УДК 622.28(043.3)

Дослідження механізму виникнення сейсмічних коливань для підвищення ефективності протисейсмічних заходів

О. О. ВОВК,
канд. техн. наук
(НТУ України «КПІ»)

Розглянуто джерела виникнення небезпечних сейсмічних проявів у процесі розробки вугільних та інших родовищ корисних копалин. Досліджено методологічні підходи до визначення розмірів зон деформації в підроблюваних масивах навколо осередку гірничого удару для підвищення ефективності протисейсмічних заходів.

Ключові слова: сейсмічні хвилі, гірничі удари, радіальні напруження, тангенціальні напруження, кластерізація.

Контактна інформація: o.a.vovk@mail.ru

Вивчення динамічних явищ у гірському масиві у формі сейсмічних коливань є важливою і надзвичайно складною багаточинниковою задачею, спрямованою на вироблення надійних прогнозів сейсмобезпеки умов експлуатації поверхневих і підземних інженерних об'єктів, впливу на деформації поверхні Землі (гірських схилів, дна водойм тощо). Джерелами, що емітують такі коливання, можуть бути технологічні вибухи зарядів вибухових речовин для руйнування гірської породи, гірничі удари, спеціальні вибухи зарядів у місцях концентрації напружень у районі можливого осередка гірничого удару для їх локалізації або зниження енергетичного рівня, переміщення осередка вглиб розроблюваного пласта або вміщуючих порід. Вирішальним чинником у дослідженнях цих процесів є розробка науково обґрунтованих методик з максимальним урахуванням особливостей формування та руху сейсмічних хвиль, властивостей гірського масиву і т. п.

Розглядаючи сейсмічні прояви як наслідки гірничого удару, конфігурацію осередка (відповідно і початковий профіль хвилі) здебільшого можна звести до сферичного (або близького до нього) виду при локальних ударах або до лінійно-протяжного (наприклад, впродовж лінії очисного вибою), поступово набуваючи циліндричних, а в подальшому і сферичних обрисів [3]. Розгляд сейсмічних задач під час дії вибуху зарядів також пов'язаний зі складностями через різноманіття і просторове розосередження зарядів, їх ініціювання в різних режимах, положення щодо об'єктів сейсмічного впливу.

Вибухові роботи мають таке виробниче призначення: а) для руйнування (подрібнення) гірської породи до стану, придатного для навантаження; для підвищення коефіцієнтів проникності та фільтрації простору навколо свердловини під час дегазації; б) при розробці вибухових методів попередження або зниження динамічних проявів у районі ведення капітальних, підготовчих і очисних робіт: струсно-камуфлетного, камуфлетно-струсно-відбійного висаджування, вибухового торпедування. Незважаючи на різні задачі технологічного плану, вирішення яких досягають завдяки реалізації відповідних схем ведення висаджувальних робіт, загальним для них є процес зміни напружено-деформованого середовища, описати яке можна, використавши одну із концепцій руйнування.

Найпоширенішою є енергетична теорія Гріффітса, відповідно до якої процес руйнування породи відбувається за час, потрібний для накопичення пружної енергії. Вона є однією з перших спроб урахувати вплив масштабного чинника, тобто наявності дефектів у реальних умовах. Це означає, що характеристики міцності гірських порід не інваріантні, тобто вони змінюються під час переходу від одних умов випробування (зразків) до інших (у масиві, в тому числі на різних глибинах).

Відповідно до теорії Гріффітса крихкий матеріал розглядається як суцільне середовище, але містить мікротріщини. Важливо зазначити, що в твердому тілі передбачається накопичення потенційної енергії в межах пружних деформацій, тобто напруження всередині тіла (в макрообсязі) не обов'язково зникає з припиненням хвильового руху.

Має певне значення і відомий ділатантний ефект, який полягає в тому, що в зернистих гірських породах під час нерівномірного просторового навантаження в докритичних межах спостерігається ділатантне розпушування гірських порід, що свідчить про взаємні зв'язок і вплив кульової і девіаторної компонент тензора напружень. Оскільки воно в цьому об'ємі пов'язано з підростанням мікротріщинуватості, його потрібно враховувати як реальний чинник у структурі гірської породи, тобто руйнування як процес втрати породою її несучої здатності згідно з енергетичною теорією Гріффітса проявляється у разі, коли вивільнена пружна енергія під час поширення тріщини перевищує енергію, необхідну для утворення нових поверхонь.

Принциповим положенням теорії є твердження, що наявна тріщина буде поширюватись, якщо потенційна енергія системи водночас зменшується. На другій (критичній) стадії процес деформування описується теорією квазікрихкого руйнування, тоді як на першій стадії (докритичній) надзвичайно важливу роль відіграє чинник часу. Механізм передачі енергії зовнішніх сил у точках дислокації характеризується певною інерційністю і тому є певний (інкубаційний) час, пов'язаний з процесом поглинання енергії пластичними деформаціями, що сповільнюють утворення нових поверхонь на докритичній стадії.

З наведеного випливає, що максимум руйнівних деформацій усього масиву (наприклад, під час вибуху) відстає від максимуму напружень, тому руйнування порід у зоні радіальних тріщин відбувається із запізненням щодо фронту максимальних (радіальних) напружень. Якщо припустити, що об'ємні деформації розвиваються в часовому інтервалі, відмінному від деформацій формозміни (різні інкубаційні періоди), оскільки критичні радіальні і тангенціальні напруження різні ($\sigma_r > \sigma_\theta$), тоді наявність двох координат (відстаней від стінки зарядної камери) зародження пружних коливань двох різновидів є досить імовірною. Першою з них буде межа, де радіальне напруження дорівнюватиме або буде меншим за міцність породи на стиск (імовірно, це зовнішня межа зони подрібнення), і друга межа, де окружні напруження досягають міцності породи на відрив (розтяг) [1], тобто $\sigma_1 = \sigma_{відр}$. У цьому разі утворюється тріщина вздовж площини дії розривних напружень σ_1. Макроруйнування зсуву виникає в елементі породи, якщо хоча б на одному з перерізів середовища дотичні напруження τ_{max} досягають зсувної міцності σ_s.

Отже, властивості міцності порід на стискання за інших однакових умов впливають на розміри зон незворотних деформацій – випромінювачів поздовжніх хвиль. Частота зсувної хвилі майже не відрізняється від частоти поздовжньої хвилі на зовнішній межі зони подрібнення, хоча за швидкістю відрізняється в n разів і загасає, на відміну від поздовжньої, за законом $r^{-1,4}$ [5]. Наводимо значення коефіцієнта крихкості $K_{кр}$ залежно від категорії порід за СНиП-82 і коефіцієнта міцності f за Протодьяконовим (таблиця).

Під час вивчення механізму зародження та реалізації динамічної події поблизу гірничих розробок енергетичну концепцію за Гріффітсом доцільно доповнити положеннями кінетичної концепції міцності академіка С. М. Жукова, яка полягає у тому, що при відомих певних закономірностях явища, стадій його розвитку на основі вимірів можна визначити, наскільки об'єкт близький до остаточного руйнування.

Процес накопичення енергії та зростання тріщин поділяється на дві основні стадії – стаціонарну і нестаціонарну (рис. 1). Перша пов'язана з утворенням і накопиченням дефектів (мікротріщин) у породі, наприклад тріщин, розміри яких зумовлені структурною неоднорідністю (гетерогенністю) матеріалу. Виникаючи в місці перенапруження, вони швидко проростають до межі структурного елементу (зерна, блоку) і загальмовуються через різку зміну умов їх розвитку, тобто стабілізуються.

У навантаженому тілі кількість таких дефектів зростає, причому кожен з них майже не впливає на міцність матеріалу. При досягненні деякої порогової концентрації пошкоджень руйнування переходить у другу нестаціонарну фазу з утворенням ансамблів тріщин (кластерів), де дефекти майже дотичні відносно один одного і можуть об'єднуватися. Якщо утворені кластери стабілізуються, то накопичуються інші тріщини з новими умовами кластери-

Категорія породи за СНиП–82	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Коефіцієнт f міцності породи за Протодьяконовим	1,5–2	3–4	4–5	5	8–9	12–15	17–18	20
Коефіцієнт крихкості $K_{кр}$	15	17	18,5	20	21	22,5	24	25
Міцність породи на відрив, 10^{-5} ·Па	10–13	17,6–23,5	21,6–27	25	38,1–42,9	53,3–66,7	70,8–75	80

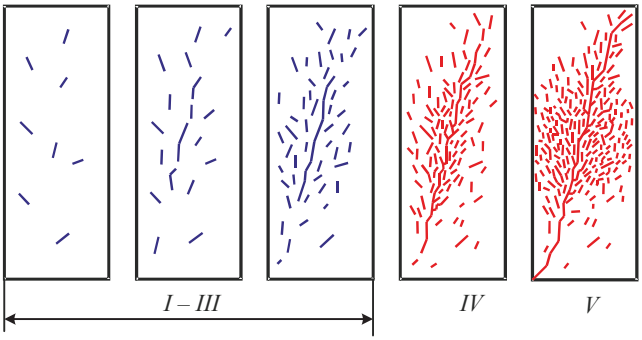


Рис. 1. Зародження і розвиток тріщин зі зростанням напруг: *I–III* – стадії накопичення дефектів (стаціонарна фаза); *IV* і *V* – стадії росту тріщин (нестаціонарна фаза).

зації до моменту виникнення нестійкого кластера, здатного розвиватися самостійно і прискорено як активний осередок руйнування.

