

Круковский А.П., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ КРЕПИ ПРИ ЕЕ СОХРАНЕНИИ ПОСЛЕ ПРОХОДА ЛАВЫ

Круковський О.П., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ НАН України)

ЗМІНА ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ВИРОБКИ З РІЗНИМИ ВИДАМИ КРІПЛЕННЯ ПРИ ЇЇ ЗБЕРЕЖЕННІ ПІСЛЯ ПРОХОДУ ЛАВИ

Krukovski A.P., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

STRESS FIELD CHANGING AROUND THE TUNNEL WITH DIFFERENT TYPES OF SUPPORTS WHICH IS TO BE CONSERVATED AFTER THE FACE HAS BEEN DRIVEN

Аннотация. В статье рассмотрен процесс упругопластического деформирования углепородного массива вокруг горной выработки в зоне ее сопряжения с лавой. В зоне влияния очистных работ крепь горных выработок подвергается серьезному испытанию, так как нагрузки здесь намного возрастают. Поэтому вопрос об оптимальном виде крепления сопряжений имеет большое значение, особенно при сохранении выработки на повторное использование.

Приведены распределения значений параметров, характеризующих разнокомпонентность поля напряжений и разгрузку массива от горного давления, а также зоны неупругих деформаций в трёх случаях: когда применяется рамная, анкерно-рамная крепь и анкерно-рамная, усиленная канатными анкерами.

Показано, что при использовании рамной крепи очистные работы приводят к формированию зоны возможного обрушения разрушенной горной породы и к критическому повышению уровня разнокомпонентности пород слева от выработки. При использовании анкерной крепи в кровле формируется породно-анкерный блок, и после прохода лавы грузонесущее перекрытие выработки остаётся в работоспособном состоянии. Однако в неустойчивых вмещающих породах или при наличии слабого слоя пород в основной кровле выработки существует вероятность опускания скреплённого анкерами блока. Поэтому в качестве крепи усиления применяются канатные анкера глубокого заложения, позволяющие связать грузонесущее перекрытие с ненарушенными породами в глубине массива.

Ключевые слова: анкерное крепление, канатные анкера, напряжённо-деформированное состояние, сопряжение штрека с лавой.

Самая сложная ситуация, влияющая на безопасность ведения горных работ, безусловно, складывается на сопряжении штрека с выработанным пространством лавы. В зоне влияния очистных работ крепь горных выработок подвергается серьёзному испытанию, поскольку нагрузки здесь намного возрастают. Традиционно анкерная крепь (АК) применяется для крепления подготовительных выработок, погашаемых после прохождения лавы [1,2]. Но в настоящее время накоплен положительный опыт применения усиленных конструкций

анкерно-рамных систем для поддержания выработок на сопряжении «лава-штрек» и далее после прохождения лавы [3].

Вопрос сохранения подготовительных выработок за лавой для их повторного использования представляет большой научный и практический интерес, а также экономически выгоден для шахт в современных условиях рыночной конкуренции [4]. Около 70 % горных выработок в Украине составляют подготовительные штреки. Их охрана при традиционных подпорных видах крепи, особенно в условиях неустойчивых пород, является сложной и дорогостоящей задачей [5]. Следовательно, одним из основных направлений снижения затрат на подготовку фронта очистных работ является сохранение штрека после прохода лавы для его повторного применения.

Цель работы: используя методы математического и численного моделирования исследовать напряжённо-деформированное состояние углепородного массива в зоне сопряжения лавы и штрека при различных видах крепления и определить оптимальный вид крепи для сохранения выработки на повторное использование.

Процесс трансформации поля напряжений в окрестности горной выработки имеет сложный пространственный характер. Напряжённо-деформированное состояние приконтурных пород горного массива существенно меняется как вдоль выработки, особенно на участках близких к забою, так и вглубь массива. Наличие лавы ещё более усложняет ситуацию: влияние лавы сказывается задолго до её подхода, а на сопряжении «лава-штрек» изменение геомеханических параметров достигает максимума [6].

Решим задачу об определении поля напряжений в стационарной, упруго-пластической постановке, используя метод конечных элементов. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние будем применять условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения, как в результате сдвига, так и отрыва.

