

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.833.622.273.18

А.С.Ягунов

О РОЛИ МЕЖСЛОЕВЫХ СДВИГОВ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН ТРЕЩИН В ПОДРАБАТЫВАЕМОМ ГОРНОМ МАССИВЕ

Известно из экспериментальных данных о постоянстве или весьма незначительном увеличении высоты зоны водопроводящих трещин при повторных подработках массива горных пород [1]. Это свойство массива сохранять его проницаемость независимо от степени подработки при явном накоплении кривизны слоев в краевых частях лав до сих пор не находит среди исследователей достаточного объяснения.

Исследования [2] об увеличении граничной кривизны слоя при изгибе за счет образования ядра текучести безусловно полезны в обосновании этого эффекта однако не способны полностью описать все те деформационные особенности поведения слоев, которые возникают при многократных подработках.

Во-первых, неизвестно с какого рода и какими размерами сквозных и не сквозных нормально-секущих трещин, возникающих в слоях в местах максимальной кривизны, мы имеем дело при первичной и повторной подработках толщи.

Во-вторых, каким образом эти наметившиеся не сквозные трещины в слоях, расположенных выше зоны водопроводящих трещин (ЗВТ), при первичной подработке способны "зачечиваться" при многократных изгибах, являясь по сути местами сформированных шарниров в слоях, испытывающих попутно кривизну выпуклости и вогнутости при прохождении забоя лавы. На эти и ряд других не менее важных вопросов теория граничной кривизны отвечает не дает.

Ниже, применительно к этой проблеме, рассматривается роль в деформировании массива сдвигов между соседними слоями, которые за пределами ЗВТ при повторной подработке толщи способны при вписывании друг в друга деформирующихся слоев перекрывать нормально-секущие трещины.

Рассмотрим в общем виде факторы, определяющие процесс трещинообразования в слоях пород. Величина раскрытия трещины (c) в слое будет определяться местоположением нейтральной линии в слое, его мощностью (m') (толщиной), длиной блока между трещинами (r_0) и величиной его оседания (η). На положение нейтральной линии в слое при его изгибе в стесненных условиях оказывают влияние его прочностные свойства и величина сцепления по контактам с соседними слоями.

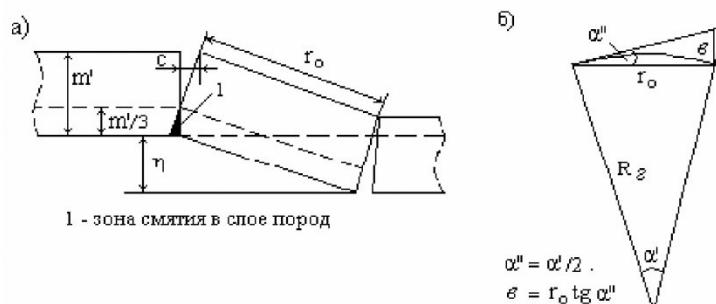
Принято считать, что глубина раскрытия несквозных трещин в слое, как правило, не более 2/3 его мощности [3]. Со-

ответственно, нейтральная линия, разграничитывающая растягивающие напряжения от сжимающих также находится на этом же удалении от верхнего контакта. Примем с некоторым запасом, что трещина такой глубины в любой момент может быть сквозной.

Используя эти положения из простейшей схемы (см. рис. 1, а) можно записать соотношение:

$$3c / 2m' = \eta / r_0 \quad (1)$$

Весьма важную роль в трещинообразовании слоя при изгибе играет его мощность и длина блока, на который разбивается слой при прохождении забоя, образуя шаги вторичной осадки кровли (r_0) и способность слоя до образования в нем сквозной трещины искривляться до так называемой граничной кривизны (K_z) [4]. Согласно исследованиям В.Н.Гусева [2] величина (K_z) зависит от литологического состава пород толщи: чем больше в ней соот-



Rис.1. Схема деформирования слоя пород:

1 – зона смятия в слое пород; а) образование трещины за счет излома и опускания слоя на величину η ; б) дополнительное оседание слоя на величину θ за счет искривления его верхней грани радиусом R_z .

ношение глинистых пород (алевролиты, аргиллиты), тем меньше кривизна слоя, при которой в нем образуется сквозная трещина. Эта зависимость выражается уравнением вида:

$$R_e = 1/K_e = 1/0,8 \cdot e^A \cdot 10^{-3},$$

где A - доля глинистых пород в толще.

