

## **К ВОПРОСУ О РАССЛАИВАЕМОСТИ РАЗУПРОЧНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫХ КРОВЕЛЬ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

В литературных источниках вопросу о влиянии разупрочнения на расслаиваемость пород тяжелых кровель ранее уделялось недостаточно внимания. Как известно, расслаиваемость слоистых пород кровли очистных выработок существенно уменьшает их изгибную жесткость, что в конечном итоге приводит к значительному увеличению нормальных к напластованию перемещений слоев междупластья и формированию предельных зон. В связи с этим прогноз расслаиваемости разупрочненных в сочетании с гидрообработкой пород тяжелых кровель является важным, так как используется при выборе оптимальных параметров систем разработок угольных месторождений, обеспечивающих необходимый эксплуатационный режим очистных камер, а также при решении других важных геомеханических задач.

Отсутствие количественных прочностных характеристик искусственно созданных поверхностей ослабления в породах кровли является существенным затруднением при исследовании на расслаиваемость как слоистых, так и квазиоднородных разупрочненных по технологии передового торпедирования пород тяжелых кровель. В данной статье предпринята попытка получить эти характеристики, исходя из основных закономерностей изменения механических характеристик однородных глинистых образцов [1] в зависимости от влажности и закономерностей изменения механических характеристик тяжелых кровель, подверженных воздействию технологии передового торпедирования [2], а затем ввести поправки на указанные факторы в угол трения по контакту и коэффициент сцепления искусственно созданной поверхности ослабления. После этого уточненные основные механические характеристики ослабленных контактов следует использовать для прогнозирования зарождения и прорастания трещин расслоения [3].

Расчет расслаиваемости разупрочненной в сочетании с гидрообработкой тяжелой кровли выполняется при следующих предположениях:

- породы кровли приняты в виде многослойной толщи; слои пород однородны, изотропны, с разными упругими характеристиками и при деформировании удовлетворительно согласуются с обобщенным законом Гука;
- прочность ослабленных межслоевых контактов различна до применения технологии передового торпедирования, постоянна вдоль каждого контакта и меньше прочности смежных слоев;
- необходимые для разупрочнения взрывааемые заряды закладываются в кровле с определенной периодичностью;
- гидрообработка определенного участка формируемой поверхности ослабления пород кровли осуществляется мгновенно, при этом прочность ослабленных контактов поверхности ослабления по длине изменяется.

Требуется определить возможность зарождения и прорастания трещин расслоения по искусственно сформированным поверхностям ослабления.

В условия зарождения и прорастания трещин расслоения [3] входят основные механические характеристики ослабленного контакта: коэффициент сцепления  $C$  и угол трения по контакту  $\rho$ . Применительно к породам тяжелой кровли с целью ее разупрочнения, как правило, применяют технологию передового торпедирования [2], иногда в сочетании с гидрообработкой. При этом на искусственно сформированной поверхности ослабления при разупрочнении породного массива

$$C = K_c C_0(x, y_i, W), \quad \rho = K_\rho \rho_0(x, y_i, W), \quad (1)$$

где  $x, y_i$  – координаты;  $W$  – влажность;  $K_c, K_\rho$  – коэффициенты, корректирующие механические характеристики  $C$  и  $\rho$  создаваемой поверхности ослабления, которые зависят от наличия

естественной трещиноватости, слоистости, микро- и макродефектов структуры, влажности, времени, а также от формируемого напряженно-деформированного состояния.

Иногда породы тяжелой кровли содержат ослабленные контакты или прослойки достаточной, но меньшей, чем смежные слои прочности. Многие ослабленные прослойки имеют толщину от долей миллиметра до нескольких сантиметров и к тому же некоторые из них в значительном количестве содержат глины, что при увеличении влажности может существенно влиять на прочность межслоевых прослоек. В работе [1] показано, что прочность образцов некоторых глин при увеличении влажности уменьшается на порядок, а в работе [2] – что увеличение влажности при гидрообработке пород тяжелой кровли существенно уменьшает прочностные и упругие характеристики породного массива. Ссылаясь на эти данные, можно утверждать, что при изменении влажности механические характеристики  $C_0(x, y_i, W)$  и  $\rho_0(x, y_i, W)$  для искусственно сформированной поверхности ослабления будут близки к закономерностям, полученным при испытании однородных глинистых образцов, и осредненным прочностным характеристикам разупрочненной тяжелой кровли.

