

## **НОВЫЙ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

## **НОВИЙ КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК**

## **NEW CONCEPTUAL DECISION TO PROVIDING FOR MOUNTAINING ROADWAY STABILITY**

Предложено новое решение проблемы обеспечения устойчивости выработок за счет искусственного изменения полей напряжений путем сжатия пород приконтурной зоны при саморасширении невзрывчатых разрушающих материалов и проведена проверка его принципиальной возможности.

**ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, КОМПОНЕНТЫ НАПРЯЖЕНИЙ, СЖАТИЕ ГОРНЫХ ПОРОД, НЕВЗРЫВЧАТЫЙ РАЗРУШАЮЩИЙ МАТЕРИАЛ, САМОРАСШИРЕНИЕ**

Обеспечение устойчивости подготовительных горных выработок в настоящее время остается одной из самых острых проблем угольной отрасли, актуальной как для передовых предприятий, так и для убыточных шахт с небольшим уровнем добычи. Несмотря на ежегодное увеличение металлоемкости каждого погонного метра выработки и рост затрат на ее поддержание, что связано с ухудшением горно-геологических условий с глубиной, существенного улучшения состояния горных выработок не наблюдается. Это свидетельствует о том, что необходима разработка и внедрение новых концептуальных решений направленных на обеспечение устойчивости горных выработок.

Известно, что проведение выработок приводит к перераспределению напряжений в массиве горных пород. С момента проведения выработки можно выделить несколько крупных стадий изменения поля напряжений приконтурных пород, их связывают с образованием вокруг выработки феноменологических зон – упругих деформаций, неупругих деформаций и разрушенных пород. Породы приконтурной зоны с течением времени последовательно проходят эти стадии. Естественно предположить, что история изменения напряженно-деформированного состояния в массиве после проведения выработки оказывает существенное влияние на дальнейшее поведение пород и механизм их деформирования.

Перераспределение напряжений вокруг выработки приводит к повышению трещиноватости пород, что сопровождается снижением их несущей способности и увеличением объема, это вызывает рост давления на крепь подготовительных выработок. При этом чем больший объем пород попадает в зону перераспределения напряжений – тем больше требуются усилия чтобы обеспечить устойчивость проводимой выработки.

Предположения о естественном затухании скорости деформирования контура выработки, связанном с самоподдержанием пород в пределах зоны разрушенных пород при достижении ею значительных размеров, не подтверждаются практикой ведения горных пород. В ремонтируемых участковых выработках и выработках восстанавливаемых по завалу не наблюдается затухание скорости деформирования, а наоборот отмечается интенсификация смещений контура [1, 2]. С этих позиций становится актуальной разработка концепции управления напряженно-деформированным состоянием массива горных пород позволяющей максимально сократить объем пород подверженных разупрочнению и расслоению.

В настоящее время известны несколько подходов направленных на предотвращение начальных расслоений пород. Анкерное крепление - позволяет создать укрепленную оболочку вокруг горной выработки, за счет сшивания слоев в единую конструкцию. Однако анкерная крепь устанавливаемая без начального распора вступает в работу после некоторых расслоений пород внутри укрепляемой области, при этом даже после формирования несущей конструкции развитие зоны разрушения может начинаться за контуром заанкерowanych пород [3]. Решение этой проблемы может быть частично достигнуто за счет увеличения длины анкерных стержней.

Установка рам крепи с предварительным распором позволяет значительно минимизировать начальные расслоения, однако не обеспечивает контакта рамы с породой по всему контуру в результате чего рама крепи точно передает сжимающие усилия на массив и точно воспринимает нагрузку, что снижает эффективность применения способа. Кроме того не обеспечивается

сопротивление процессу расслоения пород между рамами крепи.

Указанную проблему решают способы крепления с заполнением закрепного пространства путем нагнетания упрочняющих составов [4], или технологии Буллфлекс [5]. Применение указанного способа предотвращения расслоений за счет обеспечения надежного контакта пород с крепью по всей площади выработки сдерживается из-за многооперационности, необходимости применения специального оборудования, сложности реализации технологии и ее высокой стоимости.

Применение способов основанных на упрочнении горных пород нагнетанием вяжущих составов [6] не позволяет управлять напряженно деформированным состоянием породного массива, и может применяться в уже дезинтегрированном приконтурном массиве горных пород, при развитой системе трещин, что не позволяет сдерживать образование и развитие вокруг выработки зон неупругих деформаций и разрушенных пород.

Известно, что породы вмещающие выработки находятся в условиях неравнокомпонентного объемного поля сжимающих напряжений. Причем соотношение компонент напряжений различно для разных точек массива, и изменяется во времени что значительно усложняет возможность их учета при анализе напряженно деформированного состояния пород.

В настоящее время экспериментальными работами однозначно доказано, что, при увеличении промежуточного напряжения пород происходит рост их прочности [7, 8]. Согласно исследованиям [8], при промежуточном напряжении, равном  $5 \cdot 10^6 - 10^7$  Па прочность их повышается в 1,5-2 раза. Зависимость прочности аргиллитов в объемном напряженном состоянии от промежуточного напряжения приведенная в работе [8] представлена на рис. 1.

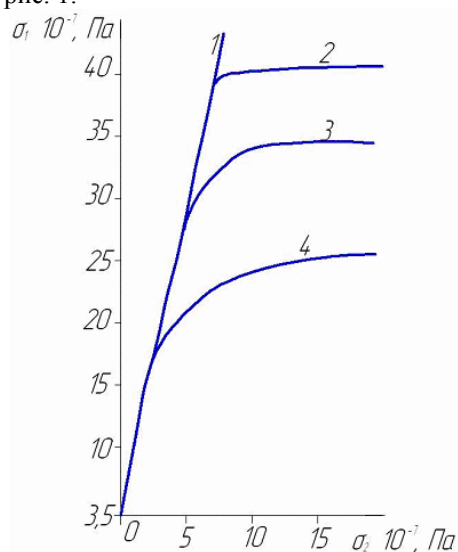


Рис. 1. Зависимость прочности аргиллитов в объемном напряженном состоянии от промежуточного напряжения:

1 -  $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ , 2-4 -  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$  (при  $\sigma_3 = 7 \cdot 10^7$  (2),  $5 \cdot 10^7$  (3),  $3 \cdot 10^7$  Па (4)).

Исследования, представленные в работе [9], показали, что увеличение бокового давления оказывает также существенное влияние на несущую способность нарушенных горных пород. При испытаниях пород типа аргиллит было установлено, что увеличение бокового давления на 4% прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}^0$  приводит к сохранению несущей способности материала на уровне 33 %  $\sigma_{сж}^0$ , а боковое давление 11 %  $\sigma_{сж}^0$  обеспечивает несущую способность, равную 81 %  $\sigma_{сж}^0$  [9].

Указанные выше соображения позволили разработать концепцию управления напряженно деформированным состоянием (НДС) массива горных пород основанную на искусственном изменении компонент напряжений в окрестности проводимой горной выработки, и приближении поля напряжений приконтурных пород к исходному природному полю напряжений, что позволит повысить устойчивость выработки.

Техническая реализация предложенной идеи осуществляется следующим образом (рис. 2): на этапе проведения выработки после установки рам основного крепления 1 в приконтурные породы 2 бурят шпур 3, в которые помещают твердеющий саморасширяющийся в процессе гидратации состав 4 в качестве которого может применяться невзрывчатый разрушающий материал (НРМ). Саморасширение материала приводит к повышению давления на стенки шпура, и на породный массив соответственно. Это приводит к искусственному изменению поля напряжений, в частности добавлению горизонтальной промежуточной компоненты  $\sigma_3$ , в пределах зоны влияния 5 НРМ, что приближает напряженное состояние пород к исходному природному полю напряжений, повышает несущую способность пород и приводит к сдерживанию образования и развития вокруг выработки зоны разрушенных пород. При этом НРМ целесообразно помещать в шпур не по всей длине шпура, а только в его донную часть, с оставлением приконтурной части шпура незаполненной на величину не менее зоны условно-мгновенного разрушения пород. Таким образом рамы основной крепи воспринимают нагрузку от разуплотнения пород в несжатой зоне и создают отпор смещениям пород в полость выработки.

Оценка эффективности изложенного способа управления НДС массива пород проводилась путем математического моделирования методом конечных элементов, реализованного в программном комплексе ANSYS. Задача решалась в объемной постановке в масштабе 1:1. Решение проводилось пошагово, с учетом сложившегося напряженного состояния на предыдущем шаге нагружения. Моделировалась

выработка прямоугольного (1 модель) и арочного (2 модель) сечения проводимая в изотропном упруго пластическом массиве представленном алевролитом с пределом прочности на одноосное сжатие 40МПа, расположенная на глубине 500м. Для размещения НРМ в кровлю выработки бурились шпуров диаметром 0,043м и глубиной 2,5м. Давление саморасширения НРМ принимали равным 15МПа, что вполне может быть достигнуто при использовании НРВ-80 в шпуровом заряде при допустимых относительных деформациях материала 15-20% [10]. Исходные данные для моделирования были взяты из кадастра физических свойств горных пород для условий Донецко-Макеевского угленосного района. Основные данные для моделирования сведены в таблицу 1.

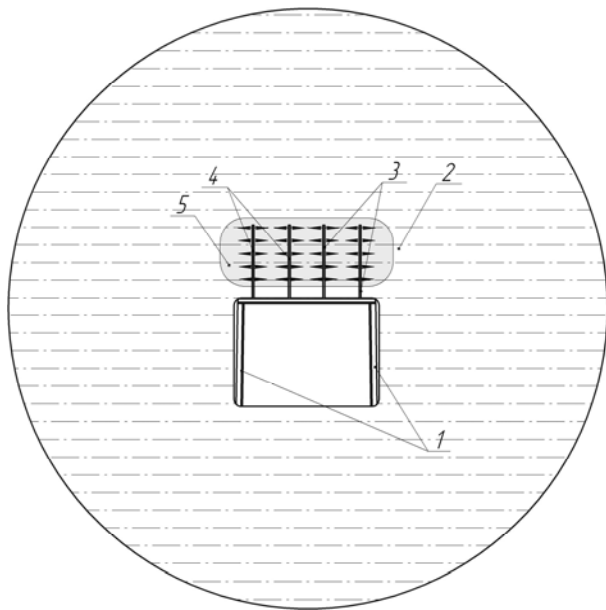


Рис. 2 Способ обеспечения устойчивости горной выработки основанный на искусственном изменении компонент напряжений в ее окрестности

Таблица 1 Исходные данные для моделирования

№ п/п	Объемная масса $\gamma$ , кгс/м <sup>3</sup>	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Сцепление C, МПа
1	2500	2500	0,33	35	0,95

Расчетная конечноэлементная модель представлена на рисунке 3.

