

спективное направление, тем более что процесс создания экспертной системы требует участия высококвалифицированных специалистов в области искусственного интеллекта (этимися вопросами занимается специальная наука – инженерия знаний), которых система высшего образования готовит пока недостаточно.

На основании приведенных соображений, Департаментом по чрезвычайным ситуациям и охране труда Министерства топлива и энергетики Украины и Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины намечена программа создания, на базе совместных исследований по анализу и прогнозированию опасных и аварийных ситуаций на угольных шахтах Украины, стран СНГ и доступного нам зарубежного опыта, экспертной системы, направленной на решение задач снижения аварийности и последствий принятия неэффективных решений по вводу в действие генерального ПЛА и использования средств противоаварийной защиты угольных шахт. Основные положения формирования такой системы планируется опубликовать в ближайшее время на страницах специализированных изданий горной науки и промышленности Украины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Частиков А.П., Гаврилова Т.А., Белов Д.Л. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS.-СПб.: БХВ-Петербург, 2000.- 608 с.
2. Мясников А.А., Патрушев М.А. Основы проектирования вентиляции угольных шахт.- М.: Недра, 1971.- 228 с.
3. Абрамов Ф.А., Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников.- М.: Недра, 1978.- 238 с.
4. Потемкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках.- К.: Техника, 1991.- 124 с.
5. Применение метода анализа иерархий для принятия решений при возникновении чрезвычайных ситуаций/Потемкин В.Я., Кокоулин И.Е., Юшина И.В.// Безопасность труда в промышленности.- 1994.- № 3.- с. 34-37.

**УДК 531.8**

А.Н. Зорин, И.В. Ульянов

### **РАЗРУШЕНИЕ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Розглянуто ентропійний метод контролю стійкості породних оголень при циклічному на-  
груженні.

### **DESTRUCTION OF GEOMATERIALS AT CYCLIC LOADING**

Is considered entropic method of control of stability rock nakes at cyclic loading.

Устойчивость породных обнажений зависит от целого ряда факторов: величины и характера изменения нагрузки, состояния пород обнажения, его геометрических параметров и т. д. При создании того или иного породного обнажения одним из важнейших вопросов является обеспечение его устойчивости в течение достаточно продолжительного времени. При этом для коррекции доступны такие параметры, как характер нагрузки, которой подвергается породное обнажение и способ его образования. Характер нагрузки может быть, в простейшем случае, циклическим. Устойчивость прямо зависит от величины этой нагрузки.

Циклическое нагружение приводит к появлению трещин усталости и образованию других дефектов структуры, что, в конечном счете, имеет своим следствием потерю несущей способности. Процессы в породах и материалах, происходящие под действием внешних циклических механических нагрузок, чрезвычайно сложны. Однако они имеют своим следствием всегда одно и то же – потерю устойчивости (несущей способности) породным обнажением или объектом. Подобные процессы разрушения материалов и пород, составляющих породное обнажение, принято называть накоплением поврежденности.

Наиболее достоверную информацию об эволюции материала содержит энтропия, как мера нарушенности (поврежденности) породы или материала. Знание закономерности динамики изменения этой величины, ее критического значения, которое соответствует потере устойчивости породы, из которой состоит обнажение, позволяет достаточно просто и достоверно прогнозировать устойчивость.

Согласно кинетической теории прочности, процесс зарождения и накопления усталостных повреждений протекает в 3 стадии:

- 1) возбуждение межатомных связей под влиянием механической нагрузки;
- 2) разрыв напряженных связей за счет термических флуктуаций;
- 3) накопление разорванных связей, приводящее к образованию микротрещин.

Если теперь объединить первую и вторую стадии накопления повреждений, назвав их повреждениями на микроуровне, то полная долговечность  $N$  от первого цикла нагружения до разрушения:

$$N = N_T + N_{жс}, \quad (1)$$

где  $N_T$  – долговечность на стадии I (стадия рассеянной поврежденности) и  $N_{жс}$  живучесть (стадия локализованной поврежденности) – период развития магистральной трещины вплоть до разрушения объекта.

