

УДК 622.023

Докт. техн. наук БАБИЮК Г. В., канд. техн. наук КУРМАН С. А. (Донбасский государственный технический университет)

ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОСТИ ПОРОД НА ИХ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Горные породы как конструкционный материал представляют собой сложную геосистему [1], расчлененную на структурные элементы различных порядков и характеризующуюся в связи с этим изменчивыми механическими свойствами. Эти свойства сформировавшиеся в ходе геологических процессов и измененные в результате горных работ, служат исходной информацией при прогнозировании проявлений горного давления в выработках. Они не известны в полной мере при проектировании выработок, поэтому для принятия решений по обеспечению их устойчивости большое значение имеет оперативная оценка состояния массива по основным влияющим факторам, к числу которых в осадочных породах, в первую очередь, относится слоистость.

В связи с сложностью непосредственного изучения свойств слоистых пород в массиве данная задача обычно решается путем экстраполяции опытов на образцах ограниченных размеров на весь исследуемый массив. При этом решение задачи сводится, прежде всего, к построению расчетной модели, отображающей с достаточной степенью приближения строение массива, и установлению способа расчета, пригодного для описания связи между свойствами пород в образце и массиве. В настоящее время определение прочностных показателей слоистых пород по характеристикам лабораторных образцов производится путем отображения особенностей поведения под нагрузкой анизотропной среды [2] или введения в расчет масштабных коэффициентов (коэффициентов структурного ослабления) [3, 4], величину которых очень сложно установить из-за отсутствия достоверной статистической информации о распределении структурных дефектов в массиве. Кроме того, при таком подходе в расчет не принимается ориентация поверхностей ослабления, которая существенно влияет на формы проявления горного давления в слоистом породном массиве. Поэтому для учета структурных дефектов массива при компьютерном моделировании геомеханических процессов выбран метод оценки предельного состояния пород со структурными дефектами, предложенный проф. Г.Н. Кузнецовым [2], который широко применяется в отечественных [5] и зарубежных [6] исследованиях. Усовершенствование метода производилось за счет установления моделей, пригодных для компьютерного моделирования, параметры которых устанавливаются по результатам непосредственного определения свойств пород в конкретных направлениях.

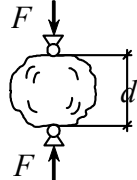
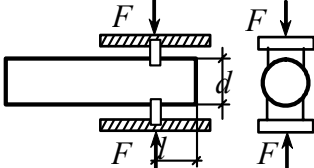
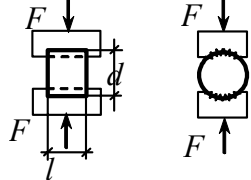
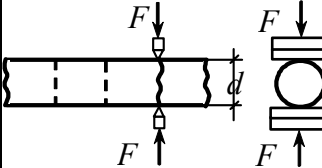
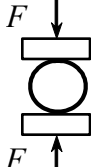
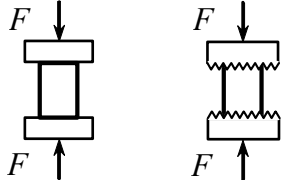
Прочностные свойства пород изучались в лабораторных и шахтных условиях с помощью экспресс-методов, позволяющих с минимальными затратами и достаточной надежностью получить оперативную информацию о прочностных свойствах с учетом дефектов структуры.

Пробы для испытаний в лаборатории отбирались в виде кусков, взятых из забоя при проведении выработки. Для сохранения естественной влажности пробы помещались в герметичные пакеты, а образцы из них готовили по методике ВНИМИ [7]. Прочность на одноосное сжатие определяли на образцах в виде цилиндра, куба и призмы правильной формы. Нагружали образцы на гидравлическом прессе МС-1000 с постоянной скоростью. Перед испытанием производилось описание образцов с точки зрения наличия слоистости и трещин, угла их наклона и состава трещинного

заполнителя. Основные сведения об использованных методах приведены в табл. 1. В ней приняты следующие обозначения:

F – усилие нагружения, кН; S – площадь образца, m^2 ; m – масштабный коэффициент; d – диаметр керна, м; h и l – размеры образца, м.

