

Список літератури

1. **Тищенко С.В.** Особенности механизма разрушения горных пород дифференцированными скважинными зарядами взрывчатых веществ / **С.В. Тищенко, Г.И. Еременко, К.А. Федин** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2012. – № 32. – С. 25 – 28.
2. **Жуков С.А.** Анализ закономерностей формирования силовых полей при взрыве скважинных зарядов в горных породах / **С.В. Тищенко, С.А. Жуков, В.В. Цариковский** // Науковий вісник Національного гірничого університету. Вип. № 2. – Дніпропетровськ: НГУ, –2009. –С.35-37.
3. **Фролов О. О.** Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різноміцнісних масивів гірських порід на кар'єрах / Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.03. – К., 2014. – 369 с.
4. **Шапурін О.В.** Оптимізація комбінованого буріння свердловин з утворенням котловин великого діаметру / **О.В. Шапурін, П.М. Синичич** // Вісник Криворізького національного університету: Зб. наук. праць. –2015. – Вип. 39. – С. 107-113.
5. **Фролов О. О.** Визначення раціональних параметрів короткосповільненого підривання гірських порід на залізничних кар'єрах / **О.О. Фролов** // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. –2011. – Вип.21. – С. 63-69.
6. Научные основы проектирования карьеров / Под ред. **В.В. Ржевского, М.Г. Новожилова, Б.П. Юматова.** – М.: Недра, 1971. – 600 с.
7. **Носков В. Ф.** Буровзрывные работы на открытых и подземных разработках / **В. Ф. Носков, В. І. Комащенко, Н. І. Жабін.** – М., Недра, 1982. – 320 с.
8. **Кравець В. Г.** Підривні роботи на кар'єрах. Навч. посібник / **В. Г. Кравець, В. Д. Воробйов, А. О. Кузьменко.** – К.: ІСДО, 1994. – 376 с.
9. **Кутузов Б. Н.** Взрывные работы / **Б. Н. Кутузов.** – М., «Недра», 1974. – 368 с.
10. **Ефремов Э. И.** Разрушение горных пород энергией взрыва / **Ефремов Э. И.;** под ред. **Э. И. Ефремова.** – К.: Наук. думка, 1987. – 264 с.
11. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий черной металлургии открытым способом разработки / **ВНТП 13-1-86** (МЧМ СССР) – 1986. – 194 с.
12. **Авдеев Ф. А.** Нормативный справочник по буровзрывным работам / **Ф. А. Авдеев, В. Л. Барон, Н. В. Гуров, В. Х. Кантор.** – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 511 с.
13. **Фролов О. О.** Щодо вибору ефективного діаметру свердловинних зарядів на кар'єрах / **О. О. Фролов, А.В. Хлановський** // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. –2017. – Вип. 33. – С. 15-21.
14. **Кутузов Б. Н.** Выбор рационального диаметра взрывных скважин на карьерах / **Б. Н. Кутузов, А. А. Вареничев** // Горн. журн. – 1976. – № 8. – С. 47-51.
15. **Мальцева Ю.С.** Проблемы выбора рационального диаметра скважинных зарядов на карьерах / **Ю.С. Мальцева А.А. Фролов** // Материалы 7-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» – Тула: Тульский государственный университет. – 2017. – С. 30-35.

Рукопис подано до редакції 20.02.2018

УДК 622.283

Л.М. ЗАХАРОВА, канд. техн. наук

Інститут фізики гірничих процесів НАН України, м. Дніпропетровськ

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ Й КІНЕТИКИ РОЗВИТКУ ЗОНИ ЗРУЙНОВАНОГО МАСИВУ НАВКОЛО ПІДГОТОВЧОЇ ВИРОБКИ

Актуальність проблеми забезпечення стійкості гірничих виробок неухильно підвищується зі збільшенням глибини розробки підземних родовищ корисних копалин. Величина зміщень порід на контурі виробок послідовно зростає, тому що оточуючий масив деформується поза межею міцності. Процес необоротних зрушень зруйнованого масиву гірських порід має складну кінематику й динаміку, які вивчені на сьогодні недостатньо. Це стримує процес вдосконалення існуючих й розробку нових технологій кріплення і підтримки гірничих виробок у складних геомеханічних умовах.

