

В.А. МАНСУРОВ, В.Н. МЕДВЕДЕВ

Институт физики и механики горных пород
Академии наук Киргизской ССР, СССР

ПОВЕДЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Резюме. Проведено исследование акустической энергии, выделяемой при испытании образцов горных пород на трехосное сжатие. По нескольким разновидностям пород установлен единый характер изменения суммарной акустической энергии при повышении бокового давления. Особенности этой зависимости связываются с изменением механизма деформирования.

Высокие давления, действующие на больших глубинах, представляют собой специфические условия, которые вносят значительные изменения в физико-механические свойства, определяющие склонность горных пород к хрупкому динамическому разрушению, т.е. их потенциальную удароопасность. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется исследованиям как физико-механических свойств, так и самих процессов деформирования и разрушения горных пород в условиях, моделирующих глубинное залегание, т.е. в условиях высокого давления.

Проблема прогнозирования горных ударов является одной из наиболее сложных и важных. Крупным шагом в научном решении этой проблемы стало развитие подхода, в котором очаг горного удара рассматривается с позиций физики и механики разрушения. При этом наряду с учетом физических свойств горных пород как частного случая твердого тела особое внимание уделяется выявлению и исследованию универсальных физических законов деформирования и разрушения. Один из таких законов — закон долговечности, — установлен Курковым [1]: разрушение механически нагруженного твер-

дого тела происходит не только при достижении предельной нагрузки, а является лишь заключительной стадией единого процесса накопления повреждений, скорость которого зависит от механического напряжения и температуры тела. Долговечность τ при действии однооснарастягивающего напряжения σ и температуре тела T описывается уравнением Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u - \gamma\sigma}{kT}\right),$$

где u – энергия активации процесса разрушения, близкая по величине энергии межатомных связей; γ – структурный коэффициент, характеризующий локальные перенапряжения; k – постоянная Больцмана; τ_0 – коэффициент, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов в твердом теле.

Этот закон обладает инвариантностью по отношению к физико-механическим и геометрическим параметрам объекта, т.е. применим для широкого круга твердых тел с различными свойствами и независимо от их размеров – от лабораторных образцов горных пород до целиков, участков массива и даже участков земной коры при землетрясениях.

Зная параметры уравнения, можно предсказать время разрушения, однако, как показывают теоретические работы и экспериментальные результаты – с логарифмической точностью. Если параметры не могут быть точно определены, как, например, в очаге готовящегося горного удара или землетрясения, оценка долговечности оказывается бесполезной. Кроме того, для состояния трехосного сжатия уравнение для долговечности еще больше усложняется. Это, тем не менее, не умаляет значимости основной физической идеи, а именно того, что разрушение и его подготовка рассматриваются как процесс, развивающийся во времени от момента приложения нагрузки через накопление дефектов (повреждений) к макроразрушению.

Кинетический подход к разрушению открывает принципиальную возможность прогноза макроразрушения и указывает пути решения этой проблемы – изучать и контролировать сам процесс накопления повреждений. Зная его характерные стадии, можно указать с той или иной точностью момент перехода в заключительную стадию макроразрушения.

Куксенко [2], развивая на этой основе модель разрушения и исследуя накопление повреждений, установил, что в общем процессе разрушения горной породы, как и твердого тела вообще, от момента приложения нагрузки до окончательного макроразрушения можно выделить две основные стадии. Первая – квазистационарная стадия связана с появлением микронарушений сплошности (в основном – с образованием трещин), некоррелированных в пространстве и времени, т.е. распределенных в пространстве и времени хаотически. При достижении некоторой пороговой концентрации трещин начинается вторая стадия разрушения. Происходит интенсивное слияние и укрупнение трещин, приводящее к ускорению образования очага разрушения. При этом события второй стадии носят взаимообусловленный, коррелированный характер.

Для образцов конечной величины или отдельных целиков при подземной отработке эта стадия завершается окончательным разрушением. Для больших массивов развитие этого процесса приведет к разрыву большой области и торможению на границе, где условия для его развития меняются.

