

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРОВЛИ ПРИ РАЗНОМ СОСТОЯНИИ СЕКЦИЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

к.т.н. Иванов И.Е., инж. Соколовская Н.В., д.т.н. Назимко В.В.
(ДонНТУ), д.т.н. Халимендик Ю.М. (ДонУГИ)

На устойчивость кровли в длинных очистных забоях влияет множество факторов. Одним из наиболее важных является отпор секций механизированных крепей. Особенно актуальным данный вопрос является для шахт Западного Донбасса. Горно-геологические условия в этой части Донбасса характеризуются малой прочностью вмещающих пород, которая в некоторых случаях ниже прочности добываемого угля. Проведенные шахтные наблюдения [1, 2] за состоянием секций крепи методом "на дораспор" показали, что шахты ГХК "Павлоградуголь" условно можно разделить на две группы. На шахтах первой группы работоспособность крепей поддерживается на уровне 65-75%. На шахтах второй группы уровень работоспособности составляет 45-50%. Под работоспособностью подразумевалась возможность достижения в гидростойках рабочего отпора в нормативное время. При этом учитывалась не только исправность секций крепи, но и соблюдение технологии разжатия секции горнорабочими очистного забоя. Как показывают исследования, не достаточно разжатая секция при передвижке не успевает набрать рабочий отпор даже к следующему циклу, что приводит к повышенным смещениям кровли и ухудшению ее состояния [3]. Надо полагать, что неравномерный отпор крепей по длине лавы, обусловленный недостаточным отпором отдельных секций, будет существенно изменять напряженно-деформированное состояние и, соответственно, влиять на устойчивость кровли.

В связи с этим необходимо оценить напряженно-деформированное состояние кровли при различном состоянии секций крепи вдоль очистного забоя. Такую оценку можно провести, только зная реальный отпор достигаемый в крепях. Метод "на дораспор" не позволяет произвести такую оценку, он только разделяет секции на разжатые и не разжатые по той или иной причине. Это связано с тем, что метод разрабатывался для применения в очистных забоях с целью установления секций крепи с неисправной гидравлической частью, а также выявления фактов несоблюдения технологии разжатия секций. При этом производителей при проверке не интересуют значения величин отпора. Ситуацию осложняет то, что в отечественных

механизированных комплексах не существует средств, позволяющих в шахтных условиях оценить отпор крепи. Попытку установки индикаторов давления рабочей жидкости в поршневой полости следует признать неудачной, так как реально в шахтных условиях они не работают.

В связи с этим используем данные английских исследователей о фактическом рабочем отпоре в секциях механизированных крепей [4]. На рис. 1 показан график такого распределения для шахты British Coal Group (Великобритания). Он был получен в результате компьютерного мониторинга состояния секций с помощью специализированных датчиков. Как видно из графика по длине очистного забоя можно выделить три участка. Это краевые участки, длиной до 30-40 секций, и центральная часть лавы длиной около 60-70 секций. Незначительный отпор крепей в краевых частях лавы связан с особенностями применяемых систем разработки. Так в Англии (как и в большинстве развитых западных стран и Австралии) применяется столбовая система разработки с оставлением между столбами значительных размеров угольных целиков. При этом породы, лежащие на целиках прогибаются.