В [1] степень разупорядоченности структур оценивают энтропией микроструктуры  $S_m$ :

$$0 < S_m = \left( \frac{R}{V_m} \right) \ln W \ll \infty, \quad (2)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $1 < W < \infty$  – число конфигураций, характерных для определенного типа структур;  $V_m$  – молярный объем.

Рассмотрим разрушаемую породу, из которой состоит породное обнажение, как сложную многокомпонентную систему, при действии на которую внешней силы, объединенное уравнение термодинамики имеет вид:

$$\begin{aligned} TdS &\geq dU + PdV + dL, \\ dL &= \sum \zeta dx, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\zeta$  - обобщенная сила (внешняя сила, действующая на систему),  $x$  – обобщенная координата (параметр состояния, сопряженный с действием силы).

При равновесии фаз, когда часть породы  $dG$  переходит из одного фазового состояния в другое, равновесие системы характеризуется дополнительным условием:

$$dG_1 = dG_2. \quad (4)$$

Для необратимых процессов, к которым относится и разрушение [2]:

$$\frac{diS}{dt} = \sum J_K X_K \geq 0, \quad (5)$$

где  $J_K$  – обобщенные скорости,  $X_K$  – обобщенные силы породного обнажения (процесс потери устойчивости).

Для обратимых процессов  $diS=0$ .

Эволюцию всегда можно разложить на 2 одновременно идущих процесса: разрушение и рекомбинацию разрушенных связей. Оба эти процесса являются необратимыми и для них в соответствии с [1] могут быть записаны феноменологические уравнения:

$$\begin{cases} J_1 = L_{11}X_1 + L_{21}X_2 \\ J_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2, \end{cases} \quad (6)$$

где  $L_{ix}$  – феноменологические коэффициенты (физические параметры породы).

В процессе потери устойчивости, начиная с любого момента развития неупругих деформаций (в т.ч. ползучести), энтропия  $S$  возрастает, т.к. они носят необратимый характер. Возрастание  $S$  будет происходить вплоть до момента разрушения, причем сам необратимый процесс потери устойчивости (разрушения) материалов типа горных пород сопровождается скачком  $S$  [1]. Значение  $S$  в момент, предшествующий разрушению –  $S_*$ . Тогда критерий длительной устойчивости:

$$\int_0^{t_*} \frac{\sigma_{iK}}{T} \left( \frac{\partial V_i}{\partial X_K} + \frac{\partial V_K}{\partial X_i} \right) dt = S_*(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, T) \quad , \quad (7)$$

где  $X_i$  – Эйлера координаты точек среды;  $V_i$  – скорости точек среды в процессе ползучести;  $\sigma_{iK}$  – тензор истинных напряжений в Эйлера координатах;  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  – инварианты тензора истинных напряжений в момент, предшествующий разрушению;  $t_*$  – время до разрушения ( $\Pi_1 = \sigma_{iK} \delta_{iK}$ ,  $\Pi_2 = \sigma_{iK} \sigma_{iK}$ ,  $\Pi_3 = \sigma_{iK} \sigma_{Kp} \sigma_{pi}$ ),  $\delta$  – приращение деформации.

Смысл этого соотношения заключается в утверждении, что накопленная в

процессе ползучести энтропия должна к моменту времени  $t^*$  принять некоторое определенное значение, зависящее от конечного напряженного состояния.

Используя данные работы [2], формулу второго начала термодинамики можно записать следующим образом:

$$dS = \delta Q/T + dSi, \quad (8)$$

где  $dSi$  – рассматривается как прирост энтропии внутри твердого тела (породы) во время протекания процесса изменения состояния.

Необратимый прирост энтропии внутри тела при неупругом и необратимом протекании процесса обычно определяют в виде соотношения:

$$dSi = \frac{1}{T} \sigma_{iK} \delta \epsilon_{iK}^n. \quad (9)$$

Учитывая, что  $dU = \delta Q - \delta A$  и  $\delta A = \sigma_{iK} (d\epsilon_{iK}^y + \delta \epsilon_{iK}^n)$ , где  $d\epsilon_{iK}^y$  – упругая часть деформации;  $\delta \epsilon_{iK}^n$  – неупругая часть деформации, имеем:

$$dU = TdS - \sigma_{iK} \delta \epsilon_{iK}^n - \delta A. \quad (10)$$

Энтропийный подход к оценке разрушения горной породы описан в [3]. Матрица распределения вероятности  $P_{ij}$  обнаружения напряжений  $i$ -го интервала амплитуд в  $j$ -й стадии разработки.

