

УДК 622.831

К.А. Филимонов

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМОГО МАССИВА

Одной из важнейших задач горной механики является описание процесса разрушения подрабатываемого массива горных пород при очистной выемке угля. От параметров разрушения подрабатываемого массива кровли во многом зависит безопасность работ и производительность очистного забоя. При ведении очистных работ в подрабатываемом массиве возникает напряженное состояние, способствующее его разрушению, а именно зарождению и развитию секущих трещин, отделяющих блоки обрушения кровли от массива. Можно считать доказанным, что для прорастания трещины при разрушении тела (особенно размежевыми в несколько метров) требуется некоторое время, а секущая трещина раскалывается по телу с некоторой скоростью. Поэтому для более правильного описания процесса разрушения подрабатываемого массива целесообразно использовать модель, учитывающую время прорастания секущих трещин в пределах мощности обрушающегося слоя.

В настоящее время не существует единого мнения о механизме развития трещин в теле. Наиболее признанными можно считать теорию Гриффитса [1] и ее последующее развитие в трудах других ученых [2,3], а также кинетическую концепцию прочности С.Н. Журкова [4,5,6]. Применение концепции С.Н. Журкова для описания процесса разрушения подрабатываемого массива представляется наиболее целесообразным по следующим причинам. Во-первых, это единственная широко опробованная на практике теория, включающая в себя понятие времени до разрушения тела (долговечности) при некотором напряженном состоянии. Во-вторых, согласно этой концепции разрушения тела может происходить при напряжениях, меньших предельных для данного тела. Другими словами, процесс прорастания трещины рассматривается не как мгновенный, происходящий при достижении предела прочности породы (что практически не осуществимо для многометровой толщи пород, так как напряжения значительно убывают с ростом вертикального удаления от пласта), а как протекающий во времени процесс, длительность которого зависит от напряженного состояния массива.

В процессе развития кинетической концепции прочности многочисленными опытами установлено [7], что процесс разрушения происходит аналогично как в лабораторных образцах, так и в крупномасштабных объектах [8]. Однако для определения долговечности тел иного масштабного уровня, чем лабораторные образцы классических опытов, необходимо использование масштабного

коэффициента. Кроме того, доказано [9], что уравнении С. Н. Журкова, полученное изначально для условий одноосного сжатия, можно использовать и в случае сложного напряженного состояния. При этом в качестве действующего напряжения можно использовать интенсивность напряжений  $\sigma_i$  [10]. Тогда применительно к геологическому слою пород кровли (см. рис.), уравнение С. Н. Журкова можно представить в виде:

$$\tau_{pi} = \tau_0 \cdot L_c \cdot \exp\left[\frac{U_0 - \gamma' \cdot \sigma_i}{k \cdot T}\right] \quad (1)$$

где  $\tau_{pi}$  – время образования секущей трещины;  $\tau_0 = 10^{13}$ , с (период атомных колебаний);  $L_c$  – масштабный коэффициент;  $U_0$  – энергия активации, Дж;  $\gamma'$  – структурно-чувствительный коэффициент, м<sup>3</sup>;  $\sigma_i$  – интенсивность действующих в массиве напряжений, МПа;  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \times 10^{-23}$  Дж/ К°);  $T$  – абсолютная температура породы в массиве, К°.

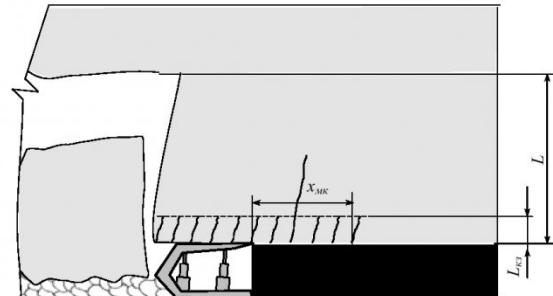


Схема разрушения подрабатываемого массива

Масштабный коэффициент  $L_c$  определяется по формуле:

$$L_c = L/\ell, \quad (2)$$

где  $L$  – мощность геологического слоя пород в кровли, для которого необходимо определить  $\tau_{pi}$ , м;  $\ell$  – высота образцов породы, на которых определялись значения  $U_0$  и  $\gamma'$ , м.