На рис. 1,б приведена схема, иллюстрирующая искривление верхней грани слоя до образования в нем трещины, где из геометрических соотношений можно записать на какую величину (θ) опустится один конец слоя в блоке за счет его искривления радиусом $R_e = 1/K_e$.

$$\theta \approx r_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha'' =$$

$$= 2R_e \cdot \operatorname{Sin} \alpha'/2 \cdot \operatorname{tg} \alpha'',$$

где α' - некоторый внутренний угол, связывающий в секторе длину хорды r_0 с радиусом R_s ;

α'' - угол, образованный касательной в начале точки искривления слоя длиной r_0 .

Следует учесть, что при малых углах $\alpha' < 3^0$ можно принять $\operatorname{Sin} \alpha'/2 = \operatorname{tg} \alpha'/2$, а также $\alpha'' = \alpha'/2$.

При этих условиях слой до образования в нем сквозной трещины опустится на величину $\theta \approx 2R_e \sin^2 \alpha'/2$, откуда величина раскрытия трещины определяется из выражения:

$$c = \frac{2m'(\eta - 2R_e \operatorname{Sin}^2 \alpha'/2)}{3r_0}$$

$$(2)$$

В настоящее время в условиях Кузбасса повсеместно находят применение высокомеханизированные длинные очистные забои с высокими скоростями подвигания забоев, поэтому для определения r_0 наиболее полно вышеназванным условиям удовлетворяет соотношение величины r_0 от влияющих факторов, полученное В.Н.Вылегжаниным и В.И.Мурашевым в безразмерных единицах [5]:

$$r_0 = B_z \frac{(1 + \operatorname{Sin} \alpha) \sigma_{cjk_{cp}} \sqrt{\nu_0 / \nu_*}}{\gamma H \sqrt{L / L_0}}$$

$$, м \quad (3)$$

где $B_z = 28$ м и $B_{z2} = 5$ м соответственно - коэффициенты для первичного и вторичного шагов обрушения основной кровли, м;

α - угол падения пласта, град.;

σ_{cjk} - предел прочности слоев пород на сжатие, МПа - определяются по опытным данным их испытаний;

ν_0 - скорость подвигания забоя лавы, м/сут, ($\nu_* = 1$ м/сут);

$L_1 = L$ - длина лавы по падению, м ($L_0 = 3,5$ м);

γH - давление пород на глубине H , МПа.

При расчете r_0 от кровли пласта до заданного слоя за пределами зоны обрушения следует учитывать процент участия в сдвигении массива песчаных и глинистых пород как их средневзвешенное значение

$$\sigma_{cjk_{cp}} =$$

$$= \frac{\%_{\text{песч.}} \sigma_{cjk_{\text{песч.}}} + \%_{\text{глин.}} \sigma_{cjk_{\text{глин.}}}}{100}$$

$$, \text{ МПа} \quad (4)$$

С удалением от пласта, как следует из исследований на моделях из эквивалентных материалов (А.А.Борисов) [6] и в натурных условиях (С.Г.Дьяконов) [7], размер блоков r_0 увеличивается на величину $\Delta r_0 = h \operatorname{tg} \Delta$, в пределах той части толщи пород, где формируются вторичные шаги осадки основной кровли, где $h = 10$ м - высота зоны крупноблочного обрушения пород для типовых условий, для тяжелых кровель можно принять $h = 15 \div 20$ м [7], m - вынимаемая мощность пласта, м;

$\Delta = 25^0 - 0,112h$ - угол между первой и второй линиями излома слоев;

h - расстояние от пласта до слоя, м; коэффициент 0,112 имеет размерность град/м.

На уровне второй линии излома слоев слои укладываются на обрушенные породы, про-

шедшие активную стадию процесса сдвижения. В [6,7] 1-я и 2-я линии излома слоев обозначены соответственно граничным углом α_3 и углом полных сдвигений ψ'_3 - эти углы значительно отличаются от углов δ_0 и ψ_3 , используемых в действующих нормативных документах по охране зданий и сооружений на поверхности [1].

С учетом увеличения r_0 с удалением от пласта на величину Δr_0 формула для оценки раскрытия трещины в пределах активно влияющей основной кровли мощностью до 10 м или до 20 м в зависимости от типа кровли примет вид:

$$c = \frac{2K' m' (\eta - 2R_e \cdot \operatorname{Sin}^2 \alpha'/2)}{3(r_0 + h \operatorname{tg} \Delta)}$$

$$, м \quad (5)$$

где K' - коэффициент, учитывающий условия подработки; при отсутствии экспериментальных данных можно принимать $K' = 1$.

