

УДК 622.281.74

О перспективах применения анкерной крепи на угольных шахтах Донбасса

Касьян Н. Н., Петренко Ю. А., Новиков А. О.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Аннотация

В статье приведен анализ состояния горных выработок на угольных шахтах Донбасса. На основании результатов лабораторных и шахтных исследований, выполненных в ДонНТУ, изложены новая концепция взаимодействия анкерной крепи и вмещающего массива и установленный механизм деформирования армо-породной конструкции, возводимой в подготовительной выработке.

Постановка проблемы

Угольная промышленность – одна из ведущих отраслей народного хозяйства, важнейшая задача, которой в условиях рыночной экономики состоит в повышении эффективности производства и снижении себестоимости продукции. К 2010 году намечено увеличить добычу угля до 100 млн.т. За последние годы правительством Украины разработаны и утверждены две программы, цель которых – повысить эффективность работы угольной промышленности. Это «Програма реформування і фінансового оздоровлення підприємств вугільної промисловості на 2000-й рік» и «Українське вугілля». Выполнение этих программ, направленных на внедрение в угольной промышленности передовых технологий обеспечило бы поступательное развитие экономики всей страны. В настоящее время техническое состояние шахтного фонда угольной промышленности Украины продолжает ухудшаться. Так, около 80 % угольных шахт работают без реконструкции более 20 лет, причем третья часть из них введена в эксплуатацию в довоенный период. Учитывая то обстоятельство, что последние 14 лет ежегодно терялось 7,6 млн. тонн производственных мощностей, для выполнения поставленных перед отраслью задач необходимо резко увеличить объемы проведения горных выработок, среди которых 70–80 % занимают вскрывающие и подготовительные. Только за последние 20 лет количество шахт, ведущих разработку угля на глубине более 700 м, выросло в 2 раза.

Увеличение глубины разработки угольных пластов, развитие на них очистных работ приводит к интенсивному воздействию горного давления на устойчивость подземных выработок через различные формы его проявления, которые зависят от совокупности влияния целого ряда горно-геологических и горнотехнических факторов, присущих условиям каждой шахты. Несмотря на снижение протяженности горных выработок угольных шахт Украинского Донбасса в связи с интенсивным их закрытием за последние годы и увеличением затрат на ремонт этих выработок, состояние последних не улучшается. В среднем, 15 % из них по протяженности на конец каждого года не удовлетворяет эксплуатационным требованиям. Одной из основных причин такого положения является высокая трудоемкость работ по содержанию выработок при весьма низком (1,5–2 %) уровне их механизации.

На сегодняшний день около 90 % поддерживаемых на шахтах выработок закреплены металлической арочной податливой крепью. Более половины от протяженности этих выработок деформирована.

Как система крепления арочная крепь имеет ряд недостатков. Фактически она не поддерживает выработку до тех пор, пока вмещающие породы не разрушатся и не начнут смещаться в выработку, нагружая рамы крепи. То есть, крепь работает в пассивном режиме и не препятствует разрушению вмещающего массива. Кроме этого основными недостатками применения арочной крепи являются:

1. Большая металлоемкость.
2. Крепь не включается в работу сразу после обнажения породного контура выработки.
3. Невозможность полной механизации процесса крепления (затяжка рам и забутовка закрепного пространства производится вручную). Трудоемкость процесса крепления выработки арочной крепью достигает 80 % от общей трудоемкости проведения выработки).
4. Традиционная конструкция арочной крепи не соответствует условиям ее нагружения (нет соосности между направлением податливости крепи и направлением наибольших смещений контура выработки).

Кардинально улучшить технические и экономические показатели работы шахт, а также состояние горных выработок можно путем применения анкерной крепи. На угольных шахтах за рубежом происходит неуклонное увеличение объемов применения анкерного крепления, доля которого уже сегодня составляет: Австралия – 87 %, КНР – 83 %, США – 52 %. Это позволяет в 5–10 раз уменьшить расход металлопроката, бетона, леса; в 3–5 раз повысить производительность работ при креплении выработок; в 2–3 раза повысить темпы проходки; вдвое сократить затраты на крепление и поддержание крепи в рабочем состоянии в период эксплуатации.

