УДК 622.271.332:0267

В.А.ПАДУКОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), Россия

ДЕФОРМАЦИОННО-ЭНТРОПИЙНЫЙ КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД, УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Сформулирован инвариантный деформационно-энтропийный критерий прочности горных пород, устойчивости горных выработок. Критическая энтропия и критическая деформация характеризуют состояние геомеханической системы в момент ее гибели.

The invariable deformation entropy criterion of rock strength and stability of mine workings has been stated. Critical entropy and critical rock deformation characterize the state of geomechanical system at the moment of its failure.

Прочностные характеристики – это временное сопротивление горных пород элементарным видам напряжений: сжатию, растяжению, сдвигу. Такое понятие прочности предполагает тождество взаимосвязи между частицами среды и развития процесса. Иными словами, понятие прочности имеет два аспекта, к которым нужно обращаться, чтобы объяснить прочностные свойства пород [6].

Механика сплошной среды изучает взаимосвязь частиц среды при нагружении как потенциальное и завершенное движение. Мгновение, когда происходит разрушение объема среды во времени, не измеряется.

Взаимно дополняющие друг друга аспекты понятия прочности явились основой развития представлений о процессе разрушения пород с учетом и без учета фактора времени. Понятие прочности отражает все этапы становления механики горных пород, в частности, гипотез предельного состояния. Разрушение рассматривается как критическое состояние, которому предшествуют упругая, пластическая деформация, рост микротрещин и магистральной трещины, скольжение по разрыву.

Согласно феноменологическим теориям, механические состояния полностью определяются напряжениями, возникающими в среде. Напряженные состояния, при которых происходит переход среды из одного состояния в другое, называются предельными.

Предсказание условий перехода из одного механического состояния в другое при всех видах напряженного состояния составляет содержание теорий предельного состояния – гипотез прочности. Влияние режима нагружения на характеристики напряженного состояния среды гипотезы не учитывают.

Основных гипотез прочности четыре, отличаются они друг от друга критериями предельного состояния.

1. Гипотеза наибольших нормальных напряжений. Согласно экспериментальным данным, гипотеза хорошо описывает хрупкое разрушение горных пород при растяжении.

2. Гипотеза максимальных относительных деформаций. Гипотеза наиболее полно отражает условия хрупкого разрушения горных пород.

3. Гипотеза максимальных касательных напряжений. Эта гипотеза объясняет факт высокой прочности материала при всестороннем сжатии. Она согласуется с результатами опытов для пластических деформируемых пород.

4. Гипотеза прочности – гипотеза потенциальной энергии формоизменения. Гипотеза предполагает наступление критического состояния при достижении энергией формоизменения предельной величины. Энергию формоизменения находят как разность между удельной работой, затрачивае-

мой на деформацию единицы объема среды, и удельной работой изменения объема.

Недостатки феноменологических гипотез прочности следующие: гипотезы не учитывают влияние на прочность породы режима нагружения и масштабного фактора. Между тем прочностные характеристики горных пород не являются величинами инвариантными, т.е. они изменяются при переходе от одних испытаний к другим, при изменении объема образца.

Согласно феноменологическим гипотезам прочности, разрушение породы происходит мгновенно и только тогда, когда напряжения достигнут предела прочности. Однако экспериментальными исследованиями установлено, что разрушение есть не критическое событие, а постепенный кинетический, термоактивационный процесс, развивающийся при нагрузках меньше критических.

Влияние режима нагружения на прочностные характеристики пород определяется его характером. Воздействие нагрузок может носить импульсный, статический и динамический характер.

Экспериментальными исследованиями установлено, что режимы нагружения значительно влияют на прочностные и упругие характеристики пород. Вместе с тем выявлено, что критическая деформация [1] не зависит от режима нагружения и является величиной инвариантной:

$$\varepsilon_{\hat{e}\eth} = \sigma_{\eth}\left(\frac{1}{\mathring{A}_{\acute{y}\hat{o}}} + \frac{1}{\grave{I}_{\ \eth}}\right) = \mathrm{inv},$$

где $\sigma_р$ – предел прочности на растяжение; $E_{эф}$ – эффективный модуль деформации; M_p – модуль спада.

Результаты по проявлению масштабного эффекта на прочностные свойства массива горных пород указывают на необходимость поиска инвариантного критерия предельного состояния массива при его разрушении.

Согласно проф. С.С.Вялову, критическая деформация массивов горных пород $\varepsilon_{кр} = 0{,}02$ [2]. Инвариантный деформационный критерий предельного состояния массива может быть объяснен на основе закономерностей процесса трещинообразования в очаге землетрясения.

Распределение числа сейсмоакустических импульсов по энергии описывается законом Гутенберга [3]:

$$\log N_i = \alpha - \beta \log A_i,$$

где N_i – количество импульсов; A_i – энергия импульса; α и β – эмпирические коэффициенты.