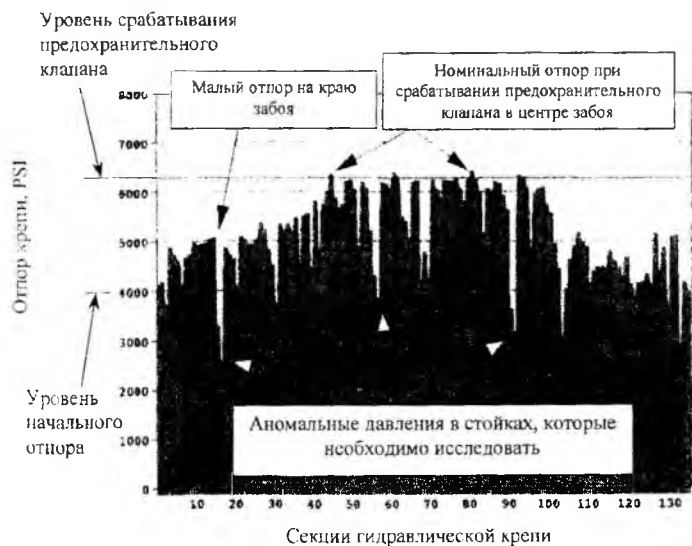


Рис. 1. График распределения давления в секциях механизированной крепи шахты British Coal Group (Великобритания), 1 PSI = 0,0069 МПа.

Максимальные смещения при прогибе приходится на среднюю часть лавы, где и наблюдается максимальная пригрузка секций. Уровень срабатывания предохранительных клапанов в рассматриваемом примере составляет около 6250 PSI (≈ 43 МПа). Уровень начального распора около 4000 PSI ($\approx 27,6$ МПа).

Рассмотрим состояние отпора в секциях в центральной части лавы. Из графика на рис. 1 можно видеть, что отпор в секциях механизированных крепей имеет значительные локальные колебания. Так в данной части лавы до 50% секций имеют отпор, превышающий 6000 PSI ($\approx 41,4$ МПа). Уровня срабатывания предохранительного клапана (рабочего сопротивления) достигают единицы секций. До 7% секций имеют отпор менее 5000 PSI ($\approx 34,5$ МПа). Эти секции являются неисправными, недоразжатыми или между перекрытием секции и кровлей по каким-либо причинам не обеспечивался полный контакт. Также имеются отдельные секции, в которых отпор составляет менее начального. Это явно неисправные секции крепи. Количество таких секций незначительно.

Следует отметить различные силовые параметры крепей, применяемых на шахтах Донбасса и в рассматриваемом примере. Так механизированная крепь из комплекса КД-80 имеет номинальное сопротивление до 0,5 МПа, начальное около 0,4 МПа. При этом общее количество неисправных крепей составляет до 7% на английской шахте против 10-15% на шахтах первой группы и 15-40% на шахтах второй группы. Неисправные секции механизированной крепи распределяются случайным образом по длине очистного забоя, как на отечественных шахтах, так и для рассматриваемого случая. Отклонение настройки предохранительного клапана составляет до 15% на отечественных механизированных крепях [5] и до 7-10% на английских. Таким образом, качественная ситуация, зафиксированная для очистного забоя английской шахты в средней части лавы, может быть с достаточной степенью достоверности сопоставлена с ситуацией, наблюдаемой на шахтах первой группы ГХК "Павлоградуголь" с учетом общего меньшего значения отпора в отечественных механизированных крепях.

Проанализируем состояние кровли применительно к условиям шахт Западного Донбасса. Для анализа используется программа расчета горного давления представленная в [6]. Она использует для расчета алгоритм плиты на упругом неоднородном основании, который способен описать поведение кровли угольного пласта при наличии выработанных пространств. При моделировании принимались основные горно-геологические условия Западного Донбасса. Глубина ведения работ 500 м, угол падения пласта 2 градуса, модуль Пуассона 0,25. Общий размер расчетной сетки 33x33 узла. Размер узла один метр. Моделирование

крепи сводилось к уменьшению жесткости плиты над соответствующим выработанным пространством в пропорциях, наблюдаемых на секциях крепи с 60-ю по 80-ю на рис. 1. Принимаемый при моделировании отпор в процентах к номинальному показан на рис. 2. Крайние секции (с 1 по 6 и с 28 по 33) моделировались исправными, и в дальнейшем не рассматриваются для исключения влияния краевого эффекта. Размер секций по длине лавы составлял 1 м. Другими словами секции крепи при моделировании устанавливаются вдоль лавы через один метр. Присвоенные секциям при моделировании номера совпадают с соответствующей длиной лавы в метрах. Иными словами 1-я секция находится на первом моделируемом метре лавы, 2-я на втором и т.д. Метраж лавы относительный. То есть