Так, например, применение анкерного крепления на шахтах Великобритании позволило снизить долю затрат на проведение выработок в себестоимости 1 т угля с 42 % при металлоарочном креплении до 15 % при анкерном креплении. При этом темпы проведения выработок составили 650–680 м/месяц.

Обзор последних исследований и публикаций по данной проблеме

Для широкого внедрения мирового опыта на шахтах Украины по приказу министра угольной промышленности в 1997 году была создана программа «Анкер», в которой одним из приоритетных направлений снижения затрат на добычу угля есть разработка, изготовление и внедрение новых технологий использования анкерной крепи. Головной организацией по реализации этой программы назначен ИГТМ НАН Украины, на базе которого создан «Центр анкерного крепления».

Несмотря на определенные успехи в деятельности «Центра» (популяризация анкерного крепления, издание учебно-методической литературы и т. п.), объем крепления выработок анкерной крепью в настоящее время составляют не более 70 км.

На наш взгляд, основной причиной, препятствующей широкому внедрению анкерной крепи на шахтах Украины является недостаточное понимание ее роли в процессе поддержания выработки и как следствие, отсутствие нормативной базы по обоснованию параметров анкерной крепи.

В настоящее время расчет параметров анкерной крепи производится в соответствии с требованиями нормативных документов [1–4], в основу которых положены представления об анкерной крепи как о несущей конструкции, работающей по схемам «Подшивка» и «Сшивка».

Исходя из такого понимания механизма работы анкерной крепи, расчет ее параметров производится по методике, предполагающей, что нагрузка на крепь формируется за счет разрушения вмещающего выработку массива и смещений пород в полость выработки. Это приводит к ограничению области применения анкерной крепи второй категорией устойчивости выработок (смещения контура не превышают 200 мм) и завышению значений плотности установки анкеров, что делает применение анкерной крепи экономически не целесообразным.

В научно-технической литературе представлено большое количество результатов исследований характера взаимодействия различных конструкций крепи (в том числе и анкерной) с массивом. Это работы А. П. Широкова, В. Т. Глушко, А. А. Борисова, Н. И. Мельникова, Л. М. Ерофеева, А. Н. Зорина, Б. К. Чукуна, А. В. Ремезова, И. А. Юрченко, А. Н. Шашенко, В. В. Виноградова, А. Югона, А. Коста и др. В них достаточно глубоко исследованы механизм формирования нагрузки на рамные крепи, особенности и закономерности деформирования вмещающего выработки массива. Однако, в работах, посвященных анкерному креплению, в

основном рассмотрены вопросы конструкции анкеров, технологии их возведения и расчета параметров. При этом анкера рассматриваются как несущие конструкции, без учета особенностей их взаимодействия с вмещающим массивом.

На наш взгляд, механизм работы анкерной крепи заключается не в представлении об анкерах, как о несущей конструкции типа рамы, а как об элементах, изменяющих структуру массива, и препятствующих его разрушению, т. е. формированию вокруг выработки зоны разрушенных пород. Применяемое в настоящее время радиальное расположение анкеров является самым не рациональным, т. к. область влияния анкеров на массив в этом случае минимальная. В этой связи, разработанные и испытанные в ДонНТУ пространственные схемы анкерования массива, позволяют при минимальном количестве анкеров максимально использовать несущую способность породного массива.

С целью установления механизма деформирования породного массива, армированного анкерами, в максимально приближенных к реальным условиям работы крепи, при различных схемах пространственного анкерования, были проведены лабораторные исследования.

