

УДК 553.291

А.В. МЕРЗЛІКІН (канд. техн. наук, доцент)

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України, м. Покровськ

Л.М. ЗАХАРОВА (канд. техн. наук, доцент)

Державний науково-дослідний гірничорудний інститут, Україна, м. Кривий Ріг

КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ Й КІНЕМАТИКИ РОЗВИТКУ МАЛОАМПЛІТУДНОГО ПОРУШЕННЯ

Розглянуто механізм утворення й розвитку малоамплітудних розривних порушень в осадовому масиві на основі фізичного й математичного моделювання. Встановлено, що завдяки взаємодії кластерів масиву гірських порід, які узгоджують свій рух й сприяють розпушенню масиву, в масиві накопичуються порожнини які є обов'язковою умовою для розвитку малоамплітудних порушень. Отримані результати дозволяють уточнити складний механізм незворотних зрушень й деформацій масиву гірських порід під час зародження й розвитку малоамплітудних розривних порушень. Це сприяє вдосконаленню методики прогнозування параметрів розривних порушень, що має практичне значення з точки зору зниження ризиків гірничих робіт.

Ключові слова: механізм утворення, моделювання, порушення, кластери.

Вступ.

Геологічні порушення є однією з найбільших проблем розробки родовищ корисних копалин, оскільки вони породжують ризики техногенної природи, які тягнуть за собою економічні збитки й зниження безпеки підземного виробництва [1].

Особливою невизначеністю характеризуються малоамплітудні порушення, які важко виявляються геофізичними методами розвідки [2, 3]. Зазвичай такі порушення розкриваються під час ведення гірничих робіт, що обумовлює високий ступінь ризиків, оскільки на виконання попереджуючих заходів може не вистачити часу [4]. Небезпека відпрацювання запасів, що пошкоджені малоамплітудними порушеннями пов'язана з невизначеністю ступеня пошкодженості рудного тіла, а також наявністю локалізованих зон високих напружень [5].

Для вивчення механізму зародження й розвитку МАП використовуються ряд методів [6]. Серед них отримали популярність методи фізичного й математичного моделювання. У даній роботі описано результати дослідження кінематики й динаміки напруженого стану масиву гірських порід під час розвитку МАП на моделях з еквівалентних матеріалів й методами комп'ютерного моделювання.

Характеристика фізичної моделі й методика моделювання малоамплітудного порушення

Модель шаруватого масиву гірських порід будувалась прошарками осадових порід. Потужність породних пластів коливалась у межах від 0,5 м до 2,0 м. Міцність порід піщано-глинистого складу становила 40-60 МПа у перерахунку на масив. Підбір механічних характеристик еквівалентного матеріалу, які забезпечують подібність механічних характеристик процесів в моделі, здійснюється за формулою:

$$N_M = \frac{1}{L} \cdot \frac{\gamma_M}{\gamma_H} \cdot N_H \quad (1)$$

Згідно з характеристиками механічних властивостей модельованих порід (виражаються у чисельних значеннях N_H) для заданого масштабу моделі ($1/L$) і заданого відношення об'ємних ваг (γ_M/γ_H) підраховуються числові значення відповідних характеристик механічних властивостей матеріалу моделі. Для виготовлення еквівалентного матеріалу моделі застосовувалась суміш піску, слюди, гіпсу й тальку.

Моделювання проводилося шляхом прикладання до границь моделі дотичних напружень. При цьому осі головні нормальні напруження орієнтуються навскіс до напрямку зрушення, а вісь алгебраїчно мінімальних (найбільших стискаючих) нормальних напружень розташована під кутом 45° , що сприяло утворенню скидних типів порушень. Цей підхід надалі підтверджується роботами В.А. Корчевагіна [7] та інших, які також показали, що в тих областях,

де виникала значна різниця між головними і нормальними напруги в площині напластування переважали МАН типу зрушення чи скидання. Це послужило підставою для моделювання граничних умов шляхом прикладення зсувних зусиль на границях фізичної моделі. Для зручності реалізації граничних умов стэнд для фізичної моделі був виконаний у вигляді шарнірного прямокутника.

