

– 2006. – № 10. – С. 144-150.

УДК 622-112.3+519.2

Мещанинов С.К., д.т.н, проф. каф. физики, Павлова Ю.Д., студ., НГУ, г. Днепрпетровск, Украина

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ

Существует значительное число исследований, посвященных анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массивов и их долговременной устойчивости при ведении подземных горных работ. Однако они не учитывают в явном виде градиенты температур, возникающие в областях искусственно созданных породных обнажений, а также существующие естественные тепловые поля в массиве. Несмотря на это, в настоящее время установлена непосредственная взаимосвязь относительного напряженного состояния и температуры породного массива. В естественных условиях залегания пласта имеются аномалии в распределении температуры по шахтному полю, которые соответствуют аномалиям в распределении напряжений. Под влиянием горных работ также происходит изменение температуры в краевой части пласта. Все это свидетельствует о наличии связи между температурой и НДС породного массива.

Коэффициент теплопроводности горных пород зависит от плотности, трещиноватости, наличия пустот, фазового состояния, содержания влаги и водонасыщения, температуры. С точки зрения долговременной устойчивости, очевидно, что коэффициент теплопроводности зависит от изменения всей совокупности перечисленных параметров, что иначе можно назвать его зависимостью от степени поврежденности пород.

При рассмотрении вопросов устойчивости породного массива, как правило, речь идет об одновременном воздействии на приконтурную область массива статических и переменных (технологических) нагрузок.

При разрушении твердого тела образование каждой трещины приводит к выделению энергии W , запасенной в нагруженном теле. Трещинообразование возможно, 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 со временем, 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 статистической энтропии на величину $\Delta S = K \ln N$, 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. Последний вряд ли применим 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. Изменение энтропии можно записать в следующем виде:

$$dS = \frac{\partial Q}{T} + dS_i, \quad (1)$$

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

Необратимый прирост энтропии внутри тела при неупругом и необратимом

протекании процесса, что соответствует механизму разрушения горных пород, определяют в виде соотношения:

$$dS_i = \frac{1}{T} \sigma_{ik} \partial \varepsilon_{ik} \quad (2)$$

учитывая, что

$$dU = \hat{\partial}q - \hat{\partial}A \text{ и } \hat{\partial}A = \sigma_{ik} (d\varepsilon_{ik}^y + \partial \varepsilon_{ik}^h), \quad (3)$$

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

В соответствии с соотношениями (2) и (3) энтропия пород, а, следовательно, и их устойчивость должны непосредственно зависеть от температуры. Исследованию этого вопроса и посвящена данная работа.

Здесь следует сразу сделать оговорку о том, что, как известно, на больших глубинах температура породного массива достигает 40⁰С и более. При проведении выработок в таких условиях имеют место температурные напряжения, в особенности при охлаждении шахтной вентиляционной струи, когда в приконтурной области возникает градиент температур. Так как 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. При действии на приконтурную область массива 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 эквивалентности. В качестве одного из таких критериев и предлагается использовать энтропию. Интерес представляет процесс изменения энтропии по ходу накопления повреждений, а также скорость изменения энтропии (обобщенная скорость накопления повреждений, dS/dn) и ускорение энтропии d^2S/dn^2 от цикла к циклу. Здесь n – номер цикла нагружения при испытаниях образцов горных пород в режиме одноосного сжатия до предела прочности.

Проанализируем процессы изменения S , dS/dn , d^2S/dn^2 от количества циклов нагружения при различных температурах. В качестве образцов для испытаний были использованы образцы песчаника (шх. им. В.И. Ленина, Макеевка, гор. 800 м), каменного угля (шх. Западно-Донбасская, Павлоград, гор. 480 м) и глинистого сланца (шх. Западно-Донбасская, Павлоград, гор. 480 м) призматической формы. Испытания проводились при температуре 20⁰, 30⁰ и 50⁰: образец нагружался на прессе в режиме одноосного сжатия до предела прочности. По ходу нагружения фиксировались значения σ и ε . Как только образец начинал разрушаться, что было видно по прекращению роста σ , нагрузку снимали, после чего начинали следующий цикл нагружения. Так постепенно образец доводили до разрушения, одновременно фиксируя текущие значения σ и ε в каждом цикле.

Кривые наглядно иллюстрируют монотонный рост величины энтропии горных пород от цикла к циклу. Чем выше температура, тем этот процесс интенсивнее, что говорит об увеличении скорости роста поврежденности в горной породе при увеличении ее температуры. Если рассматривать энтропию S как параметр, характеризующий поврежденность породы, о чем говорилось выше, то мы получили наглядное иллюстрированное представление эволюции породы вплоть до ее разрушения.

Полученные экспериментальные зависимости представлены на рис. 1.