Они проводились на образцах из цементно-песчаных растворов [5]. Изготавливались кубические образцы $55 \times 55 \times 55$ мм, которые моделировали участок породного массива объемом 1 м^3 . Моделировались горные породы прочностью 30, 40 и 50 МПа, залегающие на глубинах 800, 1200 и 1600 м. В моделируемом участке породного массива располагались 4 анкера из стальной проволоки диаметром 1 мм.

Схемы пространственного размещения анкеров в моделях представлены на рис. 1.

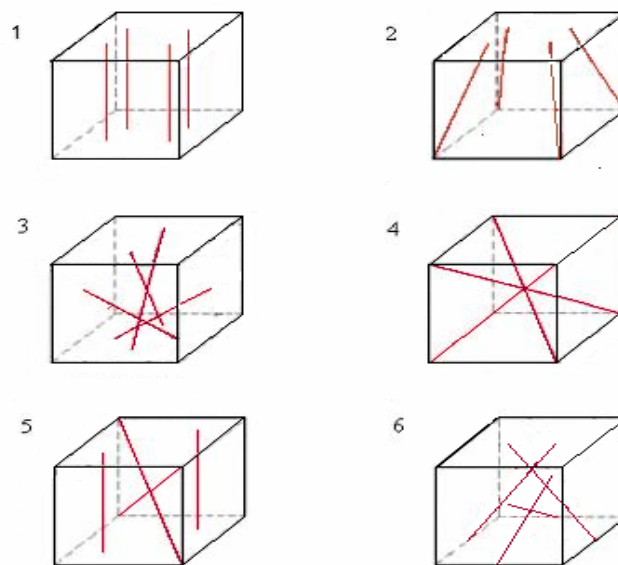


Рис.1. Общий вид схем армирования образцов .

Для каждой из 6 схем пространственного армирования массива, различной прочности вмещающих пород и глубины заложения, испытывалось по 3 образца с последующим усреднением полученных результатов (всего 189 образцов).

При испытаниях использовалась схема Беккера. Первоначально в образцах прочностью 30, 40 и 50 МПа в массиве создавалось гидростатическое поле напряжений, имитирующее глубину заложения 800, 1200 и 1600 м. Затем, в направлении действия напряжений σ_1 производилась полная разгрузка с поддержанием величин напряжений σ_2 , σ_3 на первоначальном уровне. В дальнейшем, по специально разработанной программе рассчитывались средняя величина действующих напряжений, средние относительные деформации, величина остаточной

прочности образца ($\sigma_{cp}^{ост}$), предельные относительные деформации в направлении действия σ_1 при разгрузке (ε_1^p), предельные относительные объемные деформации $(\Delta V/V)_p$, модули упругости (E) и спада (M).

Для оценки характера разрушения массива горных пород, армированного различными пространственными схемами анкерования, использовался критерий Нодаи-Лоде [6]. Он позволил оценить по величинам μ_σ и μ_ε конечный вид напряженного и деформированного состояния в армированном массиве при обобщенном растяжении.

Значения параметров μ_σ , μ_ε рассчитывались по формулам:

$$\mu_\sigma = 2[(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)] - 1; \quad (1)$$

$$\mu_\varepsilon = 2[(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)/(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)] - 1; \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – значение главных нормальных напряжений, действующих в модели; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – относительные продольные деформации, действующие в направлениях приложения соответствующих главных напряжений.

Поскольку все образцы при испытаниях по критериям Нодаи-Лоде переходили от обобщенного сжатия к обобщенному растяжению, то для оценки деформационного и напряженного состояния образцов с различными схемами армирования строились графики зависимости $\mu_\varepsilon = f(\varepsilon_1)$ и $\mu_\sigma = f(\sigma_1)$. По результатам испытаний строились также графики зависимостей $\sigma_{cp} = f(\varepsilon_{cp})$, $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$, $\sigma_1 - \sigma_{cp} = f(\varepsilon_1 - \varepsilon_{cp})$. Для анализа полученных результатов представим их в более удобной табличной форме (таблицы 1–3).