Табл. 1. Сведения о методах прочностных испытаний образцов горных пород

Форма и размеры образца	Вид испытания, тип индентора и прибора	Схема испытания	Предел прочности на	
			растяжение	сжатие
Необработанные куски, $d \approx 40 \div 50$ мм	Раскалывание сферическими инденторами, ППЭИ		$\sigma_p = 0,75 \cdot \frac{F}{S} \cdot m$	$\sigma_c = a_i + b_i \sigma_p$
Необработанные отрезки керна, $L \approx (4 \div 5)d$, $l \geq 0,7d$	Раскалывание клиньями с цилиндрической выточкой и последующее сжатие зубчатым индентором по боковой поверхности керна, ППЭИ		$\sigma_p = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \cdot m$	–
			–	$\sigma_c = 1,4 \frac{F}{d \cdot l}$
Необработанные отрезки керна, $L \approx (4 \div 5)d$	Раскалывание керна клиньями перпендикулярно оси керна, БП-3		$\sigma_p = 0,9 \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} \cdot m$	–
Необработанный отрезок керна, $d = 1 \approx 40$ мм	Раздавливание плоскими накладками (бразильский метод)		$\sigma_p = 0,64 \frac{F}{d \cdot l}$	–
Цилиндр, куб или призма правильной формы, $h = 2d$	Сжатие плоскими гладкими или зубчатыми накладками, ППЭИ, пресс МС-1000		–	$\sigma_c = F/S$

Для снижения трудоемкости определения прочностных показателей испытания проводились в шахте на необработанных образцах. В выработках, где бурили скважины с отбором керна, прочностные свойства изучали на цилиндрических образцах полуправильной формы с раскалыванием клиньями (ГОСТ 21153.3–85), бразильским методом [8] и раскалыванием керна клиньями с цилиндрической выточкой и последующим сжатием зубчатыми инденторами по боковой поверхности под различными углами и слоистости [8]. Нагружение необработанных образцов производили с помощью портативного прибора ППЭИ, имеющего комплект сменных инденторов (сферические пуансоны, плоские шлифованные и зубчатые накладки, цилиндрические инденторы с зубчатой насечкой, клинья для раскалывания) и два

коаксиально расположенных поршня (большой и малый) что позволяет испытывать породы практически любой прочности в шахтных условиях.

Прочностные показатели на нестандартных образцах определяли с учетом масштабного эффекта, для этого результаты испытаний приводили к одной площади поверхности разрушения, равной 15 см^2 , с помощью масштабного коэффициента, определяемого по методике [8].

Обработка результатов испытаний пород производилась с применением вероятностно-статистического метода [9] и включала в себя: определение потребного количества испытаний; исключение грубых ошибок; определение средних величин, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации; определение доверительных интервалов с оценкой надежности; построение распределений; определение корреляционных связей. Требуемая надежность определяемых показателей обеспечивалась статистически за счет регулирования числа образцов, для этого использовался приближенный метод [10]. Выявление и исключение результатов, существенно отличающихся от основной совокупности показателей для данной пробы, при большом объеме выборки производилось по правилу " 3σ ", а при ограниченном количестве образцов (до 12) – с использованием упрощенной методики [11].

При большом числе испытаний для одной литологической разности, кроме вычисления статистических показателей, обработка данных включала проверку гипотезы о законе распределения изучаемого показателя. Сопоставление полученных результатов с прогнозными данными производилось сравнением средних или эмпирических распределений с целью установления принадлежности отдельных выборок к одной или различным генеральным совокупностям и оценки достоверности прогноза.

