DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

УДК 553.291

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ СДВИЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ МАЛОАМПЛИТУДНОГО НАРУШЕНИЯ

А.В.МЕРЗЛИКИН[1], **Л.Н.ЗАХАРОВА**[2]
[1] *Донецкий национальный технический университет, Покровск, Украина*
[2] *Научно-исследовательский горнорудный институт, Кривой Рог, Украина*

Рассмотрен механизм образования и развития малоамплитудных разрывных нарушений в осадочном массиве на основе результатов физического и математического моделирования. Физическое моделирование слоистого массива горных пород осуществлялось с использованием песчано-гипсовой смеси. Результаты физического моделирования позволили наглядно оценить процесс формирования и развития малоамплитудных разрывных нарушений, установить ориентацию и амплитуду моделируемых разрывов. Было установлено, что в разрывных нарушениях с большей амплитудой находился материал наполнителя, который сформировался в результате трения одной стенки нарушения с другой – противоположной. Объем моделируемой толщи после формирования разрывных нарушений в зависимости от амплитуды разрывов увеличился от 2-3 до 10 %. Для получения информации о напряженно-деформированном состоянии горного массива и установления важных особенностей динамики развития разрывных нарушений было применено математическое моделирование на основе алгоритма потока частиц. Результаты математического моделирования позволили установить, что при формировании малоамплитудных нарушений в поле сдвижений зарождаются несколько породных кластеров. Благодаря взаимодействию кластеров массива горных пород, которые согласовывают свое движение и способствуют разрыхлению массива, в массиве накапливаются пустоты, 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

Как цитировать эту статью: Мерзликин А.В. Особенности кинематики сдвижений массива горных пород в процессе развития малоамплитудного нарушения / А.В.Мерзликин, Л.Н.Захарова // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 235-238. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

Введение. Геологические нарушения являются одной из самых больших проблем разработки месторождений полезных ископаемых, поскольку они порождают риски техногенной природы, которые влекут за собой экономические потери и снижение безопасности подземного производства [5].

Особой неопределенностью характеризуются малоамплитудные разрывные нарушения (МАН), трудно определяемые геофизическими методами разведки [1, 11]. Обычно такие нарушения проявляются при ведении горных работ, что обусловливает высокую степень рисков, поскольку на выполнение предупреждающих мер может быть недостаточно времени [2]. Опасность отработки запасов, поврежденных малоамплитудными нарушениями, связана с неопределенностью степени поврежденности рудного тела, а также наличием локализованных зон высоких напряжений [12].

Для изучения механизма зарождения и развития МАН используется ряд методов [3, 9]. Среди них получили популярность методы физического и математического моделирования. В работе описаны результаты исследования кинематики и динамики напряженного состояния массива горных пород при развитии МАП на моделях из эквивалентных материалов и методами компьютерного моделирования.

Характеристика физической модели и методика моделирования малоамплитудного нарушения. В модели слоистого массива горных пород выделялись слои осадочных пород. Мощность породных пластов изменялась от 0,5 до 2,0 м. Прочность пород песчано-глинистого строения составила в пересчете на массив 40-60 МПа. Подбор механических характеристик эквивалентного материала, которые обеспечивают подобие механических характеристик процессов в модели, осуществлялся по формуле

$$N_{\text{м}} = \frac{1}{L}\frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} N_{\text{н}} .$$

В соответствии с характеристиками механических свойств моделируемых пород (численные значения $N_{\text{н}}$) для заданных масштаба модели (l/L) и соотношения объемных масс ($\gamma_{\text{м}}/\gamma_{\text{н}}$) рассчитываются численные значения соответствующих характеристик механических свойств материала модели. Для изготовления эквивалентного материала модели использовалась смесь песка, слюды, гипса и талька.

