

УДК 622.411.332:533.17

В. Г. Смирнов, к.ф.-м.н. (КузГТУ)
 В. В. Дырдин, д.т.н., профессор (КузГТУ)
 Г. Кемерово

ВОЗМОЖНАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОНЫ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ВБЛИЗИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВЫРАБОТКИ

При разработке рудных месторождений возникает явление зональной дезинтеграции горных пород [1], выражающееся в том, что вокруг цилиндрической выработки образуются области разрушения и трещиноватости, чередующиеся с неразрушенными участками массива. В плоскости, перпендикулярной оси забоя, области разрушения представляют собой концентрические окружности, отстоящие друг от друга на расстояния, соизмеримые с радиусом выработки. Образование областей разрушения необходимо учитывать при проектировании способов крепления выработки. Зональная дезинтеграция горных пород вблизи цилиндрической выработки создает угрозу безопасного ведения горных работ и увеличивает затраты на крепление кровли выработки. В настоящее время идут дискуссии относительно потенциальных механизмов, приводящих к формированию подобных зон разрушения.

Теоретической основой проектирования безопасных технологий ведения горных работ является исследование механизма формирования зон дезинтеграции в породах, окружающих выработку. Одним из инструментов изучения напряженного состояния массива выработки является теория линейных упругих деформаций. В данной теории, при наложении нескольких сил допустимо рассчитывать вклад каждой силы, затем суммировать получившиеся напряжения.

На вмещающие породы вблизи выработки действуют силы горного давления, создающие направленную вдоль оси выработки компоненту напряжений σ , величина которой имеет значение порядка γH , т.е. величины горного давления.

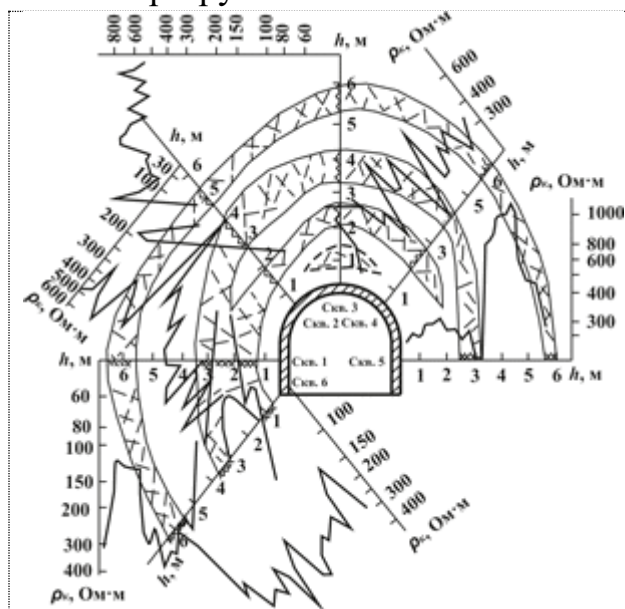


Рис. 1. Зональная дезинтеграция горных пород [1]

Кроме этого (рис. 2), горное давление, действующее впереди фронта забоя на краевую часть угольного пласта, переносит свое действие на вмещающие породы, окружающие выработку. При этом возникают сдвиговые напряжения, действующие на вмещающие породы. Возможность формирования при этом зоны дезинтеграции, т.е. зоны повышенной трещиноватости, зависит от величины упругих и неупругих напряжений, действующих в сплошной среде. Образование трещин происходит в областях пласта, где возникает растягивающее напряжение, причем ориентация трещин перпендикулярна растягивающему напряжению или самому малому по величине главному значению сжимающего напряжения.