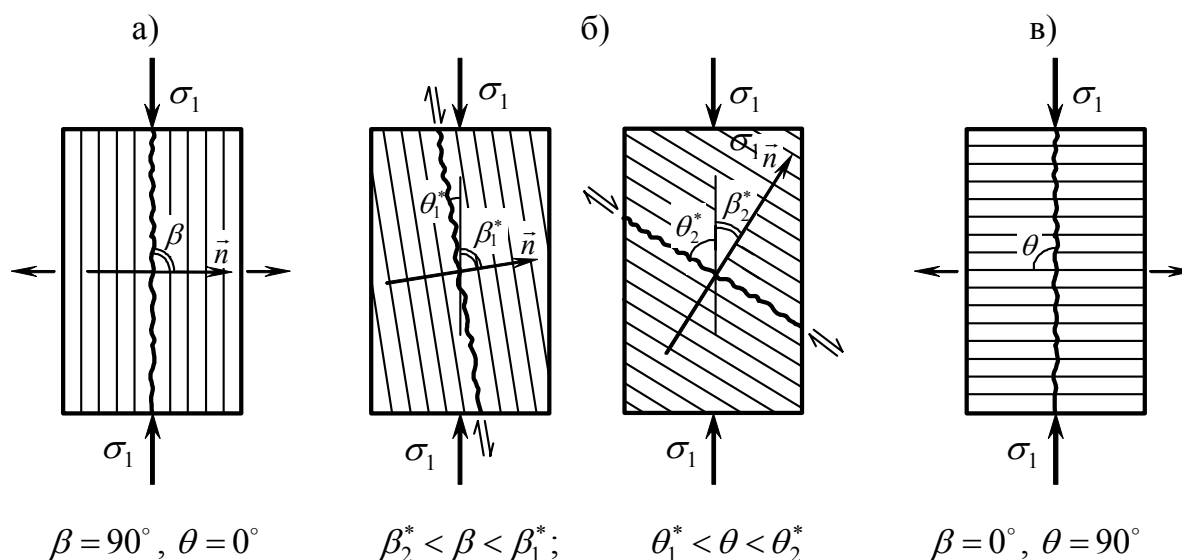


Рис. 1. Разрушение образцов, содержащих плоскости ослаблений, при одноосном сжатии

Исследования влияния слоистости на прочностные свойства показали, что поведение слоистых пород под нагрузкой подчиняются следующим закономерностям. При сжатии пород, содержащих плоскость ослабления, разрушение происходит анизотропным отрывом (за счет растягивающих деформаций) по дефектам структуры, если угол θ между слоистостью и действующим напряжением σ_1 находится в диапазоне от 0° до 9° (рис. 1, а); сдвигом по плоскостям ослабления при значении угла

$\theta = 10 \dots 60^\circ$ (рис. 1, б); изотропным отрывом по плоскостям, параллельным σ_1 , при значении угла $\theta = 61^\circ \dots 90^\circ$ (рис. 1, в). При изотропном отрыве прочность породы максимальна, а минимальные значения наблюдаются при сдвиговом механизме разрушения под углом $\theta = 20 \dots 40^\circ$.

При расколе слоистых образцов, независимо от ориентации слоистости, (рис. 2), поверхность разрушения формируется перпендикулярно растягивающим напряжениям σ_p . При этом в случае приложения нагрузки поперек поверхностей ослабления P^\perp при испытаниях получаем прочность породы на растяжение параллельно слоистости σ_p^\parallel (рис. 2, а), соответствующую прочности изотропной породы. И, наоборот, P^\parallel соответствует прочности перпендикулярно слоистости σ_p^\perp (рис. 2, б), которая характеризует сцепление по поверхности ослабления и имеет более низкие значения, т.е. $\sigma_p^\perp < \sigma_p^\parallel$. Если плоскость ослабления пересекает направление приложения нагрузки под углом $\theta_1^* < \theta < \theta_2^*$, однородность поля растягивающих напряжений нарушается, поэтому разрушение образца происходит частично отрывом и частично сдвигом по поверхности ослабления (рис. 2, в).

