

УДК 622.272

**А.Е. Майоров**

**УПРОЧНЕНИЕ И НАПРЯЖЕННОЕ АРМИРОВАНИЕ  
ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД  
ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Семинар № 15

---

**Р**ассмотрены механические процессы, происходящие в приконтурном массиве горных пород. Предложена технология консолидирующей, интегрированной в массив системы крепления на базе цементационного упрочнения трещиноватой приконтурной зоны в сочетании с анкерной крепью.

Основная задача крепления горных выработок – надежность, сохранение стабильной устойчивости контура во времени. Разнообразие и сложность горно-геологических и горно-технических условий, увеличение глубины разработки месторождений требует применения крепей с высокой несущей способностью, при этом решение задачи связано с увеличением их материалоемкости, что всегда являлось и является дорогостоящим. Развитие технологий комбинированного крепления на базе инъекционного упрочнения приконтурного массива горных пород в сочетании с анкерной крепью позволит повысить экономическую эффективность и надежность.

Дальнейшее повествование построено в соответствии с [1, 2, 3], где рассмотрены качественные изменения в пространственном напряженно-деформированном состоянии массива горных пород при проходке горной выработки, развита теория структурно-дилатансионной прочности и сдви-

гового деформирования горных пород, а также [4, 5], где представлена новая методология описания деформируемого твердого тела как многоуровневой самосогласующейся системы, в модели которой учитывается вся иерархия масштабов структурных (мезомасштабных) уровней деформации.

В попытке более полного понимания механических процессов, происходящих при формировании приконтурной зоны проводимой горной выработки, массив горных пород рассматривается как нагружаемая многоуровневая модель деформируемого структурно-неоднородного твердого тела.

Массив горных пород, исходно представляющий собой сложную многовариантную по составу и напряженно-деформированному состоянию структуру, уже в первородном состоянии на макромасштабном уровне содержит блочно-слоевое строение со сформировавшейся естественной трещиноватостью, поверхностями ослаблений и обладающий определенной глобальной устойчивостью. Данной структуре можно условно присвоить 0 макромасштабный уровень деформации.

В процессе сооружения выработки в массиве горных пород происходят два основных процесса: первое - радиальное напряжение обязательно падает по величине, даже если со стороны выработки организован под-

пор, как правило, по величине меньший, чем было исходное напряжение до проходки; второе - происходит развитие касательных напряжений за счет различия в главных напряжениях исходного состояния или возникших при создании выработки. При достижении пика касательных напряжений дальнейшее сопротивление сдвигу с ростом деформаций падает, что обычно и называют разупрочнением горных пород. В результате, изучение напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки можно свести к исследованию сдвиговой прочности горного массива как определенного свойства, принципиально отличающего твердые тела от жидких и газообразных.

В приконтурной зоне горной выработки, где максимальные касательные напряжения по главным площадкам сдвига превышают сдвиговую прочность горных пород, развиваются не только общие деформации, но и деформации сдвига, а значит и дилатансия. Таким образом, первичное нарушение исходной сплошности горных пород происходит при сдвиге в направлении действия максимальных касательных напряжений в основном по поверхностям естественных ослаблений, где сопротивление сдвигу и прочность на разрыв зоны контакта минимальны, что в свою очередь приводит к формированию блочно-слоевой структуры приконтурной зоны горных пород условно I мезомасштабного уровня деформации.

В зависимости от исходной структуры массива и направления воздействия главных и касательных напряжений, достигших пика своего роста, происходит развитие системы трещин, формируется трещиноватая, болочно-структурированная анизотропная приконтурная зона, формируется

зона неупругих деформаций горных пород, контур естественного равновесия массива вокруг горной выработки, что соответствует условно II мезомасштабному уровню деформации. В результате образуется многоуровневая самосогласующаяся система, в которой происходит движение отдельных структурных элементов как целого по схеме «сдвиг + поворот», а на границах их раздела происходит фрагментация материала, которая заканчивается возникновением разрывов среды. Фактически же, в стремлении массива горных пород к восстановлению равновесного состояния в результате действующих различных нагрузок отдельности приконтурного массива смешаются внутрь выработки, а деформация же в целом, в конечном объеме, осуществляется как скольжение блоков друг по другу с вращением этих блоков относительно друг друга так, чтобы составить квазисплошную среду.

