

бот, увеличения результирующих углов откосов и повышения долговременной ус-

тойчивости бортов карьера.

Коротко об авторах

Федянин А.С. – геофизик Центрального рудоуправления НГМК.

© В.А. Асанов, И.Л. Паньков,
И.В. Гурко, 2005

УДК 622.02:531

В.А. Асанов, И.Л. Паньков, И.В. Гурко

ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Семинар № 3

Динамическое разрушение приконтурной части подработанного массива явление достаточно распространенное в горной практике [1, 2]. Реализация такой формы проявления горного давления отмечается на многих угольных и рудных месторождениях мира, разрабатывающих породы, характеризующиеся повышенной хрупкостью. Значительно реже горные удары происходят в квазипластичных горных породах. Здесь следует выделить калийные месторождения Германии, где неоднократно имели место динамические разрушения целиков [3].

В последнее время, в связи с интенсивной отработкой месторождений полезных ископаемых, на рудниках, ведущих горные работы в породах, которые традиционно считались неудароопасными, стали регистрироваться динамические формы проявления горного давления. Наиболее показательное в этом отношении событие произошло в январе 1995 года на участке I-й и II-й северо-восточных панелей Второго

Соликамского калийного рудоуправления (СКРУ-2) ОАО “Сильвинит”, ведущего разработку запасов Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). В результате внезапного массового разрушения целиков произошло обрушение кровли над отрабатываемыми пластами пород объемом более $3 \cdot 10^6$ м³. Площадь разрушения составила 0,3 км². На поверхности мгновенно сформировалась мульда оседания глубиной до 4,5 метров. Сейсмическими станциями данное событие было зарегистрировано как землетрясение с магнитудой М-3,8. В районе аварии вынимались два (частично три) сильвинитовых пласта камерной системой разработки. Ширина камер составляла 14–16 м, при высоте на пласте АБ – 4 м, на КрII – 6 м. Глубина залегания пластов изменялась с запада на восток от 250 до 350 м. Только по счастливому стечению обстоятельств обошлось без человеческих жертв, разрушений объектов в районе городской застройки, а также не был затоплен калий-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-05-96031) и Интеграционного проекта УрО РАН № 05-11-04.

Коэффициенты хрупкости соляных пород

Тип породы, пласт	Коэффициенты хрупкости			
	$K_1 = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_p}$	$K_2 = \frac{M}{E}$	$K_3 = \frac{P_y}{P_y + P_{пл} + P_z}$	$K_4 = \frac{P_y}{P_{пл}}$
Каменная соль	0,26	0,39	0,28	0,24
Сильвинит красный, пл. Кр.П	0,27	0,18	0,15	0,37
Сильвинит полосч., пл. А	0,28	0,14	0,12	0,40
Сильвинит пестрый, пл. Б	0,29	0,20	0,17	0,40
Карналлит, пл. В	0,43	0,54	0,35	0,76
Критические значения	0,7	1,0	0,5	1,0
Удароопасные породы [4]				
Песчаник ВО	0,85	15,3	0,97	-
Гранит	0,82	3,36	0,77	-
Плагиигранит	0,96	13,3	0,93	-
Диабаз	0,84	19,7	0,95	-

где ε_y - упругая деформация на пределе прочности; ε_p - полная деформация, соответствующая пределу прочности; E - модуль упругости, определяемый по разгрузочной ветви на допределном участке диаграммы нагружения; M - модуль спада, определяемый по запределной ветви диаграммы; P_y - величина работы упругой деформации на пределе прочности; P_z - величина работы за пределом прочности; $P_{пл}$ - величина работы неупругих деформаций.

ный рудник, имеющий многомиллиардную стоимость.

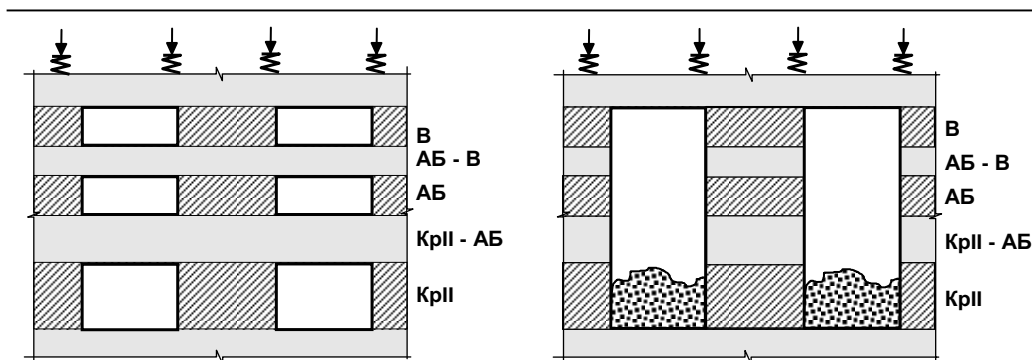
До этого времени вопрос о хрупком разрушении соляных пород для условий ВКМКС фактически не поднимался, что было обусловлено общепринятым мнением об их пластичной природе. Непосредственно после аварии было проведено изучение возможности хрупкого разрушения соляных пород ВКМКС. Для оценки потенциальной удароопасности использовался комплекс деформационных и энергетических критериев, в соответствии с которыми порода считается склонной к динамическому разрушению при превышении расчетных показателей хрупкости над критическими значениями [4, 5].