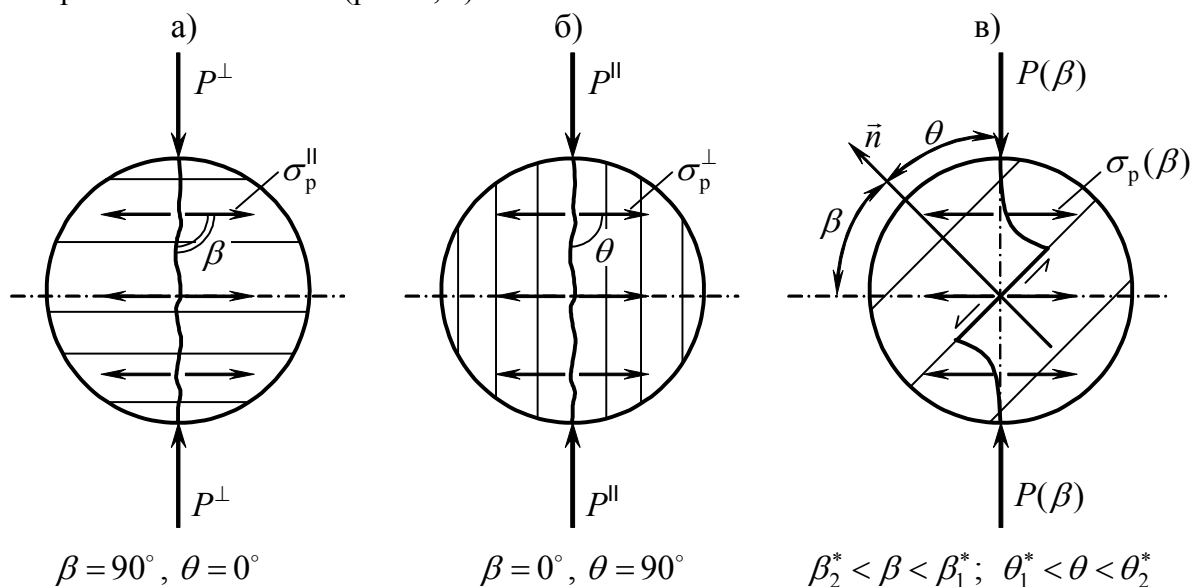


Рис. 2. Разрушение образцов, содержащих плоскости ослаблений, при расколе

Таким образом, проведенные испытания показали, что прочности породы на сжатие и растяжение зависят от угла приложения нагрузки по отношению к плоскости ослабления, т.е. наличие слоистости обуславливает прочностную анизотропию, которая характеризуется значительной изменчивостью прочностных показателей даже для одной и той же породы.

Свидетельством этому являются результаты представительных испытаний аргиллита в кровле пласта k_3^H шахты "Перевальская" ГХК "Луганскуголь". В пределах западного крыла шахтного поля прочность аргиллита варьирует в довольно значительных пределах. Так показатель на растяжение в направлении слоистости $\sigma_p^\parallel = 1,4-3,16$ МПа, а перпендикулярно – $\sigma_p^\perp = 0,73-1,6$ МПа; соответственно на сжатие вдоль напластования $\sigma_c^\parallel = 8,7-31,6$ МПа и перпендикулярно – $\sigma_c^\perp = 26,9-63,2$ МПа. По

прогноznым данным, без указания на ориентацию разрушающего усилия относительно слоистости, прочность на сжатие аргиллита находится в диапазоне $\sigma_c = 20-30$ МПа, тогда как действительный размах выборки составляет $\Delta\sigma_c = \sigma_c^{\max} - \sigma_c^{\min} = 54,5$ МПа. Если даже предположить, что средняя величина прогнозных данных близка к экспериментально установленной средней прочности, т.е. выборки имеют одинаковый центр распределения, то пренебрежение таким разбросом ведет к существенному снижению достоверности принимаемых решений.