Учитывая несравнимо большую энергоемкость нетронутого массива, при высвобождении энергии которого реальные нагрузки вокруг образованной полости могут составить сотни и тысячи тонн на квадратный метр, очевидно, что диссипация основной доли энергии происходит именно в приконтурном массиве горных пород. В попытке сохранения стабильной устойчивости контура горной выработки, системы крепления фактически только сдерживают развитие деформаций II мезомасштабного уровня, предотвращая обрушение пород и последующий переход во второй цикл того же уровня, возникающий при залповом заполнении полости выработочного пространства и последующем радиальном смещении контура естественного равновесия вглубь массива, а волны деформации до новой

компенсационной границы восстановления энергодбаланса системы «массив-крепь». При этом необходимо отметить, что при применении различных технологий крепления и попытке смещения компенсационной границы ближе к области приконтурной зоны для более быстрого восстановления энергодбаланса, реально существующие конструкции крепей участвуют только минимально частично, фактически удерживая главным образом возможный вывал пород, происходящий за счет ползучести или разрушения приконтурной зоны.

Для обоснованности разработки эффективных систем крепления остановимся на более подробном общем рассмотрении процессов II мезомасштабного уровня деформаций приконтурной зоны горной выработки.

Как уже отмечалось, находящиеся в послепиковом состоянии горные породы приконтурной зоны блочно структурированы. Взаимодействующие в системе блоки обычно рассматриваются как практически жесткие и сплошные. Учитывая же реальную сродность деформационных процессов твердых тел от микро- до макромасштабного уровня, указанные блоки необходимо рассматривать как структурные единицы реального массива горных пород в виде мезообъемов соответствующего структурного уровня деформации.

Рассмотрим развитие напряженно-деформированного состояния системы с момента образования одного из структурных блоков.

В месте приложения внешней нагрузки к деформируемому твердому телу возникает базовый концентратор напряжений и генерирует все первичные сдвиги в относительно тонких поверхностных слоях блока, которые характеризуются низкой сдвиговой

устойчивостью, высокой концентрацией микронарушений и обнаженных на поверхности свободных атомарных связей. В направлении воздействия главных напряжений происходит относительный стесненный поворот и сдвиг данного мезообъема как целого, приводящий к общему взаимосогласованному движению блоков в ограниченном объеме пространства. Таким образом, вокруг блока образуется диссипативный слой, а за счет сил трения, сцепления и дилатансии происходит торможение общеплощного сдвижения с образованием локальных механических полей напряжения, суммарно образующих определенную энергоемкость приконтурной зоны.

По аналогии с [4, 5] можно допустить, что при дальнейшем росте внешней нагрузки в мезообъеме гетерогенной среды единичного блока происходит волновое распространение упругих деформаций. При этом в более сложном варианте, при наличии точек генерации волн сжатия и растяжения, происходит их частичное взаимопоглощение при наложении в объеме образца (блока). Несовместность деформаций двух сред на границе их раздела приводит к возникновению на этой границе системы распределенных концентраторов напряжений, которые последовательно достигают критической величины и генерируют в объеме блока деформационные дефекты: дислокации, трещины и т.п. нарушения. Данный процесс развивается как автоволновой на микро- или мезоструктурных уровнях. В дальнейшем, блок теряет свою глобальную устойчивость и при образовании магистральных трещин разрушается, система согласованно переходит на следующий структурный (мезомасштабный) уровень деформации. Развитие деформаций системы возможно вплоть до п-

микромасштабного уровня с локальной неустойчивостью кристаллической решетки отдельных элементов.

Учитывая вышесказанное можно сделать вывод, что для достижения максимальной эффективности крепления с позиции сохранения стабильной устойчивости контура горной выработки важно максимально возможное снижение динамики развития процессов разрушения горных пород на различных мезомасштабных уровнях. При этом системы крепления, в основном, практически работают на II условном уровне, восстанавливая (повышая) исходную сплошность, прочностные характеристики блоков и их поверхностных слоев, в общем повышая сдвиговую прочность и энергоемкость приконтурной зоны.

