ групи за твердістю належать в основному породи з класу пластично-крихких, зокрема – алевроліти, вапняки, ангідрити, доломіти і пісковики.

До ІІІ групи порід за твердістю відносяться переважно породи з класу крихких. Ц переважно вивержені і метаморфічні породи. З порід, що зустрічаються при бурінні свердловин входять кремені, кварцити, різновиди зкременілих вапняків і пісковиків.

Класифікаційна шкала за модулем Юнга наведена в табл. 1.3, всі гірські породи розділені на вісім категорій.

Таблиця 1.3 Класифікація гірських порід за модулем Юнга

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Категорія | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Модуль Юнга, Мпа | <2500 | 2500-  5000 | 5000-  10000 | 10000-  25000 | 25000-  50000 | 50000-  75000 | 75000-  100000 | >100000 |

Класифікаційна шкала за пластичністю приведена в табл. 1.4, де за величиною коефіцієнта пластичності гірські породи розділені на шість категорій.

Таблиця 1.4 Класификаційна шкала гірських порід за пластичністю

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Категорія | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Коефіцієнт пластичності | 1 | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-6 | 6 |
| Клас порід | пружно-крихкі | | пружно-пластичні | | сильно пластичні і  дуже пористі | |

Як відомо [ ], при підриванні заряду ВР, розміщеного на заданій глибині в ґрунтовому масиві, виникає хвиля стиснення, швидкість поширення якої залежить від тиску газів (потужності ВР) та щільності середовища, що підривається. Безпосередньо поблизу заряду напруга стиснення перевищує міцність ґрунту, внаслідок чого ґрунт ущільнюється та зміщується по радіусу дії вибуху в протилежну сторону від центру заряду ВР. Таким чином, навкруги заряду утворюється замкнутий простір круглого або

еліптичного перерізу в залежності від конфігурацій самого заряду і наявності поблизу вільного простору.

Коефіцієнт пластичності *k* приймають рівним відношенню загальної роботи, витраченої для руйнування породи , до роботи пружних деформацій відповідно до табл.1.5 і табл. 1.6.

Таблиця 1.5 Коефіцієнт *k* для гірських порід

|  |  |
| --- | --- |
| Порода | Значення |
| Глини | 0,5-0,9 |
| Ізвестняки | 1,5-7,0 |
| Ангідриди | 2,9-4,3 |
| Доломіти | 1,5-6,0 |
| Кремні | 1,0-2,0 |
| Пісчаник та алевроліти | 1,3-4,3 |

Таблиця 1.6 Значення модуля повздовжньої пружності, в 10-10 Па

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Порода | Значення | |
| Глина | 0,03 | |
| Глинисті сланці | 1,5-2,5 | |
| Пісчаник | 3,3-7,8 | |
| Ізвестняк | 1,3-8,5 | |
| Мрамор | 3,9-9,2 | |
| Доломіти | 2,1-16,5 | |
| Граніти | | <6,0 |
| Базальти | | <9,7 |
| Кварцити | | 7,5-10,0 |

Слід відзначити, що для гірських порід, спостерігається значний розкид величин механічних характеристик. Це пояснюється тим, що механічні властивості окремих груп впливають не тільки на мінералогічний склад, але і на їх будову.

Теоретичною базою для розвитку методів оцінки тріщиностійкості матеріалів послужила лінійна механіка руйнування, що бере початок від робіт Грифітса [ ].

За Грифітсом в крихких тілах тріщини починають поширюватися, як тільки швидкість звільнення пружної енергії перевершить швидкість приросту поверхневої енергії тріщини. Тобто ріст тріщини в умовах плоскої деформації відбувається за умови відповідно до формули (1.3)

, (1.3)

де перший член виразу являє собою зменшення пружної енергії в пластині одиничної товщини, що перебуває під дією напруження s, внаслідок раптового виникнення тріщини довжиною 2*l*. Другий член виразу відображає приріст енергії пластини внаслідок створення нової поверхні. Коли пружна енергія, що звільняється у зв'язку зі збільшенням довжини тріщини *dl*, перевершить потребу в поверхневій енергії при тому ж збільшенні тріщини, тоді тріщина стає нестійкою. Грифітс розглядав питання про нестійкі тріщини в однорідному полі розтягуючих напружень і знайшов критичне значення напруження sк, при якому тріщина довжиною  *l* починає катастрофічно рости відповідно з формулою (1.4)

sк =, (1.4)

де sк  - руйнуюче напруження;

*Е* - модуль пружності;

g - поверхнева енергія;

*l* - довжина тріщини.