Наличие слоистости превращает массив горных пород в анизотропную среду, имеющую неодинаковые прочностные свойства в различных направлениях, что необходимо учитывать в выражениях, формализующих условия прочности при численном моделировании геомеханических процессов. На примере испытания одной пробы аргиллита, залегающего в кровле пласта k_3^H на ш. "Перевальская", отмеченные закономерности поведения слоистых пород при их нагружении под различными углами к плоскости ослабления, демонстрируются на рис. 3 в виде совмещения паспорта прочности и полярной диаграммы прочности (штрих-пунктирная линия).

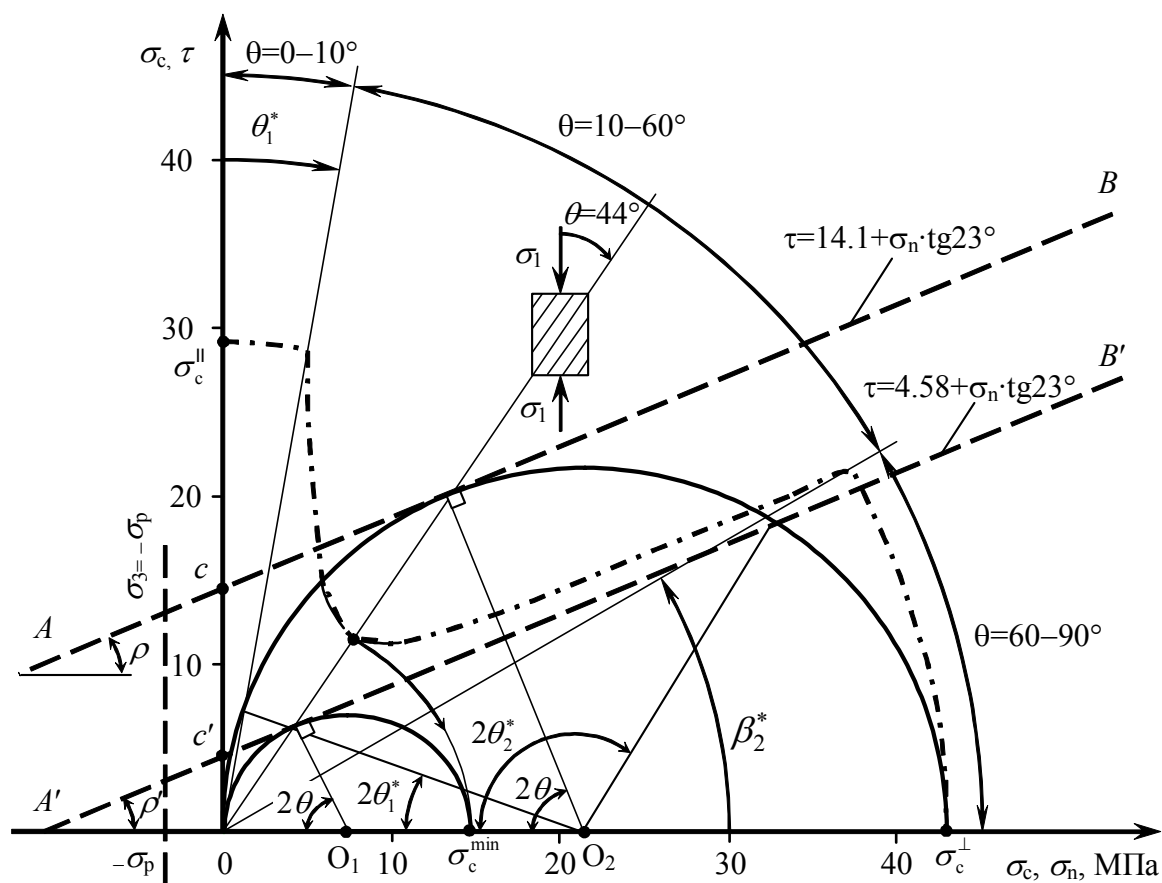


Рис. 3. Зависимость прочности анизотропного аргиллита от угла θ приложения нагрузки

