© А.Е. Хлусов, 2007

УДК 622.02:539.2

А.Е. Хлусов

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗА ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСТИМОГО ПРОГИБА СЛОИСТОЙ НЕОДНОРОДНОЙ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ СТАЛЕПОЛИМЕРНЫМИ АНКЕРАМИ

Для успешной эксплуатации горных выработок, закрепленных анкерами, необходим контроль состояния непосредственной кровли, который может быть осуществлен при помощи сравнения величины текущего прогиба заанкерованной пачки с его *допустимым* значением.

Идея предлагаемого метода прогноза устойчивости слоистой неодно-родной кровли заключается в том, что для определения ее допустимого про-гиба используются закономерности ре-ологического процесса снижения величины относительной деформации разрушения пород слоев и их контактов.

В работе рассматривается устойчивость нижней пачки неоднородной кровли, слои которых скреплены *сталеполимерными* анкерами, имеющими сцепление с породами по всей длине. Это позволяет допустить невозможность отслоений внутри скрепленной пачки (расслоения допускаются). В расчетах используется *вторая* теория прочности и принимается, что в момент времени *t* разрушение пачки как конструкции происходит в результате последовательного выхода из строя ее слоев и контактов при достижении их деформациями (соответственно растяжения и сдвига) своих предельных значений. Задача решается методами строительной механики.

Величина допустимого прогиба заанкерованной пачки определяется исходя из величины *предельного прогиба*, деленного на коэффициент запаса. *Сущность метода* расчета заключается в нахождении прогиба того ее слоя или контакта, после разрушения которого происходит обрушение всей пачки. Последовательность выхода из строя каждого ее слоя и контакта определяется при помощи сравнения величин фиктивных разрушающих нагрузок. Расчеты носят циклический характер.

Скрепленная анкерами пачка изначально считается монолитной, положение ее нейтральной оси определяется в двух местах – в середине пролета и у боков выработки – поскольку здесь имеет место знакопеременный изгиб. Затем для каждого *i*-того слоя и *j*-того контакта в пределах заанкерованной пачки рассчитывается величина *фиктивной нагрузки* (соответственно, q_i^u и q_j^p), которая в случае действия на *всю кровлю условно равномерно* разрушала бы их в момент времени *t по-отдельности*, т. е. при условии, что все остальные ее слои и контакты при этом остаются целыми. Расчеты ведутся для середины пролета выработки и ее боков по формулам:

$$(q_i^u)_{сер} = \left(\frac{\left(\varepsilon_{pi}^{пр}\right)_t}{z_{pi}^{max}} \right)^{a_i} \frac{\left(\sum_{p,c} E_i I_i^*\right)_{t\ сер}^{м}}{(\theta_{мi})_{сер}} \cdot \frac{16}{l^2(2-\omega)},$$

$$(q_i^u)_{бок} = \left(\frac{\left(\varepsilon_{pi}^{пр}\right)_t}{z_{pi}^{max}} \right)^{a_i} \frac{\left(\sum_{p,c} E_i I_i^*\right)_{t\ бок}^{м}}{(\theta_{мi})_{бок}} \cdot \frac{16}{l^2}, \quad (2)$$

$$(q_j^p)_{бок} = \left[(\gamma_j^{пр})_t \right]^{d_j} \cdot \frac{\left(G_j\right)_t}{\left(\lambda_j\right)_t} \cdot \frac{h_{мi}}{(\theta_{мi})_{бок}} \cdot \times$$

$$\times \frac{4}{l \cdot (2{,}7 - \omega)} \quad (3)$$

где $\left(\varepsilon_{pi}^{пр}\right)_t$, E_i, a_i, I_i^*, z_{pi}^{max} – механические и геометрические характеристики *i*-того слоя в составе пачки, а именно: величина предельной деформации растяжения данной породы при изгибе в момент времени *t*; модуль ее деформации; показатель, характеризующий пластические свойства породы; момент инерции слоя относительно общей нейтральной оси; расстояние от нее до максимально нагруженного волокна слоя, находящегося в зоне растяжения;

$\left(\sum_{p,c} E_i \cdot I_i^*\right)_{t\ сер}^{м}$, $\left(\sum_{p,c} E_i \cdot I_i^*\right)_{t\ бок}^{м}$ – в момент времени *t* величина жесткости монолитной пачки (или ее монолитной отдельности после возможного расслоения) мощностью $h_{мi}$ в середине пролета ℓ выработки и у ее боков, соответственно;

$(\gamma_j^{пр})_t$, $\left(G_j\right)_t$, d_j, $\left(\lambda_j\right)_t$ – в момент времени *t* механические и геометрические характеристики *j*-того контакта слоев в составе пачки, а именно: величина его предельной деформации сдвига; модуль деформации при сдвиге; показатель, характеризующий пластические свойства; коэффициент сдвига, характеризующий положение контакта в скрепленной пачке.

