

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВЕДЕНИЯ КРОВЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Представлені результати досліджень стану покрівлі від фізико-механічних властивостей гірського масиву, його напруженого-деформованого стану і ступеня пошкодження порід. Запропоновано просторово-часовий показник стійкості, що є функцією температури, напруженого стану масиву і площі оголення покрівлі.

THE RESEARCH OF BEHAVIOR MECHANISM THE ROOF WITH USING THE SPATIAL-TIME INDEX ITS STEADINESS

There are presented researches results of roof state with physical-mechanical rock massive properties, its deformed-strained state and rock's damage degree. Proposed spatial-time index of steadiness, it's the function of temperature, strained state of massive and the square of roof uncovering.

В настоящее время при эксплуатации высоконагруженных лав (ВЛ) отмечается высокий уровень травматизма, в том числе из-за обрушений пород вследствие повышенного горного давления, возникающего как результат существенно возросших скоростей подвигания лав. Конструкции механизированных крепей и их сопряжений со штреками, а также охранные конструкции являются в процессе работы весьма нагруженными, что нередко приводит к их поломкам, и, как следствие, травмированию горнорабочих.

Основными параметрами, определяющими устойчивость кровли в указанных зонах, являются напряженное состояние массива, скорость подвигания лавы и площадь кровли, поддерживаемая секциями крепи очистного участка.

В работах [1, 2] установлена непосредственная взаимосвязь физико-механических свойств и других параметров, в том числе, температуры горного массива. В соответствии с данными работы [1], в естественных условиях залегания пласта имеются аномалии в распределении температуры по шахтному полю, которые соответствуют аномалиям в распределении напряжений. Зависимость между плотностью теплового потока q и температурным градиентом Γ описывается законом Фурье:

$$q = \lambda \delta, \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности.

В работах [3, 4], установлено, что коэффициент теплопроводности горных пород зависит от плотности, трещиноватости, наличия пустот, фазового состояния, водо- и газонасыщения, температуры. С точки зрения долговременной устойчивости он зависит от изменения всей совокупности перечисленных параметров, что иначе можно назвать его зависимостью от степени поврежденности пород. При рассмотрении вопросов устойчивости горного массива, как пра-

вило, речь идет об одновременном воздействии на приконтурную зону обнажения статических и переменных нагрузок.

Рассмотрим эти вопросы более подробно. Воспользовавшись критерием Бейли, можно вычислить время до разрушения t [5] при нагружении образцов горной породы с постоянной скоростью $\sigma = \dot{\sigma}t$ при испытаниях циклическим нагружением, изменяющимся по закону:

$$\sigma(t) = \sigma_a (1 - \cos \omega t) / 2 \quad (2)$$

где σ_a - амплитуда; ω - частота нагружения.

Для циклически изменяющегося нагружения в [6] получено следующее выражение:

$$\tau_f = N \frac{2\pi}{\omega} I_0 \left(i \frac{\gamma \sigma_a}{2KT} \right) / \exp \left(\frac{\gamma \sigma_a}{2KT} \right) \quad (3)$$

где N - число циклов до разрушения; I_0 - функция Бесселя от мнимого аргумента. Расчеты по этой формуле можно проводить только в случае, когда зависимость γ и температуры T от времени можно пренебречь. Запишем формулу Журкова [5] относительно разрывного напряжения σ_f :

$$\sigma_f = \frac{U_0}{\gamma} \left(1 - \frac{KT}{U_0} \ln \frac{\tau_f}{\tau_0} \right) \quad (4)$$

Из (4) видно, что прочность материала зависит от температуры и времени τ_f [5]. Следовательно, представление о «пределе прочности», как константе материала, не согласуется с опытом. Без указания о том, при какой температуре производились измерения прочности и в течение какого времени действовало разрушающее напряжение σ_f , не имеет смысла говорить о прочности материала.