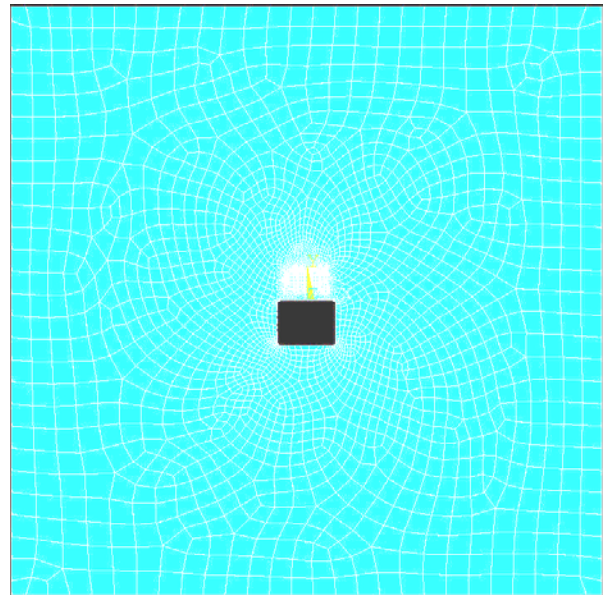


Рис. 3 Расчетная модель разбитая на конечные элементы

На данный момент нет однозначного мнения о теории прочности горных пород, находящихся в объемном неравнокомпонентном поле напряжений.

Традиционной для горных пород является теория прочности Кулона-Мора, которая по нашему мнению вполне может быть принята для инженерных расчетов. Таким образом задача решалась в нелинейной постановке с использованием критерия Кулона Мора. В этом случае условие прочности может быть записано как

$$(\sigma_{экс})_{III} = \sigma_1 - k\sigma_3 \leq [\sigma]^p \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  - главное напряжение, МПа;

$\sigma_3$  - промежуточное напряжение, МПа;

$k$  - коэффициент пропорциональности между прочностью пород на одноосное растяжение и сжатие;

$[\sigma]^p$  - предел прочности пород на растяжения, МПа.

Теоретически при повышении промежуточной компоненты  $\sigma_3$  тензора напряжений путем бокового сжатия пород при саморасширении НРМ эквивалентные напряжения по формуле (1) снижаются, и, следовательно, повышается прочность пород.

Анализ замеров смещений глубинных реперов в подземных горных выработках, проведенных в Московском Горном университете под руководством проф. И.Л. Черняка, показывает, что образование зоны условно-мгновенного разрушения происходит сразу после обрушения пород при проведении выработки, то есть предотвратить ее образование

невозможно. Дальнейшие смещения контура выработки связаны с ползучестью пород, и реализуются во времени, поэтому представляется возможным и целесообразным противодействовать их развитию.

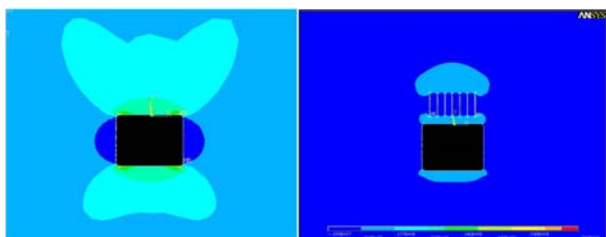
На основании анализа результатов шахтных наблюдений и моделирования в работе выделяется 3 типа деформации пород в зависимости от соотношений предела прочности и напряжений в массиве.

Первый тип деформаций пород возникает при напряжениях на контуре выработки  $\sigma_1$  при одноосном сжатии меньше предела длительной прочности пород  $\sigma_\infty$ . При этом в массиве образуется зона упруго-вязких деформаций, и деформирование происходит без нарушения сплошности пород. Второй тип деформаций наблюдается при напряжениях на контуре, превышающих предел длительной прочности, но меньше мгновенной прочности пород  $\sigma_0$ . Деформации ползучести приводят к образованию микротрещин и разрушению породы в некоторой зоне вокруг выработки. Дальнейшее развитие микротрещиноватости, связанное с длительной прочностью породы, приводит к образованию зоны длительного разрушения пород. Третий тип деформаций имеет место при напряжениях  $\sigma_1$  выше мгновенной прочности  $\sigma_0$ . Разрушение пород может начинаться вслед за проведением выработки. Зону, в которой породы разрушаются при достижении максимума напряжений, называют зоной условно-мгновенного разрушения пород.