Масштаб моделі приймався 1:500. Такий масштаб забезпечує достатню точність моделювання при прийнятних розмірах моделі. Процентне співвідношення суміші наступне: Пісок; Гіпс; Крейда; Вода = 92,2; 2,8; 1,4; 3,6. У прийнятому масштабі ця суміш відповідає найбільш типовим породам типу піщаних сланців міцністю 55 МПа при заданому геометричному масштабі. Модель представлена у вигляді шаруватої товщі, яка розділена між собою слюдою.

Обговорення результатів фізичного моделювання.

На рис. 1 подано вид моделі після розвитку МАП. У результаті прикладення дотичних деформацій у моделі виникла система з шести МАП, амплітуда яких коливалась у межах від 0,05 м до 9,84 м. Вказана величина подається тут і далі в розрахунку на натуру. Усі порушення були орієнтовані приблизно під кутом 45° до головних нормальних напружень, що відповідає теорії виникнення розривнихзсувів та скидів [2, 6, 7].

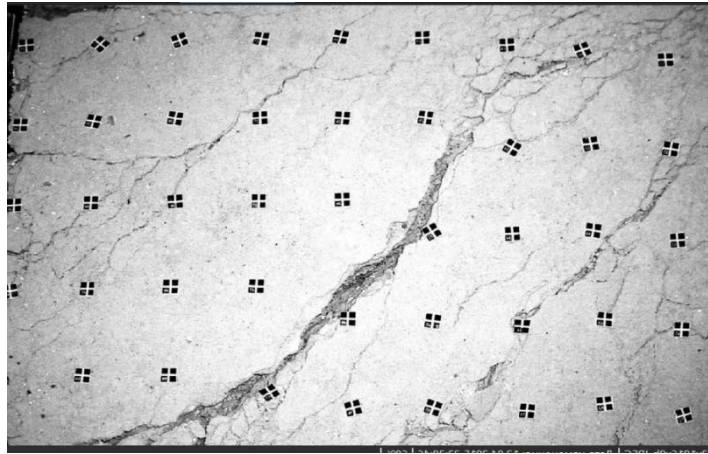


Рис. 1. Зовнішній вид моделі після формування малоамплітудних зсувів.

Площина змішувачів орієнтована по нормалі до нашарування товщі гірських порід. Усі порушення без винятку мають розгалуження, амплітуда зсувів на яких зменшується з загасанням від кореневого МАП у глибину масиву.

Після завершення моделювання тіло моделі було розібране й вивчена морфологія поверхні змішувачів порушень. Поверхня змішувача має шорсткувату текстуру. У порушеннях, амплітуда яких не перевищувала 0,1 м зазор між краями змішувача порушення був вільний, а його товщина не перевищувала 1 см. У порушеннях, амплітуда яких була більша, виявився матеріал заповнювача, який сформувався у результаті тертя однієї стінки порушення з протилежним. Об'єм гірської товщі після сформування порушень збільшився від 2-3% до 10% в залежності від амплітуди порушень.

На рис. 2 наведені розподіли зрушень у площині нашарування після розвитку МАП. Відрізняється область, де градієнт ізоліній розподілу зрушень масиву (виражені сантиметрах) є максимальний. Ця область оточує порушення, амплітуда якого була максимальна. Особливо контрастно градієнт спостерігається у верхньому правому кутку моделі, послаблюючись у напрямі нижнього лівого кутка, що свідчить про затухання МАП внаслідок його обмеженого впливу на масив гірських порід [8].

Фізичне моделювання має переваги наочності результатів й простоту їх інтерпретації. Проте інформація щодо напруженого стану гірського масиву є обмеженою, що не дозволяє встановити важливі особливості динаміки розвитку МАП. Саме тому було застосовано комп'ютерне моделювання процесу зародження й розвитку порушення на основі алгоритму потоку частинок.