Задача расчета расслоения пород тяжелой кровли включает два этапа. На первом определяется зарождение трещин расслоения в точке или на отдельном участке ослабленного контакта, а на втором – прорастание трещин вдоль ослабленного контакта, находящегося над выработанным пространством и в пределах зоны возможного зарождения трещин расслоения.

Как известно, условие специального предельного состояния [4], отражающее прочность межслоевых контактов при сдвиге, имеет смысл только при сжимающих нормальных к напластованию напряжений и применительно к  $i$ -му ослабленному контакту имеет вид

$$\left| \tau_{xy}(x, y_i) \right| = C_i(x, y_i, W) + \sigma_y(x, y_i) \operatorname{tg} \rho_i(x, y_i, W), \quad (2)$$

где  $\tau_{xy}(x, y_i)$  и  $\sigma_y(x, y)$  – соответствующие касательные и нормальные напряжения на контактных поверхностях смежных слоев;  $y_i$  – расстояние от ослабленного контакта до опорной поверхности угольного пласта, м.

Условие расслоения в точке межслоевого контакта [3] имеет вид

$$\Delta K_\tau = K_\tau - K_{\sigma_y} \operatorname{tg} \rho \geq C^*, \quad (3)$$

где  $K_\tau = |\tau_{xy}| / \gamma H$ ;  $K_{\sigma_y} = \sigma_y / \gamma H$ ;  $C^* = C / \gamma H$ ;  $\gamma$  – средневзвешенный объемный вес пород, Н/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина залегания пласта, м.

Из (3) следует, что при  $\Delta K_\tau < 0$  расслоение в данной точке не произойдет, потому что касательные напряжения на контакте недостаточны даже для преодоления сил трения. При  $\Delta K_\tau > 0$  расслоение в данной точке возможно, если  $\Delta K_\tau \geq C^*$ .

Проверка условия прорастания трещин расслоения выполняется по формуле [3]

$$S_{y_i} \geq C_i^* + T_{y_i}, \quad (4)$$

где  $S_{y_i} = \int_{l_{0,i}}^1 \tau_y(x, y_i) dx$ ,  $T_{y_i} = \int_{l_{0,i}}^1 \sigma_y(x, y_i) \operatorname{tg} \rho_i(x, y_i, W) dx$ ,  $C_i^* = \int_{l_{0,i}}^1 C_i(x, y_i, W) dx / (\gamma H l)$ ;

$S_{y_i}$ ,  $T_{y_i}$  и  $C_i^*$  – усилия в единицах  $\gamma H l$  соответственно касательные, трения и сцепления;  $l_{0,i}$  – расстояние в единицах  $l$  от начала системы координат  $XOY$  до расчетной точки начала расслоения на ослабленном контакте.

Поскольку нарушение сплошности ослабленных контактов во многих случаях происходит в начальный период увеличения ширины камеры, когда связь между напряжениями и де-