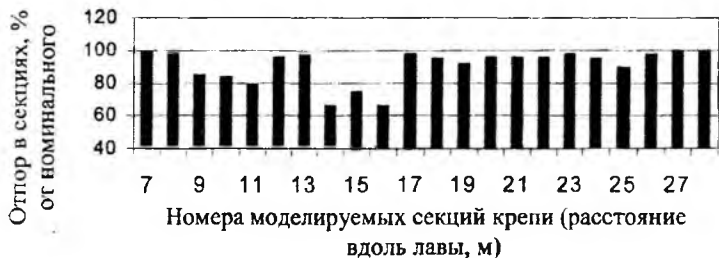


Рис. 2. Моделируемый отпор секций механизированной крепи. Соответствует отпору секций с 60-й по 80-ю для очистного забоя шахты British Coal Group (Великобритания).

первая секция (как и весь моделируемый участок лавы) находится не у штрека, а в средней части длинного очистного забоя. Моделирование выработанного пространства за крепью сводилось к дополнительному уменьшению жесткости плиты до 10-20% от жесткости исправной секции крепи. Такая жесткость с достаточной точностью моделирует эффект подбутовки кровли при полном ее обрушении.

Смещения пород, полученные при моделировании, показаны на рис. 3. Секции крепи показаны серыми прямоугольниками. Из рис. 3 видно, что смещения увеличиваются при удалении от линии очистного забоя в сторону выработанного пространства. Это хорошо согласуется с существующими представлениями о поведении кровли в очистных забоях, и может служить подтверждением достоверности применяемого метода моделирования. Можно отметить незначительное до 15% увеличение смещений напротив группы неисправных секций 14-16.

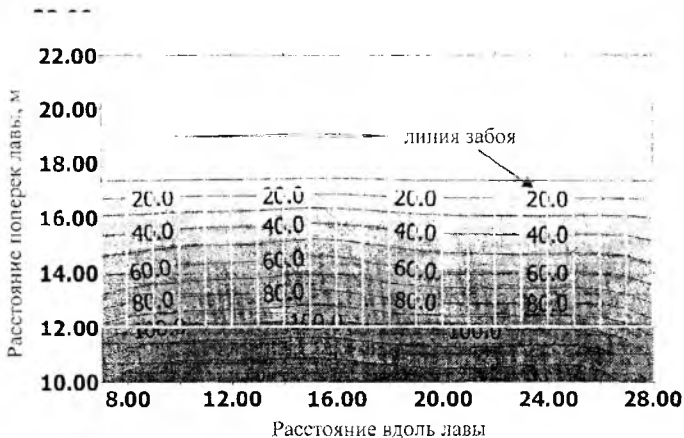


Рис. 3. Изолинии опускания пород кровли в мм по результатам физического моделирования.

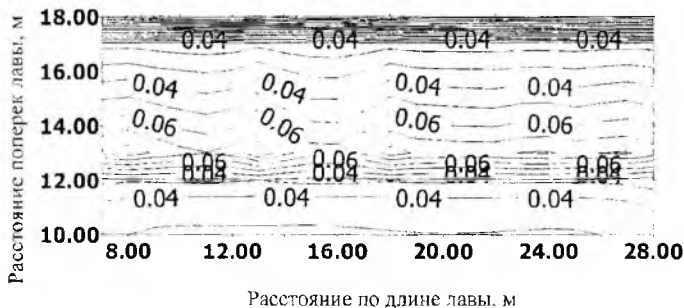


Рис. 4. Распределение коэффициента концентрации напряжений в кровле пласта над секциями механизированной крепи.