В настоящее время известны три фундаментальных физических причины отступления от уравнения Журкова [5]. Одна из них обусловлена тем, что скорость процесса разрушения не может превышать скорости звука. По этой причине зависимости $\ln \tau_f = f(\sigma_f)$ для твердых тел с разными типами химических связей (например, металлов и полимеров) испытывают при $\tau_f \leq 10^{-6}$ резкий излом. По отношению к горным породам это не существенно, так как они имеют практически одинаковый набор химических связей. Вторая причина обусловлена обратимостью разрушения (залечиванием трещин). Эти процессы имеют место при малых напряжениях наряду с накоплением очагов разрушения. В связи с этим, по отношению к горным породам обратимость разрушения не имеет места, так как в этом случае имеют место нагрузки, сравнимые с пределом прочности и соответственно, большими деформациями. Третья причина непо-

средственно связана с термофлуктуационной природой разрушения, в силу которой время до разрушения тела определяется вероятностью возникновения разрушающих тепловых флуктуаций.

При разрушении твердого тела образование каждой трещины приводит к выделению энергии W , накопленной в нагруженном теле. Трещинообразование выгодно, если $W > 0$, т.е. если энерговыделение из тела больше его энергоемкости (способности поглощать выделяемую локальную энергию). При $W > 0$ образование трещины выступает как форма релаксации неравновесной незамкнутой системы, какой является нагруженное тело. Для эволюции таких систем характерно уменьшение свободной энергии F во времени, причем из всех возможных траекторий релаксации реализуется та, для которой величина F максимальна. При образовании одной трещины свободная энергия $F = W - TS$ понижается за счет возрастания информационной энтропии на величину $\Delta S = K \ln \Delta N$, вызванного наличием в теле эффективных мест возможного трещинообразования. Дальнейшее развитие этого подхода приводит к определению критической концентрации зародышевых трещин, обуславливающих потерю устойчивости и разрушение тела на основе концентрационного критерия разрушения [6]. Он не пригоден по отношению к разрушению горных пород на макроуровне (начиная от образца до породного обнажения) в связи с тем, что горная порода является материалом с ярко выраженной анизотропией физико-механических свойств. Преимущества термодинамического (энергоэнтропийного) подхода к оценке степени поврежденности материалов, в частности, горных пород, достаточно подробно рассмотрены в работах [7,8], они состоят, в первую очередь, в том, что он позволяет рассматривать процесс разрушения горной породы или другого материала, не зная его структуры. Изменение энтропии можно записать [9]. в следующем виде :

$$dS = \frac{\partial Q}{T} + dS_i \quad (5)$$

где dS_i - прирост энтропии внутри твердого тела (породы) во время протекания процесса изменения состояния. Необратимый прирост энтропии внутри тела при неупругом и необратимом протекании процесса, что соответствует механизму разрушения горных пород, определяют в виде соотношения [9]:

$$dS_i = \frac{1}{T} \sigma_{ik} \partial \epsilon'_{ik} \quad (6)$$

Учитывая, что $dU = \partial q - \partial A$ и

$$\partial A = \sigma_{ik} (d\epsilon^y_{ik} + \partial \epsilon'_{ik}) \quad (7)$$

где $d\varepsilon_{ik}^y$ - упругая часть деформации; $\partial\varepsilon_{ik}'$ - неупругая часть деформации, имеем:

$$dU = TdS - \sigma_{ik} \partial\varepsilon_{ik}' - \partial A. \quad (8)$$

В работах [10, 11] была показана связь между энтропией горных пород, степенью их поврежденности и устойчивостью породных обнажений. Однако эти исследования были проведены при одних и тех же температурных условиях. В действительности же, температура горных пород в выработках зависит от глубины [12]. Тогда, в соответствии с соотношениями (6) и (7) энтропия пород, а следовательно и устойчивость кровли должны непосредственно зависеть от температуры и площади обнажения.