Все составляющие формулы (1), кроме  $\sigma_i$ , можно считать постоянными в пределах одного выемочного поля. Таким образом, очевидно, что процесс разрушения подрабатываемого массива зависит главным образом от напряженного состояния массива. Анализ напряженного состояния в кровле пласта [10] показывает, что величины напряжений даже в пределах геологического слоя мощностью до 10 м изменяются в пределах одного порядка. Кроме того, при подвигании очистного забоя происходит изменение напряженного со-

стояния подрабатываемого массива, что, несомненно, отразится на процессе развития секущей трещины. На основе вышесказанного и расчета напряженного состояния, приведенного в [10] процесс разрушения подрабатываемого массива можно представить следующим образом.

До некоторого вертикального удаления от пласта  $L_{kz}$  максимум касательных напряжений превышает предел прочности пород на сдвиг. Поэтому на расстоянии  $x_{mk}$  произойдет разрушение и зарождение трещин (см. рис.). Будем считать, что напряженное состояние неизменно, пока не произойдет выемка очередной стружки угля очистным комбайном. Следовательно, в течение этого времени неизменной остается интенсивность напряжений  $\sigma_t$ . Долговечность некоторого слоя породы мощностью  $L$  будет равна  $\tau_{pi}$ . Тогда зная мощность этого слоя, определяем скорость развития секущей трещины при данном напряженном состоянии массива:

$$V_i = L / \tau_{pi}, \quad (3)$$

где  $V_i$  – скорость развития секущей трещины при данном напряженном состоянии массива, м/с.

Зная скорость развития трещины можно определить ее приращение в длине по истечении какого-либо времени  $t$ :

$$\Delta l_{mpi} = V_i \cdot t, \quad (4)$$

где  $\Delta l_{mpi}$  – приращение трещины в длине, м.

Очевидно, что при подвигании очистного забоя напряженное состояние в плоскости трещины изменится. Это может произойти до того, как трещина разовьется на всю мощность слоя  $L$ .

Логично полагать, что время  $t$  в формуле (4) есть продолжительность одного цикла по выемке угля. Очевидно, что возможная длина трещины  $L_{mp}$  по истечении какого-либо промежутка времени (например суток или смены), зависит от того, сколько раз менялось напряженное состояние (при этом меняется скорость развития трещины  $V_i$ ) и как долго находится плоскость образования секущей трещины в том или ином напряженном состоянии. Другими словами, величины возможных приращений  $\Delta l_{mpi}$  зависят от скорости подвигания забоя. Следовательно, в расчетах необходимо использовать предполагаемую скорость подвигания забоя. Тогда время  $t$  в формуле (4.4) будет равно:

$$t = \frac{1440 \cdot r}{V_{cym}}, \quad (5)$$

где  $t$  – продолжительность очистного цикла, мин;  $r$  – ширина захвата очистного комбайна, м;  $V_{cym}$  – предполагаемая скорость подвигания очистного забоя, м/сут.

Длина секущей трещины в какой-либо момент времени будем рассматривать как сумму возможных приращений, накопленных к этому моменту времени:

$$L_{mp} = \sum \Delta l_{mpi}, \quad (6)$$

Очевидно, что образования секущей трещины завершиться, когда выполнится условие:

$$L_{mp} \geq L, \quad (7)$$

Из выше описанной модели следует теоретическая вероятность того, что зарождение и развитие трещин может происходить впереди очистного забоя при каждом изменении напряженного состояния (подвигании забоя). Однако очевидно, при относительно постоянной скорости подвигания очистного забоя расстояние между секущими трещинами в слоях кровли (шаг обрушения) мощностью  $(2-3)m$  и более значительно превышает ширину захвата очистного комбайна. Предположим, что зародышевые трещины небольшой длины могут действительно образовываться при каждом подвигании забоя на расстоянии  $x_{mk}$ . Длина эти трещин, очевидно, будет равна вертикальному удалению от пласта, на котором действуют касательные напряжения, превышающие предел прочности породы на сдвиг ( $L_{kz}$ ). Возможно, это объясняет наличие над пластом относительно сильно разрушенной толщи пород небольшой мощности даже при наличии труднообрушающейся кровли, а так же наличие значительных вывалов и куполов при менее залегании над пластом менее прочной ложной и непосредственной кровли.