З виразу (1.4) видно, що добуток руйнівного напруження на корінь квадратний з довжини вихідної тріщини є константою матеріалу згідно з (1.5)

sк = const . (1.5)

Концепція Гриффітса одержала підтвердження для ряду крихких матеріалів, наприклад скла. Тобто його теорія дозволяє оцінити теоретичну міцність крихких твердих тіл і дає правильний зв'язок між міцністю при руйнуванні і розміром дефекту. Слід зазначити, що практичне застосування цієї концепції реалізувати досить важко через істотні погрішності при визначенні поверхневої енергії і роботи пластичної деформації.

Наступним істотним кроком у розвитку механіки руйнування були роботи Ірвина [ ], що обґрунтував і ввів силовий критерій руйнування, який представлено на Рис. 1.1.

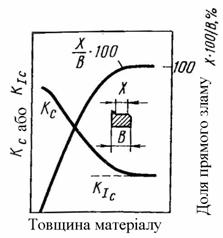


Рисунок 1.1 Залежність в'язкості руйнування від товщини матеріалу

Лінійна механіка руйнування описує крихке руйнування, що відбувається в результаті росту тріщини при відсутності помітних пластичних деформацій у вершині тріщини. Якщо лінійний розмір пластичної зони у вершині тріщини починає на 20 % перевищувати довжину тріщини, то поняття коефіцієнта інтенсивності напружень втрачає сенс (через обмеження області застосування розрахункових формул) і закономірності поведінки тіла із тріщиною визначаються властивістю матеріалу чинити опір пластичним деформаціям. Це завдання відноситься до нелінійної механіки руйнування, всі моделі якої виходять із наявності досить великої пластичної зони перед вершиною тріщини.

Найбільш відомої серед нелінійних моделей є модель зсуву або розкриття тріщини(dк-модель). Суть теорії полягає в тому, що тріщина перед швидким поширенням розкривається на деяку критичну величину dк. Цю модель незалежно один від одного запропонували М.Я. Леонов [] і В.В. Панасюк [], Д. Дагдейл []. Модель розкриття тріщини застосовується і для крихкого руйнування.

В цьому випадку граничне розкриття кінчика тріщини(dк) пов'язане з коефіцієнтом інтенсивності напружень рівнянням (1.6)

*К*Iс = (1.6)

Однак варто враховувати, що для крихкого руйнування реальна величина розкриття тріщини занадто мала і її важко виміряти експериментально.

Таким чином, однією з найважливіших задач лінійної механіки є експериментальне визначення в'язкості руйнування і побудова для кожного матеріалу кривої Гриффітса, що визначає критичну довжину тріщини, яку може витримати конструкція з даного матеріалу.

Слід відзначити, що для гірських порід, спостерігається значний розкид величин механічних характеристик. Це пояснюється тим, що на механічні властивості окремих груп впливає не тільки мінералогічний склад, але і їх будова.

**1.3. Існуючі методи керування енергією вибуху на кар’єрах**

Методи керування енергією вибуху на кар’єрах умовно поділяють на дві основні групи [1]. До першої групи належать методи, в яких передбачена взаємодія свердловинних зарядів ВР. Це короткосповільнене підривання [2], внутрішньо-свердловинне сповільнення [3], а також система зустрічного ініціювання свердловинних зарядів [4]. Друга група характеризується методами, орієнтованими на максимальне використання енергії вибуху окремого заряду. До них належать застосування повітряних та інертних проміжків у свердловинних зарядах [5], розміщення детонатора у нижній частині заряду [6], лінійне [7, 8], багатоточкове [9] та зустрічне ініціювання [10], формування заряду в оболонках, діаметр яких менший за діаметр свердловини [11].