На рис. 4 приведено распределение коэффициента концентрации вертикальных напряжений над секциями крепи. Как видно из распределения нагрузка на секцию постепенно возрастает от линии очистного забоя с 0.01 к завальной части секции до 0.06. Это вызвано увеличением вертикальных смещений при удалении от линии забоя, и соответственно большей пригрузке



Рис. 5. Показатели концентрации напряжений над задним рядом стоек секций механизированной крепи.

секций крепи со стороны пород кровли. При этом концентрации возрастают до 3 раз.

На рис. 5 дан график концентраций вертикальных напряжений над задним рядом стоек крепи. Из него видно, что над рядовыми исправными секциями концентрации составляют в среднем по заднему ряду стоек 0,082. Над местами с пониженным отпором крепи наблюдается снижение концентрации напряжений до 0,077 у секций, набравших 84-96% номинального отпора. У секций с 65-75% рабочего отпора концентрация в кровле пласта падает до значения 0,63. Напротив, над соседними с неисправными секциями наблюдаются повышенные концентрации вертикальных напряжений, которые составляют до 0,09. Таким образом, при наличии в механизированном комплексе неисправных секций крепи концентрация вертикальных напряжений над исправными соседними секциями увеличивается до 1,2 раза. Это подтверждает результаты исследований [1, 2], которые показывают, что состояние кровли (в частности наличие вывалов) ухудшается не только напротив неисправной секции крепи, но и напротив ближайших соседних секций.

На рис. 6 приведены распределения возникающих изгибающих моментов в породах непосредственной кровли над секциями крепи. Из распределения моментов вдоль лавы (рис. 6,а) можно видеть, что над исправными секциями в забойной части они достигают значения $-0,35-0,38$ МН•м. Над неисправными секциями моменты меняют знак и достигают значения $0,1$ МН•м. Над задним рядом стоек исправных секций моменты вдоль лавы достигают значения $0,5-0,8$ МН•м. Над неисправными они возрастают до $1,6-2,1$ МН•м.

а) вдоль лавы (M_x)



б) вкрест лавы (M_y)



Рис. 6. Распределение изгибающих моментов ($MH \cdot m$) возникающих в породах непосредственной кровли при наличии неисправных секций крепи.

Графики, показывающие значения изгибающих моментов действующих вдоль лавы над козырьками крепи и задней ее частью приведены на рис. 7. Как можно видеть из графика наибольшие колебания изгибающих моментов вдоль лавы наблюдаются ближе к завалу, над задним рядом стоек. При этом по абсолютному значению моменты меняют знак. Над козырьком крепи изменения моментов над неисправными секциями снижается.

При анализе моментов поперек лавы (рис. 6,б), то есть вдоль длинной стороны секций крепи, видно, что над передней частью исправной секций крепи они составляют в среднем 1,5–1,6 $MH \cdot m$. Над неисправными секциями моменты увеличиваются до



Рис. 7. Показатели изгибающих моментов вдоль лавы в кровле пласта над моделируемыми секциями крепи.

≈ 2,2 МН·м. Над задней частью исправных крепей значения моментов составляет -2,9-3,1 МН·м. Над неисправными - 0,91-0,94 МН·м. Можно отметить, что над секциями крепи, отпор которых составляет 65-75% от полного (14-16-я секции), моменты изменяются сильнее, в частности до 3,2 раз. Над секциями крепи, которые набрали отпор до 84-96% (18-22-я и 24-27-я секции) изменения значений моментов меньше и составляют до 1,2-1,3 раз. На рис. 8 показаны значения изгибающих моментов поперек лавы над козырьком крепи и задним рядом стоек. Изменения их значения также увеличиваются к завальной части. Увеличение значений моментов дальше от забоя объясняется большими абсолютными смещениями кровли.