Подобное комплексное воздействие на структуру и физико-механические характеристики горных пород возможно при применении интегрированных в массив систем комбинированного крепления горных выработок, обладающих эффектом консолидации [лат. *consolidatio*, от *con* (*cum*) - вместе, заодно и *solido* - уплотняю, укрепляю, срашиваю]. При этом наиболее максимальный эффект консолидации приконтурного массива горных пород с технической точки зрения может быть достигнут при применении, например, инъекционного упрочнения в сочетании с анкерной крепью. Создание в дезинтегрированной приконтурной зоне новых структурных связей с одновременным напряженным армированием позволяет рассматривать данную область горных пород как несущую напряженную конструкцию, работающую в непосредственном взаимодействии (взаимовлиянии) с приконтурным массивом, максимально используя его несущую способность, стабилизируя

взаимные смещения и вращение отдельных и блоков. При этом применение анкеров с активным радиальным распором на стенки скважин более активизирует описанные процессы. Перспективность подобных консолидирующих массив систем крепления очевидна вследствие их высокой надежности и низкой материалоемкости, что особенно важно при проведении капитальных выработок и выработок с длительным сроком службы в сложных условиях.

Не смотря на активно применяемые в горной промышленности составы для химического упрочнения горных пород и закрепления анкеров, вопросы экологии, низкая термостойкость и цена ограничивают объемы их применения. В настоящее время не потеряло актуальность использование цементационных составов и составов на основе минеральных наполнителей, обладающих химической инертностью, стабильность свойств во времени, сродностью структур и свойств с закрепляемыми и упрочняемыми горными породами. Также, из существующих видов анкерных крепей в данном контексте интересны беззамковые конструкции с активным радиальным распором закрепляемой части. Например, запрессовываемые в скважину фрикционные трубчатые анкера типа Split Set и Swellex, анкера, закрепляемые расширяющимися составами, закрепляемые сыпучим минеральным заполнителем (разработка ИУУ СО РАН) [6, 7, 8]. Преимуществом последних является одна из самых низких стоимость, высокая скорость установки, надежность крепления и универсальность для ряда условий, нагружение анкера до рабочей нагрузки возможно сразу после его установки и равнопрочно с грузонесущим стержнем.

Таким образом, практическая реализация идеи консолидирующей, интегрированной в массив горных пород системы крепления, возможна, например, при внедрении технологий на базе цементационного упрочнения трещиноватой приконтурной зоны в сочетании с анкерной крепью, закрепляемой сыпучим минеральным заполнителем. Предлагается два варианта способов крепления горных выработок [см. 9, 10], суть которых сводится к инъецированию в трещиноватую приконтурную зону цементного раствора через серию нагнетательно-дренажных скважин с последующим нагружением предварительно установленных анкеров, закрепляемых в скважинах сыпучим минеральным заполнителем. При этом через сыпучий минеральный заполнитель происходит отфильтровывание «излишней» жидкой фазы цементного раствора.

В соответствии с [11] при нагнетании вяжущего раствора в нагнетательные скважины в какой-то момент времени наступает прекращение их растворопоглощения. Последующая выдержка нагнетательных скважин под максимальным давлением нагнетания вяжущего раствора позволяет произвести более плотную упаковку частиц, отжать часть жидкой фазы вяжущего раствора, которая при преодолении гидравлического сопротивления дренажных скважин дренирует в выработку. Но, данный процесс происходит только лишь под действием давления нагнетания, при котором рост плотности частиц вяжущего раствора имеет предел и далее не зависит от роста давления нагнетания. Также происходит неравномерное распределение частиц цемента по длине трещин за счет седиментации и отфильтровывания жидкой фазы по длине потока.