Метод ініціювання свердловинного заряду ВР та його вплив на характер протікання детонації досліджувався багатьма авторами. В роботі [12] встановлено, що при ініціюванні заряду знизу напруження, яке викликає деформацію зсуву в підошві уступу, в 2 рази більше, ніж при ініціюванні зверху. Лабораторні дослідження, виконані в роботі [9], довели, що при ініціюванні заряду знизу руйнування відбувається більш інтенсивно, ніж при ініціюванні зверху.

Для запобігання втратам енергії вибуху (вигорання ВР) при передачі детонації проміжному детонатору промисловістю рекомендовано до використання ДШ з наважкою ТЕНу 6 г/м. Однак, як показує практика, такий ДШ не здатний надійно ініціювати проміжний детонатор.

Зарубіжні системи ініціювання запобігають негативним наслідкам при передачі детонації свердловинному заряду. Зокрема, система неелектричного ініціювання "Деталайн" розроблена на основі низькоенергетичного ДШ [13]. Такий шнур через незначну лінійну вагу заряду (1,6 г/м) самостійно може ініціювати тільки нітрогліцерінові ВР, які в промисловості не застосовуються. Отже виключається можливість вигоряння ВР вздовж ДШ. Підривання проміжного детонатора здійснюється капсулем-детонатором.

Система неелектричного ініціювання типу НОНЕЛЬ передбачає застосування хвилеводу низькоенергетичного типу [3]. Ударна хвиля, яка проходить по хвилеводу, має достатню кількість енергії для ініціювання капсуля-детонатора, однак вона недостатньо велика, щоб розірвати трубку-хвилевід та ініціювати ВР, розміщену навколо трубки.

Посилення дії вибуху в будь-якому місці свердловини можна забезпечити при двосторонньому зустрічному ініціюванні [10], завдяки взаємодії детонаційних хвиль. В цьому випадку в декілька разів збільшується тиск на стінки свердловини і тим самим покращується якість подрібнення.

Детонування циліндричних зарядів лінійними ініціаторами також досліджувалося багатьма вченими. Зокрема, в роботі [8] встановлено, що при заміні проміжного промислового детонатора ДШ, розміщеним по всій довжині заряду, ефективність вибуху збільшується на 20...30 %. Ці результати підтверджуються також в роботі [14].

Незважаючи на значну кількість запропонованих методів, які забезпечують підвищення ефективності руйнування масиву гірських порід, багато з них або не застосовуються на виробництві внаслідок їх не технологічності, або застосовуються неефективно. Це стосується, зокрема, деяких систем ініціювання за допомогою ДШ. Детонаційна хвиля, яка проходить по ДШ, викликає низькошвидкісне (1,2...1,7 км/с) вибухове перетворення значної частини свердловинного заряду до приходу по заряду детонаційної хвилі від вибуху проміжного детонатора [15]. У випадку нижнього ініціювання втрачається від 15 до 30 % енергії вибуху.

Для запобігання втратам енергії вибуху рекомендується до застосування багатоточкове і лінійне ініціювання. Проведення експериментів з лінійного ініціювання свердловинних зарядів з використанням ДШ з наважкою ТЕНу до 50 г/м не забезпечило встановленого режиму детонації промислових ВР [7]. Спостерігається низькошвидкісний режим детонації свердловинних зарядів незалежно від типу ВР. Швидкість детонації становить 1,7...2,4 км/с.

Впродовж останніх років було розроблено декілька конструкцій лінійного ініціатора. Однак, незважаючи на значні досягнення, ні один з них не впроваджений у виробництво. Це пояснюється або їх незручністю в застосуванні, або високою вартістю.