Здесь следует сразу сделать оговорку о том, что на больших глубинах температура породного массива достигает 40° С и более. При проведении выработок в таких условиях уже имеют место температурные напряжения. Однако, как показали исследования [5, 16], существенного влияния на изменение общего напряженного состояния вокруг выработки они не оказывают. В связи с этим в работе [13] сделан вывод о том, что при расчетах, связанных с проявлениями горного давления, температуру можно не учитывать.

Кроме того, по нашему мнению, повышенная температура горных пород способствует их пересыханию и, преобладанию, вследствие этого, механизма хрупкого разрушения.

Не подвергая сомнению эти выводы, следует отметить, что в работах [13-15] речь шла о напряженном состоянии породного массива, а не о долговременной устойчивости его кровли, которая в соответствии с кинетической теорией прочности [5, 6] и общепринятой термоактивационной природой разрушения твердых тел [5, 6, 16, 17], находится в непосредственной зависимости от температуры. Интерес в этом смысле представляют результаты работы [9]. Для горных пород характерен положительный градиент кривой напряжение-деформация. Прочностным испытаниям были подвергнуты сухие и влажные горные породы: гранит, андезит, песчаник и туф. Установлено, что прочность этих пород снижается при повышении температуры, а деформация в пиковой точке увеличивается. Градиент участка кривой, характеризующей взаимосвязь напряжения и деформации после разрыва при повышении температуры становится меньше. Прочность горных пород увеличивается при уменьшении температуры. При этом деформация в пиковой точке уменьшается, а градиент участка кривой, описывающей поведение после разрушения, увеличивается при падении температуры.

При действии на контур породного обнажения одновременно нескольких факторов (как правило, это - технологическое воздействие, как следствие ведения горных работ; силы горного давления; тектонические процессы), по изменению одного конкретного параметра трудно оценить количество накопленных повреждений. В таких случаях стремятся ввести обобщенный критерий эквива-

лентности [19]. В качестве одного из таких критериев и предлагается использовать энтропию. Как было показано в работах [10, 11], энтропия является количественной обобщенной мерой накопленных в материале повреждений. Если критерий длительной устойчивости записать в виде [17, 20]:

$$S < S^* \quad (9)$$

где S^* - значение энтропии в момент, предшествующий разрушению.

Тогда, с привлечением кинетической теории прочности [5, 6, 16] энергоэнтропийный метод оценки устойчивости может аналитически быть выражен следующим образом:

$$S = S_0 \exp(-k_s t) \quad (10)$$

где S_0 - начальное значение энтропии неповрежденной породы.

Из последнего соотношения может быть найдено время сохранения устойчивости контура кровли:

$$t = \frac{\ln(S^* / S_0)}{k_s} \quad (11)$$

Таким образом, для определения времени t из (11) нам необходимо знание трех величин: S^* , S_0 , k_s . Определение S^* и S_0 с помощью разработанной методики [10,11]. Для осуществления прогноза устойчивости реального породного контура необходимы предварительные лабораторные исследования по определению величины изменения энтропии k_s образцов из этого контура. Затем, с использованием критериев подобия, описанных, например, в [19] осуществляется пересчет k_s для конкретных условий и периодический контроль близости текущего значения энтропии S_i к ее критическому значению S^* (см. соотношение (11)).

Для рассмотрения устойчивости кровли представляется целесообразным введение показателя устойчивости кровли ψ_{st} :

$$\psi_{st} = f(v), \quad (12)$$

где v - скорость подвигания лавы.

Величина ψ_{st} находится в квазилинейной зависимости от отношения площади активно поддерживаемой кровли F_c к общей обнаженной площади кровли в лаве F_o , что нетрудно показать, используя результаты работ [13,15]:

$$\psi_{st} = k(F_c / F_o) \quad (13)$$

где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от особенностей конкретной ВЛ.

Дальнейшее рассмотрение поведения кровли при работе ВЛ можно провести на основе популяционно-балансовой модели [21]. Показатель устойчивости кровли ψ_{st} определяется двумя факторами: увеличением площади кровли за счет подвигания лавы со скоростью v и обрушением кровли за механизированной крепью за промежуток времени от t до Δt .