Радиус граничной кривизны (R_e) связан с внутренним углом α' зависимостью

$$\alpha' = 180^0 (r_0 + h \operatorname{tg} \Delta) / \pi \cdot R_e$$

Из экспериментальных данных известно [6,7], что рост длины блоков на величину Δr_0 с удалением от пласта при движении забоя прекращается на удалении равном мощности пород основной кровли и в дальнейшем их размер либо остается постоянным, либо каждый последующий блок разбивается на два и более блоков, соответственно уменьшается величина раскрытия трещин при их формировании.

При расстояниях от пласта 40 м и более трещины хотя и существуют, однако не являются сквозными, способными пропускать воду.

Исходя из этих условий выше зоны крупноблочного разрушения пород кровли [5] вместо $\operatorname{tg} \Delta$ в формуле (5) следует брать $\operatorname{tg} \Delta/2$. При этом "Методика..." оценки величины раскрытия трещин применима

при расстояниях от вынимаемого пласта до 40-50м.

Для расчета 1-й линии излома слоев использовано известное решение предельного состояния плиты (балки) в результате ее искривления и последующего разрушения под действием нормальных растягивающих напряжений изменяющихся линейно по ее толщине с образованием в теле сквозной трещины [8]. Эта линия совпадает с линией максимальной кривизны отдельных слоев или пачек слоев, поэтому в массиве переходя от слоя к слою образует 1-ю линию излома слоев.

На разных расстояниях от пласта h положение этой линии (рис. 2) с учетом введения в исходное уравнение коэффициента концентрации напряжений в зоне опорного давления и интегрирования уравнения будет определяться выражением:

$$x = h + \frac{2R_0H}{3\gamma g\rho\sqrt{a}} \times \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{5H-4h}{2\sqrt{a}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{5H}{2\sqrt{a}}\right) \right], \text{ м; } (6)$$

$$a = \frac{4R_0H}{3\gamma g\rho} - \frac{H^2}{4};$$

где R_0 и $\sigma_{c,jc}$ - пределы прочности отдельного слоя (пачки слоев) на растяжение и сжатие, при отсутствии испытаний можно принимать $R_0=0.2-0.25\sigma_{c,jc}$;

H и γ - глубина горных работ и объемный вес пород, м и $\text{т}/\text{м}^3$;

ρ - угол внутреннего трения по контактам слоев, рад.

Вторая линия излома слоев строится по углу Δ , на расстоянии от пласта до 10м для типовых условий и до 15÷20м для труднообрушаемых кровель; далее 2-я линия излома выкручивается по углу $\Delta/2$ до кратности 40-50м.

Следовательно, вышеописанный подход к схематизации деформирования слоев в подрабатываемой толще позволяет реально оценить местоположение и размеры нормально-секущих трещин в слоях в зависимости от их толщины, расстояния до разрабатываемого пласта, шага обрушения основной кровли и относительного

оседания слоя, которое на разных участках подрабатываемого массива будет существенно отличаться между собой. Нами выделено при отработке лавы на выемочном участке 5 видов трещин, где их размер будет в каждом случае определяться разной длиной блока, разной величиной оседания его концов и схемами сдвижения массива на разрезе по простианию и вкрест простириания.

В процессе подвигания очистного забоя по простирианию в подрабатываемом массиве формируются три вида трещин по их раскрытию: трещины над краевой частью лавы при первичной посадке кровли, трещины, образующиеся в режиме установившегося сдвижения кровли и трещины над демонтажной камерой. На разрезе вкрест простириания над вентиляционным и конвейерным штреками лавы будут формироваться трещины со стороны восстания и падения пласта, отмечающиеся между собой за счет разных углов полных сдвигов Ψ_1 и Ψ_2 при исходном положении величины r_0 на уровне верхней границы зоны обрушения. Над монтажной камерой при первичной посадке величина r_0 рассчитывается по формуле (3) при $B_z=14$ м.

В данной статье не приводятся обоснования геомеханических параметров для всех выделенных выше 5 видов трещин, однако установлено, что наибольшее раскрытие трещин по расчету получается над демонтажной камерой и на разрезе вкрест простириания над вентиляционным штреком, наименьшие трещины формируются на разрезе по простирианию при установившемся сдвижении пород кровли за счет небольшой разницы оседаний концов блока: не более $\eta_{max}/3$ - при первичной подработке и $\eta_{max}/5$ - при повторной подработке толщи пород. При первичном обрушении кровли величина раскрытия трещин с одной стороны снижается за счет увеличения



Рис.2. Схема формирования в подрабатываемом массиве линий излома слоев и вторичных шагов крупно-блочного обрушения основной кровли на разрезе по простирианию при установившемся режиме сдвижения кровли

пролета, с другой стороны при этом увеличивается толщина пачек деформирующихся без расслоения, что приводит к увеличению раскрытия трещин.