На рис. 9 показано распределение крутящего момента в кровле пласта, полученного при расчетах. Он возникает под действием неоднородного отпора крепей вдоль лавы и в поперечном ее сечении. Как можно видеть распределение имеет характерный вид из четырех областей, группирующихся попарно по диагонали. В двух из них касательные напряжения положительные, в двух отрицательные. Всплески повышенных касательных напряжений на краях пластины вызваны краевыми эффектами, и к учету не принимаются.

Зная величины и знак изгибающих и крутящих моментов, можно определить напряжения, вызываемые этими моментами [7].



Рис. 8. Значения изгибающих моментов поперек лавы.



Рис. 9. Распределение крутящего момента M_{xy} в кровле пласта.

$$\sigma = \frac{M}{D} \frac{Ez}{(1-\mu)^2}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, МН/м²;
 M – действующее значение момента в плите, МН•м;
 D – изгибная жесткость плиты:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2)$$

μ – коэффициента Пуассона;

h – толщина плиты, м

z – расстояние от срединной плоскости до рассматриваемой,

м.

Принимая во внимание формулу (2) и то, что максимальные напряжения возникают при $z = \pm \frac{h}{2}$ максимальные напряжения определяются:

$$\sigma_{x \max} = \frac{M_x \cdot 6}{h^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{y \max} = \frac{M_y \cdot 6}{h^2}; \quad (4)$$

$$\tau_{xy \max} = \frac{M_{xy} \cdot 6}{h^2} \quad (5)$$

Как видно из полученных формул (3, 4, 5) максимальные напряжения зависят от толщины плиты. Переходя к натурным условиям, напряжения в непосредственной кровле (как и любом другом слое) зависят от ее мощности и градиентов прогибов. При этом, как можно видеть из приведенных распределений, даже незначительные градиенты прогибы плиты приводят к значительным изменениям изгибающих и крутящих моментов.

Результаты расчетов напряжений по формулам (3, 4, 5) даны на рис. 10-12. Можно отметить, что распределения напряжений качественно в полной мере соответствуют изгибающим и крутящим моментам, которые их вызывают. Видно, что напряжения от изгибающих моментов, действующих поперек лавы, примерно в два раза больше (10 МПа против 5 МПа). Поэтому при оценке возможности разрушения пород в кровле лучше ориентироваться на них. Вместе с тем следует отметить, что величины напряжений, вызванных неодинаковым отпором крепей вдоль лавы всего в два раза меньше тех, которые возникают поперек лавы. Это свидетельствует о существенном вкладе неравномерности отпора крепи в устойчивость кровли в целом.

Напряжения на распределениях рис. 10-12 со знаком минус сжимающие со знаком плюс растягивающие.



Рис. 10. Изолинии напряжений (МПа) возникающие в непосредственной кровле пласта от изгибающих моментов действующих вдоль лавы.

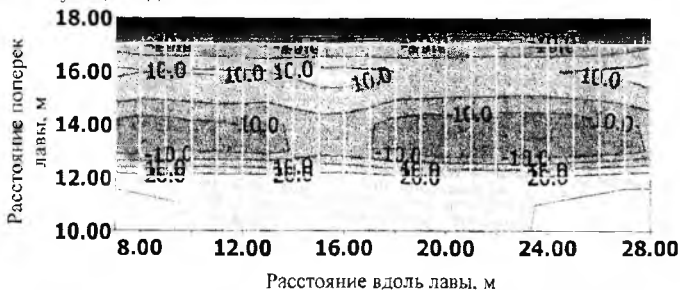


Рис. 11. Изолинии напряжений (МПа), возникающих в породах непосредственной кровли от изгибающих моментов действующих поперек лавы.