Проведём расчёт полей напряжений для следующих условий. Глубина проведения выработки – 400 м. Мощность угольного пласта 1,1 м. Состав и физико-механические свойства пород представлены в таблице 1. Размеры сечения выработки соответствуют рамной крепи КШПУ-14,4. Длина анкера – 2,4 м, длина канатного анкера – 6 м. Для поддержания выработки за линией очистных работ используются охранные конструкции – деревянные костры.

Для расчётов были взяты физико-механические свойства, типичные для условий Западного Донбасса, табл. 1. Они характеризуются повышенной прочностью угля и низкой прочностью вмещающих пород. Ввиду значительной неоднородности состава вмещающих выработку пород, часто встречается характерная для Западного Донбасса ситуация, когда в кровле выработки на расстоянии, превышающем зону анкерования, расположен слабый породный слой или пропласток угля.

Рассмотрим три случая крепления выработки:

- рамной крепью;
- анкерно-рамной крепью;

– анкерно-рамной крепью, усиленной канатными анкерами.

Таблица 1 – Свойства пород, используемые при расчёте

Порода	Мощность, M	$\sigma_{сж}$, МПа	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Сцепление, C , МПа	Угол внутр. трения, φ , °
Песчаник	2	47	$2,1 \cdot 10^4$	0,36	11,9	35
Алевролит	3	29	$1,2 \cdot 10^4$	0,32	7,4	28,5
Угольный пропласток	0,2	35	$0,3 \cdot 10^4$	0,25	8,8	28,5
Алевролит	5,6	29	$1,2 \cdot 10^4$	0,32	7,4	28,5
Уголь	1,1	35	$0,3 \cdot 10^4$	0,25	8,8	28,5
Аргиллит	9	19	$1,1 \cdot 10^4$	0,26	6,9	28,5

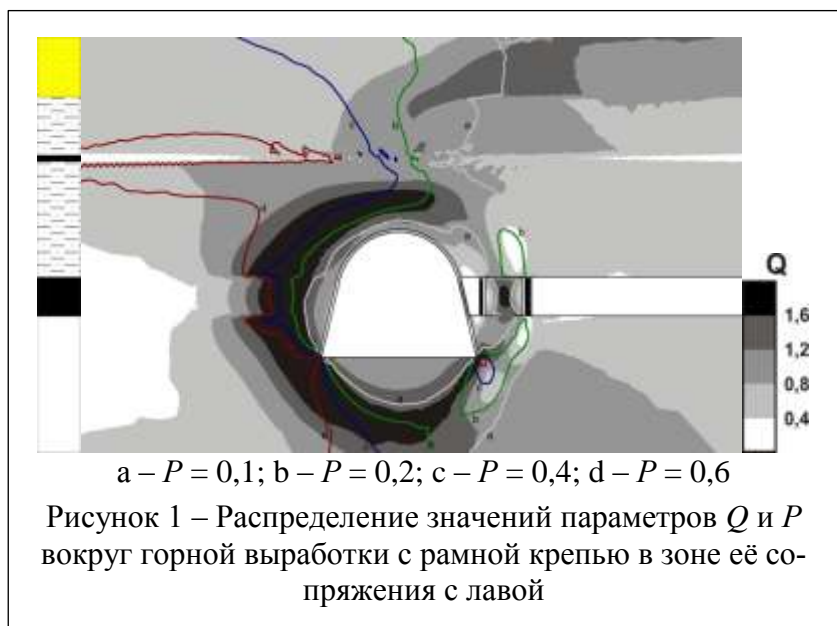
Для анализа напряжённого состояния горного массива будем использовать геомеханические параметры, которые характеризуют разнокомпонентность поля напряжений и степень разгрузки пород от горного давления:

$$Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma H; \quad P = \sigma_3 / \gamma H,$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – компоненты тензора главных напряжений; γ – усреднённый вес вышележащих горных пород; H – глубина разработки.