Огибающая круга Мора при приложении нагрузки перпендикулярно плоскостям ослабления изображена на рис. 3 прямой АВ, а при разрушении по структурному дефекту-секущей А'В'. Если плоскости ослабления ориентированы под углом $10^\circ < \theta < 60^\circ$, то образец разрушается сдвигом. Если $2\theta < 2\theta_1^*$ или $2\theta > 2\theta_2^*$, то образец разрушается отрывом. При этом предельное состояние, реализующееся на поверхности

сдвига для изотропной породы и плоскости ослабления, запишется условием Кулона-Мора соответственно в виде:

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \rho \text{ (для АВ);} \\ \tau &= c' + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \rho' \text{ (для A'B')} \end{aligned} \quad (1)$$

где τ и σ_n – касательное и нормальное напряжения на площадке скольжения;
 c , ρ и c' , ρ' – сила сцепления и угол внутреннего трения соответственно в монолитной породе и по поверхности ослабления.

На полярной диаграмме прочности, отображающей предельную величину напряжения $\sigma_1(\theta)$, действующего под углом θ к плоскости ослабления, имеется три участка, где крайние (в виде окружностей) соответствуют отрыву, а вогнутый средний – условию прочности на плоскости ослабления. Выражения для главного напряжения $\sigma_1(\theta)$, обуславливающего сдвиговое разрушение в зависимости от ориентации плоскости ослабления, получено путем подстановки значений нормальных $\sigma_n = \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta$ и касательных $\tau = 0,5 \sigma_1 \cdot \sin 2\theta$ напряжений на произвольно ориентированной площадке в условие Кулона [6]:

$$\sigma_1(\theta) = 2c / (\sin 2\theta - 2 \sin^2 \theta \operatorname{tg} \rho). \quad (2)$$

Если порода однородна, то её прочность не зависит от угла θ , которую можно найти из (2) путем отыскания экстремума

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma_c^\perp = 2c \cos \rho / (1 - \sin \rho) \\ &\text{при } \theta = 45^\circ - \rho/2. \end{aligned} \quad (3)$$

Если угол θ больше угла трения ρ , то сила сопротивления по плоскости слоистости, независимо от σ_1 , препятствует сдвиговому разрушению, при этом знаменатель в (3) становится отрицательным.

Решая уравнение (2) относительно угла θ , получим выражение:

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sigma_1(\theta)}{2(\sigma_1(\theta) \operatorname{tg} \rho' + c')} + \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4c'}{(\sigma_1(\theta))^2} (c' + \sigma \operatorname{tg} \rho')} \right) \right). \quad (4)$$

Для определения c' и ρ' следует произвести два испытания под углами θ_1 и θ_2 в диапазоне сдвигового разрушения и найти соответствующие им значения $\sigma_1(\theta_1)$ и $\sigma_1(\theta_2)$. По результатам двух испытаний, решая систему уравнений, легко получить следующие выражения:

$$\operatorname{tg} \rho' = (\sigma_1(\theta_1) \sin 2\theta_1 - \sigma_1(\theta_2) \sin 2\theta_2) / (2(\sigma_1(\theta_1) \sin^2 \theta_1 - \sigma_1(\theta_2) \sin^2 \theta_2)); \quad (5)$$

$$c' = \sigma_1(\theta_1) \sigma_1(\theta_2) \times (\sin 2\theta_2 \sin^2 \theta_1 - \sin 2\theta_1 \sin^2 \theta_2) / (2(\sigma_1(\theta_1) \sin^2 \theta_1 - \sigma_1(\theta_2) \sin^2 \theta_2)). \quad (6)$$

Подставляя в (4) значения c' и ρ' , а также прочности породы по нормали к слоистости σ_c^\perp и параллельно плоскости ослабления σ_c^\parallel , можно определить граничные углы θ_1 и θ_2 . Следовательно, чтобы задать прочность породы на сжатие в произвольном направлении необходимо иметь шесть параметров: σ_c^\parallel , σ_c^\perp , ρ' , c' , θ_1 , θ_2 , – которые можно получить по результатам 4-х серий испытаний. Если принять граничные углы сдвигового разрушения равными $\theta_1 = 10^\circ$ и $\theta_2 = 60^\circ$, то полярную диаграмму прочности можно построить лишь по результатам испытаний пород вдоль (σ_c^\parallel) и перпендикулярно (σ_c^\perp) слоистости.