Формування кластерів супроводжується акустичною емісією з певними енергетичними рівнями – невеликими на першій стадії і набагато інтенсивнішими на стадії, коли вже починають об'єднуватися кластери і процес вступає в фазу нестабільного випромінювання – провісника гірничого удару (на рис. 1: IV–V стадії розвитку). Аналізують кластеризацію загальноприйнятими статичними прийомами, це найважливіша складова в оцінюванні формування осередку гірничого удару.

Розглянемо деякі методичні особливості дослідження сейсмічних коливань під час вибухів та гірничих ударів. Для вивчення хвильових процесів в ідеально пружному середовищі приймаємо розрахункову схему опису картини поширення збурень у деформованому міцному середовищі, запропоновану в роботі [2], у такому трактуванні: при падінні напружень, викликаних тиском продуктів вибуху на стінку зарядної камери, швидкість поширення фронту подрібнення вирівнюється, а потім стає менше швидкості поздовжніх хвиль. У підсумку цей фронт вироджується і подальший рух відбувається в рамках моделі Гука у вигляді поздовжньої хвилі.

Отриману з умов на фронті подрібнення формулу для швидкості його поширення на стадії, близькій до виродження, наведено у праці [2]. Однак прийняття пружного середовища як вихідної моделі призводить до того, що за межами зони подрібнення час зростання амплітуди скорочується залежно від відстані, що експериментально не підтверджено. Тому в аналізі хвильових рухів слід замінити в узагальненій пружно-пластичній моделі пружні співвідношення квазіпружними з уточненням хвильової картини за межами зони подрібнення.

Враховуючи релаксаційні і зсувні механізми в прийнятій квазіпружно-пластичній моделі, передній ударний фронт на пружному провіснику залежно від відстані вироджується швидше, і епюра масової швидкості стає безперервною кривою, а залежність часу зростання з відстанню показує зростання його за межами зони подрібнення до межі неруйнівних навантажень, де коефіцієнт загасання амплітуд приймає значення порядку 1,6 (тоді як у першій моделі воно є нереальною величиною, що дорівнює приблизно 1). Як бачимо, аналітичні побудови для встановлення часових параметрів руху пружно-пластичних хвиль поблизу заряду мають лише наближений (оцінний) характер і уточнюються в результаті конкретних експериментів або найчастіше в цей час замінюються емпіричними (напівемпіричними) співвідношеннями [4].

Принципову схему поширення збурень у руйнівному твердому середовищі та її стану в характерних зонах наведено на рис. 2. Розглянемо основні положення теорії руйнування під час динамічних навантажень, що описують механічні ефекти вибуху для вироблення підходів до визначення розмірів зон деформації в рамках зонної моделі В. М. Родіонова.

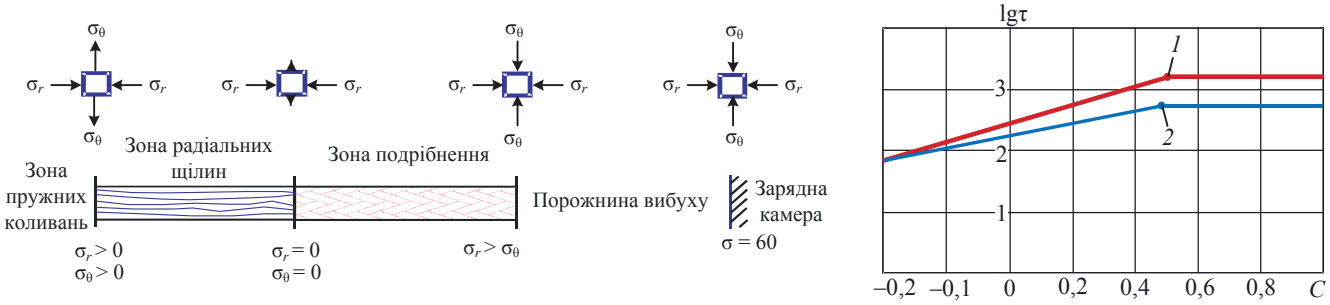
Схема на рис. 2 ілюструє низку положень, з урахуванням яких можна отримати більш точні параметри зон деформації навколо осередку. На деякій відстані від центру вибуху ($5r_3$ приблизно при розгляді сферичного джерела) радіальні σ_r і тангенціальні σ_θ компоненти стискаючих напружень приблизно однакові ($\sigma_r \approx \sigma_\theta$) і напруження близьке до гідростатичного. Починаючи з відстані приблизно $14r_3$, тангенціальна компонента напруження стає розтяжною, а радіальна залишається стискаючою, середовище руйнується у формі радіальних тріщин*.