Напряжённое состояние угленородного массива на сопряжении «лава-штрек», закреплённом рамной крепью. На рисунке 1 представлено распределение значений параметров Q и P вокруг одиночной горной выработки, закреплённой рамной крепью, на рис. 2 показаны зоны неупругих деформаций вокруг этой выработки в зоне её сопряжения с лавой.

В горных породах в непосредственной близости от контура выработки минимальная компонента напряжений становится близкой к нулевому значению. Разрушение приконтурного массива в таких условиях происходит посредством разделения его на отдельные слабо взаимодействующие блоки и требует на своё развитие минимальных затрат энергии. Поэтому для поддержания самопроизвольного развития разрушения горных пород все дальше вглубь приконтурного массива, как правило, достаточно работы упругих деформаций, вызванных перераспределением компонент напряжений всесторонне сжатых горных пород.



Для выработки с рамной крепью усилия, прижимающие блоки друг к другу в своде выработки, незначительны, и сцепление между ними низкое, поэтому нарушенные горные породы в своде обрушения с отходом забоя под действием собственного веса приобретают возможность смещений в выработку. В результате таких смещений

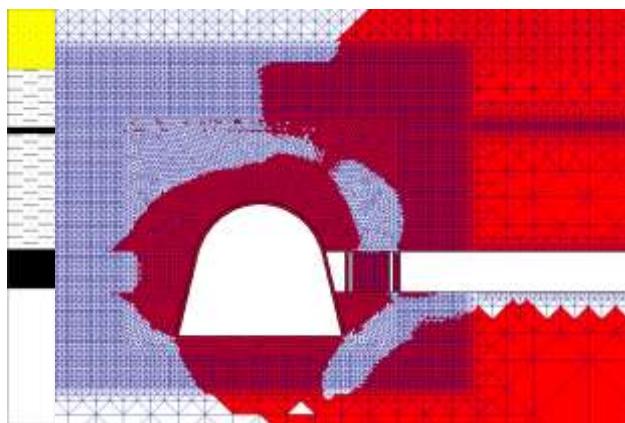


Рисунок 2 – Зона неупругих деформаций вокруг горной выработки с рамной крепью в зоне её сопряжения с лавой

происходит разрыхление горных пород свода и снижение действующей здесь минимальной компоненты напряжений. Однако, по сравнению с выработкой прямоугольного сечения свод арочного сечения намного более устойчив.

При отработке лавы справа правая породная стена, поддерживающая кровлю выработки, удалена, и горные породы в кровле с этой стороны выработки разгружены от действовавших напряжений. Изолинии параметра P в правой части рисунка охватывают выработанное пространство лавы, причём изолиния a , $P = 0,1$, очерчивающая зону полного разрушения в этом сечении, поднимается над лавой на высоту, превышающую четырёхкратную мощность угольного пласта.

Разнокомпонентность поля напряжений в левом борту выработки принимает высокие значения. Область $Q > 1,6$ распространяется и в кровле и почве выработки. Напряжённое состояние пород в этих областях достигло максимума разнокомпонентности, здесь произойдёт разрушение и разупрочнение горных пород на глубину 2-3 м. Развитие разрушения горных пород в боку выработки будет ускорять процессы потери устойчивости штрека и обрушения пород кровли штрека и лавы. При этом область $0,8 < Q < 1,2$ распространяется далеко вправо и вверх над всем выработанным пространством, сформировав зону возможного обрушения разрушенной горной породы от середины кровли выработки вправо и вверх.

Таким образом, при использовании рамной крепи очистные работы в угольном пласте будут приводить:

- к формированию зоны возможного обрушения разрушенной горной породы под действием собственного веса от середины кровли выработки вправо и вверх;
- к критическому повышению уровня разнокомпонентности пород слева от выработки, здесь произойдёт разрушение и разупрочнение горных пород на глубину 2-3 м; развитие разрушения горных пород в левом боку выработки будет ускорять процессы потери устойчивости штрека и обрушения пород кровли штрека и лавы.

Напряжённое состояние угленородного массива на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерной крепью. Рассмотрим НДС массива, вмещающего сопряжение лавы со штреком, закреплённым с помощью анкерной крепи. Результаты расчётов приведены на рис. 3 и рис. 4.