Нагружение анкера приводит к его закреплению в скважине за счет сил

трения, сцепления и дилатансии в сыпучем минеральном заполнителе, реализующих активную во времени радиальную составляющую, что способствует объемному сжатию отдельностей и блоков горных пород, составляющих непосредственно контур выработки. Дальнейшее порядное нагружение анкеров, расположенных в нагнетательных и дренажных скважинах, в направлении от забоя выработки (в сторону ранее упрочненных горных пород) создает эффект волнового распространения вяжущего раствора по трещинам и расслоениям, повышая эффект отжатия жидкой фазы, равномерность и плотность упаковки частиц вяжущего раствора, его прочностные и адгезионные характеристики. При этом происходит более эффективная сшивка и объемное сжатие упрочняемых пород приконтурной зоны закрепляемой горной выработки с одновременным их поджатием к устойчивой части массива. Бо́льшая величина нагружения анкерной крепи позволяет реализовать более активное принудительное разнонаправленное сближение плоскостей трещин и расслоений. Вяжущий раствор, не имея другого выхода, дополнительно проникает в незаполненные трещины и поры, а избыточная отжимаемая жидкая фаза (фильтрат) вяжущего раствора начинает истекать в выработку. При этом важно, что при инъекционном упрочнении горных пород происходит не только восстановление макро сплошности за счет заполнения магистральных трещин цементационными растворами, но также и упрочнение наружной поверхности блоков, состояние которой играет определяющую роль в развитии общей деформации контура выработки.

Максимальный отжим жидкой фазы важен также вследствие потери со временем прочности горных пород на-

ходящихся в напряженно-деформированном состоянии, а соответственно и последующего уменьшения их несущей способности. Это происходит не только за счет «усталости» или временного охрупчивания с образованием новых микротрещин, но и за счет снижения поверхностной энергии при более или менее полной компенсации обнаженных на поверхности отдельных связей адсорбирующимися из раствора инородными атомами или молекулами [12].

С позиции строительства в вышеуказанных технологиях основной объем

необходимых материалов при сооружении крепи составляют непосредственно горные породы приконтурной зоны, при этом объем инъекционного состава не превышает объема трещин и пустот (конечно с технологическим допуском), плюс анкерная крепь в комплекте. Относительно низкая стоимость, материалоемкость и надежность данного вида крепления, возможность полной механизации технологических процессов представляют привлекательность для дальнейших научных исследований и более широкого практического внедрения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шемякин Е.И.* О прочности горного массива. // Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. Выпуск 328/2004. - С.8-18.
2. *Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.* О структурно-дилатансионной прочности горных пород. ДАН СССР. – 1989. – Т.305. - №35. – С.1077-1080;
3. *Шемякин Е.И.* Синтетическая теория прочности. // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т.2. - №6.
4. *Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В.* Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
5. *Панин В.Е.* Физическая мезомеханика материалов – новое направление на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // Современные проблемы науки: Материалы научной сессии. Новосибирск, 25-26 ноября 2003 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 228 с.
6. *Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие: учебное пособие/ А.В. Ремезов, В.Г. Харитонов, В.П. Мазикин и др.* – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2005. – 471 с.
7. *Патент РФ № 2166635.* Анкер с минеральным наполнителем В.Е.Ануфриев, З.М. Гараев, А.Е. Майоров. МПК E21D 21/00, опубл. 2001.05.10
8. *Патент РФ № 2166634.* Установка закрепления анкера сыпучими материалами /В.Е. Ануфриев, В.В. Барковский, А.Е. Майоров, А.А. Родичкин. МПК E21D 20/00, опубл. 2001.05.10
9. *Патент РФ № 2283959.* Способ крепления горных выработок. Хямяляйнен В.А., Майоров А.Е., МПК E21D 20/00, E21D 11/00, опубл. 2006.09.20, Бюл. № 26.
10. *Заявка на изобретение №2 006 132158/03(034961).* Способ крепления горных выработок и устройство для его осуществления/В.А. Хямяляйнен, А.Е. Майоров.
11. *Хямяляйнен В.А., Бурков Ю.В., Сыркин П.С.* Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок. – М.: Недра, 1994. -400 с: ил.
12. *Воронков Г.Я.* Влияние среды на процессы деформирования и разрушения горных пород в условиях напряженного состояния. // Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского. Выпуск 328/2004. - С.19-25. **ГИАБ**

#### Коротко об авторе

*Майоров А.Е.* – ГУ КузГТУ, КемНЦ СО РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 15 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.В. Мельник*.