Метою статті є підтвердити гіпотезу щодо важливості мікро-динамічних стрибко-подібних зміщень масиву гірських порід навколо підготовчих виробок під час необоротних зрушень масиву. У статті виконано комплексний аналіз результатів моніторингу кінетики й динаміки незворотних зрушень порід **методами** глибинних реперів, моніторингу мікро-сейсмічності масиву, а також його напруженого стану.

Наукові результати та їх новизна полягають у наступному. Вперше встановлено зв'язок між мікро-динамічними осіданнями порід покрівлі виробки й активністю мікро-сейсмічної емісії масиву. Вперше доведено, що величина пустотності зруйнованого масиву періодично змінюється в зоні активного гірського тиску у 2-3 рази. Уточнено механізм взаємодії породних кластерів або інтервалів, у результаті якого відбувається перерозподіл пустотності зруйнованих порід. Показано, що такі процеси відображають близьку й дальню взаємодію породних фрагментів і їх кластерів під час необоротних зрушень гірського масиву у зоні активного гірського тиску, а самі кластери створюють дисипативні системи, які розсіюють енергію гірського тиску під час необоротних зрушень масиву гірських порід.

© Захарова Л.М., 2018

Практична значимість результатів дослідження обумовлена обґрунтуванням перспективних технологій, які є найбільш ефективними для управління дисипативними системами взаємодіючих породних кластерів, а саме: канатні анкери глибокого закладення, які попередньо натягують початковим зусиллям під час установки, точкове зміцнення зруйнованого масиву гірських порід для підтримки ефекту їх само заклинювання, рамно-анкерне кріплення сумісного опору.

Ключові слова: підготовча виробка, покрівля, необоротні зрушення, кінематика, динаміка, взаємодія кластерів, дисипативні системи.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-14-20

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Стійке функціонування видобувної промисловості України забезпечує її енергетичну й сировинну незалежність. Надійна експлуатація підземних родовищ корисних копалин залежить, у першу чергу, від забезпечення стійкості підготовчих й очисних виробок. Проте неухильне зростання глибини розробки посилює актуальність проблеми забезпечення належного стану гірських виробок для безпечної експлуатації родовищ. Вдосконалення існуючих й розробка нових засобів кріплення, підтримання й охорони вказаних виробок наштовхується на недостатньо вивчений механізм необоротних зрушень порід, які оточують виробки. Вважається, що зрушення масиву навколо підготовчої виробки можна розглядати як плавний процес й нехтувати мікро-динамічними осіданнями покрівлі, або здиманнями підшоши. Окрема проблема гірських ударів як макро-динамічних явищ, що відбуваються під час проходки виробок у даній статті не розглядається.

Метою даної роботи є перевірка і підтвердження гіпотези про важливість мікро-динамічних, стрибко-подібних зрушень масиву навколо підготовчої виробки, які суттєво змінюють кінетику й динаміку необоротних зрушень порід.

Аналіз досліджень та публікацій. Переважна більшість зарубіжних публікацій присвячена дослідженню проблем абсолютної стійкості підземних виробок, тобто забезпечення умов, коли зміщення на контурі не перевищують пружних деформацій гірського масиву й знаходяться на рівні кількох десятків міліметрів. У разі перевищення пружного рівня деформацій ситуація вважається катастрофічною. Ця традиція обумовлена тим, що розвинуті країни видобувають руду у міцних уміщувачих породах, а видобуток вугілля здійснюється зазвичай на глибинах, що не перевищують 250-400 м. Проте у Польщі, Германії, Україні, Китаї глибина вугільних шахт і рудників сягнула за 1000 м й проблема забезпечення стійкості підготовчих виробок постала ще більш гостро [3, 4, 8].

Абсолютну стійкість гірничих виробок у таких умовах забезпечити практично неможливо, отже спеціалісти шукають такі засоби кріплення технології [5, 7], які здатні забезпечити стійкість підземних споруд за умов, коли зміщення порід сягають кількох сотень міліметрів. Для забезпечення задовільної стійкості виробок у таких умовах знайшло застосування комбіноване рамно-анкерне кріплення [9].