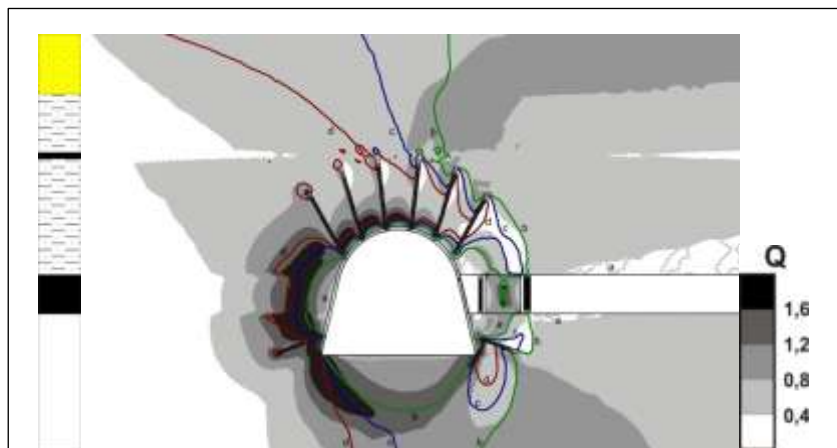
В целом состояние штрека перед сопряжением значительно улучшилось, влияние лавы при помощи АК ослаблено. Вытянутая вправо и вверх область $0,8 < Q < 1,2$, по которой, вероятнее всего, произойдёт обрушение пород кровли, рассечена образованным АК породным перекрытием на две части. То есть зависающая над выработанным пространством породная консоль отсекается справа от выработки, и тем самым даёт ей возможность сохранить устойчивость ещё на определённом отрезке за лавой.

Установленные в кровле анкера формируют породно-анкерный блок, который сохраняет свою цельность и после прохода лавы. Однако разрушение левого борта выработки приведёт к опусканию перекрытия кровли внутрь выработки. Для предотвращения этого явления требуется дополнительная установка ремонтин или применение канатных анкеров.

В левом боку породы находятся в очень напряжённом состоянии, область $1,2 < Q < 1,6$ распространяется вглубь массива на 1-1,5 м, и вместе с тем значение минимальной компоненты тензора главных напряжений близко к нулю на расстоянии 0,3-0,5 м от поверхности левого борта выработки, рис. 3.

Это говорит о неизбежном разрушении элемента опоры конструкции АК. Хотя по сравнению с выработкой с рамной крепью, рис. 1, изолиния *a* ($P = 0,1$) охватывает уже значительно меньшую площадь благодаря сдерживающему влиянию левого бокового анкера.

Область неупругих деформаций после прохода лавы в приконтурных породах выработки с АК,



a – $P = 0,1$; b – $P = 0,2$; c – $P = 0,4$; d – $P = 0,6$.

Рисунок 3 – Распределение значений параметров Q и P на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерно-рамной крепью

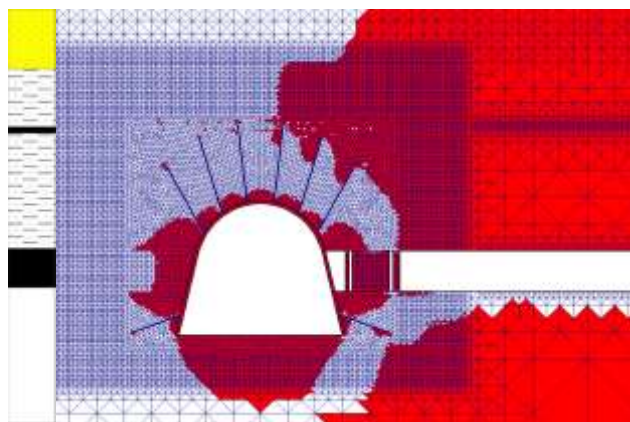


Рисунок 4 – Область неупругих деформаций на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерно-рамной крепью

рис. 4, отличается от выработки с рамной крепью, рис. 2. Применение АК значительно уменьшает площадь этой области вокруг выработки, разделяя её на большое число маленьких, не связанных между собой областей.