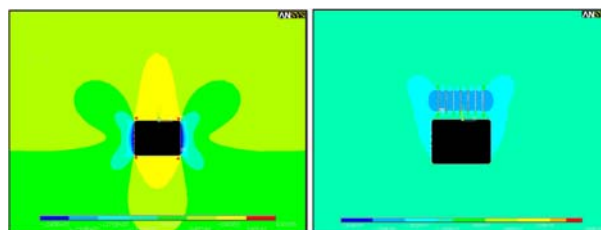
Учитывая вышесказанное также будем анализировать распределение напряжений по первой теории прочности.

На рис. 4, и 5 приведены картины распределения напряжений вокруг выработки прямоугольного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б) рассчитанные по первой теории прочности, и по теории прочности Кулона-Мора соответственно.

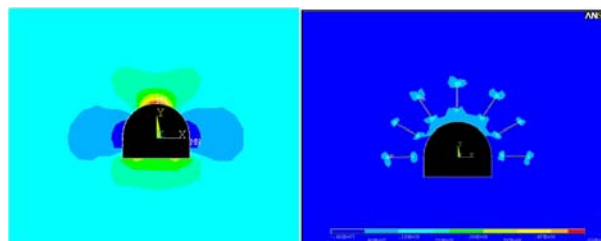
На рис. 6, и 7 приведены картины распределения напряжений вокруг выработки арочного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б), рассчитанные по первой теории прочности, и по теории прочности Кулона-Мора соответственно.



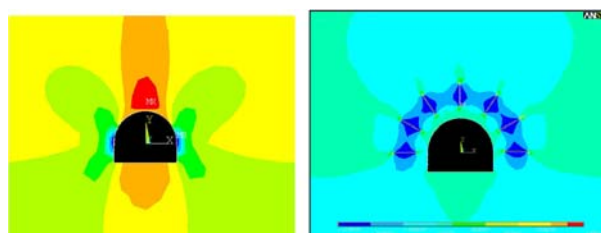
а) б)  
Рис. 4 Распределение напряжений вокруг выработки прямоугольного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б), рассчитанные по первой теории прочности.



а) б)  
Рис. 5 Распределение напряжений вокруг выработки арочного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б), рассчитанные по теории прочности Кулона-Мора.



а) б)  
Рис. 6 Распределение напряжений вокруг выработки арочного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б), рассчитанные по первой теории прочности.



а) б)  
Рис. 7 Распределение напряжений вокруг выработки арочного сечения для традиционного крепления (а) и с мероприятиями по сжатию пород при помощи НРМ с давлением саморасширения в шпуре – 15МПа (б), рассчитанные по теории прочности Кулона-Мора.

Анализ приведенных картин распределения напряжений показывает, что при традиционном способе крепления выработки прямоугольного сечения (рис. 4, 5) в углах образуются участки концентрации напряжений, в боках выработки зона сжатия, а в кровле образуется зона пониженных

напряжений максимум которых находится посередине пролета выработки. Таким образом, в кровле выработки происходит прогиб слоев, возможно их расслоение и разрушение от растягивающих напряжений, при развитии этого процесса вглубь массива, произойдет развитие вокруг выработки зоны разрушенных пород. Размер зоны разгрузки в кровлю выработки составляет 1,2 ширины выработки. При сжатии приконтурных пород за счет саморасширения НРМ в шпуре с давлением 15МПа и расстоянием между шпурами 0,5м, в области эффективной работы НРМ отсутствует зона пониженных напряжений, следовательно, разрушение в этой области развиваться не будет. Зона пониженных напряжений развивается за контуром сжатой области, при этом размер разгруженной области сокращается на 16%. Такие же выводы можно сделать анализируя картины распределения напряжений по теории прочности Мора. В этом случае зона растяжений в кровле вообще не наблюдается, зато четко видны границы зоны сжатия. Предельные напряжения за границей сжатой области не наблюдаются. На контуре выработки имеет место понижение напряжений, но их область заканчивается на границе сжатой зоны. Таким образом нагружение рамы крепи происходит за счет разупрочнения пород в пределах зоны разгрузки пород между контуром выработки и сжатой зоной, такие нагрузки вполне могут быть выдержаны современной металлической податливой крепью.