При застосуванні багатоточкового ініціювання створюється багатоімпульсне навантаження на стінки свердловини, що обумовлює складний напружений стан у масиві гірських порід і підвищує ефективність руйнування [16]. Чисельними дослідженнями встановлені ефективність і доцільність застосування багатоточкового ініціювання в порівнянні з традиційними методами ініціювання при підриванні свердловинних зарядів ВР [17–20]. Воно, при відповідних параметрах, може мати переваги лінійного ініціювання [5, 6], однак значно дешевше і зручніше в застосуванні.

Як зазначено в роботі [21] питання досягнення якісного подрібнення скельних порід вибухом на гірничих підприємствах були і залишаються одними з основних. Низький коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) вибуху (5-10 %) вказує на необхідність розробки нових методів вибухового руйнування гірських порід.

Дослідження багатьох авторів показали, що гранулометричний склад підірваної гірничої маси залежить в основному від параметрів та вибухового імпульсу конкретної ВР, фізико-механічних властивостей масиву, його структурних особливостей та умов підривання. Виходячи з мети роботи нас будуть цікавити в першу чергу фактори, що впливають на характер зміни напруженого стану середовища і на тривалість вибухового імпульсу. За інших рівних умов на ці параметри впливає спосіб ініціювання свердловинного заряду, його конструкція та порядок підривання.

Приймаючи до уваги, що детонаційні характеристики ВР безпосередньо впливають на початкову і наступні стадії процесу руйнування гірської породи, необхідно досягнути найбільш раціонального режиму детонації. Серед можливих напрямків реалізації даної цілі можна виділити конструкцію свердловинного заряду ВР та спосіб його ініціювання.

Відомо, що під час детонації свердловинного заряду ВР в середовищі виникає порожнина з високим тиском газоподібних продуктів детонації (ПД), а в навколишній гірській породі виникає ударна хвиля. Не дивлячись на те, що розміри зон ударної хвилі незначні, висока амплітуда тиску і надзвичайна швидкість протікання процесу приводить до великих втрат енергії вибуху (поблизу заряду) на пластичні деформації та переподрібнення середовища. Крім того, відомо, що при збудженні інтенсивних ударних хвиль збільшується відносна частка втрат енергії вибуху. Це послужило поштовхом для створення зарядів з повітряними проміжками. Основна перевага таких зарядів в тому, що вони передають енергію середовищу не миттєво, а порціями, багатократною дією ПД на стінки свердловини. Крім того, зштовхування газових потоків в свердловині змінює газодинаміку розширення продуктів вибуху і збільшує тривалість вибухової дії на середовище. Багатократне навантаження масиву призводить до того, що всі наступні (за хвилею стиснення) хвилі приймають активну участь у розвитку системи тріщин і сприяють підвищенню ефективності подрібнення середовища.

Зміна внутрішньої газодинаміки продуктів детонації може бути досягнута за рахунок використання багатоточкового ініціювання. Відомо що при одночасному ініціюванні заряду в декількох точках, в кожній точці ініціювання з’являються 2 детонаційні хвилі, що поширюються у протилежні сторони. Через деякий час Δt (Δt≈L/2 nD, де L – довжина заряду, n – кількість точок ініціювання, D – швидкість детонації) дві детонаційні хвилі, що рухаються на зустріч одна одній зіштовхнуться, та відбившись одна від другої почнуть рухатися в протилежних напрямках. Це призводить до того, що взаємодія детонаційних хвиль, що розповсюджуються по заряду ВР та ударних хвиль, що рухаються по ПД, створює складну інтерференційну картину руху середовища, яка і визначає характер навантаження масиву. Ще одним важливим наслідком даного способу ініціювання є збільшення тривалості вибухової дії на середовище.

При використанні одного бойовика на забивку діє імпульс вибуху від усього заряду, в той час при багатоточковому ініціюванні тільки від його частини пропорційній L/n. Зі збільшенням числа точок ініціювання свердловинного заряду значення повного імпульсу вибуху зростає, однак градієнт його збільшення зменшується зі збільшенням кількості бойовиків. При n→∞ питомий імпульс в 3 рази перевищує ту ж величину при одноточковому ініціюванні.

Аналіз інтенсивності подрібнення середовища при багатоточковому ініціюванні заряду ВР показав, що найбільшої величини даний показник досягає при n=4÷5.