Таке кріплення здатне стабілізувати стійкість виробок навіть за умов, коли навколо їх виникає зона зруйнованих порід, а зміщення на контурі сягають 1 м і навіть більше. Проте механізм таких зміщень вивчено недостатньо, що стримує процеси розвитку й вдосконалення засобів кріплення для складних геомеханічних умов [10, 11]. Стаття [12] є одною з перших, в якій встановлено наявність механізму ближньої взаємодії породних фрагментів, яка є важливою ланкою у механізмі незворотних зрушень порід навколо виробки. Для детального вивчення процесів взаємодії породних фрагментів й їх кластерів необхідно здійснювати інтенсивний моніторинг процесу необоротних зрушень порід. Наразі такий моніторинг виконується з перервою між послідовними сесіями замірів, яка не менша за кілька діб, тоді як для ідентифікації кластерів необхідно скоротити цей інтервал на один-два порядки. Саме тому у даній статті виконано аналіз автоматизованого моніторингу необоротних зрушень масиву гірських порід навколо підготовчої виробки, який здійснювався з кроком у часі, рівним 30 хвилинам.

Викладення матеріалу та результати. Комплексні інструментальні спостереження за проявами гірського тиску здійснювались у 32 очисному вибої довжиною 305 м на шахті Вест Коллієрі (Австралія). Вугільний пласт потужністю 2,5 м відпрацьовувався на глибині 520 м стовповою системою розробки з розділенням виїмкових стовпів ланцюговими ціликами шири-

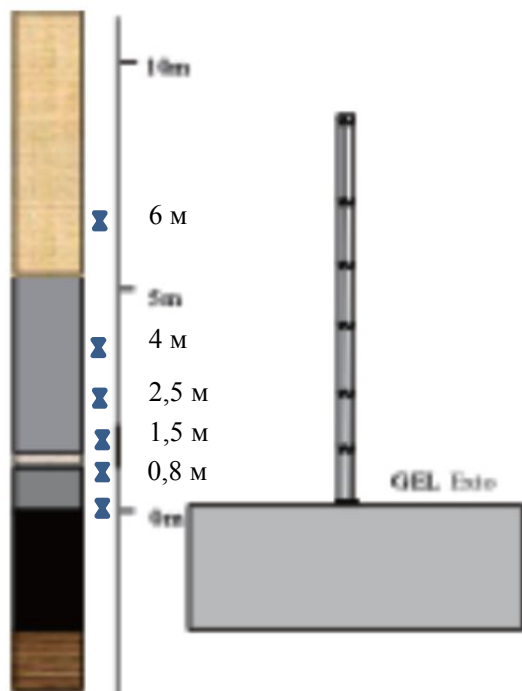


Рис. 1. Стратиграфічна колонка, й схема закладки глибинних реперів [13]

паралельні вентиляційні штреки. Схема розташування глибинних реперів наведена на рис. 1. Напроти реперів вказана їх відстань від породного оголення покрівлі підготовчої виробки. Перший репер був зафіксований на породному оголенні покрівлі, а отже розташовувався на відстані 0 м. Шостий глибинний репер був встановлений на відстані 6 м від породного оголення покрівлі. Також було встановлено, що процес зрушення порід покрівлі не розповсюджувався на відстань більш ніж 10 м протягом періоду моніторингу розшарувань порід покрівлі.

Навколо спостережної станції були пробурені додаткові шпури, в яких було закладено тривимірні датчики гірського тиску, а також геофони для моніторингу сейсмоакустичної емісії порід покрівлі. Це дозволило вивчити динаміку зрушень порід навколо підготовчої експериментальної виробки й зіставити її з кінематикою розшарування покрівлі.

Зміщення покрівлі почались у момент, коли лава підійшла до експериментальної ділянки на 10 м. Моніторинг розшарувань покрівлі відбувався протягом 2160 хв. до моменту, коли шпур, у якому були розміщені глибинні реperi перерізало горизонтальними зміщеннями суміжних шарів. За цей час лава пройшла спостережну станцію і віддалилась від неї на 10 м, а максимальне осідання першого реперу, або породного оголення покрівлі склало 180 мм.

Датчики гірського тиску зареєстрували підвищення тиску попереду очисного вибою на 4,8 МПа й зниження його відносно початкового рівня на 5,4 МПа після проходу лави, що свідчить про інтенсивне руйнування порід, які оточують виробку й формування розвантаженої зони навколо експериментальної ділянки виробки. Підкреслимо, що вказане розвантаження відбувається саме завдяки руйнуванню порід, незважаючи на те, що збійка розташована на відстані 15 м від межі виробленого простору лави, яка відпрацьовувалась, а отже виробка потрапила у зону залишкового опорного тиску.

Графіки осідань усіх реперів наведені на рис. 2. По-перше, помітно, що осідання й розшарування покрівлі відбувалось з прискоренням. Очевидно, що після проходу лави й її подальшого віддалення покрівля втратила свою стійкість, а виробка була обвалена. Це типова ситуація, яка складається на американських та австралійських шахтах, які відпрацьовують лави тільки зворотним ходом й не підтримують виробки позаду очисних вибоїв.

По-друге помітно, що зрушення породних шарів відбувалось дискретними кроками у часі й просторі. Періоди плавного опускання змінювались дискретними стрибко-подібними зрушеннями. Амплітуда таких дискретних (моментальних) інкрементальних зрушень сягала 23 мм. Середня швидкість осідань породних шарів у періоди плавних опускань становила 0,05 мм/хв.,

ною 37 м. Стратиграфічна будова товщі наведена на рис. 1. Безпосередня покрівля пласта представлена 5-метровим аргілітом, у нижній частині якого був прошарок міцної породи. Міцність аргіліту на одноосьовий стиск становила 40 МПа. Вище залягав алевроліт міцністю на одноосьовий стиск 50 МПа. У безпосередній підшові виробки прямокутного перерізу розміщувався шар аргіліту. Швидкість посування очисного вибою коливалась у межах 500-600 м/міс.

Підготовча виробка мала прямокутний переріз шириною 5,2 м і висотою 2,5 м (рис. 1). Покрівля виробки була закріплена сталі-полімерними анкерами довжиною 2,4 м, а також канатними анкерами, довжина яких була 4-5 м.

Кінематика зрушення порід покрівлі реєструвалась за допомогою автоматичного моніторингу зміщень глибинних реперів з кроком у часі, що дорівнював 30 хв. Така частота зняття показань є на сьогодні унікальною і дозволяє прослідкувати процес розшарування покрівлі з такою детальністю, яка раніше не була досягнута. Спостережна станція була обладнана у збійці, яка з'єднувала

або 72 мм/доб, що добре узгоджується з інтенсивністю зрушень покрівлі у підготовчих виробках українських шахт у зонах активних зрушень позаду діючих лав [12].

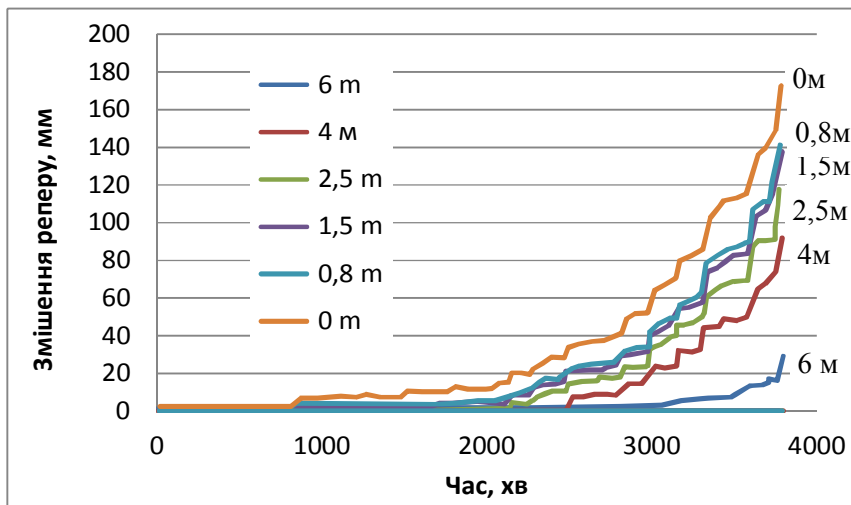


Рис. 2. Кінематика зрушення глибинних реперів [13]

По-третє, дискретні інкрементальні зрушення порід покрівлі узгоджуються з результатами моніторингу мікросейсмічної активності масиву навколо експериментальної виробки. У якості інтенсивності сейсмічності приймалась кількість мікросейсмічних сигналів зареєстрованих геофоном протягом 15 хв., або половини інтервалу між послідовними зняттями показань щодо зрушень глибинних реперів.