Таким образом, при имитации породного массива однородной моделью, к чему часто прибегают при исследовании геомеханических процессов методом конечных элементов, наличие слоистости следует учитывать как минимум путем снижения прочности по плоскостям ослабления. При этом отдельный слой породы в деформационном отношении предполагается изотропным и однородным. Модель нагружается при принятой внешней нагрузке, и для каждого конечного элемента

вычисляются, согласно принятой физической модели деформирования пород, главные фактические напряжения и углы, определяющие ориентировку главных площадок. Найденные таким образом, напряжения сравниваются с предельными значениями параметров прочности в направлении их ориентации. Для каждого элемента, тем самым, составляется отдельное условие прочности, куда подставляется предельное сопротивление породы в данной точке массива с учетом знака и ориентации главных напряжений, а также вида напряженного состояния.

Список литературы

1. Рац М.В. Структурные модели и инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. – 216с.
2. Кузнецов Г.Н. Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок //Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. – с. 30-44.
3. Фисенко Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений в связи с анализом их устойчивости // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. с.4–29.
4. Шашенко А.Н., Сургай Н.С., Парчевский Л.Я. Методы теории вероятностей в геомеханике. – К.: Техніка, 1994. – 214 с.
5. Литвинский Г.Г., Курман С.А. Методы и средства определения прочности затампированных пород // Крепление, поддержание и охрана горных выработок: Сб. науч. трудов ИГД СО АН СССР, ин-т угля СО АН СССР. – Новосибирск: 1985. – с.9–18.
6. Витке В. Механика скальных пород: Пер. с нем. – М.: Недра, 1990. – 439 с.
7. Рекомендации по комплексу методов определения механических свойств горных пород для инженерных методов расчета горного давления. – Л.: ВНИМИ, 1985. – 105 с.
8. Временная инструкция и методические указания по определению свойств горных пород портативным прибором ППЭИ. – Коммунарск: КГМИ, 1981.– 41 с.
9. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский М.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
10. Матвеев Б.В. О необходимом числе образцов для испытания свойств пород / Труды ВНИМИ. – Л.: ВНИМИ, 1966, вып. 60. с. 11–20.
11. Глушко В.Т., Киричанский Г.Т. Инженерно-геологическое прогнозирование устойчивости выработок глубоких угольных шахт. – М.: Недра, 1974. – 176 с.

© Бабиюк В. Г., Курман С. А., 2006

УДК 622.831

Канд. техн. наук СОЛОВЬЕВ Г. И., инж. ТОЛКАЧЕВ А. Ф., канд. техн. наук ФОРМОС В. Ф., инж. НЕФЕДОВ В. Е., инж. ПАНФИЛОВ Ю. Н. (ДонНТУ)

О МЕХАНИЗМЕ УПОРНО-ЖЕСТКОГО УСИЛЕНИЯ АРОЧНОЙ КРЕПИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Обеспечение устойчивости подготовительных выработок глубоких шахт, поддерживаемых в зоне активного влияния очистных работ, является одной из важных задач подземной угледобычи, предопределяющей эффективность ведения очистных и подготовительных работ, проветривания забоев, транспортирования добытого угля.

В связи с низкой надежностью применяемых арочных крепей их применение в условиях больших глубин разработки практически невозможно без использования дополнительных крепей усиления, которые позволяют создавать дополнительное силовое противодействие возрастающим с глубиной нагрузкам на основную крепь выработок. Значительно усугубляет неудовлетворительное состояние с устойчивостью выемочных выработок несоответствие параметров применяемых способов охраны условиям ведения горных работ [1, 2].

Предложенная сотрудниками ДонНТУ продольно-балочная крепь усиления (рис. 1), основанная на принципе продольно-жесткой консолидации комплектов