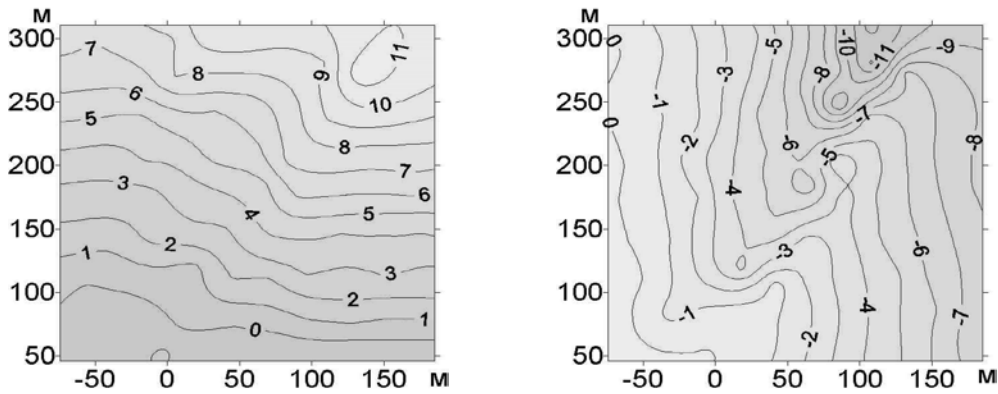


Рис. 2. Розподіл зрушень у площині нашарування.

Результати комп'ютерного моделювання.

Дослідження динаміки й кінематики зародження й розвитку МАП виконувалось за допомогою алгоритму, аналогічного методу дискретних елементів [9] з тою різницею, що дискретні блоки замінялись елементарними частинками. Отже такий підхід був вільний від похибок, які виникають при необхідності задавання форми й розмірів дискретних блоків масиву заздалегідь [10].

Ці блоки й кластери масиву виникали природним шляхом за рахунок взаємодії й кооперації елементарних частинок, що відповідає реальному механізмові необоротних зрушень і деформацій масиву гірських порід. Важливо також, що розвиток порушення можна досліджувати з самого початку його зародження [11], оскільки кінцевий результат залежить від шляху навантаження. Тобто історія процесу розвитку руйнування гірського масиву є вкрай важливою, щоб зрозуміти кінцевий результат.

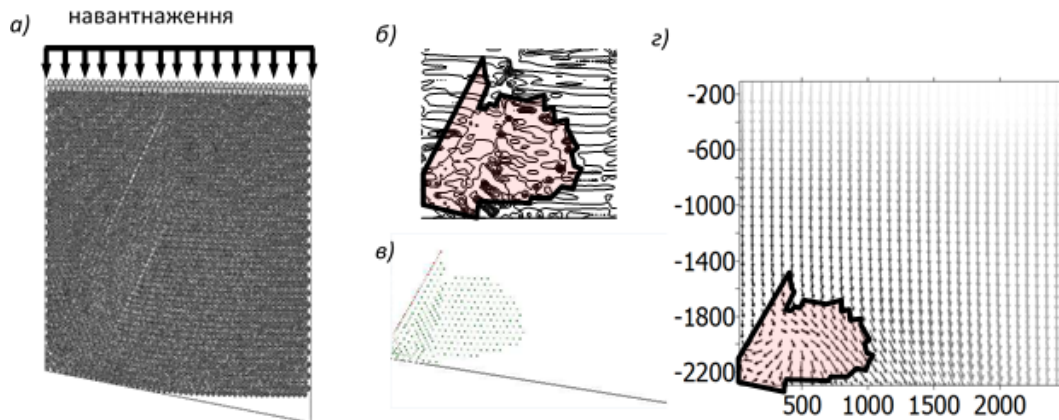


Рис. 3. Результати комп'ютерного моделювання: зовнішній вид моделі після розвитку МАП (а); зона зруйнованих порід (б); поле зміщень у нашаруванні на початковій стадії розвитку порушення (в); суміщена діаграма границь зруйнованої зони й концентрацій дотичних напружень (г).

Розміри масиву, граничні умови й механічні властивості порід приймалися такими ж самими, як й під час фізичного моделювання. На рис. 3 наведено стан моделі після завершення експерименту. Як видно у комп'ютерній моделі також виникла кілька паралельних малоамплітудних порушень і вони орієнтовані так, що витягнуті від лівого нижнього кута моделі до правого верхнього. Це підтверджує якісний збіг результатів фізично й комп'ютерного моделювань.