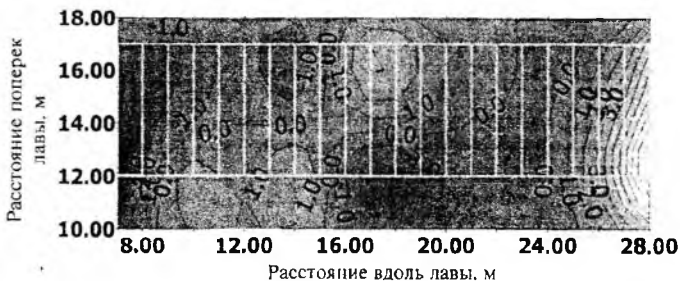


Рис. 12. Распределение касательных напряжений τ_{xy} (МПа) в кровле пласта, возникающих от крутящих моментов.

Соответственно проверка прочности пород в областях со сжимающими напряжениями должна производиться на сопротивление пород сжатию. В областях с растягивающими напряжениями на сопротивление пород на разрыв, которое, как известно, имеет значение в 7-10 раз меньшее. По касательным напряжениям проверка должна проводиться путем их сравнения с допустимым пределом прочности пород на чистый сдвиг (сцепление).

Кроме нормальных напряжений от изгибающих моментов и касательных напряжений от крутящих моментов на устойчивость кровли воздействуют также касательные напряжения, которые вызваны действием поперечных перерезывающих сил. На рис. 13-14 показаны распределения поперечных сил вдоль и вкрест лавы. Видно, что у перерезающих сил, действующих поперек лавы



Рис. 13. Распределение поперечной перерезывающей силы (МН) действующей в плоскости поперек лавы (Q_x).



Рис. 14. Распределение поперечной перерезывающей силы (МН) действующей в плоскости вдоль лавы (Q_y).

(рис. 13), напротив группы неисправных секций (14-16) наблюдается резкое уменьшение значений. При этом они составляют до -1,5 МН. Над группами секций соседних с неисправными наблюдается повышение значения перерезающей силы до 0,7-1,7 МН. При этом таким повышением охвачены группы до 2 секций, что также хорошо согласуется с результатами исследований [2], которые определяли такую зону в натуральных условиях шириной в одну секцию. Над группой секций, которые набрали до 84-96% номинального отпора (24-27-я секции), значение перерезающей силы вдоль лавы составляет от -0,1 до 0,1 МН.

Значение перерезающей силы вдоль лавы в меньшей степени реагирует на наличие неисправных секций. Так по заднему ряду крепи значение силы падает от -3-4 МН напротив исправных секций до -2,3-2,4 МН напротив неисправных. Ближе к очистному забою, над козырьком крепи картина иная. Так напротив исправных секций значение перерезающей силы составляет -7,0-7,3 МН., а напротив группы неисправных достигает значения -8,7-8,8 МН. Можно видеть, что эффект от наличия неисправных секций крепи в забойной и завальной части противоположный. Так в первом случае перерезающая сила увеличивается, во втором уменьшается.

Также как и моменты, перерезающие силы не являются показателем разрушения кровли. В соответствии с [7] максимальные касательные напряжения от перерезающей силы определяются из условия их нахождения на нейтральной оси по выражению:

$$\tau_{\max} = \frac{3Q}{2h} \quad (6)$$

Рассчитанные значения касательных напряжений от перерезающих сил поперек и вдоль лавы показаны на рис. 15-16.

Видно, что распределения (рис. 15, 16) качественно в достаточной мере соответствуют вызвавшим их перерезающим силам. Касательные напряжения от перерезающей силы поперек лавы (рис. 15) достигают значения -2,3-2,4 МПа над группой неисправных секций. Над прилегающими исправными секциями значения напряжений составляют 1,1-2,5 МПа. Касательные напряжения от перерезающей силы вдоль лавы (рис. 16) достигают максимального значения на линии очистного забоя. Так напротив исправных секций (80-100% отпора) они достигают значения 10,5-11 МПа. Напротив неисправных секций (65-75% отпора) они возрастают до 13 МПа. На линии заднего ряда стоек ситуация меняется. Так напротив группы исправных стоек напряжения составляют от 5,5 до 6,5 МПа, напротив неисправных падают до



Рис. 15. Распределение касательных напряжений τ_{xz} (МПа) в кровле пласта, вызванных перерезающей силой действующей поперек лавы.