Величина энтропии нарушенности:

$$H_j = - \sum_{i=1}^m P_{ij} \log P_{ij}, \quad (11)$$

где  $m$  – число интервалов амплитуд нарушений.

Термодинамический энтропийный метод позволяет рассматривать испытуемое породное обнажение, его свойства, в том числе, прочностные, не зная его структуры, в чем и состоит его основное преимущество [4].

В [5...10], в той или иной степени изучены термодинамические процессы, связанные с изменениями состояния и структуры геоматериалов.

В [11] отмечается, что горные породы, в отличие от металлов, имеют повышенную чувствительность к циклическим нагрузкам и связывается это со сложностью их строения и ярко выраженной дефектностью структуры.

Использование энтропии в качестве информативного параметра для оценки степени поврежденности пород, слагающих породное обнажение, позволяет наиболее достоверно оценивать и прогнозировать их устойчивость при воздействии циклов механических нагрузок. Объясняется это не только свойствами энтропии как информативного параметра, но и тем, что она не измеряется не-

посредственно, а определяется через другие параметры породы. При этом набор таких параметров определяется целью и задачей исследований, а также удобством и возможностью измерения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика управления гетерогенным упруго-наследственным горным массивом /Зорин А.Н., Долинина Н.Н., Колесников В.Г.- Киев: Наук.думка, 1980.-288с.
2. Булат А.Ф., Курносое А.Т. Управление геомеханическими процессами при отработке угольных пластов. - Киев: Наук. думка, 1987. –200 с.
3. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления.- М.: Недра, 1978.-175с.
4. Черняк И.Л., Бурчаков Ю.И. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт. - М.: Недра, 1984.-304с.
5. Зорин А.Н., Бондаренко В.И., Мещанинов С.К. и др. К вопросу устойчивости породных обнажений // Науковий вісник НГАУ. - 2000, № 1.-С.100-101.
6. Бондаренко В.И., Зорин А.К, Мещанинов С.К., Ульянов И.В. и др. Закономерность изменения устойчивости породных обнажений при переменных нагрузках.- Открытие № 151. - Сб.научных открытий. - М.-Санкт-Петербург. - 2000. - 43с.
7. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974. - 560с.
8. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. -М.: Машиностроение, 1974.-311с.
9. Сосновский Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения. - Минск: Наука и техника, 1987. - 288с.
10. Ильюшин А.А., Победра Б.Е, Основы математической теории термовязкоупругости. - М.: Наука, 1970.
- 11.Ставрогин А.Н., Протосея А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. - М.: Недра, 1992. - 224с.

**УДК 539.3:620.17**

Ю.А. Шевляков, Ю.А. Костандов,  
А.Н. Рыжаков, И.Е. Шиповский

#### **КВАЗИХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Разработана модель квазихрупкого разрушения при произвольных нагрузках. Получены аналитические выражения для анализа напряженно-деформированного состояния в пластине вблизи вершины стационарной трещины. Предлагаемая модель имеет строгое физическое обоснование и позволяет в рамках единой концепции описывать протекание процессов хрупкого и квазихрупкого разрушения материалов с дефектами при динамическом и статическом нагружении.

#### **QUASY-FRAGILE DESTRUCTION AT IMPULSE LOADING**

The model quasy -fragile destruction is developed at any loadings. The analytical expressions for the analysis is intense - is deformed condition in a plate near to top of a stationary crack are received. The offered model has a strict physical substantiation and allows within the framework of the uniform concept to describe course of processes fragile and quasy -fragile destruction of materials with defects at dynamic and static loading.

При изучении процесса разрушения принято рассматривать отдельно случаи квазистатического и динамического разрушения. Основанием для такого подхода служат качественные отличия в поведении дефектов типа трещин при медленном и быстром нагружении, отмеченные в [1, 2].

Однако при любом виде нагружения процесс разрушения представляет собой последовательность элементарных актов разрыва межатомных или межмо-