На початковій стадії процесу руйнування масиву почалось у лівому нижньому кутку моделі, й розповсюджувалось уздовж діагоналі моделі. На середньому фрагменті рис. 3 показано елементарні об'єми гірського масиву, які втратили зв'язок між собою та відірвались від реш-

ти оточуючих порід. На правому фрагменті наведено поле зсувів гірської товщі, на якому видно що вектори зсувів у зоні руйнування масиву дезорієнтовані відносно решти векторів-зміщень масиву. Більш того, у середині зони руйнації масиву, обмеженої жирним контуром й накладеним на поле зміщень з дотриманням масштабу можна виділити кілька породних кластерів. Лівий кластер нагадує вихор, що закручується вниз і за годинниковою стрілкою, середній кластер рухається униз, а правий кластер – вправо і вниз. Отже зародження порушення супроводжувалось складною кінетикою поза межних або незворотних зрушень зруйнованих порід.

Більш того, правий кластер виходить за межі зруйнованої ділянки масиву гірських порід. Це означає, що для надійного визначення положення границь зруйнованої зони необхідно притягати додатково й напружений стан порід. Фрагмент (г) на рис. 3 демонструє, що права границя зони руйнації масиву практично співпадає з ланцюжком елементів масиву, в яких діють високі концентрації дотичних напружень, що згідно теорії Кулона-Мора призводить до переходу порід у поза межний стан.

Таким чином механізм зародження й розвитку малоамплітудного порушення в осадовому масиві гірських порід залучає не тільки перехід порід у поза межний стан, але й інтенсивну взаємодію кластерів раніше зруйнованих порід.

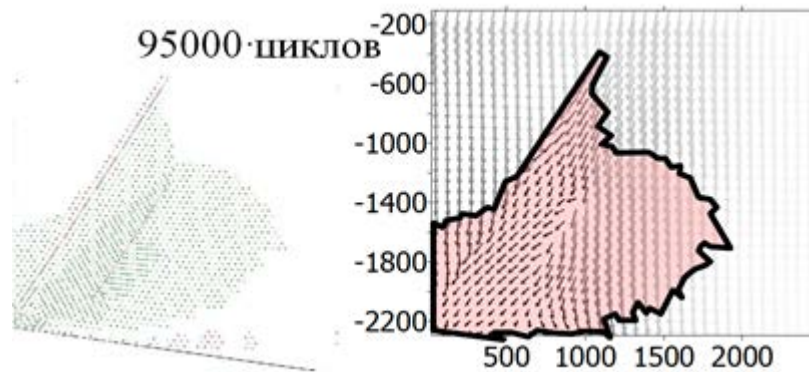


Рис. 4. Завершальна стадія процесу розвитку МАП.

Розподіл поля зрушень підтверджує цей висновок (рис.4). Видно, що уздовж зміщувачів МАП, які показані пунктирними лініями розташовано кілька породних кластерів. Лівий кластер прилягає до лівого МАП і рухається уздовж вертикалі. Середній кластер рухається вниз паралельно зміщувачам сусідніх МАП, правий домен зміщується в основу нову вниз, проте він складається з кількох кластерів, напрямок руху яких відрізняється. Саме такий механізм узгодженого необоротного зрушення масиву у вигляді кластерів зруйнованих порід, сприяє накопиченню порожнин масиву, завдяки чому порушення має можливість розвиватись, а береги зміщувачів розширюватись. Без такого резерву руйнування масиву може виникнути, але розвиток порушення буде стримуватись дефіцитом порожнин, тому що поза межне деформування гірської породи вимагає розуцільнення й розпушення.

Висновки.

Уточнено механізм зародження й розвитку малоамплітудного порушення в осадовому масиві на основі фізичного й математичного моделювання. Доведено, що обов'язковою умовою для розвитку МАП є накопичення порожнин масиву завдяки взаємодії кластерів масиву гірських порід, які узгоджують свій рух й сприяють розпушенню масиву, що руйнується. Виконані дослідження дозволяють уточнити складний механізм незворотних зрушень й деформацій масиву гірських порід під час зародженню й розвитку МАП. Це сприяє вдосконаленню методики прогнозування параметрів МАП, що має практичне значення з точки зору зниження ризиків гірничих робіт.

