

УДК 539.1: 532.2

©1994

ФОРМИРОВАНИЕ ОЧАГА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГРАНИТА)

Н.Г.Томилин, Е.Е.Дамаскинская, В.С.Куксенко

Исследуется формирование очага разрушения в механически нагруженных гетерогенных материалах. Анализируются статистические параметры акустической эмиссии (АЭ), зарегистрированной при деформировании гранитных образцов. Каждый сигнал АЭ характеризуется временем, тремя координатами гипоцентра и амплитудой. Оригинальный режим нагружения, при котором в условиях всестороннего сжатия аксиальная нагрузка регулируется уровнем активности АЭ, позволил замедлить развитие очаговой стадии процесса. Выявлена фаза стабильного развития очага процесса, дальнейшее развитие которой приводит к макроразрыву. Основываясь на экспериментальных данных о многоуровневости структуры горных пород, вводится представление о рангах процесса разрушения. Выделен амплитудный диапазон сигналов АЭ, интерпретируемый как единый ранг процесса.

Исследование кинетики формирования очага разрушения в механически нагруженном твердом теле с помощью неразрушающих методов контроля, в том числе акустической эмиссии (АЭ), в настоящее время сталкивается с объективными трудностями. Это связано с недостаточной разрешающей способностью методов при изучении быстропротекающих процессов, например таких, как формирование и развитие очага разрушения. Решение этой проблемы возможно при условии изменения традиционной схемы эксперимента, обеспечивающего возможность растянуть во времени развитие очаговой стадии процесса. Кроме того, для исследования закономерностей эволюции очага разрушения в данной работе будет использован метод компьютерного моделирования, обладающий «абсолютным» разрешением. Компьютерные эксперименты позволяют дифференцировать влияние на разрушение различных факторов, например режима нагружения, а также проверить статистическую значимость обнаруженных закономерностей.

1. Экспериментальные данные и компьютерное моделирование

Использовались экспериментальные данные, полученные при деформировании цилиндрических образцов ($h = 190.5$, $d = 76.2$ mm) из гранита Вестерли, имеющего мелкодисперсную зернистую структуру. Образец сжимался в условиях действия гидростатического давления $P_c = 50$ МПа (рис. 1). В качестве метода контроля процесса деструкции использовалась регистрация продольной и поперечной деформации, а

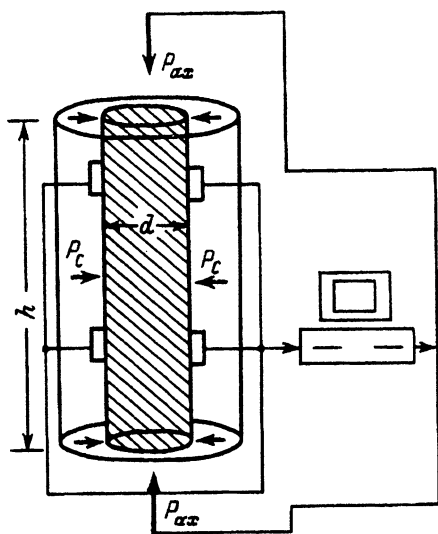


Рис. 1. Схема эксперимента.

также упругого энерговыделения — акустическая эмиссия. Кроме того, в процессе нагружения проводилось ультразвуковое прозвучивание образца по 8 трассам, что позволило непрерывно контролировать поле скоростей. Благодаря этому точность определения координат гипоцентров источников АЭ достигает ≈ 3 мм. За время эксперимента зарегистрировано $> 10^4$ сигналов АЭ, моменты излучения, координаты и амплитуды которых и составляют основную базу данных, используемую для анализа. Подробно схема эксперимента приведена в [1]. Отличительной особенностью рассматриваемых экспериментов является режим нагружения: при всестороннем сжатии величина аксиальной нагрузки P_{ax} автоматически изменялась таким образом, чтобы активность АЭ (по заданному амплитудному порогу) не превышала заранее установленного уровня. Тем самым изменение напряжения контролируется собственно процессом разрушения образца. Как оказалось при дальнейшем анализе, это позволило растянуть во времени обычно быстротекающую очаговую стадию. С целью дальнейшего фрактографического анализа эксперимент был остановлен до окончательного разрушения образца в момент времени T_k . В статье будут представлены наиболее общие для серии экспериментов закономерности.