Табл. 1. Сравнительные деформационные характеристики моделей заанкерowanego массива горных пород при испытаниях на обобщенное растяжение (прочность 30 МПа, глубина 800 м).

№ схемы	E, МПа	ε_1^p , ед.	$\sigma_{cp}^{ост}$, МПа	M, МПа	$(\Delta V/V)_p$, ед.	μ_σ	μ_ε
1	351,7	0,032	19,9	2775,6	0,318	-1,0	-1,0
2	278,2	0,027	20,8	1026,2	0,316	-0,92	-1,0
3	275,1	0,038	21,9	713,8	0,246	-0,99	-1,0
4	204,3	0,021	20,7	664,6	0,330	-0,97	-1,0
5	266,8	0,037	20,5	468,0	0,327	-0,89	-1,0
6	214,5	0,030	20,1	396,7	0,335	-0,99	-1,0

Табл. 2. Сравнительные деформационные характеристики моделей заанкерowanego массива горных пород при испытаниях на обобщенное растяжение (прочность 30 МПа, глубина 1200 м).

№ схемы	E, МПа	ε_1^p , ед.	$\sigma_{cp}^{ост}$, МПа	M, МПа	$(\Delta V/V)_p$, ед.	μ_σ	μ_ε
1	267,4	0,022	27,0	563,7	0,156	-0,83	-1,0
2	263,5	0,020	26,4	556,9	0,176	-0,96	-1,0
3	279,0	0,015	28,1	488,1	0,126	-1,0	-1,0
4	288,3	0,017	27,1	476,5	0,121	-0,81	-1,0
5	322,7	0,015	27,1	468,4	0,229	-0,84	-1,0
6	330,7	0,024	27,4	354,3	0,172	-0,84	-1,0

Табл. 3. Сравнительные деформационные характеристики моделей заанкерowanego массива горных пород при испытаниях на обобщенное растяжение (прочность 30 МПа, глубина 1600 м).

№ схемы	E, МПа	ε_1^p , ед.	$\sigma_{cp}^{ост}$, МПа	M, МПа	$(\Delta V/V)_p$, ед.	μ_σ	μ_ε
1	252,1	0,022	7,16	1496,3	0,156	-1,0	-1,0
2	274,4	0,020	10,36	1016,6	0,176	-0,96	-1,0
3	298,1	0,015	11,47	912,2	0,126	-1,0	-1,0
4	252,2	0,017	8,98	809,0	0,121	-1,0	-1,0
5	274,2	0,015	8,80	607,1	0,229	-1,0	-0,98
6	331,1	0,024	14,7	328,7	0,172	-0,84	-1,0

Как видно из данных, представленных в таблицах 1–3, использование в массиве пространственных анкерных породо-армирующих систем (АПАС), приводит к увеличению остаточной прочности в 1,60 раза, позволяет увеличить модуль упругости в 1,3 раза, уменьшить модуль спада на 86 %, увеличить на 47 % относительные объемные деформации при разрушении по сравнению с массивом, армированным радиально расположенными анкерами. Установлено также, что армирование пород позволяет увеличить предельные относительные деформации пород при разгрузке в 2,6 раза, а величину остаточной прочности в 2,4 раза по сравнению с не армированными породами. По совокупности вышеназванных показателей худшей является радиальная схема армирования (схема 1), а лучшими – схемы № 6, 5 и 4, которые на более поздней стадии разгрузки образца при испытаниях меняют характер деформационного состояния с обобщенного сжатия на обобщенный сдвиг.

Уменьшение значений модуля спада и увеличение предельных относительных объемных деформаций в образцах армированных с использованием пространственных схем позволяет говорить о возможности существенно влиять на величину пластической составляющей деформаций пород с АПАС на стадии запредельного деформирования.

Полученные выводы хорошо согласуются с результатами выполненных ранее работ В. Т. Глушко [7], в которых установлены факты повышения остаточной прочности пород при их анкерования до 2,5 раз (в зависимости от плотности анкерования) и перехода заанкерованных пород после разрушения к пластическому деформированию.

