

10. Земисев В.Н. Расчеты деформаций горного массива. - М., Недра, 1973. 102 с.

11. Борисов А.А. Основы геомеханики горных массивов. -Л.: АГИ, 1989. -94 с.

## УДК 622.831

### ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ С ПОЗИЦИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

**д. т. н. Маевский В. С.** (Макеевский экономико-гуманитарный институт), **к. т. н. Ревва В. Н.,** **инж. Борисенко Э. В.** (Отделение физико-технических горных проблем ДонФТИ НАНУ), **к. т. н. Брюханов А. М.** (Государственная холдинговая компания "Октябрьуголь")

Устойчивость кровли в призабойном пространстве очистных забоев является определяющим фактором при выборе способа управления горным давлением, типа выемочного оборудования, характеристики, схемы расположения и передвижки крепи.

Как отмечалось ранее, существующие к настоящему моменту классификации кровель [1,2,3] не учитывают многих влияющих факторов. Наиболее существенным из них, на наш взгляд, являются неравнокомпонентность объемного напряженного состояния и дефектность структуры горных пород.

С позиции механики разрушения горных пород предлагается новый подход к оценке устойчивости кровли в окрестности горной выработки. Рассмотрим предельный, в смысле устойчивости кровли, случай. Горный массив принимаем упругим. В породах, обладающих свойствами пластичности, со временем напряжения могут релаксировать.

Учитывая сложность проблемы, ограничимся рассмотрением плоской задачи о напряженно-деформированном состоянии упругого горного массива в окрестности протяженной горизонтальной выработки кругового поперечного сечения, подверженной действию гидростатического напряжения  $\gamma H$ . Согласно [4] напряжения в окрестности выработки определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \gamma H - \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \\ \sigma_\phi &= \gamma H - \frac{P - \gamma H}{\rho^2}\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\sigma_r$  - радиальное напряжение;  
 $\sigma_\phi$  - тангенциальное напряжение;  
 $\rho = r/a$ ;

$r$  - расстояние от центра выработки до рассматриваемой точки;

$a$  - радиус выработки;

$P$  - реактивное сопротивление крепи.

Известно из механики разрушения Гриффитса, что процесс разрушения горных пород начинается с развития дефектов структуры, т.е. трещин различных размеров и ориентации.

В кровле выработки рассмотрим эффективную прямолинейную трещину длины  $2l$ , интегрально учитывающую множество реальных трещин в массиве и ориентированную под углом  $\psi$  к направлению действия  $\sigma_r$ . По берегам трещины равномерно расположены напряжения  $Q$  - давление флюида (воды, газа) на стенки трещины. Согласно [5] коэффициенты интенсивности напряжений  $k_I$  и  $k_{II}$ , характеризующие локальное поле упругих напряжений у тупиковой части трещин соответственно нормального отрыва и поперечного сдвига, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} k_I &= \sqrt{\pi l} [Q - \sigma_r \sin^2 \psi - \sigma_\theta \cos^2 \psi] \\ k_{II} &= \frac{1}{2} \sqrt{\pi l} [\sigma_r - \sigma_\theta] \sin 2\psi \end{aligned} \quad (2)$$

После подстановки (1) в (2)

$$\begin{aligned} k_I &= \sqrt{\pi l} \left[ Q - \left( \gamma H + \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right) \sin^2 \psi - \left( \gamma H - \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right) \cos^2 \psi \right] \\ k_{II} &= \sqrt{\pi l} \left[ \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right] \sin 2\psi \end{aligned} \quad (3)$$

В дальнейшем воспользуемся критерием локального разрушения [6] в виде

$$k_I^2 + k_{II}^2 = \frac{2E}{1-\nu^2} \Gamma \quad (4)$$

где  $E$  - модуль Юнга,

$\nu$  - коэффициент Пуассона,

$\Gamma$  - эффективная поверхностная энергия (ЭПЭ), энергия необходимая на образование нового элемента поверхности в породе, трещиностойкость материала, характеризующая сопротивляемость развитию в нем трещин.

После подстановки (3) в (4) получим

$$\begin{aligned} & \left[ Q - \left( \gamma H + \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right) \sin^2 \psi - \left( \gamma H - \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right) \cos^2 \psi \right]^2 + \\ & + \left[ \frac{P - \gamma H}{\rho^2} \right]^2 \sin^2 2\psi = \frac{2E\Gamma}{\pi l(1-\nu^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, получено критериальное соотношение, описывающее предельное состояние породного массива в окрестности горной выработки, учитывающее многие влияющие факторы, в том числе и трещиностойкость кровли. Критерий (5) может стать основой для оценки устойчивости кровли. Рассмотрим случай, когда в

кровле выработки находится песчаник, трещиностойкость которого изменяется в пределах от 5 до 100 Дж/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu=0,1-0,15$ , модуль Юнга  $E=(2,5-4,0) \cdot 10^3$  МПа,  $H=800$  м,  $\gamma H=20$  МПа,  $Q=0,7\gamma H$ , размер эффективной трещины  $l=(0,5-5,0) \cdot 10^{-3}$  м. Тогда из (5) получим зависимость реактивного сопротивления крепи в зависимости от уровня трещиностойкости пород кровли (рис.1). Отсюда следует, что трещиностойкость пород кровли существенно влияет на предельное состояние в окрестности горной выработки, определяет необходимый уровень реактивного сопротивления крепи, причем, чем выше уровень трещиностойкости пород кровли, тем необходимо меньшее значение реактивного сопротивления крепи, т.е. тем устойчивее выработка и ее кровля.