Поэтому для слежения за процессом разрушения в горных породах необходим метод, позволяющий получить информацию о размерах и концентрации образующихся трещин под нагрузкой. Этому наиболее полно отвечает метод акустической эмиссии (АЭ). Он основан на явлении излучения упругих волн при образовании трещин, причем применим для любых масштабных уровней трещин, от микроскопических до километровых. При этом меняется лишь частотный диапазон излучения упругих

волн. Использование этого метода дает возможность указать, на какой стадии развития находится данный процесс и как далек он от критических, неустойчивых состояний, которые могут привести или к образованию крупной трещины, или к горному удару (землетрясению). Натурное исследование предвестников разрушения в удароопасных зонах массивов горных пород продвигается очень медленно, так как статистика горных ударов невелика. Поэтому целенаправленный лабораторный эксперимент по деформированию и разрушению образцов горных пород позволяет значительно сократить сроки накопления данных о свойствах процесса трещинообразования, о динамических характеристиках предвестников и эффективных способах их использования для прогноза.

Установленные в последние годы законы масштабного подобия процессов трещинообразования, аналогии в свойствах ряда предвестников разрушения на разном масштабном уровне, некоторые доказательства автомодельности процесса подготовки динамических явлений придает особое значение модельным исследованиям.

Основным, на наш взгляд, является решение задачи распознавания образа готовящегося разрушения в условиях, моделирующих различные ситуации в массивах горных пород на больших глубинах – будет ли разрушение хрупкое, динамическое или вязкое, спокойное.

Для исследования процессов подготовки и развития разрушения в лабораторных условиях проведены испытания образцов двух типов пород – мрамора Чичкан и песчаника Джергалан (Киргизская ССР). Испытания на трехосное сжатие проводили по схеме Кармана: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные действующие напряжения. Цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 60 мм, изготовленные с высокой точностью, в специальной гидроизолирующей оболочке устанавливали в камере высокого давления, смонтированной на прессе

(рис.1). После сбора камеры насосом создавали в ней высокое давление, стабилизируемое ресивером. Кроме того, отличительной особенностью камеры является наличие компенсационной полости, обеспечивающей неизменность давления при перемещении штока вниз в процессе нагружения прессом. Далее на созданное гидростатическое давление налагается осевое сжимающее усилие пресса F и производится деформирование образца вплоть до разрушения или запредельного пластического течения.

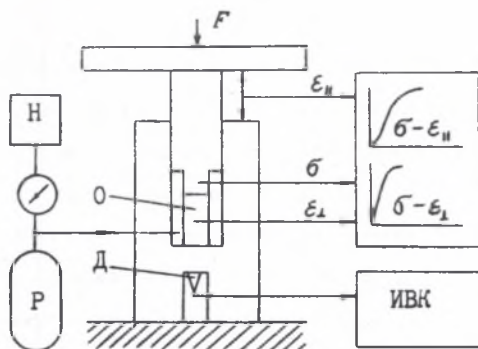


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

Н - насос высокого давления, Р - ресивер, О - образец, Д - датчик АЭ, ИВК - измерительно-вычислительный комплекс на базе компьютера SM I420, F - усилие пресса.

Рис. 1. Schemat stanowiska badawczego

Н - pompa wysokiego ciśnienia, Р - odbieralnik, О - próbka, d - czujnik АЭ, ИВК - zespół pomiarowo-obliczeniowy na bazie komputera SM1420, F - nacisk prasy

В течении эксперимента на самописцах непрерывно регистрируются нагрузка на образце и его продольная и поперечная деформации в виде диаграмм "напряжение-продольная деформация" и "напряжение-поперечная деформация". Эти показания снимаются методом тензометрии. Одновременно в течении всего эксперимента ведется непрерывное наблюдение акустической эмиссии образца, воспринимаемой датчиком АЭ и

регистрируемой компьютером. Регистрация акустических сигналов (АС) ведется без частотного анализа в полосе частот $10^5 - 10^6$ Гц в виде записи для каждого сигнала его амплитуды, длительности и времени ожидания, т.е. интервала времени между двумя последовательными АС. Таким образом, сбор акустической информации ведется в режиме реального времени, что в дальнейшем дает возможность изучать динамику АЭ и по меткам времени на диаграммах "напряжение-деформация", проставляемых во время эксперимента, сопоставлять картину развития АЭ и процесс деформирования.