На межі зон подрібнення і радіальних тріщин зв'язок між C і $\lg\tau$ (див. рис. 2) визначається ділянкою кривої рівняння $\tau_n(C)$ до $C = 0$:

$$\lg\tau_{max} = \lg[(\sigma_{max} - \sigma_{min})/2]. \qquad (1)$$

Теорія руйнування, окрім обґрунтування конкретного прийнятого варіанта механізму зародження і розвитку тріщин, повинна доповнюватись однією з теорій граничного стану – гіпотезою міцності у вигляді зв'язку максимальної дотичної напруги з нормальною. Без цього неможливе розділення

* Обгрунтування цієї концепції розвитку деформаційних процесів у твердих середовищах наведено в працях академіка Е. І. Шемякіна.



а *б*

Рис. 2. Схема до визначення розмірів зон деформації за В. М. Родіоновим (*а*) та умови граничних станів за А. Н. Ставрогіним: *1* – умови міцності; *2* – умови пружності (*б*); *C* – відношення мінімальної розтягувальної ε_{min} і максимальної ε_{max} деформацій, $C = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$.

спектру пружних об›ємних хвиль як в початковий момент, так і в процесі руху по пружному середовищу. Найповніше умови крихкого руйнування відбиває гіпотеза, запропонована Е. Маріоттом у вигляді

$$\sigma = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \le \sigma_p, \quad (2)$$

де σ_p – межа міцності зразка при одновісному розтязі;
ν – коефіцієнт Пуассона.

Треба проаналізувати умови граничного стану середовища з пластичними властивостями, що вкрай важливо під час розгляду задач в середовищі на глибоких горизонтах або в наносах. М. Хубер для цих умов запропонував гіпотезу потенційної енергії формозміни, за якою граничний стан настає під час досягнення енергією формозміни $E_ф$ деякої граничної величини:

$$E_ф = E_п - E_V, \quad (3)$$

де $E_п$ – повна питома робота на деформацію одиниці об'єму;
E_V – питома робота зміни об'єму, при $V \to 0{,}5$ вона перетворюється на нуль.

Одним з важливих напрямів розвитку промислової сейсміки треба вважати розробку методики оцінки сейсмонебезпеки за силовим і енергетичним чинниками, яка дасть змогу враховувати дисипативні втрати через коефіцієнт поглинання і оцінити масштаб відхилень від розрахункових параметрів енергетичної подібності як можливість його застосування для конкретних умов.

Висновки. Оцінку інтенсивності сейсмічних коливань для підвищення ефективності проти сейсмічних заходів треба виконувати на основі критеріїв, що цілком відображають реальну картину впливу сейсмічних хвиль і реакцію на них об'єкта, який маємо захищати. У цьому зв'язку поряд із загальноприйнятою концепцією оцінки сейсмонебезпеки за чинником масової швидкості варто розвивати напрями промислової сейсміки на основі силових і енергетичних критеріїв з урахуванням дисипативних втрат, внаслідок чого змінюється коефіцієнт поглинання впродовж променя хвилі.

Розглядаючи задачі деформації породи під впливом силового імпульсу, треба виходити з енергетичної концепції Гріффітса, а під час вивчення механізму незворотних деформацій у місцях концентрації напруг (осередку) з подальшою реалізацією динамічних подій – кінетичної концепції міцності поведінки породи в силовому полі академіка С. М. Жукова.

Виходячи з кінетичної концепції міцності, потрібно внести зміни в чинні методичні підходи до вивчення динаміки хвильових процесів, прийнявши гіпотезу про наявність двох координат зародження об'ємних хвиль (радіусів випромінювача) для кожної з них.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Kompleksowa* metoda prognozowania oddziałowania wpływu podziemnej eksploatacji złoż oraz wstząsów górotworu na chronieone obiekty powierzchniowe w brzeżnym obszarze niecki obniżeniowej / [M. Chudek, W. Krawiec, A. Wowk i in]. – Glivice: Wydawnictwo Politechniki śląskiej, 2003. – 535 s.
2. *Поведение* грунтов под действием импульсных нагрузок / [А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев и др.]. – К.: Наук. думка, 1986. – 228 с.
3. *Вовк А. А.* Сейсмическое действие взрыва цилиндрического заряда / А. А. Вовк, А. А. Кузьменко // Прикладная гидромеханика. – 2001. – Т. 3(75). – № 4. – С. 3–12.
4. *Вовк О. О.* Управління напружено-деформованим станом підроблюваного масиву для підвищення стійкості природних і інженерних об'єктів при сейсмодинамічних навантаженнях: дис. … доктора техн. наук: 05.15.09 / Вовк Оксана Олексіївна. – К., 2014. – 347 с.
5. *Мосинец В. Н.* Основные научно-технические проблемы сейсмики ближней зоны / В. Н. Мосинец, В. Ф. Богацкий // Сейсмика промышленных взрывов. Взрывное дело. – 1983. – № 85/42. – С. 89–101.