Рис. 16. Распределение касательных напряжений τ_{yz} (МПа) в кровле пласта от поперечной перерезывающей силы действующей вдоль лавы

3,6 МПа или на 35-45%. Видно, что неисправные секции оказывают разное влияние на изменение касательных напряжений. Так у забоя они повышаются, а ближе к завалу понижаются. Очевидно, у забоя напряжения повышаются из-за большего прогиба пород. Над задним рядом стоек наоборот, более прогнутые над неисправными секциями породы испытывают меньший перегиб при переходе в выработанное пространство.

Проверку прочности плиты-кровли по касательным напряжениям также следует производить путем их сравнения с пределом прочности пород на чистый сдвиг, или сцепление. Ее следует производить по касательным напряжениям, возникающим от перерезывающей силы действующей вдоль лавы, так как в этом случае они достигают наибольших значений.

Следует отметить, что отдельные компоненты напряженного состояния приводят к образованию различного вида нарушения кровли (рис. 17). Так изгибающие моменты M_x и M_y приводят к сжатию (растяжению) в плите-кровле с максимумом на нижней и верхней его плоскостях. При превышении допустимых значений

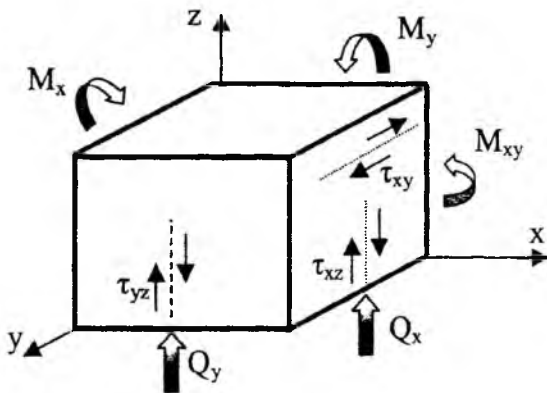


Рис. 17. Действующие в элементарном объеме плиты силовые факторы.

породы кровли будут разрушаться от сдвигания-растяжения. Крутящий момент M_{xy} приводит к возникновению касательных напряжений τ_{xy} на грани нормальной к оси X. Исходя из их ориентации, видно, что они будут приводить к образованию в породах кровли трещин в плоскости, в которой они лежат. Иными словами трещины будут перпендикулярны плоскости очистного забоя. Поперечная перерезывающая сила Q_x на площадке нормальной к оси X вызывает касательные напряжения в данной плоскости τ_{xz} и будет приводить также к образованию трещин, перпендикулярных плоскости очистного забоя. Поперечная перерезывающая сила Q_y на площадке, нормальной к оси Y вызывает касательные напряжения τ_{yz} в данной плоскости и будет приводить к образованию трещин параллельных плоскости очистного забоя.

Сравнивая распределения значений касательных напряжений от поперечных перерезывающих сил Q_x и Q_y (рис. 15-16), можно видеть что напряжения в плоскости нормальной к оси Y (и соответственно плоскости забоя) больше напряжений в плоскости нормальной к оси X примерно в 3 раза. Это хорошо объясняет известный факт, что в очистных забоях в породах кровли трещины параллельные линии очистного забоя наблюдаются значительно чаще.

Как известно касательные напряжения характеризуются своей парностью. Так для напряжений τ_{xz} существуют парные и действующие в плоскости нормальной к оси Z касательные напряжения τ_{zx} . Для τ_{yz} также существуют парные в плоскости нормальной к оси Z касательные напряжения τ_{zy} . Именно напряжения τ_{zx} и τ_{zy} приводят разрушению пород в плоскости, нормальной к оси Z , или другими словами к расслоению пород кровли.