$(\theta_{мi})_{сер}$, $(\theta_{мi})_{бок}$ и ω – коэффициенты, характеризующие соотношения величин жесткости кровли в середине пролета, у боков выработки и целиков полезного ископаемого.

Фиктивные разрушающие нагрузки излома q_i^u и расслоения q_j^p сравниваются между собой: *минимальная* из них величина, которой присваивается условное название *первая критическая нагрузка* $q_1^{кр}$, покажет, что – слой или контакт – и где – в середине пролета или сбоку – выйдет из строя первым. Этот выбывший элемент исключается из дальнейшего взаимодействия, система переходит в новое состояние, а, значит, требуется перерасчет.

Если из строя выбывает *слой*, то жесткость пачки в данном сечении уменьшается. Это приводит к тому, что нейтральная ось пачки в этом месте смещается, а, значит, и изменяются величины разрушающих слои и их контакты фиктивных нагрузок, которые необходимо определить заново. Эти нагрузки снова сравниваются между собой, снова находится *минимальная*, которой присваивается условное название *вторая критическая нагрузка* $q_2^{кр}$, и которая указывает на следующий выбывающий из системы элемент. Если расчеты покажут, что из строя выходит опять слой, то необходимо вернуться к началу этого абзаца, произвести перерасчет, очередной критической нагрузке присвоить следующий (третий) порядковый номер и т. д. В противном случае, т. е. при выходе из строя контакта, необходимо перейти к следующему абзацу.

Если из строя выбывает *контакт*, то пачка расслаивается на две отдельности, каждая из которых имеет свою нейтральную ось, а, значит, должна быть рассчитана отдельно. Поэтому, расчеты необходимо произвести для каждой вновь образовавшейся условно монолитной пачки (или слоя). Очередные

найденные критические нагрузки $q_4^{кр}$ и $q_5^{кр}$ отмечаются следующими порядковыми номерами (в данном случае, четвертым и пятым). Если очередным выбывающим элементом системы оказывается контакт, то необходимо вернуться к началу этого абзаца, если же слой – то к началу предыдущего.

Расчет критических нагрузок ведется до тех пор, пока внутри пачки разрушение не охватит все скрепленные слои и их контакты. *Предельной изгибающей нагрузкой* $q^{пр}$ считается максимальная величина из найденных критических нагрузок $q_k^{кр}$. Она показывает, после выхода из строя какого силового *элемента* – слоя или контакта – и где – в середине пролета или сбоку – наступает полное разрушение всей *системы* «заанкерованная кровля». Это происходит при определенном прогибе, являющимся, таким образом, *предельным прогибом* кровли. Его величина находится из выражений:

$$f_t^{пр} = \frac{\left(\varepsilon_{pi}^{пр}\right)_t}{z_{pi}^{max}} \cdot A_{сер} \cdot \left(1+\eta\right) \qquad (4)$$

если к обрушению кровли привел излом *i*-того слоя в середине пролета выработки;

$$f_t^{пр} = \frac{\left(\varepsilon_{pi}^{пр}\right)_t}{z_{pi}^{max}} \cdot A_{бок} \cdot \left(1+\eta\right) \qquad (5)$$

если к обрушению кровли привел излом *i*-того слоя у боков выработки;

$$f_t^{пр} = \left[\left(\gamma_j^{пр}\right)_t\right]^{d_j} \cdot \frac{(G_j)_t}{(\lambda_j)_t} \cdot \frac{h_{мi}}{\theta_{мi}} \cdot \frac{l}{4\cdot(2{,}7-\omega)} \times$$

$$\times \frac{A_{бок}}{\left(\sum E_i \cdot I_i^*\right)_{t\,бок}} \cdot \left(1+\eta\right) \qquad (6)$$

если к обрушению кровли привело ее расслоение по *j*-тому контакту (коэффициенты $A_{сер}$ и $A_{бок}$ отражают податливость боков выработки).

В последних трех формулах необходимо использовать механические и геометрические характеристики того породного слоя или контакта, разрушение которого и привело к обрушению всей кровли.

В выражениях (4–6) используется значения предельных (разрушающих) относительных деформаций растяжения породы и сдвига контакта при их *длительном* нагружении. С целью выяснения вопроса о том, происходит ли изменение во времени этих величин, были проведены лабораторные эксперименты, посвященные определению реологических характеристик пород и их контактов. Их результаты показали, что с течением времени происходит уменьшение значения предельной относительной деформации, как растяжения, так и сдвига, что должно учитываться в расчетах кровли по деформациям.

Разработанный метод позволяет оценивать устойчивость слоистой неоднородной кровли, закрепленной сталеполимерными анкерами.

Коротко об авторах

Хлусов А.Е. – ведущий инженер, Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр (ВНИМИ), С-Петербург.