Аналіз промислових вибухів показав, що при 5-точковому ініціюванні на 5 % знижується питома витрата ВР, на 10 % збільшується вихід гірничої маси і суттєво покращується якість подрібнення. Швидкісна кінозйомка процесу вильоту забивки з свердловини дозволила встановити, що при багатоточковому ініціюванні заряду ВР витікання продуктів детонації зі свердловини починається значно пізніше ніж при підриванні заряду ВР одним бойовиком.

Одним із напрямків зниження непродуктивних втрат енергії вибуху свердловинного заряду є зниження амплітуди навантажень у хвилі з одночасним збільшенням її терміну дії на середовище. Ці умови створюються при різночасовому ініціюванні окремих частин свердловинного заряду (так званий метод внутрішньосвердловинних сповільнень).

Ефективність даного способу визначається тим, що він дозволяє:

* розосередити заряд на декілька частин та забезпечити більш рівномірний розподіл ВР по об’єму блока, що підривається;
* ініціювати кожну частину заряду окремим бойовиком, що збільшує повноту вибухового перетворення ВР і, як наслідок, ступінь подрібнення;
* забезпечити загальне збільшення тривалості дії вибуху на масив за рахунок ініціювання окремих частин заряду з визначеним інтервалом сповільнення.

Інтенсивність руйнуючих навантажень у методі внутрішньо- свердловинних сповільнень залежить від схеми підривання: при сповільненні «зверху» концентрація навантажень проходить в області верхньої частини уступу, при сповільненні «знизу» - в області перебуру свердловини, при сповільненні «ялинка» - по всій висоті уступу. Застосування даного методу на гранітних кар’єрах крім високої якості подрібнення дозволило також в 1,4 рази зменшити перебур. Було також встановлено що на ділянках де підривання здійснювали з внутрішньосвердловинним сповільненням були відсутні заколи в глибину масиву, розвал гірничої маси мав більш компактну форму, що сприяло збільшенню продуктивності навантажувальних робіт.

Крім розглянутих способів ініціювання зарядів, які в основному регулюють напрямок руху фронту детонаційної хвилі та навантажень у середовищі, існують конструкції зарядів в яких змінюється сам характер детонації заряду. До таких методів відносяться заряди з повздовжніми виїмками, осьовими порожнинами та інертними сердечниками.

Заряди з повздовжньою кумулятивною виїмкою частіше всього використовують для одержання більш точного профілю виробки та зниження заколоформування. Наявність профільованої виїмки дозволяє концентрувати енергію вибуху у бік направлення кумулятивної поверхні, що сприяє збільшенню ефективності дії вибуху.

Ефективність заряду з осьовою порожниною визначається тими специфічними особливостями, які пов’язані з появою канальної хвилі, що рухається попереду фронту детонації при верхньому ініціюванні даного заряду. Відбивання канальної хвилі першочергово створює на дно каналу тиск у межах 0.3÷0.5 ГПа, який з підходом кумулятивного струменю збільшується до 5,0 ГПа. Такий тиск достатній для ініціювання зворотної детонаційної хвилі, що рухається назустріч основній. При цьому тиск на дно свердловини весь час майже в 2 рази нижчий тиску відбивання прямої хвилі, що виникає у випадку застосування суцільних зарядів, а час вибухової дії значно більший. Разом з більш плавним навантаженням середовища ці фактори зменшують дисипативні втрати енергії на переподрібнення і його нагрівання в ближній зоні, сприяють збільшенню розмірів зони тріщиноутворення та збільшенню швидкості руху породи у напрямку вільної поверхні, тобто збільшується частка корисної енергії переданою ПД середовищу. Все це в решті решт приводить до підвищення інтенсивності вибухового подрібнення.