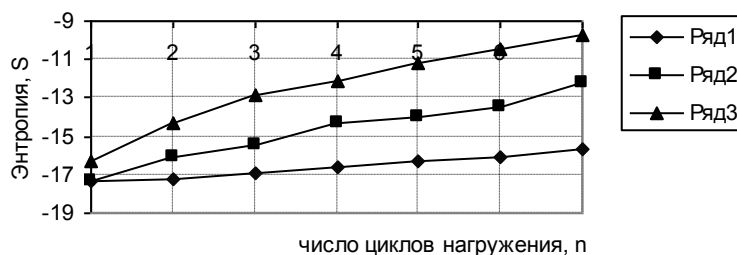


Рис. 1.а Зависимость энтропии песчаника (их. им. Ленина, гор. 800 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1-20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

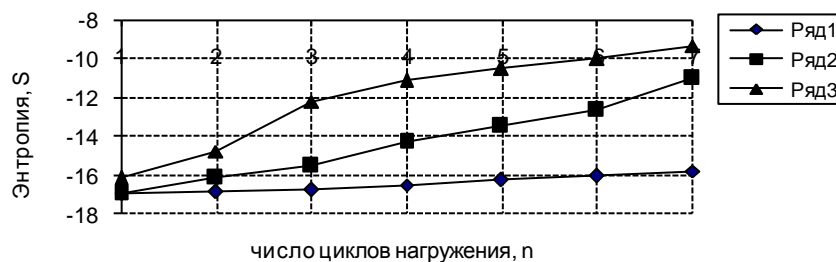


Рис. 1.б. Зависимость энтропии угля (их. З. - Донбасская, гор. 480 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

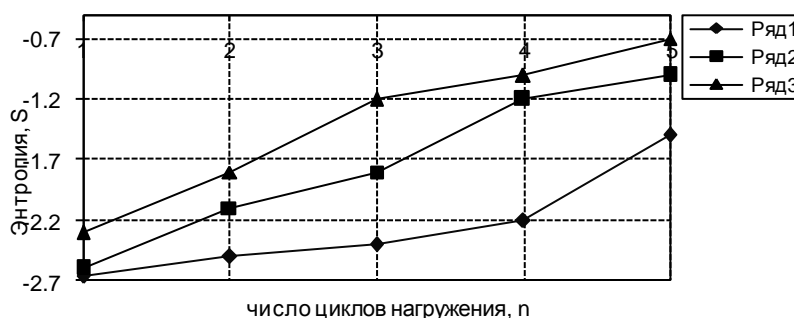


Рис. 1.в. Зависимость энтропии глинистого сланца (их. З. - Донбасская, гор. 480 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

Интерес здесь также представляет рассмотрение скорости роста поврежденности, как величины, по которой непосредственно можно осуществить прогноз долговременной устойчивости того или иного породного контура. Запишем критерий длительной устойчивости в виде:

$$S < S_*, \tag{4}$$

где S_* – значение энтропии в момент, предшествующий разрушению.

Тогда, с привлечением кинетической теории прочности, энтропийный метод оценки устойчивости может аналитически быть выражен следующим образом:

$$S = S_0 \exp(-k_s t), \tag{5}$$

где S_0 – начальное значение энтропии неповрежденной породы, k_s – скорость изменения энтропии.

Из соотношения (5) может быть найдено время сохранения устойчивости приконтурной областью массива:

$$t = \frac{\ln(S_*/S_0)}{k_s} \quad (6)$$

Представленные на рис. 2, 3 зависимости скорости и ускорения энтропии от количества циклов нагружения имеют довольно хаотический характер. Полученные как результат несложной математической обработки данных, представленных на рис. 1., они вряд ли могут быть подвергнуты какому-либо более или менее серьезному анализу. Очевидно, что такое изменение величин скорости и ускорения энтропии горной породы по ходу ее разрушения связано, в первую очередь, с многостадийным и сложным характером трещинообразования, обусловленным одновременным протеканием двух взаимно противоположных процессов: роста количества трещин и их закрытия (рекомбинации).

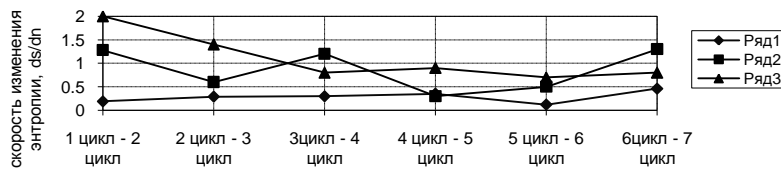


Рис. 2.а. Зависимость скорости изменения энтропии ds/dn песчаника (их. им. Ленина, гор. 800 м, «кубик») от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20°C ; 2 - 30°C ; 3 - 50°C .

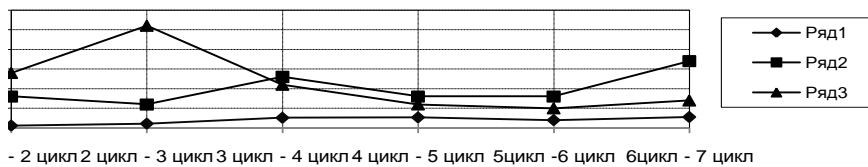


Рис. 2.б. Зависимость скорости изменения энтропии ds/dn угля (их. 3. - Донбасская, гор. 480 м, «кубик») от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20°C ; 2 - 30°C ; 3 - 50°C .