Рассмотрим условия формирования межслоевых сдвигов в подрабатываемом массиве базируясь на экспериментальных данных наблюдений за сдвижением глубинных реперов, закладываемых в скважины, пробуренные с поверхности.

В [9] показана возможность расчета межслоевых сдвигов на интервалах измерений между смещениями соседних глубинных реперов и приведены данные обобщения экспериментального материала по этому виду деформаций, позволившие установить характер изменения по мере прохождения забоя под скважиной относительных межслоевых сдвигов (d/η) в относительных координатах времени $d/\eta = f_z(t/T_a)$. Здесь d – суммарный сдвиг на интервале измерений, η – осадание репера, t – текущее время, T_a – общая продолжительность активной стадии процесса сдвижения. Значение функции f_z задано в табличном виде. Из зависимости величины d , приходящейся на 1м максимального оседания слоя для первичной и повторной подработок толщи (рис. 3), следует что максимальные по величине межслоевые сдвиги в массиве формируются позади забоя лавы с координатой $z(t) = (0.4 - 0.5)T_a$, а по окончании процесса сдвижения $z(t) = 1,0T_a$ в массиве сохраняются остаточные сдвиги величиной от 40 до 80 мм на 1м оседания слоя.

При этом следует иметь ввиду, что величина d , приходящаяся на 1м максимального оседания слоя в заданный момент времени t является суммарной величиной сдвигов приходящихся на средний интервал измерений $\ell = 8-12$ м. Поэтому если учесть, что весь подрабатываемый массив согласно [2,7]

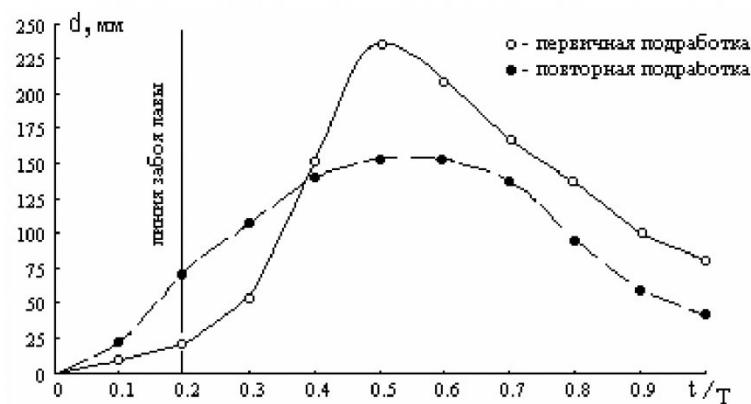


Рис. 3. Расчетная величина межслоевого сдвига, приходящаяся на 1м максимального оседания слоя пород для активной стадии протекания процесса сдвижения толщи.

и др. в процессе деформирования разбивается на тонкие слои толщиной в среднем 1,5-2,0м то получим, что искомая величина сдвига (d) определяемая по графику (рис. 3) должна быть уменьшена в 5 раз, т.е. достоверность прогнозирования сдвиговых деформаций и нормально-секущих трещин в подработанном массиве в значительной мере будет зависеть от выбора толщины слоев, на которые будет разбиваться толща пород в процессе прохождения забоя. При расчете ширины раскрытия трещины, как было показано выше, толщина слоя также является одним из главных и определяющих параметров.

По данным исследований В.Н.Земисева [3] и М.А.Иофиса [10], толщина пачек слоев деформирующихся без расслоения зависит от их расстояния до разрабатываемого пласта (Δh), параметров сдвижения и деформационных характеристик толщи и по оценкам находится в интервале величин от 0,9-2,0м при $\Delta h=50$ м до 3,5-8,0 м при $\Delta h=200$ м и более.

Следовательно, при определении условий для расслоения на слои или пачки слоев деформируемого массива возрастает роль геологической интерпретации кернового материала на стадии разведки месторождения предусматривающей определение типов и прочности слабых контактов.