Анализируя полученные зависимости $\mu_\sigma = f(\sigma_1)$ для моделируемых прочностей пород 30, 40 и 50 МПа и глубин заложения 800, 1200 и 1600 м установлено, что в зависимости от схемы армирования, при разгрузке на 49–56 % от величины первоначально действующих напряжений, происходит изменение вида напряженного состояния пород из обобщенного сжатия ($\mu_\sigma = +1$) в обобщенный сдвиг ($\mu_\sigma = 0$). При дальнейшей разгрузке образцов вид напряженного состояния быстро приближается к обобщенному растяжению ($\mu_\sigma = -1$).

Можно также отметить, что с увеличением уровня гидростатического давления в образцах до начала их разгрузки, резко падает влияние схем анкерования на величину остаточной прочности пород, в то время как влияние того же показателя на снижение модуля спада остается наиболее существенным.

Анализ напряженного и деформационного состояния образцов при моделировании их разгрузки (удаление забоя от места установки анкеров) показал, что деформационное состояние достаточно точно соответствует напряженному состоянию $\mu_\sigma = \mu_\epsilon$ [8]. Визуальный анализ состояния образцов после испытаний показал, что под некоторым углом к плоскости разгрузки (до 30 град.) образуются трещины сложного сдвига. Плоскости разрушения направлены под углом к максимальному сжимающему напряжению ($\sigma_2 = \sigma_3$), а в некоторых случаях почти параллельны плоскости разгрузки (кровле выработки). Разрушение образцов происходит как правило в виде отрыва или в комбинации отрыва со сдвигом.

Следует также отметить, что с ростом уровня гидростатического давления в армированных образцах, меняется и механизм их разрушения, проявляющийся в увеличении степени влияния сдвигающих деформаций при снижении влияния деформаций отрыва, что хорошо согласуется с результатами исследований [9]. Применение АПАС позволяет улучшить и другие механические характеристики пространственно армированных пород по сравнению с наиболее распространенной радиальной схемой расположения анкеров. Так, прочность на одноосное сжатие и растяжение увеличиваются до 1,3 раза; коэффициент сцепления – в 1,2 раза; угол внутреннего трения – на 2–4 град., остаточную прочность – в 1,4–1,7 раза. Это позволяет сделать вывод о том, что размещение в массиве пространственной совокупности армирующих элементов изменяет ряд параметров, характеризующих его структурно-механические характеристики, создает препятствия разрушению и дает возможность управлять формированием вокруг выработки зоны разрушенных пород.

Получены предварительные данные (на основании аналитических расчетов и экспериментальных исследований), которые позволяют прогнозировать уменьшение на 20–40 % размеров зоны разрушения вокруг подготовительных выработок и величин ожидаемых смещений пород в 2–4 раза .

С целью проверки результатов лабораторных исследований и уточнения механизма деформирования породного массива, армированного пространственными анкерными системами, в рамках тематического плана научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины по госбюджетной теме Д8-08 «Разработка проекта нормативного документа по использованию анкерного крепления для обеспечения устойчивости горных выработок глубоких шахт» (№ госрегистрации №0107U012803), проводились шахтные инструментальные наблюдения в подготовительных выработках по пластам k_8^H , m_5^{1B} и m_4^0 шахты «Добропольская» [10–12]. Наблюдения за состоянием выработок и вмещающих пород проводились с момента их проведения. Состояние выработок оценивалось визуально, а характер деформирования вмещающих пород – путем наблюдения за смещениями глубинных реперов. Всего в выработках было оборудовано 23 замерных станции, наблюдения на которых осуществлялись в течение трех лет и в настоящее время продолжаются. В результате был установлен следующий механизм деформирования породного массива, армированного анкерами. До момента начала ведения очистных работ, деформации контура выработки не значительные. Максимальные смещения кровли составляют до 180 мм, а боков – до 350 мм.