Таким образом, можно видеть, что рассмотренная методика позволяет реально оценить напряженно-деформированное состояние пород кровли в очистном забое. При этом, зная силовые параметры применяемых механизированных крепей, а также реальные характеристики пород можно произвести оценку типа степени разрушения в кровле пласта.

Проведенный анализ деформированного напряженного состояния пород кровли позволяет сделать следующие выводы. При отпоре в секциях крепи в пределах 84-96% (отпор в пределах точности настройки предохранительных клапанов) по абсолютному значению изменения характеристик напряженного состояния составляют до 10%. Наличие неисправных и недоразжатых секций крепи (отпор 65-75% от номинального) приводит к возникновению повышенных градиентов опусканий плиты-кровли, что создает как бы дополнительные степени свободы для подвижности составляющих кровлю породных блоков. При этом по абсолютному значению изменения характеристик напряженного состояния при переходе от исправных к неисправным секциям могут составлять от 10 до 300%.

Такие градиенты порождают изгибающие и крутящие моменты в местах кровли на переходах от исправно работающих секций к неисправным. Крутящие моменты, нормально отсутствующие при плановом состоянии крепей, порождают на переходах от несущих секций к недоразжатым касательные напряжения в плоскости кровли, что может приводить к ее дополнительному расслоению. Оценка на основании компьютерного моделирования показывает, что такие напряжения могут превышать 1 МПа, что соизмеримо со сцеплением породы в плоскости ее наслоения.

Изгибающие моменты вдоль линии очистного забоя, также отсутствующие при нормальном рабочем одинаковом отпоре секций порождают нормальные напряжения порядка 5 МПа, которые соизмеримы с пределом прочности на растяжения типичных пород кровли и в ряде случаев, с пределом прочности на сжатие.

На границе исправных секций возникают также перерезывающие силы, нормально отсутствующие на участке лавы, кровля которой поддерживается полностью работоспособными

секциями крепи. Указанные перерезывающие силы могут достигать 1,7 МН и более, что порождает напряжения среза порядка 2,3-2,5 МПа, который соизмерим со сцеплением породы перпендикулярно наслоению.

Именно эти три дополнительных действия оказывают отрицательное воздействие на устойчивость кровли, снижая ее устойчивость и создавая условия для увеличения подвижности составляющих ее блоков, повышая вероятность их вывала в призабойное пространство. Другими словами неисправные секции переводят напряженное состояние кровли из плоскодеформированного в пространственное, что не выгодно с точки зрения сохранения ее устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведение работ при обрушениях кровли в очистных забоях пологих пластов /Халимендик Ю.М., Иванов И.Е., Добровольский Н.А., Воронин С.А., Захаров В.С. -Донецк: ДОНУГИ-ДУНПО, 2000. -128 с.
2. Халимендик Ю.М., Южакова Р.А., Иванов И.Е. переход зон вывалов кровли выработки при ее надработке очистным забоем //Известия донецкого горного института. - 1999. -№2. - С. 14-18.
3. Дубов Е. Д., Мухин Е. П., Резник Ю. Р. Влияние величины первоначального распора на работу механизированных крепей //Вопросы управления кровлей, охраны и крепления горных выработок. -Донецк: Донбасс. -1969. -С. 18-27.
4. Harris R.G. Longwall Support Monitoring //Proceeding of 12t International Conference on Ground Control in Mining. - Department of Mining Engineering College of Mineral and Energy Resources, West Virginia University. -Morgantown (USA). -1993. - P. 143-151.
5. Пигаленко Е.И. Геомеханическое обоснование кинематических параметров механизированных крепей для крутых и крутонаклонных пластов Донбасса: Дисс... канд. техн. наук: 05.15.11. -Ленинград, 1983. -123 с.
6. Назимко В. В. Геомеханические основы устойчивости подготавливающих выработок в зонах разгрузки при воздействии очистных работ: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.15.02., 05.15.11. Донск, 1989. -337 с.
7. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин. -М.: Машиностроение, 1973. -456 с.