Однако очевидно, что не все эти зародышевые трещины продолжают развиваться дальше. Возможно, это объясняется представлением о свободном разрушении тел, развиваемым в работах Е.И. Шемякина [11]. Согласно теории Е.И. Шемякина, полное разрушение пород происходит тогда, когда освобождаемая внутренняя упругая энергия горных пород превышает энергию поверхности вновь образованных трещин, отделяющих эти породы от основного массива. Другими словами упругая энергия массива вначале расходуется на развитие трещин, отделяющих один блок некоторого объема от массива, а после его образования – на отделение следующего блока. Это позволяет предположить, что некоторая секущая трещина может прорастать только тогда, когда предыдущая образовалась на всю мощность слоя и произошло отделение предыдущего блока от массива.

Расчет параметров трещинообразования описанным методом содержит много формул и производится на основе 12 исходных данных. Это, конечно, предполагает использование ЭВМ. Для выполнения расчетов была разработана специальная программа на основе Microsoft Excel с применением редактора Visual Basic.

В разработанной модели процесса трещинообразования учитываются следующие исходные данные:

- 1) скорость подвигания очистного забоя,  $V_{cym}$ , м/сут;
- 2) мощность пласта,  $m$ , м;
- 3) глубина ведения очистных работ,  $H$ , м;
- 4) удельный вес пород,  $\gamma$ , Н/м<sup>3</sup>;
- 5) угол полных сдвигений пород,  $\varphi_3$ , град;

- 6) коэффициент, учитывающий неполную подработку,  $\kappa$ ;
- 7) прочность куба угля при одноосном сжатии,  $\sigma_{куб}$ , Па;
- 8) коэффициент Пуассона для исследуемой породы,  $\nu$ ;
- 9) мощность геологического слоя пород в кровли,  $L$ , м;
- 10) энергия активации для исследуемой породы,  $U_0$ , Дж;
- 11) структурно-чувствительный коэффициент для исследуемой породы,  $\gamma'$ , м<sup>3</sup>
- 12) абсолютная температура породы в массиве на заданной глубине ведения очистных работ,  $T$ , К°.

С учетом вышеперечисленных данных модель позволяет определить численно:

- 1) параметры распределения опорного давления впереди очистного забоя;
- 2) параметры распределения главных, нормальных и касательных напряжений в подрабатываемом массиве;
- 3) относительное положение очистного забоя и плоскости образования секущей трещины в подрабатываемом слое кровли при отсутствии подвигания очистного забоя;

4) относительное положение очистного забоя и плоскости образования секущей трещины в подрабатываемом слое кровли при различных скоростях подвигания очистного забоя;

5) время развития секущей трещины в пределах подрабатываемого слоя пород кровли при отсутствии подвигания очистного забоя;

6) время развития секущей трещины в пределах подрабатываемого слоя пород кровли при различных скоростях подвигания очистного забоя;

7) граничное значение скорости подвигания очистного забоя, при превышении которого возникает высокая вероятность зависания больших пролетов подрабатываемого слоя кровли;

8) длину секущей трещины в любой момент времени при любой скорости подвигания забоя.

Результаты расчетов выполненных по данной модели для условий Кузбасса будут представлены в дальнейших публикациях. Следует отметить, что параметры обрушения кровли и критические значения скоростей подвигания очистных забоев по фактору кровли, полученные при расчетах, вполне сопоставимы с фактическими значениями этих величин известными для некоторых шахт Кузбасса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffits A. A. The phenomena of rapture in solids / Vol. 221, A 587, 2 October, 1920. – P. 163–198.
2. Orowen E. Dislocations in details // AJME/ New York, 1954.
3. Irwin G. R. Linear fracture mechanics, fracture transitions and fracture control // Engineering fracture mechanics. – 1968. – Vol. 1, №2. – P. 241–257
4. Журков С.Н. Кинетическая концепция твердых тел// Вестник АН СССР,1968.– №3.– С. 46–52.
5. Журков С.Н. Дилатоновский механизм прочности твердых тел// ФТТ.– 1983. –Т. 25. – вып.10.–С. 3119–3123.
6. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР.–1981.–Т.259.№6.–С. 1350–1353.
7. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР.–1981.–Т.259.№6.–С. 1350–1353.
8. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР, 1979.–Т.247.–№4.
9. Векслер Ю. А. Долговечность горных пород при сжатии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1979. – №3. – С. 71–76.
10. Филимонов К.А. Исследование напряженного состояния подрабатываемого массива // Вестн. КузГТУ. – 2003. – № 5. С. 22–25.
11. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН СССР. – 1988. – Т. 300. – № 5. – С.1090–1094.

Автор статьи:

Филимонов

Константин Александрович

- ст. преп. каф. разработки месторождений полезных ископаемых