Взаимосвязь площади трещин с энергией импульса имеет вид (по Н.В.Шебалину)

$$\log F_i = \hat{a} + \beta \log A_i,$$

где F_i – площадь трещин на единицу объема; $в$ и β – эмпирические коэффициенты.

Сложив левые и правые части формул Гутенберга и Шебалина, получим $\Sigma N_i F_i =$ = const. Это значит, что суммарная площадь трещин на единицу объема, предшествующая наступлению предельного состояния массива, есть величина постоянная.

Согласно кинетической концепции прочности С.Н.Журкова [5], основное свойство прочности – зависимость от времени. Разрушение должно характеризоваться не предельным напряжением, а долговечностью, скоростью разрушения.

Для долговечности и скорости деформирования установлены следующие зависимости:

$$t = t_0 \exp\left[\left(\grave{E}_0 - \gamma\sigma\right)/\hat{E}\grave{O}\right],$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left[-\left(\grave{E}_0 - \gamma\sigma\right)/\hat{E}\grave{O}\right],$$

где t – время от момента приложения постоянной нагрузки до разрушения образца; t_0 – период собственных колебаний атомов в кристаллической решетке; $И_0$ – начальный энергетический барьер; γ – структурный коэффициент, зависящий от свойств материала; K – постоянная Больцмана; σ – напряжение растяжения; T – температура; $\dot{\varepsilon}$ – скорость относительной деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – постоянная величина.

В результате совместного решения кинетических уравнений для долговечности и скорости деформирования имеем

$$t\dot{\varepsilon} = \varepsilon = \text{const}.$$

Деформационно-кинетическая модель позволяет объяснить следующий экспериментальный факт. Разнопрочные породы в конусных и роторных дробилках раскалываются независимо друг от друга. Выходы продуктов дробления разнопрочных пород аддитивны относительно продуктов дробления пород каждой группы по прочности.

Время стояния горной выработки определяется инвариантом деформирования [4]:

$$\frac{t}{\ln\dfrac{\varepsilon_{\hat{e}\eth}}{\varepsilon_{\acute{o}}}} = \text{inv},$$

где t – время стояния горной выработки; $\varepsilon_{кр}$, $\varepsilon_{у}$ – критическая и упругая деформации зоны влияния выработки.

История понятия прочности является моделью развития механики горных пород. Противоречия, заключенные в понятии прочности, являются внутренней основой развития механики горных пород. Они обусловили появление феноменологических и кинетических гипотез прочности. Дальнейшее углубление представлений о механизме разрушения связано с развитием противоположных сторон понятия прочности на основе закона сохранения энергии системы.

В развитии гипотез прочности можно проследить диалектический метод познания. Путь к новой точке знания возможен не только через обнаружение и развитие противоположностей, но одновременно и через сохранение единой основы, из которой они возникают. По аналогии с явлениями плавления и испарения при описании разрушения горных пород можно использовать лишь те характеристики, которые не зависят от режима нагружения и масштабного фактора. Согласно второму закону термодинамики, такой характеристикой является энтропия. Ни энергия, затрачиваемая на разрушение, ни напряжение, ни упругая пластическая деформация не являются характеристиками предельного состояния, так как они зависят от условий опыта, т.е. являются характеристиками процесса.

Инвариантный деформационно-энтропийный критерий прочности горных пород, устойчивости горных выработок при статических, сейсмических нагрузках и землетрясениях может быть представлен в виде

$$S_{\hat{e}\eth} = \alpha E \varepsilon_{\hat{e}\eth},$$

где $S_{кр}$ – критические значения удельной энергии; α – коэффициент линейного теплового расширения; E – модуль упругости; $\varepsilon_{кр}$ – критическая относительная деформация растяжения, $\varepsilon_{кр} = 0{,}02$.

Критическая деформация находится в области между упругой деформацией и деформацией плавления:

$$\varepsilon_{\acute{o}} < \varepsilon_{\hat{e}\eth} < \varepsilon_{\ddot{i}\ddot{e}}.$$

Инвариантный деформационно-энтропийный критерий прочности горных пород, устойчивости горных выработок формулируется следующим образом: критические энтропия и деформация характеризуют состояние геомеханической системы в момент ее гибели (бифуркации).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988.

2. *Вялов С.С.* Геологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978.

3. *Медведев С.В.* С землетрясением можно спорить / С.В.Медведев, Н.В.Шебалин. М.: Наука, 1974.

4. *Николаев Р.А.* Закон эволюции / Р.А.Николаев, В.А.Холпанов. М.: Наука, 1999.

5. *Регель В.Р.* Кинетическая теория прочности твердых тел / В.Р.Регель, Н.И.Слуцкер, Э.Н.Томашевский. М.: Наука, 1974.

6. *Падуков В.А.* Горная геомеханика / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1997.