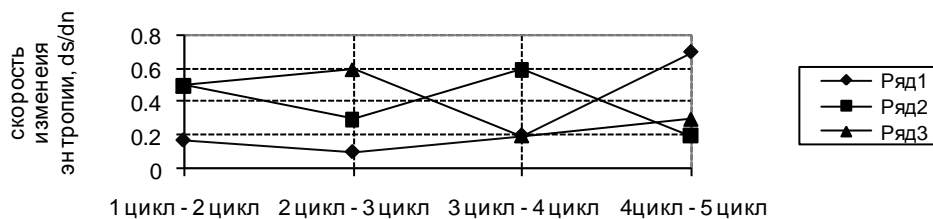


Рис. 2.в. Зависимость скорости изменения энтропии ds/dn глинистого сланца (их. 3. - Донбасская, гор. 480 м, «кубик») от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20°C ; 2 - 30°C ; 3 - 50°C .

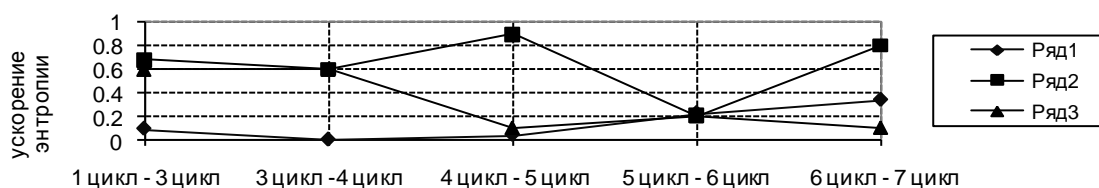


Рис. 3.а. Зависимость ускорения энтропии песчаника (их. им. Ленина, гор. 800 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

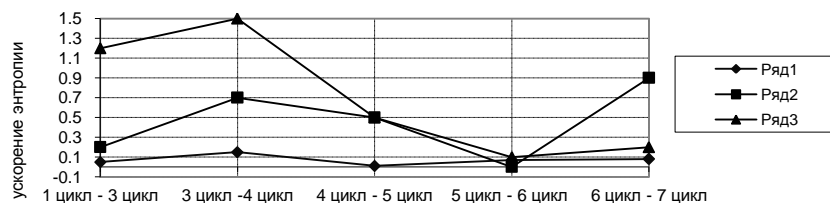


Рис. 3.б. Зависимость ускорения энтропии угля (их. 3. - Донбасская, гор. 480 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

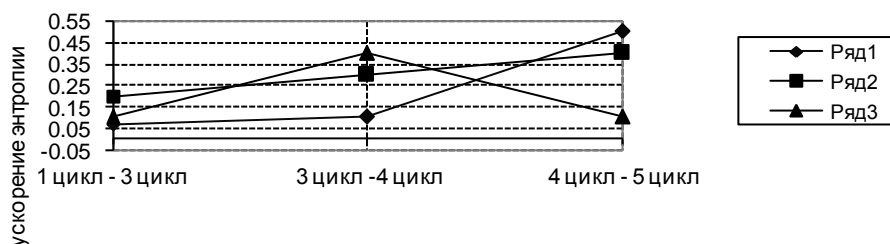


Рис. 3.в. Зависимость ускорения энтропии глинистого сланца (их. 3. - Донбасская, гор. 480 м, "кубик") от числа циклов нагружения при различных температурах: 1 - 20⁰С; 2 - 30⁰С; 3 - 50⁰С.

Для горных пород закрытие трещин – процесс слабовыраженный. Поэтому экспериментальные данные, свидетельствующие об уменьшении энтропии могут быть объяснены переходом части материала образца в вязкотекучее состояние и «залечиванием» трещин. В связи с хаотическим характером зависимостей рис. 2, 3, их дальнейшее рассмотрение нецелесообразно. С другой стороны, для осуществления прогноза по зависимости (6), необходимо знание величины k_s . В связи с этим, предлагается использовать усредненное значение скорости dS/dn , как скорости изменения энтропии от начального (S_0) до конечного (S_*) значений. Естественно, что подобный вариант возможен только в лабораторных условиях при достаточном количестве образцов. Для осуществления прогноза устойчивости реального породного контура необходимы предварительные лабораторные исследования по определению скорости изменения энтропии k_s образцов из этого контура. Затем, с использованием критериев подобия осуществляется пересчет k_s для конкретных условий и периодический контроль близости текущего значения энтропии S_i к ее критическому значению S_* (соотношение (6)).

Выводы.

- Скорость накопления поврежденности, а, следовательно, и устойчивость приконтурной области массива находятся в непосредственной зависимости от температуры слагающих их пород.

- Текущие значения скорости и ускорения энтропии горных пород не являются достаточно достоверными и однозначными характеристиками для осуществления долговременного прогноза устойчивости приконтурной области массива.