Величину тангенциальных (сдвиговых) напряжений можно оценить исходя из баланса сил трения и горизонтальной проекции сил горного давления, спроецированных на ось забоя: $\tau = \gamma H(R/2L)$, где R – радиус выработки или радиус поверхности, на которую перераспределяются данные напряжения, а L – размер зоны влияния выработки. Сдвиговые напряжения имеют наибольшее значение впереди фронта забоя на границе с вмещающими породами. Сдвиговые напряжения убывают, но остаются не нулевыми на некотором расстоянии вглубь массива вмещающих пород. Для рудных месторождений зона влияния выработки достаточно мала, так что в этом случае величина сдвиговых напряжений может быть сравнима или даже превосходить напряжения γH , действующие в ненарушенном пласте.

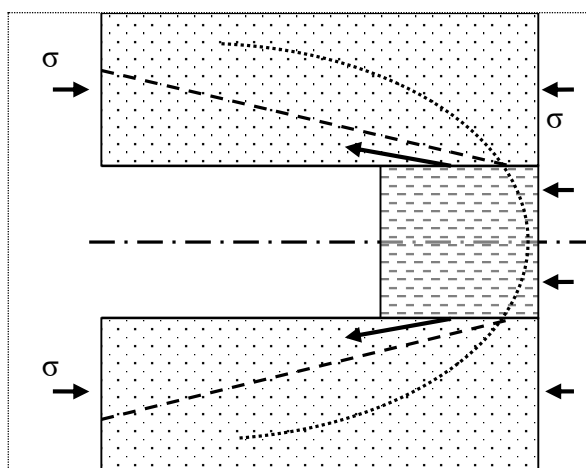


Рис. 2. Схема напряжений вблизи цилиндрической выработки

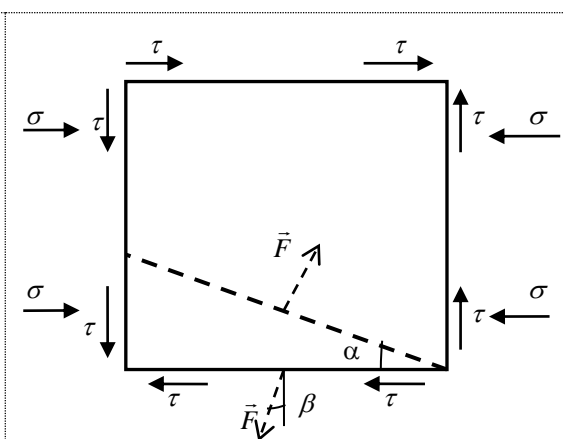


Рис. 3. Схема напряжений в небольшом участке массива

Рассмотрим суперпозицию сдвиговых и сжимающих напряжений (рис. 3), для чего в горной породе, прилегающей к выработке, выделим куб, достаточно маленький, чтобы можно было считать напряжения вдоль каждой его грани постоянными. Сдвиговые деформации создаются тангенциальными напряжениями τ , приложенными вдоль каждой из граней [2], как показано на рис. 3. Куб выбран так, что тангенциальные напряжения,

перпендикулярные плоскости рисунка, отсутствуют, а нормальные напряжения, перпендикулярные рисунку, одинаковы. Дополнительно к сдвиговым напряжениям куб подвержен (рис. 3) горизонтальным сжимающим напряжениям.

Через ребро куба проведем плоскость под углом α к одной из граней и рассмотрим полученную треугольную призму. Призма находится в равновесии, значит сила, действующая на наклонную грань, равна (противоположна по направлению) векторной сумме сил, действующих на остальные грани [2]. По поверхностям, совпадающим с участками граней куба, действуют силы: горизонтальная $F_y = \tau a^2 - \sigma a^2 \operatorname{tg} \alpha$, вертикальная $F_z = \tau a^2 \operatorname{tg} \alpha$, угол между горизонтальной осью и вектором силы удовлетворяет условию: $\operatorname{tg} \beta = \frac{F_y}{F_z} = \frac{\tau - \sigma \operatorname{tg} \alpha}{\tau \operatorname{tg} \alpha}$.