Моделирование проводилось путем прикладывания к границам модели касательных напряжений. При этом оси главных нормальных напряжений ориентированы диагонально к направлению сдвижения, а ось алгебраически минимальных (наибольших сжимающих) нормальных напря-

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

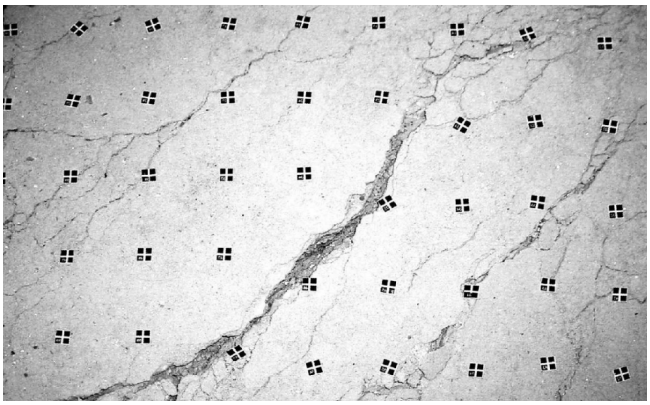


Рис. 1. Внешний вид модели после формирования малоамплитудных нарушений

жений расположена под углом 45°, что способствовало образованию сбросовых типов нарушений. Этот подход в дальнейшем подтверждается работами В.А.Корчемагина [4] и др., которые также показали, что в тех областях, где возникала значительная разница между главными и нормальными напряжениями в плоскости напластования преобладали МАН типа сдвига или сброса. Это послужило основанием для моделирования граничных условий путем приложения сдвигающих усилий на границах физической модели. Для удобства реализации граничных условий стенд для физической модели были выполнен в виде шарнирного прямоугольника.

Масштаб модели принимался 1:500. Такой масштаб обеспечивает достаточную точность моделирования при приемлемых размерах модели. Соотношение смеси следующее, %: песок 92,2; гипс 2,8; мел 1,4; вода 3,6. В принятом масштабе эта смесь соответствует наиболее типичным породам типа песчаных сланцев прочностью 55 МПа при заданном геометрическом масштабе. Модель представлена в виде слоистой толщи, которая разделена между собой слюдой.

Обсуждение результатов физического моделирования. На рис.1 представлен вид модели после развития МАН. В результате действия касательных деформаций в модели возникла система из шести нарушений, амплитуда которых колебалась от 0,05 до 9,84 м. Указанная величина подается здесь и далее в пересчете на натуру. Все нарушения были ориентированы примерно под углом 45° к главным нормальным напряжениям, что соответствует теории возникновения разрывных сдвигов и сбросов [1, 3, 4].

Плоскость сместителя ориентирована по нормали к напластованию толщи горных пород. Все нарушения без исключения имеют разветвленность смещений, которые уменьшаются от коренного МАН в глубину массива.

После окончания моделирования тело модели было разобрано для изучения морфологии поверхности сместителя нарушения. Поверхность сместителя имеет шероховатую текстуру. В нарушениях, амплитуда которых не превышала 0,1 м, зазор между краями сместителя нарушения был свободный, а его толщина не превышала 1 см. В нарушениях, амплитуда которых была больше, находился материал наполнителя, который сформировался в результате трения одной стенки нарушения с другой – противоположной. Объем моделируемой толщи после формирования нарушений в зависимости от амплитуды нарушения увеличился от 2-3 до 10 %.

На рис.2 представлено распределение сдвижений в плоскости напластования после развития МАН. Область, где градиент изолиний распределения сдвижений массива (выраженный в метрах) является максимальным, оконтуривает нарушение, амплитуда которого была максимальной. Особенно контрастно градиент наблюдается в верхнем правом углу модели, ослабевая в направлении нижнего левого угла, что свидетельствует о затухании МАН вследствие его ограниченного влияния на массив горных пород [10].