формациями близка к линейной и может быть приближенно выражена обобщенным законом Гука, необходимые величины  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_y$ , входящие в условия (2) и (3), определим методами теории упругости [5]. При расчете напряженного состояния слоистого междупластья функция напряжений для каждого из слоев принимается в виде

$$F(x, y) = - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha^2 (s^2 - \alpha^2 h^2)} \times \left\{ P_m^{(1)} \left[ -s \operatorname{sh}(\omega) + \alpha^2 h(h-y) \operatorname{ch}(\alpha y) - \alpha y s \operatorname{ch}(\omega) + \alpha h \operatorname{sh}(\alpha y) \right] + P_m^{(2)} \left[ \alpha^2 h y \operatorname{ch}(\omega) + \alpha y s \operatorname{ch}(\alpha y) - \alpha h c \operatorname{sh}(\alpha y) - s \operatorname{sh}(\alpha y) \right] + \lambda_m^{(1)} \left[ \alpha (y s \operatorname{sh}(\omega) + \alpha h(h-y) \operatorname{sh}(\alpha y)) \right] + \lambda_m^{(2)} \alpha \left[ \alpha h y \operatorname{sh}(\omega) + s(y-h) \operatorname{sh}(\alpha y) \right] \right\} \cos(\alpha x), \quad (5)$$

где  $\alpha = m\pi/l$ ;  $s = \operatorname{sh}(\alpha h)$ ;  $c = \operatorname{ch}(\alpha h)$ ;  $\omega = \alpha(h-y)$ ;  $P_m^{(1)}$ ,  $\lambda_m^{(1)}$ ,  $P_m^{(2)}$ ,  $\lambda_m^{(2)}$  – коэффициенты рядов Фурье, отражают нормальные и касательные напряжения на длинных сторонах  $k$ -го слоя.

Функция напряжений в таком виде является решением бигармонического уравнения и удовлетворяет граничным условиям в напряжениях. Необходимые для вычисления конкретные значения напряжений на контактах слоев вычисляются в рядах Фурье, коэффициенты которых находят из решения систем линейных неоднородных уравнений трехклеточной структуры со столбцом свободных членов, отражающим граничные условия.

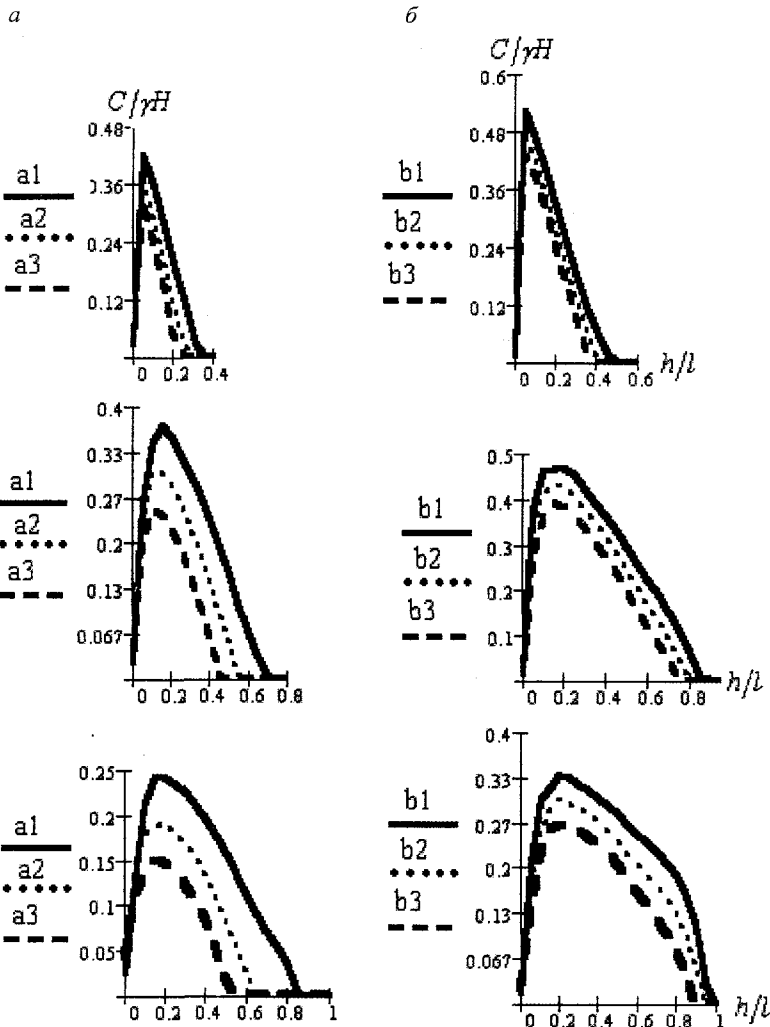
Приведем пример расчета расслоения надработанного, а затем подработанного междупластья. Отработанная площадь верхнего угольного пласта значительно больше, чем нижнего пласта. Расчет выполним для следующих данных: глубина ведения очистных работ 700 м, мощность междупластья 100 м, ширина выработанного пространства равна 90 м, мощность отработанного пласта 1,2 м, а его кубиковая прочность в массиве  $K^* = 9$  МПа, компоненты бокового распора  $\lambda_x = \lambda_y = 0,7$ . Междупластье состоит из слоев мощностью не менее 15 м, и межслоевые связи достаточно прочны и близки к прочности смежных слоев.