Нагружение велось в режиме постоянной производительности силовой установки пресса. Этот режим позволяет создать фиксированные, идентичные условия испытаний при переходе от образца к образцу и обеспечивает сопоставимость результатов. Кроме того, такой режим нагружения, на наш взгляд, в большей степени соответствует реальным условиям в массиве, чем другие, например, режим постоянной скорости деформирования или режим постоянной скорости нагружения. Уровень производительности силовой установки пресса в проведенных испытаниях обеспечивал скорость нагружения примерно $\dot{\sigma}_1 \approx 0,2$ МПа/с по оценке в упругой зоне диаграммы "напряжение-деформация".

В центре внимания анализируемых характеристик получаемой в экспериментах информации находится энергетика процессов, протекающих в горных породах при деформировании и разрушении, поскольку на основе познания именно энергетических закономерностей возможно построение прогноза силы динамических явлений и их разрушающих последствий. Акустическая эмиссия, на долю которой приходится часть общей энергетике, несет информацию о накапливающейся в породе механической энергии и ее высвобождении.

В работе Виноградова и др. [3] в опытах по разрушению образцов определяется процент упругой энергии, накопленной в образцах и переходящей в сейсмоакустическую. При сопос-

тавлении суммарной энергии излученных импульсов за время нагружения образца до потери им несущей способности с упругой энергией, накопленной во всем объеме образца, получено, что в сейсмоакустическую переходит 0,0004 – 0,1% от накопленной упругой энергии. Причем эта доля существенно зависит от скорости нагружения и не зависит от их прочности. С уменьшением скорости деформации доля сейсмоакустической энергии резко уменьшается, так как уменьшаются число и энергия возникающих импульсов. Это объясняется тем, что с уменьшением скорости деформации больше упругой энергии затрачивается на пластические деформации и изменение структуры материала, вследствие чего уменьшается часть запасенной механической энергии, выделяющаяся в виде акустических сигналов.

Была также проведена оценка доли сейсмоакустической энергии для локальной очаговой зоны при исследованиях, проводимых на модельных материалах Шаминой и Ваниеком [4]. Получено, что энергия упругих волн составляет 5% от энергии, накопленной в очаговом объеме. Разница в приведенных значениях доли сейсмоакустической энергии возникает из-за различия между объемом образца, которым оперирует Виноградов, и суммой очаговых объемов для возникающих трещин (под очаговым объемом подразумевается область размером ℓ^3 где ℓ – длина трещины), с которыми работает Шамина.

Важно то, что для фиксированных условий испытания доля акустической энергии есть постоянная величина и может служить параметром общей энергетики процессов в нагруженной породе.

Одной из главных задач проводимых исследований было определение влияния величины давления в камере (величины

напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$) на параметры АЭ при деформировании горных пород. Энергия каждого АС рассчитывалась с точностью до постоянного коэффициента как $E = A^2B$, где A — амплитуда огибающей АС и B — длительность АС на пороге дискриминации. Далее определяли суммарное акустическое энерговыделение, т.е. сумму энергий всех зарегистрированных АС от момента начала осевого нагружения образца до момента достижения предела прочности. Момент макроразрушения или запредельного деформирования в подсчет энергии не включается, поскольку именно по развитию процесса подготовки разрушения до предела прочности необходимо оценить процесс за пределом — будет ли разрушение хрупкое или вязкое.

Испытания образцов мрамора и песчаника при повышении давления в камере от эксперимента к эксперименту показали, что прочность обеих пород закономерно возрастает. Однако при этом суммарная акустическая энергия изменяется неодинаково, даже противоположно. У песчаника суммарное акустическое энерговыделение возрастает (рис.2а), а у мрамора снижается (рис.2б).