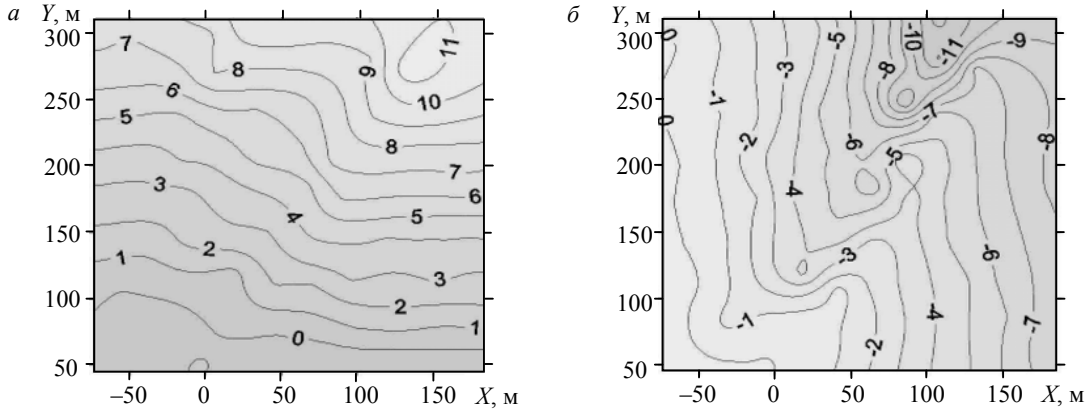


Рис.2. Распределение сдвижений моделируемого массива в плоскости напластования:
а – этап зарождения МАН; *б* – этап развития МАН

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

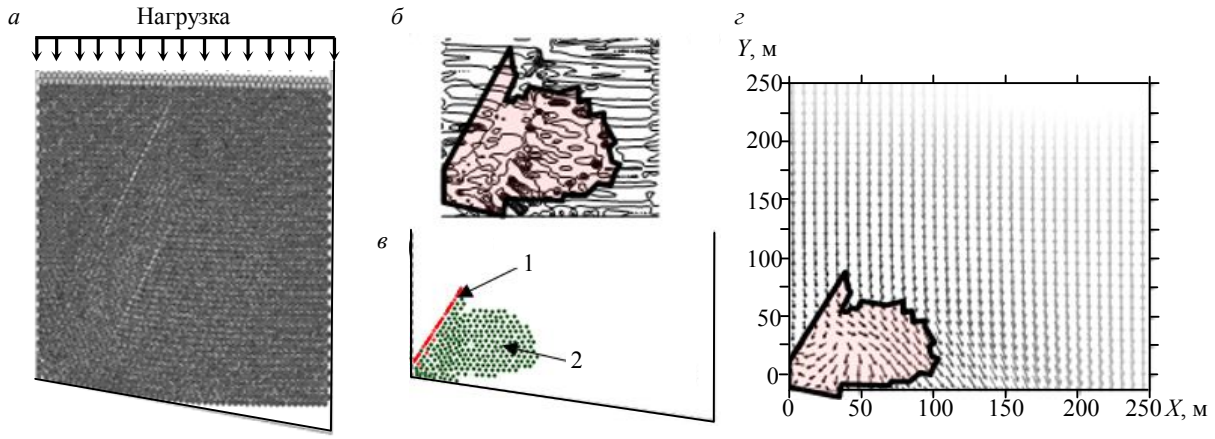


Рис.3. Результаты компьютерного моделирования:

а – внешний вид модели после развития МАН; *б* – зона разрушенных пород; *в* – поле смещений в напластовании на начальной стадии развития нарушения (1 – зона разрывов; 2 – зона деформации); *г* – совмещенная диаграмма границ разрушенной зоны и концентрации касательных напряжений

Преимущество физического моделирования – наглядность результатов и простота их интерпретации. Однако информация о напряженно-деформированном состоянии горного массива является ограниченной, что не позволяет установить важные особенности динамики развития МАН. Именно поэтому было применено компьютерное моделирование процесса зарождения и развития на основе алгоритма потока частиц.

Результаты компьютерного моделирования. Исследование динамики и кинематики зарождения и развития МАН выполнялось с помощью алгоритма, аналогичного методу дискретных элементов [8], только дискретные блоки заменялись элементарными частицами. Таким образом этот подход был лишен погрешностей, которые возникают при задании формы и размеров дискретных блоков массива заранее [7].

Эти блоки и кластеры массива появились естественным путем за счет взаимодействия и кооперации элементарных частиц, что соответствует реальному механизму необратимых разрушений и деформаций массива горных пород. Важно также отметить, что развитие нарушения можно исследовать с самого начала его зарождения [13], поскольку конечный результат зависит от способа приложения нагрузки. История процесса развития разрушения массива горных пород является очень важным для понимания конечного результата.

Размеры массива, граничные условия и механические свойства пород принимались такими же, как и при физическом моделировании. На рис.3 показано состояние модели после завершения эксперимента. Как видно, при компьютерном моделировании возникло несколько параллельных нарушений, и они ориентированы от левого нижнего угла модели к правому верхнему. Это подтверждает качественное совпадение результатов физического и компьютерного моделирования.

Начальный этап процесса разрушения массива наступает в левом нижнем углу модели и распространяется вдоль ее диагонали (рис.3, *а*). Фрагмент рис.3, *в* иллюстрирует элементарные объемы горного массива, которые потеряли связь между собой и оторвались от окружающих горных пород. На рис.3, *б* приведено поле сдвижений горной толщи, на котором видно, что векторы сдвижений в зоне разрушения массива дезориентированы относительно оставшихся векторов-смещений массива. Кроме того, в середине зоны разрушения массива, ограниченной жирным контуром и наложенной на поле сдвижений с соблюдением масштаба, можно выделить несколько породных кластеров. Левый кластер напоминает вихрь, который закручивается вниз по часовой стрелке, средний кластер двигается вниз, а правый кластер – вправо и вниз. Таким образом, зарождение нарушения сопровождается сложной кинетикой запредельных или необратимых сдвижений разрушенных пород.

Правый кластер выходит за границы разрушенного участка горных пород. Это означает, что для надежного определения положения границ разрушенной зоны необходимо учитывать дополнительно и напряженное состояние пород. Фрагмент рис.3, *г* демонстрирует, что правая граница зоны разрушения массива практически совпадает с рядом элементов массива, в которых действуют высокие концентрации касательных напряжений, что соответствует теории Кулона – Мора и приводит к переходу в запредельное состояние.

Таким образом, механизм зарождения и развития малоамплитудного разрывного нарушения в осадочном массиве горных пород основан не только на переходе в запредельное состояние, но и на интенсивном взаимодействии кластеров ранее разрушенных пород.

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.235

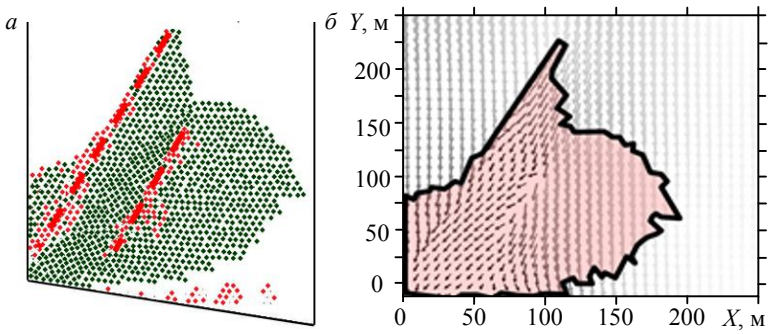


Рис.4. Конечная стадия процесса развития МАН: *а* – отображение связей между элементами компьютерной модели (95000 циклов); *б* – совмещенная карта полей напряжений и векторов перемещений

Распределение поля сдвижений подтверждает этот вывод (рис.4). Видно, что вдоль сместителей МАН, которые показаны пунктирными линиями, находятся несколько породных кластеров. Левый кластер прилегает к левому МАН и движется вдоль вертикали. Средний кластер движется вниз параллельно сместителя соседних МАН, правый домен смещается в основном вниз, однако он состоит из нескольких кластеров, направление движения которых отличается. Именно такой механизм согласованного необратимого сдвижения массива в виде кластеров разрушенных пород способствует накоплению пустот в массиве [6], благодаря чему нарушение может развиваться, а края смесителей расширяться. Без такого резерва может возникнуть разрушение массива, но развитие нарушения будет сдерживаться дефицитом пустот, так как запредельное деформирование горной породы требует разуплотнения и разрыхления.

Выводы

1. На основании физического и математического моделирования уточнен механизм зарождения и развития нарушений в осадочном массиве. 536 с.

2. Обязательным условием для развития МАН является накопление пустот массива благодаря взаимодействию кластеров массива горных пород, которые согласовывают свое движение и способствуют разрыхлению разрушающегося массива.

3. Выполненные исследования позволяют уточнить сложный механизм необратимых сдвижений и деформаций массива горных пород во время зарождения и развития МАН. Это способствует совершенствованию методики прогнозирования параметров МАН, что имеет практическое значение с точки зрения снижения рисков горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Недра, 1978. 536 с.

2. *Глухов А.А.* Метод определения типа и параметров малоамплитудной тектонической нарушенности угольного пласта / А.А.Глухов, А.В.Анциферов // Проблемы горного давления. 2001. № 5. С. 106-113.

3. *Грабер Н.С.* Разрывные нарушения угольных пластов / Н.С.Грабер, В.Е.Григорьев, Ю.Н.Дупак. Л.: Недра, 1979. 190 с.

4. *Корчемагин В.А.* К методике выделения и реконструкции наложенных полей напряжений / В.А.Корчемагин, В.С.Емец // ДАН СССР. 1982. Т. 263. № 1. С. 163-168.

5. *Халимендик Ю.М.* Исследование закономерностей вывалообразований в очистных забоях угольных шахт / Ю.М.Халимендик, А.В.Бруй, М.В.Чемакина // Записки Горного института. 2010. Т.188. С.70-73.

6. *Цирель С.В.* Дилатансия в разрушенных породах // Записки Горного института. 2011. Т.190. С.172-176.

7. *Azad Sağlam Selçuk*. Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, slip rate and implications on the characteristic slip behavior / Azad Sağlam Selçuk, M.Korhan Erturaç, Sebastien Nomade // Tectonophysics. 2016. Vol. 680. P.155-173.

8. *Hazeghian M.* Numerical modeling of dip-slip faulting through granular soils using DEM / M.Hazeghian, A.Soroush // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2017. Vol. 97. P.155-171.

9. *Jun Cai*. Substratum transverse faults in Kuqa Foreland Basin, northwest China and their significance in petroleum geology / Jun Cai, Xiuxiang Lü // Journal of Asian Earth Sciences. 2015.Vol.107. P.72-82.

10. Relationship between joint development in rock and coal seams in the southeastern margin of the Ordos basin Original Research Article/ Linlin Wang, Bo Jiang, Jilin Wang, Zhenghui Qu, Pei Li, Jiegang Liu // International Journal of Mining Science and Technology. 2014. Vol.24. Iss.2. P.219-227.

11. *SHI Xiaojuan*. Operational state monitoring and fuzzy fault diagnostic system of mine drainage // Mining Science and Technology. 2010. Vol.20. Iss.4. P.581-584.

12. Stress spatial evolution law and rockburst danger induced by coal mining in fault zone / Li T., Mu Z., Liu G., Du J., Lu H. // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol.26(3). P.409-415.

13. *Stefano Tavani*. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology/ Stefano Tavani, Amerigo Corradetti, Andrea Billi // Journal of Structural Geology. 2016. Vol.86. P.200-210.

Авторы: **А.В.Мерзликин**, *канд. техн. наук, доцент, artem.merzlikin@donntu.edu.ua* (*Донецкий национальный технический университет, Покровск, Украина*) **Л.Н.Захарова**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, mila2017ma@gmail.com* (*Научно-исследовательский горнорудный институт, Кривой Рог, Украина*).

Статья поступила в редакцию 26.07.2017.
Статья принята к публикации 22.02.2018.