Згідно результатів моніторингу мікросейсмічної активності масиву, основні руйнування порід покрівлі відбулись перед очисним вибоєм. Після проходження експериментальної виробки інтенсивність мікросейсмічних подій суттєво зменшилась, оскільки розшарування й розтріскування порід змінилось на їх необоротне осідання у вигляді прогину у порожнину виробки.

На рис. 3 показана динаміка розпушення інтервалів породних шарів між сусідніми глибинними реперами. Ці графіки і подальший аналіз виконано авторкою даної статті. Оскільки орієнтовна межа міцності порід на розтягнення становить приблизно 0,005 (відмічено пунктирною прямою на рис. 3), породи, які залягають вище реперу 6 (тобто на відстані 6 м і далі від пород-

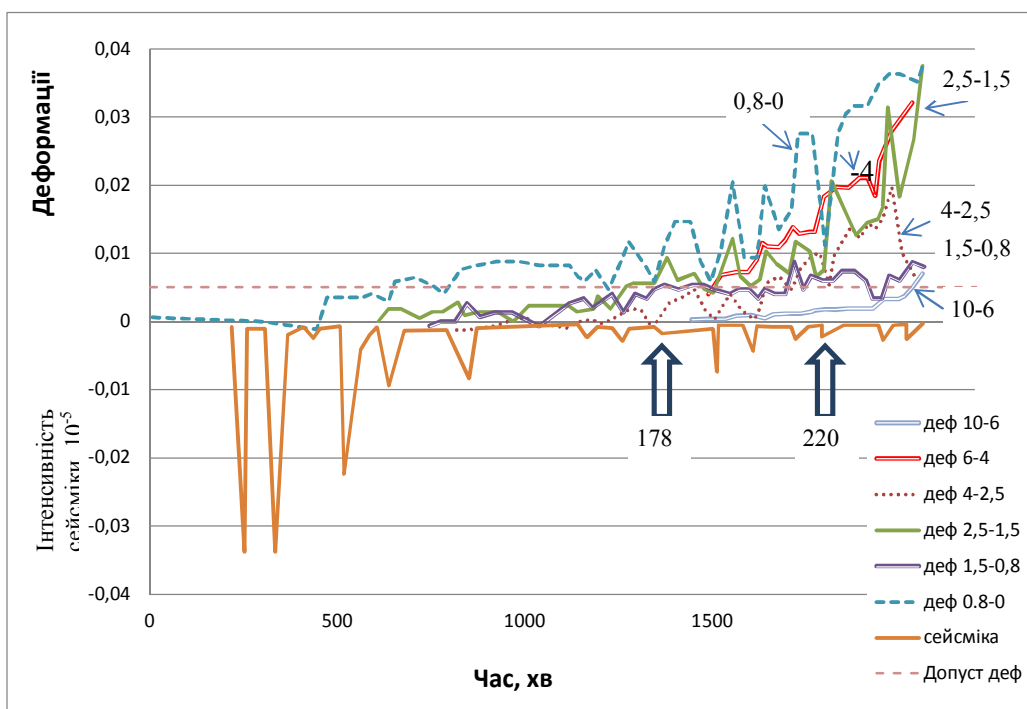


Рис. 3. Динаміка розпушення інтервалів

ного оголення покрівлі виробки) деформувались у пружному стані. Майже пружно деформувалася й інтервал від 0,8 до 1,5 м, який містив міцний прошарок породи. Решта покрівлі перейшла у позамежний стан, й деформувалась необоротно.

Найбільш важливо те, що величина розпушення вказаних інтервалів періодично змінювалась у часі. Достовірність цього спостереження перевищує 99%, оскільки амплітуда коливань величини розпушення у 2-4 рази більша за мінімальний тренд. Це видно на графіках розпушення інтервалів 0,8-0 м, 2,5-1,5 м, 4-2,5 м, 6-4 м. Характерно, що локальні мінімуми розпушення майже у всіх випадках співпадають з активізацією мікросейсмічності. Її графік наведений умовно на від'ємній частині вертикальної вісі рис. 3.

Для того, щоб встановити причину такого ефекту були побудовані поточні розподіли інтервальних розпушень (рис. 4). Пунктиром показаний попередній розподіл розпушення інтервалів, суцільною ломаною лінією – послідовний у часі. Аналіз цих розподілів показав, що активізація мікросейсмічності пов'язана з дискретним інкрементальним осіданням певного глибинного породного шару, та його додатковим розпушенням, яке вимагало вільного місця або додаткового ступеню свободи. Оскільки ці шари залягають у глибині масиву, додатковий ступень свободи можна відібрати тільки у шарів, які розташовані нижче або ближче до підготовчої виробки. Отже породи у інтервалі, який стрибко-подібно осідав і розпушувався, надавлювали на сусідні породи, які не встигали синхронно осідати, й тому змушені були зменшувати своє розпушення внаслідок відносного стиснення.

На лівому графіку рис. 4 видно, що різке осідання й розпушення інтервалів 4-2,5; 2,5-1,5 і 1,5-0,8 м, яке супроводжувалось мікросейсмічною інтенсивністю 178 одиниць (ліва пуста стрілка на рис. 3), призвело до відносного стиснення інтервалу 0,8-0 м, розпушення якого зменшилось з 0,012 до 0,006, або у два рази. Правий фрагмент рис. 4 демонструє як різке осідання інтервалів 6-4 й 4-2,5 м, яке супроводжувалось мікросейсмічністю 220 одиниць (права пуста стрілка на рис. 3), призвело до відносного стиснення інтервалів 2,5-1,8 й 0,8-0 м у 1,56 і 2,48 рази відповідно. Така нерівномірність може існувати тимчасово, й згладжується з часом після виходу виробки з зони активного гірського тиску або віддалення лави на значну відстань (150 м і далі).

Вказана закономірність відображає близьку й дальню взаємодію породних кластерів, яка супроводжує активні необоротні зрушення масиву гірських порід. Близня взаємодія відбувається між сусідніми кластерами, або інтервалами, наприклад інтервалом 1,5-0,8 м і 0,8-0 м (лівий фрагмент рис. 4). Дальня взаємодія здійснюється через ланцюжок кластерів-посередників, наприклад інтервалу 6-4 м й інтервалу 0,8-0 м (правий фрагмент рис. 4) через проміжні інтервали 4-2,5 м й 2,5-1,8 м. У такому випадку проміжні інтервали також беруть участь у перерозподілі ступенів свободи, або вільного простору, що використовується для забезпечення можливості необоротних зрушень зруйнованих порід у порожнину виробки.

З практичної точки зору важливо управляти взаємодією породних кластерів таким чином, щоб мінімізувати дисипацію енергії гірського тиску, що досягається такими перспективними

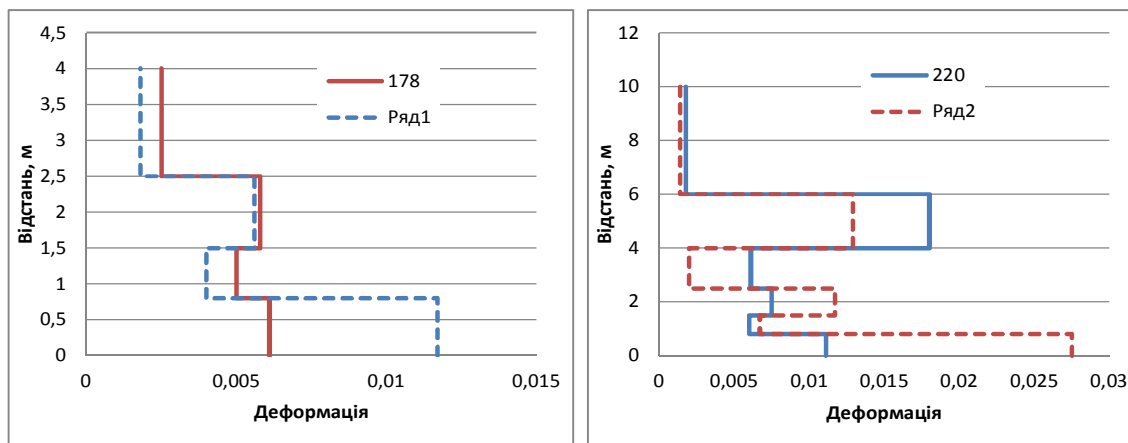


Рис. 4. Фрагменти, які ілюструють розширення одних кластерів за рахунок відносного стиснення інших