Тем не менее, выполненные оценки показывают, что при нижеприведенных характеристиках деформируемого массива: (средняя толщина слоя 2,0м, вынимаемая мощность пласта 3,5м, максимальное оседание слоя 3,15м, расстояние слоя от пласта 140м, глубина разработки 300м, скорость подвигания забоя 150м/мес., состав толщи состоит на 60% из глинистых разностей пород, $R_e = 684,9$ м, среднее значение $\sigma_{ск} = 42$ МПа), расчетная величина раскрытия нормально-секущих трещин над демонтажной камерой по формулам (3) и (5) составит 53мм. По графику, приведенному на рис. 3 максимальная суммарная величина сдвига на среднем интервале 10м составляет 150 мм/м · 3,15 м = 472 мм, а на интервале 2,0м соответственно в 5 раз меньше, т.е. $472/5 \approx 94$ мм. Погрешность определения сдвигов по оси z в среднем равна $m_d = 0,4d_i$, поэтому величина сдвигов между слоями будет по оценкам находиться в интервале величин $d_{сл.} = 94 \pm 94 \cdot 0,4 = 56 \div 132$ мм. Сравнивая эти значения с расчетной величиной раскрытия трещин $C = 53$ мм, получаем, что максимальные по раскрытию трещины на верхней границе зоны водопроводящих (ЗВТ) при кратности $40m$ и более в местах наибольшего раскрытия трещин над вентиляционным штреком и демонтажной камерой вполне

могут перекрываться сдвигами пород по контакту между слоями. По нашим оценкам эффект перекрытия трещин в нижних

слоях за счет сдвигов верхних слоев является одной из основных особенностей отмечаемого постоянства или незначительно-

го роста высоты ЗВТ при многократных подработках толщи пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. С-Петербург, ВНИМИ, 1998, 290с.
2. Гусев В.Н. Научные основы прогнозирования развития техногенных водопроводящих трещин при выемке свит угольных пластов под водными объектами. Автореферат докторской диссертации, Санкт-Петербург, 2000, 35с.
3. Земисев В.Н. Расчеты деформаций горного массива – М., Недра, 1979 – 145с.
4. Гусев В.Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин. Санкт-Петербургский горный инт СПб: СПГГИ, 1999, 157с.
5. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. Новосибирск, "Наука", Сибирское отделение, 1990, 295с.
6. Борисов А.А. Расчеты горного давления в лавах пологих пластов. – М., Недра, 1980 – 306с.
7. Калинин С.И., Лютенко А.Ф., Егоров П.В., Дьяконов С.Г. Управление горным давлением при разработке пологих пластов с труднообрушающей кровлей на шахтах Кузбасса. Кемеровское книжное издво, 1991, 248с.
8. Троцкий В.С., Земисев В.Н. К вопросу определения границы зоны сжатий в слоистом массиве с целью выбора оптимальных размеров целиков под водные объекты. – Л., ВНИМИ сб. Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ, LXXVIII, 1970, с 302-312.
9. Ягунов А.С. Особенности проявления и параметры деформационных процессов, формируемых в подрабатываемом горном массиве. Сб. Современные проблемы безопасной разработки угольных месторождений. Тр. Координационного совещания по безопасности. ВНИМИ, С-Петербург, 2006, с. 155-165.
10. Иофис М.А. Деформации земной поверхности при разработке свит крутых пластов. Сб. Маркшейдерское дело в социалистических странах. Том. 11, Л., ВНИМИ, 1998. с. 177-183.

Автор статьи

Ягунов

Анатолий Степанович

- канд.техн.наук, директор Сибирского филиала ОАО ВНИМИ, г. Прокопьевск

УДК 622.822.39

В.Д. Богатырев, О. Ю. Жилкишиева

О ПАРАМЕТРАХ СТОЯЧЕЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Рассмотрим одну из стадий процесса развития взрыва метано-воздушной смеси в подготовительной выработке. Предполагается, что забой выработки явился местом инициации взрыва.

Знание об изменении таких параметров как давление и скорость при переходе через фронт ударной волны от области реакции к области, еще не возмущенной взрывом, позволяет прогнозировать возможность перехода взрыва метано-воздушной смеси в катастрофическую fazu – детонацию.

Из гидродинамической теории детонации известно, что во взрывчатой среде со сверхзвуковой скоростью распространяется детонационная волна, состоящая из ударной волны и следующей за ней зоны химической реакции. При сверхзвуковой скорости детонационной волны вещество перед ее

фронтом остается невозмущенным, в то время, когда на самом фронте она скачкообразно сжимается, сопровождаясь резким повышением давления, температуры и плотности среды.

При встрече ударной воздушной волны (далее УВВ), распространяющейся в канале с каким-либо препятствием, происходит скачкообразное повышение давления на ее фронте. Например, при сужении канала $d = 200$ мм до $d = 100$ мм, т. е. в 2 раза, вблизи места изменения сечения наблюдалось резкое увеличение давления. Это объясняется тем, что в месте сужения канала формируется отраженная ударная волна, которая распространяется навстречу падающей волне.

Подобные явления именуются как стоячая ударная волна.

При отражении ударной волны от взрывоза-