Таким образом, установлено, что эффективную поверхностную энергию, интегрально характеризующую сопротивляемость горных пород развитию в них трещин (трещиностойкость), необходимо использовать для оценки устойчивости кровли, как один из главных параметров.

Конечно, рассмотренная выше модель, позволяющая получить очень важный качественный результат, является несколько упрощенной. Реальная кровля представляет собой неоднородную (слоистую) среду. А, учитывая, то что неоднородность упругих свойств горных пород существенно уменьшает их трещиностойкость [5], в развитие вышеуказанного подхода предлагается использовать условие локального разрушения для эффективной трещины, находящейся на границе раздела различных упругих сред (границе слоев), в виде [6]:

$$\frac{(\mu_1 + \mu_2 \chi_i)(\mu_2 + \mu_1 \chi_{2i})}{\mu_1 \mu_2 [\mu_1(\chi_i + 1) - \mu_2(\chi_{2i} + 1)]} (k_i^2 + k_{2i}^2) = 8\Gamma, \quad (6)$$

где  $\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$ ,  $\chi_i = 3-4\nu_i$ ,  $i=1; 2$ ;

$E_i$  – модуль Юнга  $i$ -го слоя;

$\nu_i$  – коэффициент Пуассона  $i$ -го слоя;

$\Gamma$  – эффективная поверхностная энергия менее трещиностойкого слоя.

Располагая аналитическим решением соответствующей задачи о напряженно-деформированном состоянии в окрестности горной выработки, определяем коэффициенты интенсивности напряжений и подставляем в (6). В результате получаем условие предельного состояния горных пород, которое может быть принято за основу для разработки критерия устойчивости кровли в окрестности горной выработки. Нам представляется перспективным и принципиально новым указанный подход по проблеме устойчивости кровли.

Доказав необходимость использования параметра трещиностойкости при оценке устойчивости пород кровли постараемся его ввести в известные геомеханические соотношения. Согласно А. А. Борисову [7] наиболее важной для условий подземной разра-

ботки пластовых месторождений является работа основной кровли. В начальном режиме она работает подобно плите, заземленной на упругом четырехстороннем опорном контуре, представляющем совокупность краевых зон. Кровля деформируется подобно овальной, а не прямоугольной плите, поскольку ее зависание в углах являют собой жесткую заделку. Асимметрия изгиба объясняется влиянием деформаций ползучести. Детальное изучение деформаций основной кровли в плоскости пласта показывает, что деформации основной кровли охватывают значительные площади всех краевых зон по контуру ее обнажения. Начинается процесс расслоения пород кровли, происходит отделение пачки пород, нагружающей основную кровлю от вышележащей толщи.

Закономерности деформаций и разрушений основной кровли в режиме установившегося движения, заключается в ее периодических осадках и формируется следующим образом: по мере подвигания забоя происходит нарастание обнажений очередного блока основной кровли и одновременное прогрессирующее нарастание деформаций ее изгиба, которое при достижении предельного пролета, сменяется ударным, практически мгновенным его обломом, сопровождающийся очередной осадкой.

А. А. Борисов [7] установил закономерность справедливую для всех горных выработок, в том числе и для режима установившегося движения основной кровли и покрывающей толщи, а также и для естественных полостей в литосфере. Заключается она в следующем: квадрат предельного пролета кровли в любой плоскости поперечного сечения выработки прямопропорционален произведению квадрата ее

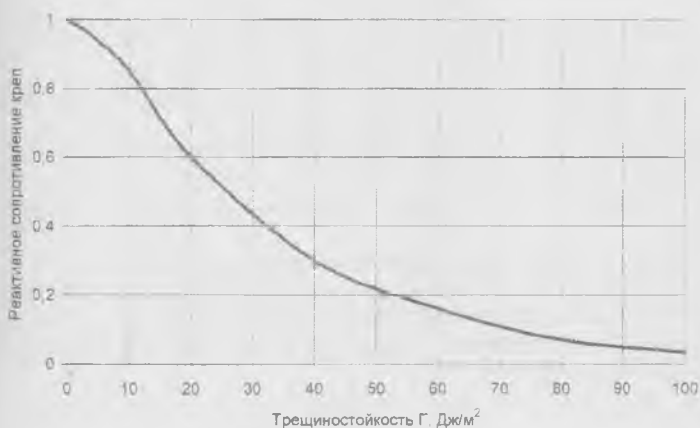


Рис. 1. Зависимость реактивного сопротивления крепи ( $P/\gamma H$ ) от трещиностойкости окружающих пород.