Библиографический список

1. Jun Cai, Xiuxiang Lü Substratum transverse faults in Kuqa Foreland Basin, northwest China and their significance in petroleum geology. *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 107, 1 August 2015, Pages 72-82.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики, – М.: Недра, 1978.
3. SHI Xiaojuan Operational state monitoring and fuzzy fault diagnostic system of mine drainage. *Mining Science and Technology*, Volume 20, Issue 4, July 2010, Pages 581-584.
4. Глухов А.А., Анциферов А.В. Метод определения типа и параметров малоамплитудной тектонической нарушенности угольного пласта // Проблемы горного давления. – 2001. – №5. – С. 106 – 113.
5. Li T., Mu Z., Liu G., Du J., Lu H. Stress spatial evolution law and rockburst danger induced by coal mining in fault zone. *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 26(3) 2016: Pages 409-415.
6. Грабер Н.С., Григорьев В.Е., Дупак Ю.Н. Разрывные нарушения угольных пластов. – Л.: Недра, 1979, – 190 с.
7. Корчемагин В.А., Емец В.С. К методике выделения и реконструкции наложенных полей напряжений // ДАН СССР. – 1982. – Т. 263. – №1. – С. 163–168.
8. Linlin Wang, Bo Jiang, Jilin Wang, Zhenghui Qu, Pei Li, Jiegang Liu Relationship between joint development in rock and coal seams in the southeastern margin of the Ordos basin Original Research Article *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 24, Issue 2, March 2014, Pages 219-227.
9. M Hazeghian, A Soroush Numerical modeling of dip-slip faulting through granular soils using DEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 97, June 2017, Pages 155-171.
10. Azad Sağlam Selçuk, M. Korhan Erturaç, Sebastian Nomade Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, slip rate and implications on the characteristic slip behavior. *Tectonophysics*, Volume 680, 12 June 2016, Pages 155-173.
11. Stefano Tavani, Amerigo Corradetti, Andrea Billi High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. *Journal of Structural Geology*, Volume 86, May 2016, Pages 200-210.

Надійшла до редакції 11.05.2017

А.В. Мерзликін

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» МОН Украины, г. Покровск

Л.М. Захарова

Государственный научно-исследовательский горнорудный институт, Украина, г. Кривой Рог

КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ І КІНЕМАТИКИ РАЗВИТТЯ МАЛОАМПЛІТУДНОГО НАРУШЕННЯ

Рассмотрен механизм образования и развития малоамплитудных разрывных нарушений в осадочном массиве на основе физического и математического моделирования. Установлено, что благодаря взаимодействию кластеров массива горных пород, которые согласовывают свое движение и способствуют разрыхлению массива, в массиве накапливаются полости являющиеся обязательным условием для развития малоамплитудных нарушений. Полученные результаты позволяют уточнить сложный механизм необратимых сдвигов и деформаций массива горных пород в период зарождения и развития малоамплитудных разрывных нарушений. Это способствует совершенствованию методики прогнозирования параметров разрывных нарушений, имеет практическое значение с точки зрения снижения рисков горных работ.

Ключевые слова: механизм образования, моделирование, нарушения, кластеры

A. Merzlikin

State higher educational establishment “Donetsk national technical university”, Ukraine, Pokrovsk

L. Zakharova

State Research Institute of Mining, Ukraine, Kryvyi Rih

CLUSTER ANALYSIS OF DYNAMICS AND KINEMATICS TO THE DEVELOPMENT OF MICRO FAULTS

The mechanistic approach to the establishment and development of micro fault railings in siege oil on the basis of physical and mathematical modeling. It is proved that a prerequisite for the development of the micro fault is the accumulation of cavities in the array. Through coordinated movement of clusters, the array of rocks loosened and destroyed. The investigation helps to clarify the complex mechanism of irreversible shifts and deformations of the rock mass during initiation and micro fault. This contributes to improving methods of forecasting parameters of the micro fault, which has practical significance in terms of reducing the risks of mining.

Keywords: mechanism of formation, modeling, disorder clusters