Таким образом, изменение величины ψ_{st} имеет следующий вид:

$$\Delta\psi_{st} = \psi_{st}(t + \Delta t) - \psi_{st} = \Phi(\psi_{st}, \Delta t) \quad (14)$$

Так как $\Phi(\psi_{st}, \Delta t)$ линейна по Δt при малых Δt , то очевидно:

$$\Phi(\psi_{st}, \Delta t) = f(\psi_{st})\Delta t \quad (15)$$

$$\text{здесь } f(\psi_{st}) = \alpha\psi_{st} - v\psi_{st} \quad (16)$$

где α и v - соответственно скорость обрушения кровли и подвигания забоя лавы.

Таким образом:

$$\Delta\psi_{st} = (\alpha\psi_{st} - v\psi_{st})\Delta t \quad (17)$$

Отсюда, деля на Δt и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$ и обозначая $\alpha - v = \varepsilon$, получаем дифференциальное уравнение:

$$\psi'_{st} = \varepsilon\psi_{st} \quad (18)$$

Это уравнение нетрудно проинтегрировать. Пусть ψ_{st} - решение (18), удовлетворяющее условию $\psi_{st}(t_0) = \psi_{st0}$. В существовании такого решения можно не сомневаться, так как правая часть (18) удовлетворяет условию теоремы Коши. Подставив полученное решение в (18), мы получим тождество:

$$\begin{aligned} \psi'_{st} &\equiv \varepsilon\psi_{st} \text{ или} \\ \frac{\psi'_{st}(t)}{\psi_{st}} &\equiv \varepsilon \\ &\text{или} \\ \frac{d[\ln\psi_{st}(t)]}{dt} &\equiv \varepsilon, \text{ или} \\ \frac{d}{dt}[\ln\psi_{st}(t) - \varepsilon t] &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Итак, если $\psi_{st}(t)$ - решение уравнения (18), то производная функции $\ln \psi_{st} - \epsilon t$ равна тождественно нулю, т. е. сама функция равна постоянной.

Отсюда, после потенцирования имеем:

$$\psi_{st}(t) = \exp(\epsilon t + a). \quad (20)$$

Окончательно, учитывая соотношения (11), (13) и (20), пространственно-временной показатель устойчивости кровли ψ_{st} можно выразить следующим образом:

$$\psi_{st} = \psi_{st}(v)\psi_{st}(T)\psi_{st}(F)\Psi_{st}(S), \quad (21)$$

где $\psi_{st}(v)$ - функция устойчивости кровли от скорости движения лавы; $\psi_{st}(T)$ - функция устойчивости кровли от температуры; $\psi_{st}(F)$ - функция устойчивости кровли от площади обнажения кровли $\psi_{st}(S)$ - функция устойчивости кровли от степени поврежденности пород ее слагающих.

Полученные результаты позволили сформулировать новое научное положение: устойчивость участка кровли в границах влияния на него очистных работ определяется составом массива горных пород, вмещающего этот участок, его напряженностью и газонасыщенностью, и адекватно оценивается предложенным впервые автором пространственно-временным показателем устойчивости кровли ψ_{st} , который находится в квазилинейной зависимости от отношения площади активно поддерживаемой кровли к общей обнаженной площади горного массива в окрестности лавы и ее сопряжений, и экспоненциально увеличивается с ростом скорости подвигания высоконагруженной лавы, и сделать следующие выводы:

1. Устойчивость кровли на границе обнажения находится в непосредственной зависимости от напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств, в том числе, температуры слагающих их пород и степени поврежденности пород ее слагающих.

2. Повышенные температуры пород в выработке могут служить одной из причин преобладания механизма их хрупкого разрушения.