Определим положение грани, при котором действующая на эту грань сила будет нормальна к ее плоскости, т. е. найдем плоскость, в которой отсутствуют касательные напряжения. Эта плоскость соответствует ориентации растущих трещин. Из условия $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \beta$ получим квадратное уравнение $(\operatorname{tg} \alpha)^2 + \frac{\sigma}{\tau} \operatorname{tg} \alpha - 1 = 0$. Решив уравнение, видим, что тангенс угла зависит от τ/σ – отношения сдвиговых и нормальных напряжений:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{2\tau} \left(\sqrt{1 + 4(\tau/\sigma)^2} - 1 \right), \quad (1)$$

Величина растягивающих напряжений на этой плоскости:

$$\sigma' = \frac{F}{S} = \frac{a^2 \sqrt{(\tau - \sigma \operatorname{tg} \alpha)^2 + (\tau \operatorname{tg} \alpha)^2}}{a^2 \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \alpha)^2}} = \tau \sqrt{1 + (\sigma/\tau) \operatorname{tg} \alpha \frac{(\sigma/\tau) \operatorname{tg} \alpha - 2}{1 + (\operatorname{tg} \alpha)^2}} \quad (2)$$

Проанализируем полученные выражения. Можно считать, что на некоторой глубине массива, где сдвиговые напряжения убывают, распределяясь на все большую поверхность, выполняется соотношение $\sigma \gg \tau$ – сжимающие напряжения гораздо больше сдвиговых. Из (1) следует: $\operatorname{tg} \alpha \approx \tau/\sigma \ll 1$, т. е. угол близок к нулю и ориентация образующихся трещин практически параллельна оси выработки. При этом величина растягивающих напряжений (2) будет: $\sigma' = \tau(\tau/\sigma)$, это значение не очень велико, но в случае, если в данной области есть зачатки трещин, или они образовались на предыдущих этапах, то даже не очень большие растягивающие напряжения способны поддерживать рост зоны дезинтеграции. Подобные явления справедливы для любого радиального

направления, поэтому данный процесс приводит к образованию цилиндрического участка зоны дезинтеграции, ось которой совпадает с осью выработки.

При приближении из глубины вмещающих пород к границе выработки отношение τ/σ возрастает, угол между фронтом забоя и ориентированными трещинами (1) стремится к величине 45° . Например, при отношении касательных и нормальных (1) напряжений равном единице ($\tau/\sigma = 1$) угол равен 42° , а величина растягивающих напряжений σ' становится сравнима с γH – горным давлением, несколько превосходя его. Это значительно больше предела прочности на растяжение. На этом этапе происходит зарождение магистральных трещин, образующих затем зону дезинтеграции. Трещины, зарождаясь на границе выработки и вмещающих пород вблизи фронта забоя, сначала ориентированы под острым углом к оси выработки, затем, в процессе углубления в кровлю и борта выработки угол между плоскостью трещин и осью выработки уменьшается практически до нуля. Таким образом, образуется цилиндрический участок зоны дезинтеграции в глубине массива. На рис. 2 точками показано возможная эволюция системы трещин, развивающейся по описанному сценарию. Образующиеся трещины создают вокруг себя зону разгрузки, так что после зарождения одной системы трещин – зоны дезинтеграции, следующая зона возникает на некотором удалении от первой и в процессе прорастания образуются несколько зон дезинтеграции, имеющих форму концентрических кругов.

Исследование механизма зарождения зон дезинтеграции и прогноз областей разрушения вмещающего массива необходим при проектировании оптимальных схем ведения подземных работ и крепления горных выработок.

1. Опарин В. Н. Зональная дезинтеграция горных пород / В. Н. Опарин, А. П. Тапсиев, М. А. Розенбаум, В. Н. Рева, Б. П. Бадтиев, Э. А. Тропп, А. И. Чанышев // Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 2008. – 278 с.

2. Седов, Л. И. Механика сплошной среды : в 2 т. Т. 2. – 6-е изд., стер. / Л. И. Седов. – Санкт-Петербург : Лань, 2004. – 560 с.