мощности на предел прочности при растяжении и обратно пропорционален интенсивности действующей на нее нагрузки. Величина несущей способности кровли – величина ее предельного пролета  $l_{пред}$  – определяется согласно [4] по формуле:

$$l_{пред}^2 = \frac{k_1 \varphi^2 h^2 |\sigma_p|}{q} \quad (7)$$

где  $k_1$  – расчетный безразмерный коэффициент;  
 $\varphi$  – коэффициент интенсивности защемления кровли на опорах;  
 $h$  – мощность кровли;  
 $|\sigma_p|$  – предел прочности кровли на растяжение;  
 $q$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки, действующей на кровлю.

Согласно критерия, вытекающего из уравнения Гриффитса-Орована для условий плоской деформации [8], разрушающее напряжение

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{2E\Gamma}{\pi(1-\nu^2)a}}, \quad (8)$$

где  $a$  – критическая длина трещины.

Полагаем  $\sigma_p = \sigma_I$  и подставляем (8) в (7), получим

$$l_{пред}^2 = \frac{k_1 \varphi^2 h^2}{q} \sqrt{\frac{2E\Gamma}{\pi(1-\nu^2)a}} \quad (9)$$

Из (9) следует, что с увеличением уровня трещиностойкости пород будет увеличиваться величина предельного пролета, а следовательно, повышаться устойчивость кровли. Сделаем обозначение

$l_{пред}^* = \frac{l_{пред}}{k_1 \varphi h}$ . Из (9) рассчитаем  $l_{пред}^*$  при различных  $\Gamma$ , при этом полагаем

$E=2 \cdot 10^3$  МПа,  $\nu=0,1$ ,  $a=5 \cdot 10^{-3}$  м,  $H=800$  м.

На рис. 2 представлена графическая зависимость  $l_{пред}^*$  от уровня трещиностойкости пород кровли.

Из графической зависимости следует, что можно выделить три области изменения  $\Gamma$ :

–  $\Gamma < 10$  Дж/м<sup>2</sup>, где наиболее существенно влияние  $\Gamma$  на пролет кровли;

–  $10 \leq \Gamma < 50$  Дж/м<sup>2</sup> – незначительное изменение  $l_{пред}$  от  $\Gamma$ ;

$\Gamma > 50$  Дж/м<sup>2</sup> –  $l_{пред}$  почти не изменяется. Таким образом, данный результат, с привлечением анализа влияния мощности и состояния кровли на ее устойчивость, может быть использован для создания классификации кровель.

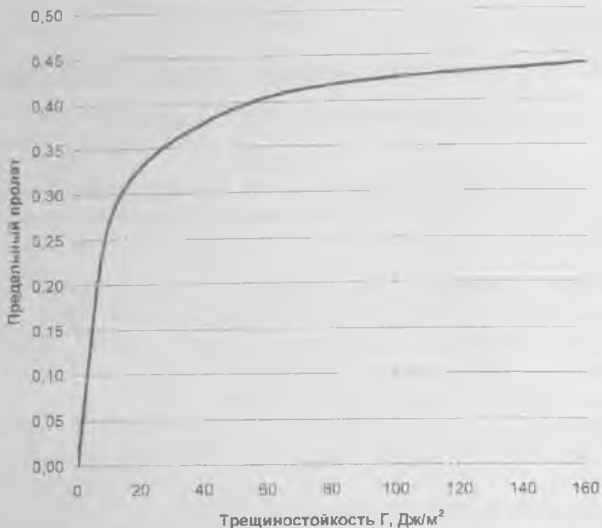


Рис. 2. Зависимость  $\dot{\gamma}_{\text{пред}} = \frac{\dot{\gamma}_{\text{пред}}}{k, \varphi h}$  от уровня трещиностойкости пород кровли Г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Управление кровлей и крепление очистных забоев с индивидуальной крепью /Е.П.Мужин, Е.П.Захаров, Е.Д.Дубов и др. -К.: Техника, 1994. -190 с.
2. Указания по управлению горным давлением в очистных забоях угольных шахт. -Л.: ВНИМИ, 1988. -280 с.
3. Управление горным давлением при разработке угольных пластов /Аносов О.С., Кузьменко Н.С., Кудравец Г.В. и др. -Донецк: Донбасс, 1990. -303 с.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. - М.: Недра, 1975. -272 с.
5. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. -К.: Наукова думка, 1989. -168 с.
6. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Недра 1974. -640 с.
7. Борисов А.А. Основы геомеханики горных массивов. -Л.: АГИ, 1989. -94 с.
8. Хеккель К.Техническое применение механики разрушения. - М.: Металлургия, 1974. -64 с.