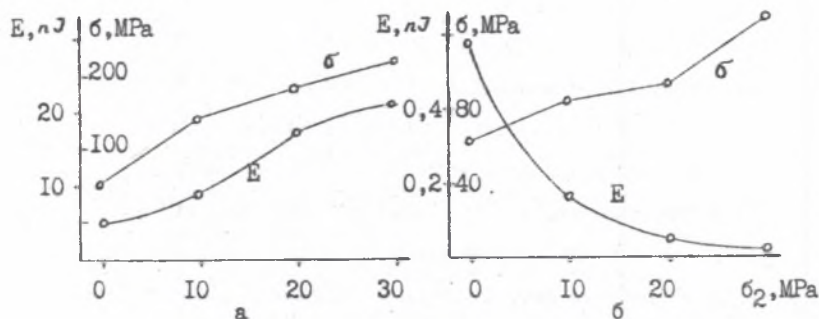


Рис. 2. Изменение прочности σ и суммарного акустического энерговыделения E при повышении рабочего давления в камере: а — песчаник, б — мрамор.

Rys. 2. Zmiana wytrzymałości σ i całkowitego akustycznego wydzielania energii E przy zwiększeniu ciśnienia roboczego w komorze; а — piaskowiec, b — marmur

Высказано предположение, объясняющее ход зависимостей $E(\sigma_2)$, что при увеличении давления в испытательной камере во время деформирования горной породы действуют две противоборствующие тенденции. С одной стороны – повышение прочности материала, увеличение энергоемкости разрушения и, как следствие, рост суммарного акустического энерговыделения; с другой стороны – изменение напряженного состояния, в результате которого преимущественный механизм разрушения горной породы в комбинации сдвигов и отрывов от отрывного переходит к сдвиговому, что сопровождается снижением выделяемой акустической энергии. На меньшую энергетичность сдвиговых процессов по сравнению с отрывными указывают работы Мюллера [5] и Ставрогина [6]. Мюллер отмечает, что сигналы АЭ, возникающие при сдвиге или отрыве, значительно отличаются по форме. У сигналов от трещин скольжения наблюдается сильное затухание, у сигналов от трещин отрыва – слабое. Соответственно отличаются они и по энергиям: сигнала АЭ, возникающие при отрыве, имеют большую энергию. В работе Ставрогина показано, что увеличение напряжения приводит к уменьшению общего числа АС, а объясняется это повышением пластичности породы.

Конкуренция указанных тенденций повышения и снижения акустической энергии при увеличении напряжений $\sigma_2 = \sigma_3$ и определяет итоговый баланс в акустической энергетике в каждом конкретном случае.

Поведение мрамора при низких давлениях носит относительно хрупкий характер. Образцы разрушаются по множеству плоскостей с сильным дроблением материала. При высоких давлениях (30 МПа) поведение мрамора носит ярко выраженный вязкий характер. На диаграмме "б-ε" образцы дают глубо-

кую запредельную ветвь и, выходя на остаточную прочность, продолжают квазипластическое деформирование, не разрушаясь. Песчаник в том же диапазоне боковых давлений не претерпевает таких существенных изменений в деформировании и разрушении. По виду обломков образца и по диаграммам " σ - ϵ " можно лишь отметить, что его характер меняется с более хрупкого при давлении 0,1 МПа на менее хрупкий при давлении 30 МПа.

Этот факт послужил основанием для предположения, что песчаник может иметь столь же значительные изменения в механизме деформирования, что и мрамор, но при более высоких давлениях в камере, поскольку прочность слагающих его минералов, например, кварца, составляющего 50% породы, в десятки и даже сотни раз превышает прочность кальцита. Значит, и в его акустической энергетике при достаточно больших давлениях должно произойти смещение баланса в сторону уменьшения. Соответственно можно предположить, что и мрамор имеет область преимущественного влияния первой тенденции, в которой энергия АЭ возрастает, но при малых величинах давлений, расположенных между использованными значениями $\sigma_2 = 0,1$ и 10 МПа.

Поэтому было проведено несколько серий экспериментов на образцах аналогичных разновидностей мрамора и песчаника. Для мрамора диапазон изменения σ_2 был смещен в область малых, а для песчаника расширен в область больших значений. Эти эксперименты показали, что увеличение давления в камере вызывает рост суммарной акустической энергии E , выделяющейся при деформировании образцов. Рост энерговыделения достигает максимума при давлениях 100 МПа для песчаника 1 и при 150 МПа для песчаника 2 (рис.3а). Дальней-

шее повышение давления сопровождается уменьшением энергии. Зависимость $E(\sigma_2)$, полученная по результатам испытания двух разновидностей мрамора, также имеет участок роста, максимум при $\sigma_2 = 3$ МПа и участок спада (рис.3б).