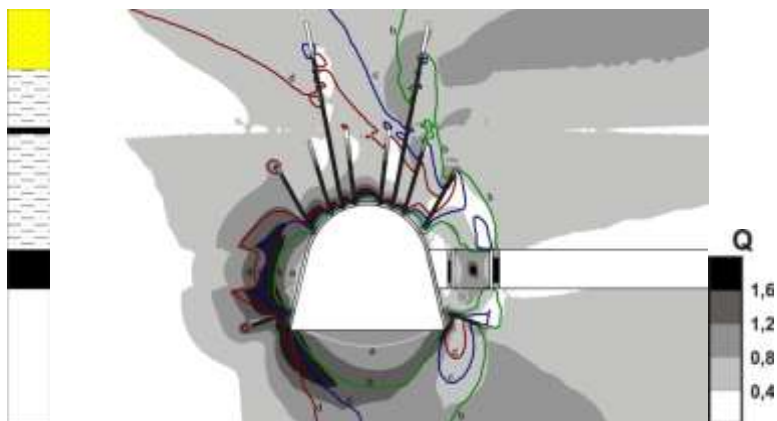


Рисунок 5 – Канатные анкеры глубокого заложения, применяемые на угольных шахтах Украины

Таким образом, в большей части искусственно созданного грузонесущего перекрытия напряжения от воздействия лавы не превысили допустимые по прочности. В этой связи процесс разрушения перекрытия не будет происходить, и после прохода лавы грузонесущее перекрытие выработки остаётся в работоспособном состоянии. Однако, поскольку зона возможного разрушения по угольному пропластку распространилась на все пространство над анкерами, грузонесущее перекрытие оказывается не связанным с ненарушенными породами в глубине массива. Сохраняется возможность обрушения перекрытия в выработку.

Напряжённое состояние угленосного массива на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерной крепью с канатными анкерами. Для предотвращения обрушения породно-анкерного перекрытия в выработку и нейтрализации негативного воздействия ослабленной зоны в кровле применяются канатные анкеры глубокого заложения (рис. 5) [7].

Результаты расчётов НДС массива, вмещающего сопряжение лавы со штреком, закреплённым с помощью анкерной крепи



а – $P = 0,1$; б – $P = 0,2$; в – $P = 0,4$; д – $P = 0,6$

Рисунок 6 – Распределение значений параметров Q и P на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерно-рамной крепью и канатными анкерами

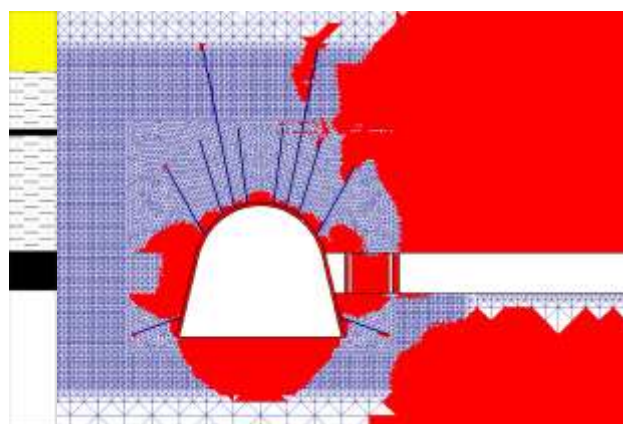


Рисунок 7 – Область неупругих деформаций на сопряжении «лава-штрек», закреплённом анкерно-рамной крепью и канатными анкерами

и канатных анкеров, приведены на рис. 6 и рис. 7.

По сравнению с предыдущим расчётом значительно уменьшилась область $0,8 < Q < 1,2$ в кровле выработки, что снижает возможность обрушения сформированного анкерами грузонесущего перекрытия при поддержании выработки после прохода лавы.

Отмечается уменьшение нагрузки на левый борт выработки, площадь области $1,2 < Q < 1,6$ уменьшилась на (50-60) %, рис. 6, что повышает несущую способность элемента опоры конструкции АК.

После прохода лавы в приконтурных породах выработки с АК, усиленной канатными анкерами, рис. 7, область неупругих деформаций над породно-анкерным перекрытием значительно уменьшилась, в том числе и в ослабленном угольном пропластке.