технологіями, як канатні анкери глибокого закладення, які попередньо натягують початковим зусиллям під час установки [14, 15], точкове зміцнення зруйнованого масиву гірських порід для підтримки ефекту їх само-заклинювання, рамно-анкерне кріплення сумісного опору.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз детального моніторингу стану масиву навколо виробки, що здійснювався з кроком у часі у 30 хвилин, засвідчив складну кінематику осідань порід покрівлі у зоні активного гірського тиску, що розповсюджується навколо діючого очисного вибою. Періоди плавного прогинання породних шарів змінюються різкими або стрибко-подібними осіданнями, амплітуда яких сягає 24 мм. Такі динамічні осідання супроводжуються мікросейсмічною активністю у межах 178-1000 одиниць, а також розпушенням вказаних шарів за рахунок відносного стиснення шарів, які розташовані ближче до порожнини підготовчої виробки. Вказаний механізм підтверджує наявність близької й дальньої взаємодії породних кластерів під час активних необоротних зрушень гірського масиву.

У подальшому планується дослідити параметри обґрунтованих технологій забезпечення стійкості гірничих виробок з урахуванням особливостей поведінки дисипативних систем, які виникають у результаті близької і дальньої взаємодії породних кластерів.

Список літератури

1. Esterhuizen G., Ellenberger J.E., Klemetti T. A Procedure for the Rapid Assessment of Coal Mine Roof Stability Against Large Roof Falls. 34th International Conference on Ground Control in Mining, WVU, Morgantown, 2015, pp. 138–144.
2. Esterhuizen G.S. Analysis of Alternatives for Using Cable Bolts As Primary Support at Two Low-seam Coal Mines. 35th International Conference on Ground Control in Mining, WVU, Morgantown, 2016, pp. 48–55.
3. Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю. Технологія відпрацювання потужних крутоспадних рудних покладів. Вісник Криворізького національного університету, вип. 45, 2017.-С.47-50.
4. Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю. Удосконалення технології відпрацювання рудних покладів камерними системами на глибоких горизонтах / Вісник КНУ, 2012. - Вип. 30. - С. 23-26
5. Bastante F.G., Alejano L. Ground reaction curves for circular excavations in non-homogeneous, axisymmetric strainsoftening rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 34 (2013): 231-240.
6. Alejano L.R., Dono A.R., Veiga M. Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strainsoftening rock masses. Tunnelling and Underground Space Technology 30 (2012) 169–182.
7. Ступник Н.И. Исследование формы поперечного сечения подземных выработок при комбинированной отработке месторождений / Н.И.Ступник, Б.Н.Андреев, С.В.Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – № 32. – С. 3-6.
8. Ступник Н.И. Разработка рекомендаций по выбору типа крепления горных выработок и сопряжений в условиях урановых шахт ГП "ВОСТГОК" / Н.И. Ступник, М.Б. Федько, В.А. Колосов, С.В. Письменный // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 5. – С.21-25.
9. Методические указания. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. КД 12.01.01.201 – 98.
10. Письменный С.В. Визначення кутової точки руйнівного тиску на контурі гірничої виробки з урахуванням техногенних сил. Вісник Криворізького національного університету, вип. 45, 2017.-С.166-172.
11. Письменный С.В. Моделювання стійкої форми очисної камери при розробці магнетитових кварцитів Криворізького залізорудного басейну / С.В. Письменный, О.Б. Томашевський // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – 2015. – № 40. – С. 98-103.
12. Zakharova L. Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. Metallurgical and mining industry.N.6, 2017, pp.39-42.
13. Shen B. , Guo H., Luo X. Field monitoring of roof strata and longwall overburden in underground coal mine. ICGCM China 2014 Proceedings (English volume). Beijing, 2014, pp. 105-111.
14. Ur-Rahman I., Hagan P., Chen J. The Influence of Concrete Sample Testing Dimensions on Assessing Cable Bolt Load Carrying Capacity. 2015 Coal Operators' Conference. The University of Wollongong, 2015, p.137-145.
15. Mosse-Robinson, S. Sharrock, G. (2016). Laboratory experiments to quantify the pull-out strength of single strand cable bolts for large boreholes. In: Proceedings of the Second Australasian Ground Control in Mining Conference. Australian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 201–209.

Рукопис подано до редакції 20.02.2018