Принудительное сжатие пород вокруг выработки арочной формы (рис. 6, 7) также исключает образование зоны разгрузки в кровле выработки и способствует созданию вокруг нее сжатой арочноподобной зоны, препятствующей расслоению пород.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие **выводы**.

Для обеспечения устойчивости горных выработок в современных горно-геологических условиях необходимы разработка и внедрение принципиально новых решений направленных на управление напряженно-деформированным состоянием породного массива.

Предложен концептуальный подход обеспечения устойчивости выработок за счет искусственного изменения вокруг них полей напряжений путем сжатия пород при саморасширении НРМ. Принципиальная возможность изложенного подхода подтверждается проведенным моделированием методом конечных элементов.

Для получения качественных характеристик способа, и обоснования его параметров необходимы детальные исследования направленные на изучение особенностей работы способа в зависимости от горно-геологических условий его применения.

### Список литературы

1. Зубов В.П. Влияние подрывок на пучение пород в подготовительных выработках / Зубов В.П., Чернышков Л.Н., Лазченко К.Н. // Уголь Украины. – 1985. – №7. – С. 15-16.
2. Негрей С.Г. - Обоснование параметров механического отпора породам почвы выемочных выработок при отработке лав обратным ходом друк. Дисс... канд. техн. наук: 05.15.02.– Донецк, 2007.– 296 с.
3. Сахно И.Г. Исследование особенностей деформирования породного массива, вмещающего выработку, закрепленную анкерной крепью / Сахно И.Г., Новиков А.О. // Вісті Донецького гірничого інституту – Донецьк. - №1 – 2007. С. 82-88.
4. Маттен В. Заполнение закрепного пространства штреков природным ангидритом / В. Маттен, И. Зеегер, Х. Цильэссен. – Глюкауф. – 1980. - №14. – С. 15-20.
5. Брайт Ф. Заполнение пустот за рамами штрековой крепи методом Буллфлекс / Брайт Ф., Крае Ю. – Глюкауф. – 1980. - №13 С. 12-17.
6. Заславский Ю.З. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю.З. Заславский, Е.А. Лопотухин, Е.Б. Дружко, И.В. Качан. - М.:Недра, 1984. - 176 с.
7. Чирков С.Е. Прочность горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии / Чирков С.Е. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1976, №1, С. 11-17
8. Алексеев А.Д. Предельное состояние горных пород / Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. – Киев: Наук. Думка, 1982, - 200 с.
9. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / Виноградов В.В. – К.: Наукова думка. – 1989. – 192 с.
10. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению / Сахно И.Г. – Проблеми гірського тиску . 2010. - №18. С. 132-146.

Запропоновано нове рішення проблеми забезпечення стійкості виробок за рахунок штучної зміни полей напруг, шляхом стиску порід при саморозширенні невибухових руйнуючих речовин і проведено перевірку його принципової можливості.

New solution of problem of providing stability of making is offered due to an mauntain workings change round them of the fields of tensions by the compression of rocks at selfexpansion of inexplosive destroying materials, and verification of his of principle possibility is conducted.

ГІРНИЧА ВИРОБКА, КОМПОНЕНТИ НАПРУГ, СТИСК ГІРНИЧИХ ПОРІД, НЕВИБУХОВИЙ РУЙНУЮЧИЙ МАТЕРІАЛ, САМОРОЗШИРЕННЯ

MOUNTAINING ROADWAY, COMPONENTS OF TENSIONS, COMPRESSION OF ROCK MASS,

INEXPLOSIVE DESTROYING MATERIAL,  
SELFEXPANSION