Таким образом, применение канатных анкеров глубокого заложения позволяет связать грузонесущее породно-анкерное перекрытие с ненарушенными породами в глубине массива и значительно уменьшить область неупругих деформаций над выработкой. Применение такого вида крепи обеспечивает сохранение контура и уменьшение потери сечения выработок, что повышает возможность их повторного применения для отработки следующей лавы в сложных горно-геологических условиях.

Выводы.

При анализе результатов численного моделирования изменения напряжённо-деформированного состояния углепородного массива в зоне сопряжения лавы и штрека, закреплённого различными видами крепи, показано следующее.

1) При использовании рамной крепи очистные работы приводят к формированию зоны возможного обрушения разрушенной горной породы под действием собственного веса от середины кровли выработки вправо и вверх и к критическому повышению уровня разнокомпонентности пород слева от выработки, где происходит разрушение и разупрочнение горных пород. Развитие разрушения горных пород в левом боку выработки ускоряет процессы потери устойчивости штрека и обрушения пород кровли штрека и лавы.

2) При использовании анкерной крепи в кровле формируется породно-анкерный блок. В большей части искусственно созданного грузонесущего перекрытия напряжения от воздействия лавы не превышают допустимые по прочности. В этой связи разрушение грузонесущего перекрытия выработки не происходит, и после прохода лавы оно остаётся в работоспособном состоянии. Однако существует большая вероятность, что наличие в кровле слабого прослойка или межслоевого контакта за пределами заанкереной области приведёт к нарушению связи между породно-анкерной конструкцией и основной кровлей. И поскольку зона возможного разрушения распространяется на все пространство над анкерами и грузонесущее перекрытие оказывается несвязанным с ненарушенными породами в глубине массива, сохраняется возможность обрушения перекрытия в выработку.

3) Применение анкерной крепи, усиленной канатными анкерами глубокого заложения, позволяет не только создать грузонесущее породно-анкерное пе-

рекрытие, но и связать его с ненарушенными породами в глубине массива. Применение такого вида крепи обеспечивает сохранение контура и уменьшение потери сечения выработок, что повышает возможность их повторного применения для отработки следующей лавы в сложных горно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск, 2002. – 372 с.
2. Айкхоф Ю. Анкерная крепь – ключевая технология для высокопроизводительных лав на большой глубине / Ю. Айкхоф, Х. Юрека // Глюкауф. – 2002. – № 2. – С. 27-32.
3. Круковский А.П. Исследование напряженного состояния горного массива вокруг выработки в зоне ее сопряжения с выработанным пространством лавы / А.П. Круковский // Геотехническая механика: Сб. научн. тр. / НАН Укр-раины ИГТМ. – Днепропетровск, 2010. – № 91. – С. 239-244.
4. Анализ и направления совершенствования способов и средств поддержания выемочных штреков / С.И. Скипочка, В.Н. Трипольский, Н.А. Буряк, Т.Г. Войтович // Геотехническая механика: Сб. научн. тр. / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2014. – № 115. – С. 109-119.
5. Курносос А.Т. Решение проблемы поддержания горных выработок, расположенных в слабых вмещающих породах / А.Т. Курносос, С.А. Курносос, И.Н. Слащев // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XIX Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2009. – С. 187-190.
6. Демин В.Ф. Характер проявлений горного давления при различных видах крепи выемочных выработок / В.Ф. Демин, А.В. Саранчуков, В.В. Демин // Горный журнал. Известия высших учебных заведений. – 2008. – №4. – С. 33-37.
7. Разумов Е.А. Применение канатных анкеров глубокого заложения при креплении подземных горных выработок / Е.А. Разумов, А.С. Позолотин // Уголь Кузбасса. – 2010. – № 6. – С. 60-61.