Для определения удароопасности соляных пород проведены испытания образцов соляных пород на сжатие с построением полной диаграммы деформирования, которые осуществлялись при стандартных условиях нагружения (скорость деформирования – 1,0 мм/мин, отношение высоты

(h) образца к ширине (a) $h/d = 2,0$). Результаты испытаний приведены в табл. Для сопоставления здесь же, приведены коэффициенты хрупкости некоторых удароопасных пород рудных месторождений Урала [5].

Анализ результатов показал, что основные разновидности соляных пород ВКМКС не являются удароопасными. Их показатели хрупкости не достигают критических значений. Сильвинит и каменная соль имеют ярко выраженный пластический характер деформирования. Согласно сравнительной оценке из всех представленных разновидностей соляных пород наиболее склонной к хрупкому разрушению является карналлит.

Анализ экспериментальных данных, не позволил однозначно выявить факторы, определяющие условия реализации хрупкого разрушения квазипластичных соляных пород. Было высказано предположение [6], что динамическое разрушение соляных целиков может быть обусловлено разрушением междупластий, ведущих к формированию высоких междукламерных



целиков (рис. 1), которые имеют пониженную несущую способность и энергоемкость запредельного деформирования. Это определило необходимость изучения совместного деформирования системы целиков при многопластовой отработке и вмещающих пород, обуславливающих мягкий режим нагружения.

Рис. 2. Изменение уровня нагрузки перехода к хрупкому разрушению образцов сильвинита в зависимости от жесткости нагружающего устройства: а) 0,25 ГПа; б) 1,0 ГПа; в) 4,0 ГПа; О – точка хрупкого разрушения

Рис. 1. Схема формирования высоких междупластных целиков, при отработке свиты пластов, вследствие обрушения междупластий АБ-В и КрII-АБ

целиков выполнено на образцах соляных пород с соотношением их размеров, соответствующих горнотехническим условиям в районе аварии. Исследованные образцы (каменная соль, пестрый сильвинит, карналлит) представляли собой прямоугольные призмы с одинаковой площадью основания и различным отношением высоты

к ширине: для сильвинита и каменной соли – 1,1; 1,5; 2,8; для карналлита – 1,1; 1,5. Эксперименты проводились при различной жесткости нагружающего устройства [6], что позволяло варьировать величину упругой энергии, запасенной в нагружающей системе. Регистрация результатов испытаний в координатах “напряжение – деформация” велась в автоматическом режиме на персональный компьютер, что позволяло отслеживать все стадии деформирования образца во времени, в том числе, и стадию динамического разрушения.

Анализ полученных диаграмм показал, что допредельная ветвь кривой деформирования не зависит от жесткости нагружающей системы. На ниспадающей ветви диаграммы деформирования можно выделить два участка: стадию устойчивого запредельного деформирования и стадию хрупкого разрушения [7]. Момент перехода на стадию хрупкого разрушения, фиксировался по резкому возрастанию скорости спада нагрузки. Деформирование приобретало неконтролируемый характер, сопровождалось звуковым эффектом, напоминающим удар и разлетом

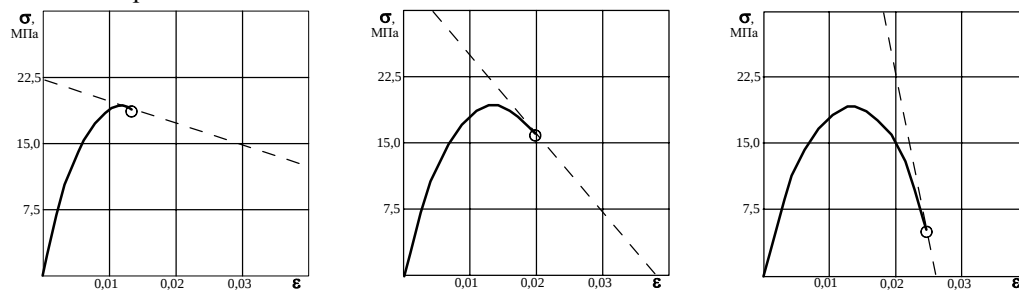


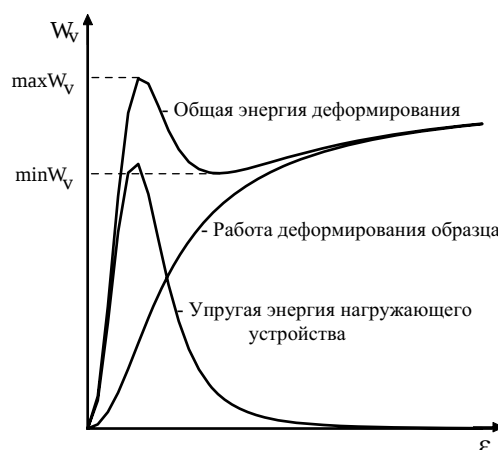
Рис. 3. Изменение общей энергии, при совместном деформировании системы “образец – нагружающее устройство”

частей. Время, за которое происходило хрупкое разрушения образца, составляло несколько десятков миллисекунды. Завершение стадии хрупкого разрушения фиксировалось по уменьшению скорости деформирования. Установлено, что переход на стадию хрупкого разрушения происходит не только на пике прочности, но может иметь место в любой точке запредельной ветви диаграммы деформирования (рис. 2), что определяется балансом энергии системы “образец – нагружающее устройство”.

Эти исследования показали, что хотя в целом соляные породы не относятся к разряду хрупких, сложная подземная конструкция, созданная в результате выемки запасов камерной системой разработки, в ряде случаев может быть удароопасной.

Для изучения условий хрупкого разрушения, наряду с диаграммой деформирования, рассматривались зависимости, отражающие изменение упругой энергии, накапливаемой нагружающим устройством и работы по деформированию образца [7]. Установлено, что условием начала хрупкого разрушения являлся “переход” через локальный максимум общей энергии ($\max W$), затраченной на деформирование образца и нагружающего устройства. В результате реализации избытка упругой энергии, идущей на образование дополнительных поверхностей разрушения и разлет частиц образца, формируется локальный минимум общей энергии ($\min W$), являющийся условием завершения стадии хрупкого разрушения (рис. 3).

После испытания разрушенный материал подвергался гранулометрическому анализу, который проводился ситовым методом (набор стандартных сит с отверстиями: 10; 7; 5; 2; 0,7; 0,3 мм). Оценка степени разрушения образцов производилась путем



подсчета суммарной площади боковых поверхностей образованных частиц. Для ее вычисления принималась гипотеза кубического строения образующихся частиц. В этом случае, суммарная площадь поверхностей, образованных при разрушении образца и отнесенная к его объему (удельная площадь) вычислялась по формуле:

$$S_v \approx \frac{6}{V} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{a_i} \frac{m_i}{\rho} - \left(\frac{m_i}{\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \right],$$

где V – первоначальный объем образца, N – количество фракций, m_i – масса одной фракции, a_i – осредненный размер частицы во фракции, ρ – плотность материала.

На рис. 4 представлены результаты по оценке изменения суммарной удельной площади образующихся поверхностей от величины общей удельной энергии, затраченной на деформирование нагружающего устройства и образцов каменной соли и карналлита различной высоты. Установлено, что для образцов каменной соли (рис. 4, а) и карналлита (рис. 4, б) увеличение общей энергии в 2 раза приводит к росту поверхностей в 2,5 раза, а увеличение энергии в 10 раз приводит к росту поверхностей только в 4,5-6 раз. Таким образом, при высоком уровне энергии (динамическое разрушение) основная ее часть будет расходоваться на увеличение скоро-

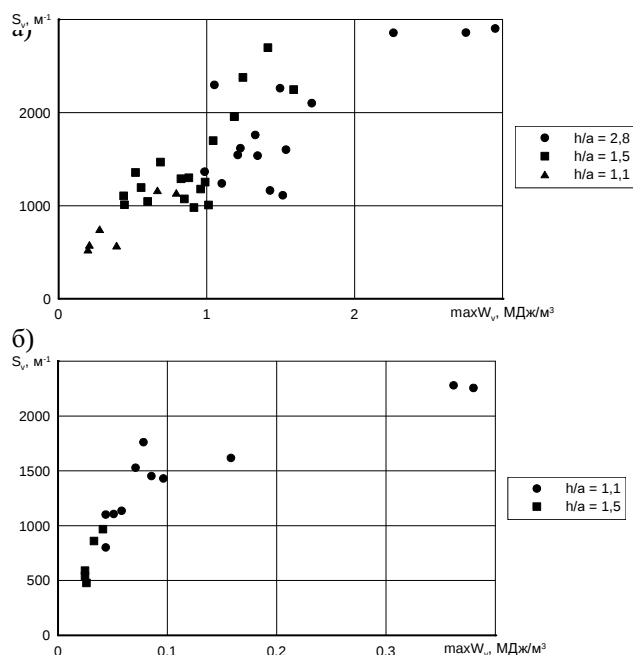


Рис.4 Зависимость изменения удельной площади образующихся частиц от величины общей удельной энергии, затраченной на разрушение образцов: а) каменная соль; б) карналлит

сти разлета частиц. В то же время, при низком уровне энергии основная ее часть будет идти на образование дополнительных свободных поверхностей. Так при обследовании периферийной части зоны массового обрушения пород отмечено разрушение со значительным измельчением вмещающих пород кровли на высоту 10-15 м. Это объясняет, почему при отсутствии специальной аппаратуры (до аварии

на СКРУ-2 в январе 1995 года) в условиях ВКМКС не удавалось фиксировать событий, связанных с хрупким разрушением, имеющим, по всей видимости, низкую интенсивность, когда основная часть упругой энергии вмещающих пород расходовалась на образование новых поверхностей. Возможность реализации низкоинтенсивного характера хрупкого разрушения соляных пород ВКМКС подтверждается тем фактом, что система мониторинга, развернутая на рудниках ОАО “Сильвинит” сразу после аварии на СКРУ-2, позволила зафиксировать с 1995 г. по 2003 г. около 4,7 тысяч микросейсмических процессов, происходящих на подработанных территориях, с энергией от нескольких десятков до 100 кДж [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bieniawski Z.T. Strata control in mineral engineering. Rotterdam, Balkema, 1987.
2. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983.
3. Ahoner L. Seismologische Untersuchung des Gebirgsschlages am 13. März 1989 bei Volkershausen (DDR) im Kalibergbaugebiet an der Werra. Kali und Steinsalz, № 10, 1989.
4. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985, 273 с.
5. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам. – Л.: ВНИМИ, 1980.
6. Baryakh A., Asanov V., Ghagin A., Toksarov V., Pankov I. Dinamic failure of salt interchamber pillars.// 24st Winter School of Rock Mechanics, Wrocław, 2001, 5-13 pp.
7. Паньков И.Л., Аникин В.В. Изучение особенностей запредельного деформирования соляных пород в условиях “псевдожесткого” режима нагружения.// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2003 №9. – С. 56-59.
8. Шулаков Д.Ю. Сравнительный анализ временной динамики микросейсмической активности и деформационных процессов в калийном руднике.// Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов. Мат. науч. Сессии ГИ УрО РАН, Пермь, 2003. – С. 290-292.

УДК 622.83

А.С. Кузьменко

**ВТОРИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ КОНЦЕНТРАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Семинар № 3

Современное представление о природе формирования зон высокой концентрации напряжений при разработке месторождений на больших глубинах исходит из того, что основными факторами нагрузки являются гравитационная и тектоническая составляющие.

Однако, не все явления, сопровождающие процесс разработки недр, находят удовлетворительное объяснение с позиций этих представлений. Так, не вполне объяснимо возникновение в недрах и на поверхности "волн Вебера", возвратно-поступательные перемещения толщи, отмечаемые в примыкающих к зоне подработки покрывающих породах, развязка горных ударов на верхнем горизонте при отсутствии признаков действия высокого горного давления на расположенном ниже, незначительные разрушения выработок в шахтах при катастрофических разрушениях на поверхности при землетрясениях и т.д.

Ранее нами рассмотрены, применительно к условиям ведения горных работ на Кировском и Юкспорском апатитовых рудниках, ситуации развязки горных ударов и описаны механизмы, приведшие к концентрации гравитационной нагрузки на участках развязки горных ударов, а также, доказана непричастность сил тектоники к развязке горных ударов для этих и других случаев [1].

Возникающие в процессе ведения очистных работ, простейшие механизмы, известные из курса физики разного рода рычаги и системы с малой площадью опоры и большим сосредоточенным на этой опоре весом (типа иглы), способны продуцировать на отдельных участках разрабатываемого массива весьма высокие напряжения. Подработка пород покрывающей толщи приводит к образованию консолей и балок, прогибающихся под действием собственного веса в очистное пространство и вызывающих, из-за не утраченной сплошности, поднятие определенной части еще не подработанных участков покрывающей толщи, вовлекая и их вес в нагрузку. Опорой такого рычага является весьма ограниченный по протяженности участок рудного тела, где концентрация напряжений может на порядок превышать гравитационный фон, что приводит к разрушению отдельных элементов в пределах этого участка. Последующее перемещение фронта очистных работ, при условии сохранения сплошности нагружающей конструкции, может привести к развязке горных ударов в соседних секциях, как это имело место в разрезах 13/15 гор. +252 м Кировского рудника (1982 г.), где на одном участке в течение квартала произошло пять горных ударов.

Система с постепенно уменьшающейся площадью опоры из-за стадийной отработки части опоры складывалась на Ки-