Ефективність корисної дії вибуху може бути підвищено шляхом використання комбінованих зарядів ВР в яких чергуються ділянки ВР, що мають різні швидкості детонації. При ініціюванні даних зарядів в області контакту різних ВР створюються зони з підвищеними градієнтами навантажень, що сприяє інтенсифікації вибухового подрібнення середовища. Одним із методів, що дозволяє створити нерівномірне багатократне навантаження середовища є спосіб ініціювання комбінованих зарядів. При ініціюванні цих зарядів за допомогою ДШ в першу чергу вибухають, частини більш потужної ВР в парах ініційованих від ДШ, а потім вже від них відбувається детонація менш потужної ВР. Тобто вибух такого заряду дозволяє створити каскадне навантаження масиву, коли при цьому збільшується тривалість вибухової дії і поблизу зони контакту двох типів ВР виникає зштовхування ударних хвиль, що також позитивно впливає на інтенсивність руйнування середовища.

На основі отриманої математичної моделі оцінки навантажень у твердому середовищі під час вибуху циліндричного заряду ВР, а також виконаних теоретичних досліджень [21], пов’язаних з вибором матеріалу забивки, проведена оцінка пружно-деформованого стану скельних порід при їх вибуховому руйнуванні та встановлено, що розташування ініціаторів зі зміщенням відносно осі свердловинного заряду забезпечує середовищу, що навантажується, періодичний вплив. При цьому спостерігаються декілька яскраво виражених «піків», перший з яких за амплітудою рівний максимальному зміщенню у випадку миттєвої детонації та на 10-25 % перевищує максимальне зміщення при осьовому розташуванні ініціаторів (зі збільшенням швидкості детонації ця різниця збільшується).

Встановлено, що наявність асиметрично розташованих пустот у свердловинному заряді підвищує динамічну нерівномірність навантаження породи, що зазнає руйнування. Зі збільшенням швидкості детонації ВР циліндричного заряду кількість максимальних зміщень у часі («піків») зменшується більшою мірою у випадку осьової детонації, ніж у випадку асиметричного ініціювання.

Зміщення бойовиків відносно осі викликає суттєвий вплив на розподіл навантажень у ближній зоні. На відстані п’яти радіусів циліндричного заряду (r0) осьове розташування ініціаторів збільшує загальний імпульс на 10 %, при асиметричному розташуванні ініціаторів це збільшення складає 21 % (в порівнянні з миттєвою детонацією), на відстані 10 r0 ці показники рівні 21 % та 24 %; на відстані 15 r0 – 10 % та 12 %; на відстані 20 r0 – 5 % та 7 %.

При розташуванні ініціаторів по висоті більше трьох діаметрів свердловини зона максимального впливу детонаційних хвиль знаходиться в області половини відстані між бойовиками. Незначне зміщення бойовиків по висоті відносно один одного дозволяє в більш широких межах змінювати відстань від точки ініціювання до точки зустрічі детонаційних хвиль. Розташування бойовиків на відстані, розрахованій за залежністю між глибиною перебуру, діаметром свердловини та відстанню між бойовиками, дозволяє створити початкову систему тріщин у точці спряження стінки свердловини та її дна. Незважаючи на успіхи, досягнуті в галузі вивчення механізму вибухового руйнування реальних середовищ, до теперішнього часу недостатньо повно досліджені питання ефективного управління дією вибуху на основі детального вивчення механізму взаємодії енергетичних потоків вибухів окремих зарядів з урахуванням фізико-механічних властивостей гірського масиву та всіх технологічних факторів виконання БПР.

**Висновки по розділу**

1. Розглянуто основні технологічні та деформаційні властивості гірських порід і встановлено, що вони впливають на характер руйнування гірського масиву при динамічних навантаженнях.

2. В’язкість гірських порід визначається різноманітними способами: відношення величини дотичних напружень до швидкості пластичного плину; виражається через роботу деформації – роботу, необхідну для руйнування породи; кількістю ударів, які витримує порода до руйнування. Для спрощеного розрахунку користуються відношенням межі міцності породи на розтяг до межі міцності на стиснення.

3. Згідно аналізу руйнування в’язких порід випливає, що крихке руйнування звичайно виникає у результаті прикладення сил, що розтягують, в’язке - зв'язане з дотичними напруженнями.