REFERENCES

1. Bulat, A.F. and Vinogradov, V.V. (2002), *Oporno-ankernoe kreplenie gornyih vyirabotok ugolnyih shaht* [Support-anchoring mine workings of coal mines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Aykhof, Yu. and Yurekka, H. (2002), “Anchoring – a key technology for high productivity longwall on a large dove”, *Glyukauf*, no. 2, pp. 27-32.
3. Krukovskiy, A.P. (2010), “Investigation of stress state of rock mass around workings in the zone of its conjunction with the longwall goaf”, *Geotechnical Mechanics*, no. 91, pp. 239-244.
4. Skipochka, S.I., Tripolskiy, V.N., Buryak, N.A. and Voytovich, T.G. (2014), “Analysis and improvement of methods and facilities for supporting the gate roads”, *Geotechnical Mechanics*, no. 115, pp. 109-119.
5. Kurnosov, A.T., Kurnosov, S.A. and Slashev, I.N. (2009), “Solving the problem of maintenance of mine workings located in weak surrounding rocks”, *Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly* [Proceedings of the XIX International Research School], *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie yavleniya v gornyih porodah i vyirabotkah* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings], Simferopol, Ukraine, pp. 187-190.
6. Demin, V.F., Saranchukov, A.V. and Demin, V.V. (2008), “The nature of the demonstrations of rock pressure in different types of supporting the excavation workings”, *Gorniy zhurnal. Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy*, no. 4, pp. 33-37.
7. Razumov, E.A. and Pozolotin, A.S. (2010), “Application of deep cable anchor in the fixing underground workings”, *Ugol Kuzbassa*, no. 6, pp. 60-61.

Об авторе

Круковский Александр Петрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, igtm@ua.fm

About the author

Krukovskiy Alexander Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Deputy Director of the institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtm@ua.fm

Анотація. У статті розглянуто процес пружно-пластичного деформування вуглепородного масиву навколо гірничої виробки в зоні її сполучення з лавою. У зоні впливу очисних робіт кріплення гірничих виробок піддається серйозному випробуванню, оскільки навантаження тут набагато зростають. Тому питання про оптимальний вид кріплення сполучень має велике значення, особливо при збереженні виробки на повторне використання.

Наведено розподіл значень параметрів, що характеризують різнокомпонентність поля напружень і розвантаження масиву від гірського тиску, а також зони непружних деформацій у трьох випадках: коли застосовується рамне, анкерно-рамне кріплення і анкерно-рамне, посилене канатними анкерами.

Показано, що при використанні рамного кріплення очисні роботи призводять до формування зони можливого обвалення зруйнованої гірської породи і до критичного підвищення рівня різнокомпонентності порід ліворуч від виробки. При використанні анкерного кріплення в покрівлі формується породно-анкерний блок, і після проходження лави вантажонесуче перекриття виробки залишається в працездатному стані. Однак в нестійких вмштуючих породах або при наявності слабкого шару порід в основній покрівлі виробки існує ймовірність опускання скріпленого анкерами блоку. Тому в якості посилення кріплення застосовуються канатні анкери глибокого закладення, що дозволяє зв'язати вантажонесуче перекриття з непошкодженими породами в глибині масиву.

Ключові слова: анкерне кріплення, канатні анкери, напружено-деформований стан, сполучення штреку з лавою.

Abstract. This article describes a process of elastic-plastic deforming of the rock-and-coal massive around the tunnel in the area of the face end. In the area of winning operation influence, supports of the tunnels are under much greater load which essentially grows here. Therefore, availability of optimal form of the ends supporting is of great importance, especially in case of tunnel conservation for further usage.

Distributions of parameter values which characterize multicomponent stress field, pressure relief in the rock mass and zones of inelastic deformations are shown for three types of support: frame support; anchor-frame support; and anchor-frame support reinforced by the rope anchors.

It is shown that winning operations with using frame support led to formation of a zone with possible fall of the disturbed rocks and critical growth in number of the rock components from the left side of the tunnel. When anchor supports are used, a rock-anchor block is formed in the tunnel roof, and when the face has been driven a load-carrying canopy remains in operable state. However, in condition of instable adjoining rocks or weak rock layer in the main roof of the tunnel there is a probability that a block reinforced by the anchors could subside. Therefore, deep rope anchors are used as a reinforced support as they tie together load-carrying canopy with the virgin rock mass.

Keywords: roof bolting, rope anchor, stress-strain state, face end

Стаття поступила в редакцію 03.03.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко