

увеличивается с понижением горных работ за каждый цикл и является наибольшим в нижней части при доработке панели.

2. При управлении кровлей с закладкой выработанного пространства эффективная мощность пласта зависит от скорости перемещения очистного забоя, влияющей на конвергенцию боковых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов И.Ф., Ленихов А.Г., Курепин В.И., Курицын Б.И. Управление горным давлением в лавах крутых пластов Донбасса. Донецк, «Донбасс», 1972. – 150 с.
2. Степанович Г.Я. Управление горным давлением в лавах крутых пластов. – В сб.: О средствах и технологиях управления горным давлением, их особенностях и перспективах. – Донецк, «Донбасс», 1977. – 76 с.
3. Методика оценки основных технологических и технических параметров отработки крутых пластов штыковыми агрегатами / Ин-т геотехнической механики АН УССР. Сост.: Глушко В.Т., Яланский А.А., Курносов А.Т., Паламарчук Т.А. - Киев: Наук. Думка, 1981. – 56 с.
4. Иванов И.Ф. Комплексная механизация разработки тонких крутых пластов. – К.: Техніка, 1983. – 136 с.
5. Булат А.Ф., Курносов А.Т. Управление геомеханическими процессами при отработке угольных пластов. К.: Наук. Думка, 1987. – 200 с.
6. Жуков В.Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. Уголь Украины, №7, 2001. – С. 6 – 10.
7. Технології підземної розробки та процеси гірничих робіт в очисних вибоях крутих та крутопохилих вугільних пластів. Вид. 2, перероблене та доповнене. Навчальний посібник для вузів / Під редакцією С.С. Греббонкіна: Донецьк, КП „Регіон”, 2001. – 418 с.
8. Четверик М.С. Проблемные вопросы теории сдвижения массива горных пород, земной поверхности и управления деформационными процессами. Сб. науч. трудов НГУ, №17. Том 1, 2003. – С. 489 - 494.
9. Бубнова Е.А. Влияние направления развития очистных работ на параметры сдвижения и устойчивость горных выработок // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов // Институт геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2002, вып. 36. - С. 45 - 50.
10. Четверик М.С., Андрушук Е.В., Бубнова Е.А., Гаврюк Г.Ф. Сдвижение массива горных пород и влияние скорости подвигания очистного забоя на выделение метана. Сб. науч. трудов НГУ, №16. -2003. – С. 42 - 53.
11. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на угольных месторождениях. Утв. Минугольпром СССР. М.: Недра, 1981. – 288 с.

УДК 621. 831: 624.131(0.43.3)

Канд. техн. наук Д.Л. Васильев (ИГТМ НАН Украины)

КОНЦЕПЦІЯ РАЗРУШЕННЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНИХ ПОРОД ВДОЛЬ ОДНООСНОЇ СЖИМАЮЧОЇ НАГРУЗКИ

Запропоновано новий механізм повздовжньої руйнації зразків гірничих порід при одноосовому стисканні, заснована на гіпотезі максимальних ефективних дотичних напружень.

CONCEPT OF DESTROYING THE SAMPLES OF ROCK ALONG ONE-AXIS COMPRESSING LOAD

Offered new concept of longitudinal destroying the samples of rock on one-axis compression, based on the hypothesis maximum effective tangent strengths.

Проблема изучения трещинообразования горных пород имеет важное научное и практическое значение. Неразработанность теории трещинообразования в массивах горных пород сдерживает изучение механизма динамических проявлений горного давления, таких, как, например, стреляние, горные удары и

внезапные выбросы. Особенно невыясненным является вопрос разрушения горных пород вдоль действия сжимающей нагрузки.

В данной статье рассмотрим это интересное явление, так называемое «парадоксальное разрушение» (по Бриджмену), до сих пор не получившее убедительного теоретического объяснения. Трудность объяснения этого явления (растягивание вдоль сжимающей нагрузки) с позиций общей теории деформирования тела заключается в том, что «в направлении, перпендикулярном плоскости таких трещин, никаких нормальных растягивающих (как и вообще никаких) напряжений нет» [1]. Исследователи по этому поводу высказывают различные предположения. Большинство из них склоняются к мысли, что возникновение продольных трещин обусловлено отрывом, перпендикулярным к направлению продольной нагрузки [2]. Но тогда непонятно, откуда возникают растягивающие напряжения отрыва, когда, наоборот, образец сжимается по торцам силами контактного трения. Предположение о наличии отрыва пород, происходящего в условиях сжатия, является аномальным и по праву вызывает у многих исследователей недоумение. Согласно принятым представлениям о прочности твердого тела отрыв не должен происходить, если отсутствуют растягивающие напряжения, хотя мнение о наличии отрыва подкрепляют своим авторитетом некоторые ученые общей механики деформируемого тела. Мы будем исходить из положения, что все формы разрушения, в том числе и продольного, формируются максимальными эффективными касательными напряжениями.

Статья подготовлена в соответствии с заданием госбюджетной темы 1.3.5.74 ИГТМ НАН Украины «Механика горных пород, техника и технология добычи угля высоконагруженными лавами».

Составим схему напряжений и схему траекторий максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) при деформировании образца высотой h и шириной a (рис. 1). Контактные касательные напряжения τ_k направим против поперечной деформации. Для построения ТМЭКН по всему сечению образца центр осей XY расположим в его верхнем левом углу. Оговорим принятые правила знаков касательных напряжений: если внешняя нормаль к площадке не совпадает с направлением одной из осей координат, то положительное касательное напряжение направлено вдоль соответствующей оси, если внешняя нормаль к площадке идет по отрицательному направлению оси, то положительное касательное напряжение имеет обратное направление. Угол, который составляет направление касательной к ТМЭКН в данной точке и отсчитываемый по часовой стрелке, обозначим через α . Рассмотрим одну левую ТМЭКН, выходящую из левого угла. ТМЭКН, выходящие из трех других углов, являются симметричными. Значения знаков τ_k показаны на рис. 1, определенные согласно правилу знаков для касательных напряжений и физического смысла.

Для определения распределения нормальных и касательных напряжений на контактной поверхности используем известные дифференциальные уравнения равновесия:

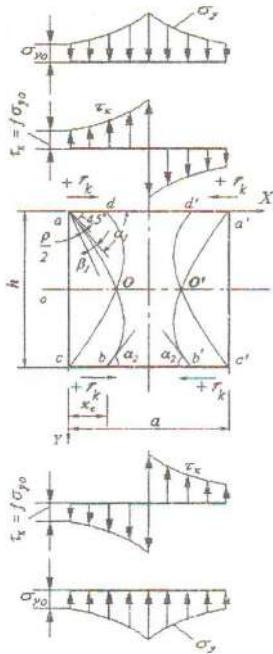


Рис. 1. – Схема контактных нагрузок и ТМЭKH в образце при наличии внешнего и внутреннего трения при $\alpha_2 > \pi/2$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Принимаем из известных положений сопротивления материалов, что напряжение σ_y сохраняется постоянным по высоте образца. Так как касательное напряжение τ_k на контактной поверхности обусловлено трением плиты о породу, на основании закона Амонтона имеем

$$\tau_k = f \sigma_y. \quad (2)$$

Здесь используем равенство [3]

$$d\sigma_x = d\sigma_y. \quad (3)$$

Из подстановки выражений (2) и (3) в первое уравнение системы (1) получено

$$\frac{d\sigma_y}{dx} = \frac{f\sigma_y}{h}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) получаем, что нормальные сжимающие напряжения определяются по выражению

$$\sigma_y = \sigma_{yo} e^{\frac{2f_k x}{h}},$$

где f_k – коэффициент контактного (внешнего) трения; σ_{yo} – нормальное напряжение в угловых точках образца.

Тогда

$$\tau_k = f_k \sigma_y = f_k \sigma_{yo} e^{\frac{2f_k x}{h}}.$$

При этом принято, что касательные напряжения от внешнего трения к поперечной оси уменьшаются по линейному закону

$$\tau_{xy} = \tau_k \left(1 - \frac{2y}{h} \right).$$

Эпюры нормальных и касательных напряжений на контактной плоскости приведены на рис. 1. В последующем покажем, что для нас важна особенность повышения значений контактных касательных напряжений к центру образца.

Теперь вернемся к формированию ТМЭКН. Численное значение максимальных эффективных касательных напряжений, равных сопротивлению материала сдвигу k в любой точке ТМЭКН, определяем по известным из курса прикладной механики твердого деформируемого тела формулам с учетом контактных касательных напряжений от внешнего трения за вычетом сопротивления материала сдвигу от внутреннего трения по Кулону [4]

$$k = \tau_\alpha - \mu \sigma_\alpha, \quad (5)$$

где τ_α – активные касательные напряжения на ТМЭКН от внешнего нагружения; μ – коэффициент внутреннего трения; σ_α – нормальные напряжения на ТМЭКН от внешнего нагружения.

Угол наклона в любой точке на ТМЭКН определяем по формуле [5]

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} + \beta_i, \quad (6)$$

где $\rho = \operatorname{arctg} \mu$; β_i – угол поворота ТМЭКН от внешнего трения в ее точке определения.

Угол α на выходе ТМЭКН обозначим через α_2 .

С учетом закономерностей распределения контактных касательных напряжений и их уменьшения вдоль оси образца параметр β_i при $\alpha_2 > \pi/2$ определяется по формуле

$$\beta_i = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_i \cos \rho}{\sin \rho - \sqrt{1 - b_i^2}}, \quad (7)$$

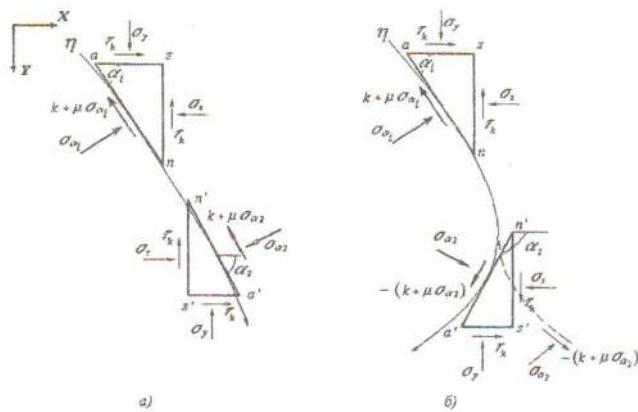
где

$$b_{ii} = \frac{f_k \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \sigma_{y0i} \cdot e^{\frac{2f_k x}{h}}}{k + \mu \sigma_{y0i} \cdot e^{\frac{2f_k x}{h}}}. \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что параметр $f_k \sigma_y \left(1 - \frac{2y}{h} \right)$ определяет значение касательного напряжения от контактного трения внутри образца. С учетом известных выражений τ_a и σ_a для формул (5) – (7) могут быть определены траектории трещин разрушения образца. Эти вопросы частично изложены в отдельных публикациях [5, 6].

Здесь важно рассмотреть физику действия контактного трения на равновесные треугольники на ТМЭКН при угле α , меньшем и большем $\pi/2$ (рис. 2). В верхнем левом углу касательное напряжение $\tau_k = f_k \sigma_{yo}$ всегда положительно и оттягивает треугольник от ТМЭКН, а на нижней плоскости при $\alpha_2 < \pi/2$ (рис. 2а) $\tau_k = f_k \sigma_y$ отрицательно и прижимает треугольник к ТМЭКН.

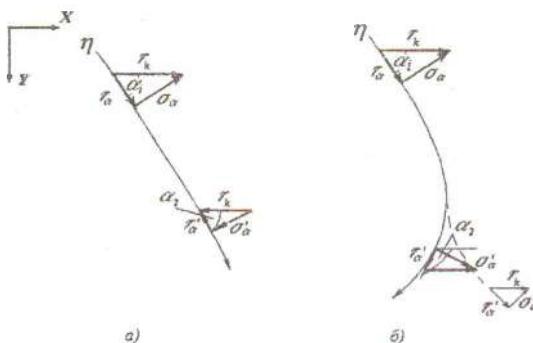
Наличие оттягивания равновесных треугольников не значит, что разрушение происходит по критерию максимальных растягивающих напряжений. Поперечные растягивающие нормальные напряжения σ_x в образце возникают только в отдельных случаях. Как правило, эти напряжения σ_x являются сжимающими. Они формируются при совместном воздействии внешних продольных и контактных нагрузок [6]. Положительные контактные касательные напряжения разгружают материал на ТМЭКН от продольного нагружения, уменьшая σ_x и увеличивая τ_a . В этом легко убедится из векторного



a) $\alpha_2 < \pi/2$; б) $\alpha_2 > \pi/2$

Рис. 2 - Равновесные треугольники на ТМЭКН:

построения (рис. 3), из разложения контактных касательных напряжений на составляющие τ_α и σ_α . При отрицательном же значении контактных напряжений увеличиваются σ'_α и уменьшаются τ'_α , вследствие чего возникает необходимость увеличения (для реализации разрушения образца) внешнего сжимающего продольного нормального напряжения σ_y . Такое состояние возникает при малых значениях контактного и внутреннего трения. При этих значениях не могут возникнуть условия продольного разрушения образцов



a) $\alpha_2 < \pi/2$; б) $\alpha_2 > \pi/2$

Рис. 3. - Схема разложения контактных касательных напряжений на составляющие компоненты τ_α и σ_α

пород. Тогда точками начала разрушения материала являются угловые точки образца, так как только в них действуют положительные контактные касательные напряжения, и на примыкающих к ним боковых поверхностях нет вообще напряжений.

Иная картина наблюдается при высоких значениях контактного и внутреннего трения. Если же в угловой точке всегда контактные касательные напряжения на ТМЭКН ξ положительны, то на выходе ТМЭКН они имеют положительный знак только при $\alpha_2 > \pi/2$. Тогда состояние нижнего равновесного треугольника становится аналогичным угловому. Он силами трения оттягивается от ТМЭКН, т.е. тогда в верхних и нижних зонах ТМЭКН касательные напряжения от внешнего трения имеют положительный знак. Здесь и возникает вопрос: откуда будет развиваться трещина? Трещина будет развиваться, очевидно, в той области, в которой абсолютное значение положительного касательного напряжения выше. Это значение выше в зоне выхода ТМЭКН, поскольку последняя находится в области возрастания контактных касательных напряжений от угла к центру образца, в частности, согласно экспоненциальному закону распределения контактных нормальных и касательных напряжений, что вытекает из решения дифференциальных уравнений равновесия (см. рис. 1).

Численно может быть определено значение параметра « β_i », при котором возникает продольная трещина, по условиям: $|\beta_i| > \pi/4 - \rho/2$ и $y > 0,5$.

Тогда угол β_i приобретает отрицательное значение, точка b переместиться в точку B и трещина пойдет по ТМЭКН снизу вверх в направлении Ba , так как необходимое для разрушения продольное нормальное напряжение в точке B существенно ниже (из условия экспоненциального распределения контактных касательных напряжений), чем в точке a . В этом случае трещина приобретает вид кривой BO (см. рис. 1) и идет до пересечения с поперечной осью образца.

Угол наклона α_i определяется по формуле $\alpha_i = \frac{5}{4}\pi + \frac{\rho}{2} + \beta_i$. В этом случае

трещина от точки s ($\alpha = \frac{5}{4}\pi$) постепенно отходит влево до точки пересечения с поперечной осью образца.

В виду симметричности нагружения образца процесс будет аналогичным и для других трех ТМЭКН. Таким образом, будут одновременно развиваться четыре трещины BO , DO , $D'O'$ и $B'O'$ (рис. 4), которые раскалывают образец на три продольные части четырьмя сомкнувшимися попарно трещинами.

Тогда для ТМЭКН в формуле (8) знак поменяется на обратный при $\beta_i > \pi/4 - \rho/2$ и $y > 0,5$.

Для сравнения приведем центральную часть образца, полученную теоретическим путем, с осколками продольного разрушения (рис. 5), приведенными в работе [7]. Как видно, аналогия довольно точная.

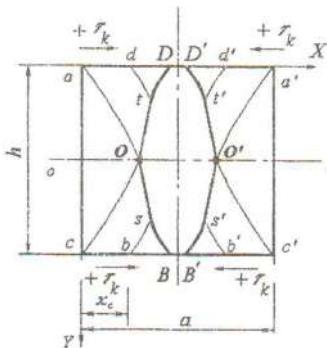
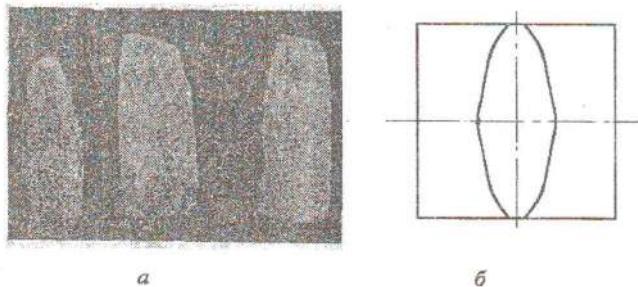


Рис. 4 – Продольная форма разрушения, построенная аналитически



а – экспериментальная (по Барону А.И.); б – аналитическая

Рис. 5 – Продольная форма разрушения образцов горных пород

Таким образом, концептуально утверждаем, что продольное разрушение образцов горных пород при их одноосном сжатии происходит не за счет отрыва (растягивающие поперечные нормальные напряжения в сжатом силами контактного трения образца возникнуть не могут), а за счет максимальных эффективных касательных напряжений и развивается по их траектории.

Следует подчеркнуть, что экспериментаторы [7, 8] наблюдают различные формы разрушения. Л.И. Барон по этому поводу писал, что систематизация и анализ материалов испытаний позволяет сделать вывод о несомненном наличии четырех разных форм разрушения монолитных (не имеющих видимых трещин и выраженной слоистости) породных образцов при испытаниях на одноосное сжатие: пирамидальная, разрушение по диагонали, продольная, взрывоподобная. Что касается продольной, то он указывает, что с увеличением высоты образцов продольная форма разрушения наблюдалась все более часто и, наоборот, при испытаниях кубических образцов она встречалась редко, что соответствует нашим рассуждениям.

Надо сказать, что исследователи каждую форму или группу форм разрушения объясняют различными критериями прочности. Мы же утверждаем, что все формы разрушения формируются по траекториям максимальных эффективных касательных напряжений.

В последующих исследованиях предстоит разработать метод расчета предела прочности образцов на одноосное сжатие при продольном их разрушении, а также изучить запредельные кривые диаграмм «продольное напряжение–деформация».

Вывод. Разработана новая концепция продольного разрушения образцов горных пород, основанная на формировании траекторий максимальных эффективных касательных напряжений (линий скольжения), которая, в свою очередь, позволяет с единных позиций объяснить все наблюдаемые формы разрушения образцов горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – М.: Физматгиз, 1975. – 832 с.
2. Одинцов В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М: ИПКОН РАН, 1966. – 166 с.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. – М.: Мир, 1975, т. 2. – С. 336 – 520.
5. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Метод расчета предела прочности горных пород на одноосное сжатие при линейной связи между контактными напряжениями // Сб. научн. тр. Геотехническая механика. Выпуск 42, – ИГТМ: Днепропетровск, 2003 – С 73 – 80.
6. Васильев Д.Л. Закономерности формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород // Сб. научн. тр. Геотехническая механика. Выпуск 29, – ИГТМ: Днепропетровск, 2001 – С. 17 – 21.
7. Барон Л.И. Экспериментальное определение коэффициентов крепости горных пород по шкале М.М. Протодьяконова путем испытания буровых кернов на раздавливание. Сб научн. тр. // Разрушение углей и горных пород. – М.: Углехимиздат, 1958. – С. 103 – 125.
8. Барон Л.И. Горнотехническое породоведение. – М.: Наука, 1977. – 324 с.

УДК 550.834: 622.12

Канд. техн. наук А.А. Глухов (УкрНИМИ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ШАХТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Розглянуто варіант скінчено-різницевого методу моделювання процесу розповсюдження сейсмічних коливань стосовно до задач шахтної сейсморозвідки.

MATHEMATICAL MODELING OF SEISMIC WAVES IN TASKS OF MINING SEISMIC EXPLORATION

Version of finite-difference method for modeling of seismic waves propagation process is considered of mine seismic exploration

Новейшие методики исследования нарушений угольных пластов основаны на предварительном математическом моделировании процесса распространения сейсмических волн [1]. Модель для расчетов выбирается на основе априорных данных о горно-геологических условиях залегания пласта и о нарушении. Итоги моделирования принимаются в расчет при выборе