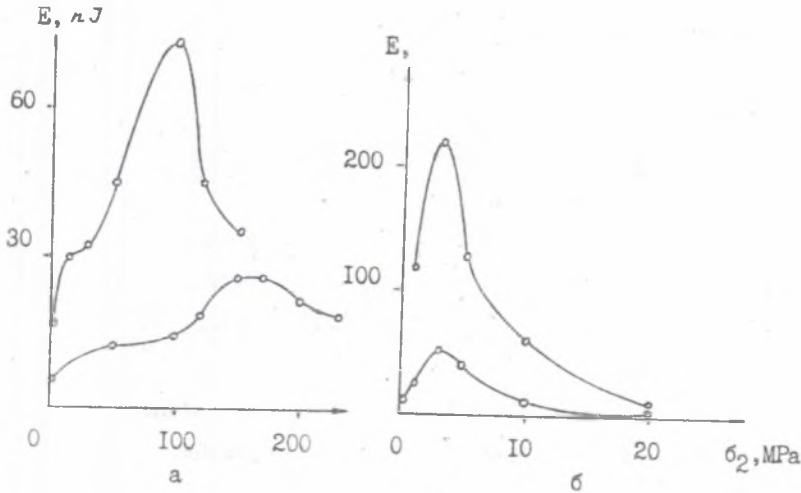


Рис. 3. Зависимость суммарного акустического энерговыделения E от величины рабочего давления в камере: а - песчаник, б - мрамор.

Rys. 3. Zależność całkowitego akustycznego wydzielania energii E od wielkości ciśnienia roboczego w komorze; а - piaskowiec, б - marmur

Таким образом, высказанные ранее предположения полностью подтверждаются: и для мрамора, и для песчаника изменение акустического энерговыделения с ростом бокового давления происходит одинаковым образом, отражая изменения в деформационных процессах и механизме деформирования. Зависимость $E(\sigma_2)$ имеет максимум, который можно трактовать как переход от хрупкого к вязкому типу разрушения.

В лабораторных экспериментах, моделирующих условия разрушения в породном массиве, для любой породы повышение всестороннего давления способствует переходу от хрупкого

поведения к вязкому. Абсолютные величины таких переходных давлений у разных типов пород сильно отличаются, поэтому разным будет и положение максимума функции $E(\sigma_2)$, однако, можно предположить, что общий вид зависимости является универсальным для любых пород.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел//Вестн. АН СССР, 1968.-№3.
- [2] Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел// Физические процессы в очагах землетрясений.-М.:Наука, 1980.
- [3] Виноградов С.Д., Мирзоев К.М., Саломов Н.Г. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов.-Душанбе: Дониш, 1975.
- [4] Шамина О.Г., Ваниек Л. Сейсмическая энергия и сейсмический момент сдвиговой трещины// Изв. АН СССР, Физика Земли, 1986.-№3.
- [5] Мюллер Л. Инженерная геология// Механика скальных массивов.-М.: Мир, 1971.
- [6] Ставрогин А.Н., Зарецкий-Феоктистов Г.Г., Танов Г.Н. Исследование акустической эмиссии при деформировании горных пород в условиях сложного осесимметричного напряженного состояния.-ФТПРИ, 1986.-№5.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław Chudek

ZACHOWANIE SIĘ SKAŁ NA DUŻYCH GŁĘBOKOŚCIACH

S t r o s z c z e n i e

Wykonano badania emisji akustycznej występującej przy przeprowadzaniu prób na trójosiowe ściskanie różnych typów skał. Na podstawie badania kilku odmian skał stwierdzono taki sam charakter zmiany całkowitej energii akustycznej przy zwiększaniu ciśnienia bocznego. Szczegóły tej zależności wiążą się ze zmianą mechanizmu odkształcania.

ROCK BEHAVIOR IN GREAT DEPTHS

A b s t r a c t

Acoustic emission, registered under triaxial testing of rocks, was investigated. Universal character of total AE change was determined under lateral pressure increase on the example of several types of rocks. Peculiarities of this dependence are connected with the change of deformation mechanism.