3. Впервые предложенный автором пространственно-временной показатель устойчивости кровли ψ_{st} является характеристикой, наиболее адекватно описывающей поведение кровли с учетом физико-механических свойств пород ее слагающих, напряженно-деформированного состояния массива, скорости подвигания лавы и интенсивности накопления повреждений в породах кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Ю. Н. Термодинамические процессы в горном массиве // Уголь, 1982. - № 7.-С. 19-22.
2. Трофимов В. Д., Розенбаум М. А., Рейпольский П. А. и др. Тепловой эффект в горной породе при объемном нагружении // Изв. Вузов. Горный журнал. - 1977, № 11. - С. 49-51.

3. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. - М.: Недра, 1973. - 285с.
4. Zito G., Mongelli F., Loddo H. Temperature dependence of the thermal parameters of some Rocks // Jnt. J. Rock Mech. and Mining Sci. and Geomech. - 1996, 33. - № 3. - p.117 A.
5. Веттегрень В. И., Лазарев С. О., Петров В. А. Физические основы кинетики разрушения материалов. - Л.: ФТИ, 1989. - 246 с.
6. Петров А. А. // Физика и механика разрушения композиционных материалов. - Л.: ФТИ АН СССР, 1986. - 137 с.
7. Вильсон А. Д. Энтропийные методы моделирования сложных систем. - Пер. с англ. Под ред. Ю. С. Попкова. - М.: Наука, 1978. - 247 с.
8. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов / Вылегжанин В. Н., Егоров П. В., Мурашев В. И. - Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1990. - 295 с.
9. Норель Б. К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. - М.: Наука, 1983. - 128 с.
10. Зорин А. Н., Бондаренко В. И., Мещанинов С. К. и др. К вопросу устойчивости породных обнажений // Науковий Вісник НГАУ. - 2000, № 1. - С.100-101.
11. Бондаренко В. И., Зорин А. Н., Грядущий Ю. Б., Мещанинов С. К., Гончаров А. Д., Вершинин В.А., Ульянов И. В. Закономерность изменения устойчивости породных обнажений при периодических нагрузках. - Открытие № 151// Сб. научных открытий: М. - СПб. - 2000.- С. 17 - 19.
12. Васючков Ю. Ф., Янко С. В. Горное дело. - Киев: Техніка, 1995. - 507 с.
13. Заславский Ю. З., Зорин А. Н., Черняк И. Л. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. - Киев: Техніка, 1972. - 156 с.
14. Белаенко Ф. А. Температурные напряжения в породах вокруг подготовительных выработок // Изв.Вузov. Горный журнал, 1962. - № 8.
15. Заславский Ю.З. Вопросы крепления капитальных горных выработок глубоких шахт в Донбассе. - М.: ЦНИИТЭИугля, 1963. - 132 с.
16. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. - Ташкент: ФАН, 1985. - 168 с.
17. Федоров В. В. Термодинамический метод оценки длительной прочности // Пробл. прочности. - 1972, № 9. - С. 45-47.
18. Inada Yoshinori and others. The influence high and low temperature on characteristics of rocks under compression // J. Soc. Mater. Sci. - 1992. - 41, № 463. - p.410-416.
19. Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. - Киев: Наук. думка, 1995. - 360 с.
20. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. - Пер. с англ. Под ред. Ю. С. Попкова. - М.: Наука, 1978. - 127 с.
22. Гильдерман Ю. И. Вооружившись интегралом... - Новосибирск: Наука, 1980.- 192 с.

УДК 624.191.24

В.И. Петренко, В.Д. Петренко

ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПЕРЕГОННЫХ ТОННЕЛЕЙ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

У статті описано комплексне рішення проблеми техногенної безпеки під час спорудження перегінних тунелів мілкового закладання на основі нових технологій та спеціальних засобів будівництва.

TECHNOGEN SAFETY IN A PERIOD BUILDING STAGING TUNNELS OF PETTY LAYING

At the article the complex decision of technogenous safety problem of running tunnels on the basis of new technologies and special methods of constructions has been described.

Рост крупных городов Украины сопровождается интенсивным увеличением объемов подземного транспортного строительства. К наиболее важным его объектам относятся станционные и перегонные тоннели метрополитена мелкого заложения. Новая техническая политика сооружения станций и тоннелей на