Учитывая, что технология передового торпедирования применяется при квазиоднородных кровлях или слоистых кровлях с достаточно прочными породами и межслоевыми связями, ограничимся рассмотрением случая прочных межслоевых связей, угол трения которых не меньше  $20^\circ$ . Поскольку в настоящее время сведения об изменении угла трения и коэффициента сцепления на сформированной поверхности ослабления отсутствуют, ограничимся рассмотрением изменения угла трения по закону

$$\rho(x) = \rho_0 [1 + x(k_p - 1)]. \quad (6)$$

На основании данных работы [2] модуль упругости нижнего слоя основной кровли примем на порядок меньше.

Для отношения упругих характеристик  $\Delta = E_1(1+\nu_2)/(E_2(1+\nu_1))$ , равных 0,1; 1 и 10, и  $k_p = 0,3$  применительно к двухслойному междупластью получены зависимости между максимально возможной относительной толщиной нижнего слоя междупластья  $h/l$ , при которой межслоевые связи могут разрушиться, т.е. расслоиться, и безразмерным коэффициентом сцепления  $K_c C_0(x, y_i, W)/(\gamma H)$ . Здесь  $E_i$  и  $\nu_i$  модули упругости и коэффициенты Пуассона  $i$ -го слоя. Для определения систем усилий, формирующихся на контактах слоев, требуются знания только отношения упругих характеристик, поэтому значения упругих характеристик не приводятся. Отраженные на рисунке кривые  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$  (при постоянном угле трения по контакту) и  $b1$ ,  $b2$ ,  $b3$  (при угле трения по контакту, меняющемся по закону (6) и соответственно равном  $21^\circ$ ,  $27^\circ$  и  $33^\circ$ ) показывают, что при передовом торпедировании вызванное уменьшение угла трения по искусственно созданной поверхности ослабления способствует существенному возрастанию



Зависимость между относительной высотой расслоения  $h/l$  и величиной  $C/\gamma H$  при угле трения по контакту, постоянном (а) и меняющемся по закону (б) (б), для пород междупластья

максимальной относительной мощности слоя, при которой возможно расслоение по поверхности ослабления. С уменьшением угла трения  $\rho$  на сформированной поверхности ослабления при прочих равных условиях нарушение межслоевых связей возможно при большем коэффициенте сцепления.

Таким образом, предложенный подход к расчету расслоения пород тяжелых кровель очистных выработок позволит прогнозировать зарождение и прорастание трещин расслоения по искусственно созданной поверхности ослабления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И.П. Инженерно-геологические исследования в горном деле (для обоснования рационального использования и охраны недр). Л.: Недра, 1987. 255 с.
2. Кузнецов С.Т. Разупрочнение труднообрушаемых кровель угольных пластов / С.Т.Кузнецов, Ю.А.Семенов, В.П.Шишкин, М.М.Мукашев. М.: Недра, 1987. 200 с.
3. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Физматгиз, 1960. 224 с.
4. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П.Тимошенко, Дж.Н.Гудьер. М.: Наука, 1975. 576 с.