Очевидно, это связано с наличием в боках выработки слабых вмещающих пород. В целом, состояние выработки хорошее. Деформирование пород в глубине массива носит следующий характер. До момента включения анкеров в работу (2–8 суток) разрушения в кровле происходят от контура выработки на глубину до 0,5 м. Затем, разрушаются породы в глубине массива, за пределами заанкерванной области. Заанкерванная область пород практически не разрушается, а смещается единым блоком в сторону выработки. В боках выработки разрушения пласта и пород происходят на глубину до 2,5 м и проявляются в виде выдавливания верхней пачки угля и пород непосредственной почвы пласта. При этом деформирование носит пластический характер.

На расстоянии 70–80 м впереди лавы происходит активизация смещений как в кровле, так и в боках выработки. Причем на расстоянии 30–40 м впереди очистного забоя, начинается разрушение пород в пределах заанкерванной области в направлении от внешней ее границы в сторону контура. Этот процесс развивается по мере приближения лавы к замерной станции и завершается после прохода лавы. Разрушение заанкерванной области проявляется в виде расслоений, заколов на контуре выработки. Однако эта область не теряет своей несущей способности и продолжает смещаться в полость выработки единым блоком. Смещения контура кровли, при этом, в створе лавы не превышают 350 мм. На расстоянии 10–15 м позади лавы происходит разрушение деревянных стоек крепи за счет выдавливания боковых пород и плавное опускание заанкерванной области на выдавленную из боков выработку породу.

Выводы

Полученные в результате многолетних исследований результаты, будут положены в основу разрабатываемого нормативного документа по использованию анкерного крепления для обеспечения устойчивости горных выработок. Предлагаемая в нем новая концепция взаимодействия анкерной крепи с массивом и механизм работы пространственных АПАС позволяют не только существенно расширить область применения этого вида крепи как самостоятельной конструкции, но и рассчитать его рациональные параметры, обеспечивающие при минимальном количестве анкеров максимальное использование несущей способности породного массива и устойчивость выработок с анкерным и комбинированным – рамно-анкерным креплением.

Библиографический список

1. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Изд. 4-е, дополненное. Л., 1986. – 222 с.
2. КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания, 1998. – 149 с.
3. КД 12.01.01.501-98. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования.
4. СОУ-П 10.1.05411357.010. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования, 2007. – 62 с.
5. Кузнецов Г.И., Будько М.Н., Филипова А.А., Шклярский М.Ф. Изучение проявлений горного давления на моделях. Углетехиздат, 1959.-151с.
6. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел./ пер. с англ. Под ред. Г.С.Шапиро, т.1. – М.: Иностранная литература, 1954. – 647с.
7. Реология горного массива/ Глушко В.Т., Чередниченко В.П., Усатенко Б.С. – Киев: Наук. Думка, 1981. – 172 с.
8. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. /А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев. - Киев: Наукова думка, 1989. - 168 с.
9. Ревва В.Н. Экспериментальные исследования горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения //Л. Горнометаллургические проблемы Донбасса: Сб. научн. тр. / ДНТУ - Донецк: ИНФО. - 1995. - №1. - С.46 - 58.
10. Плетнев В.А., Касьян Н.Н., Петренко Ю.А., Новиков А.О., Сахно И.Г. Результаты внедрения анкерных систем для поддержания горных выработок на шахте «Добропольская»// Геотехнологии и управление производством XXI века. Монография в 2-х томах. ДонНТУ, ДЦНПГО, 2006.- с.39-44.
11. Новиков А.О., Сахно И.Г. Исследование особенностей деформирования породного массива, вмещающего выработку, закрепленную анкерной крепью// Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – №1. – С. 82-88.
12. Новиков А.О., Гладкий С.Ю., Шестопапов И.Н. Об особенностях деформирования породного массива, вмещающего подготовительные выработки с анкерным креплением //Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – №1. – С.120-129.

© Касьян Н. Н., Петренко Ю. А., Новиков А. О., 2009 г.