Основным источником АЭ сигналов в механически нагруженных хрупких материалах, в частности горных породах, являются образующиеся трещины [2]. Поэтому анализ пространственно-временной последовательности АЭ сигналов позволяет исследовать кинетику трещинообразования. Случайный характер разрушения таких существенно неоднородных материалов, как горные породы, определил выбор статистических методов анализа. В дальнейшем АЭ сигналы будем называть событиями, каждое из которых характеризуется временем, тремя координатами гипоцентра и амплитудой.

В разработанной на основе кинетических представлений о прочности твердых тел имитационной модели разрушения гетерогенных материалов [3] внешняя нагрузка изменяется по любому выбранному

закону. В данном случае для сопоставления модельных и экспериментальных результатов был выбран такой же, как и в лабораторных исследованиях, режим нагружения, при котором скорость генерации дефектов не превышает заранее определенного порогового значения.

2. Анализ экспериментальных данных

Обратимся к анализу экспериментальной пространственно-временной последовательности АЭ событий. Для этого будем использовать такие статистические параметры, как средние временные $\overline{\Delta t}$ и средние пространственные $\overline{\Delta r}$ интервалы между хронологически соседними событиями и соответствующие коэффициенты вариации $V_{\Delta t}$, $V_{\Delta r}$. Характерное поведение этих параметров при переходе на очаговую стадию подробно обсуждалось в [3]. Критерием формирования локального очага разрушения является одновременное уменьшение $\overline{\Delta t}(\overline{\Delta r})$ и возрастание $V_{\Delta t}(V_{\Delta r})$. В дальнейшем для краткости данное изменение параметров будем называть образом очага. Используем ранее установленный критерий для исследования очага разрушения, развитие которого приводит к макроразрыву образца.

На рис. 2 приведены временные зависимости $\overline{\Delta t}$, $V_{\Delta t}$, а также $\overline{\Delta r}$, $V_{\Delta r}$, отражающие развитие процесса в течение всего эксперимента. Для анализа использован весь массив данных, т.е. все сигналы, зарегистрированные в эксперименте. Можно видеть, что одновременное уменьшение $\overline{\Delta r}$ и увеличение $V_{\Delta r}$, свидетельствующие о формировании очага разрушения, появляется в момент времени T_2 . При этом изменение временных параметров не демонстрирует характерных особенностей, которые позволили бы идентифицировать очаговую стадию процесса. Уменьшение $\overline{\Delta t}$ на начальном этапе излучения АЭ связано с возрастанием нагрузки. Существенно иная картина проявляется, если проводить анализ сигналов АЭ в определенном диапазоне их амплитуд. На рис. 3 приведены аналогичные параметры при анализе сигналов с амплитудами $A \geq 40$ mV. Выбор такого порога дискриминации не случаен и будет обсуждаться ниже. Здесь же отметим, что при таком выборе амплитудного диапазона используются для анализа $\approx 2\%$ от общего числа сигналов. И тем не менее именно в этом диапазоне наиболее надежно и наглядно проявляются статистические закономерности формирования очага разрушения. Некоторые из них мы проанализируем.

До момента времени T_1 происходит уменьшение $\overline{\Delta t}$, которое можно объяснить аналогичными причинами, как и в случае анализа событий АЭ всего амплитудного диапазона. Смещение начала графика по оси времени вправо связано с тем, что образованию крупных дефектов, излучающих акустические сигналы больших амплитуд, предшествует процесс накопления трещин меньших размеров. Затем процесс накопления стабилизируется (временной диапазон $T_1 - T_2$), что демонстрируется малыми колебаниями среднего значения временных интервалов и уменьшением $V_{\Delta t}$. В изменении пространственных параметров в диапазоне $0 - T_2$, напротив, не обнаруживается характерного момента T_1 . Происходит дисперсное некоррелированное зарождение дефектов (рис. 4,а), которое характеризуется значениями $\overline{\Delta r}$, определяемыми размерами образца, при устойчивых и низких значениях $V_{\Delta r}$ (рис. 3,б).

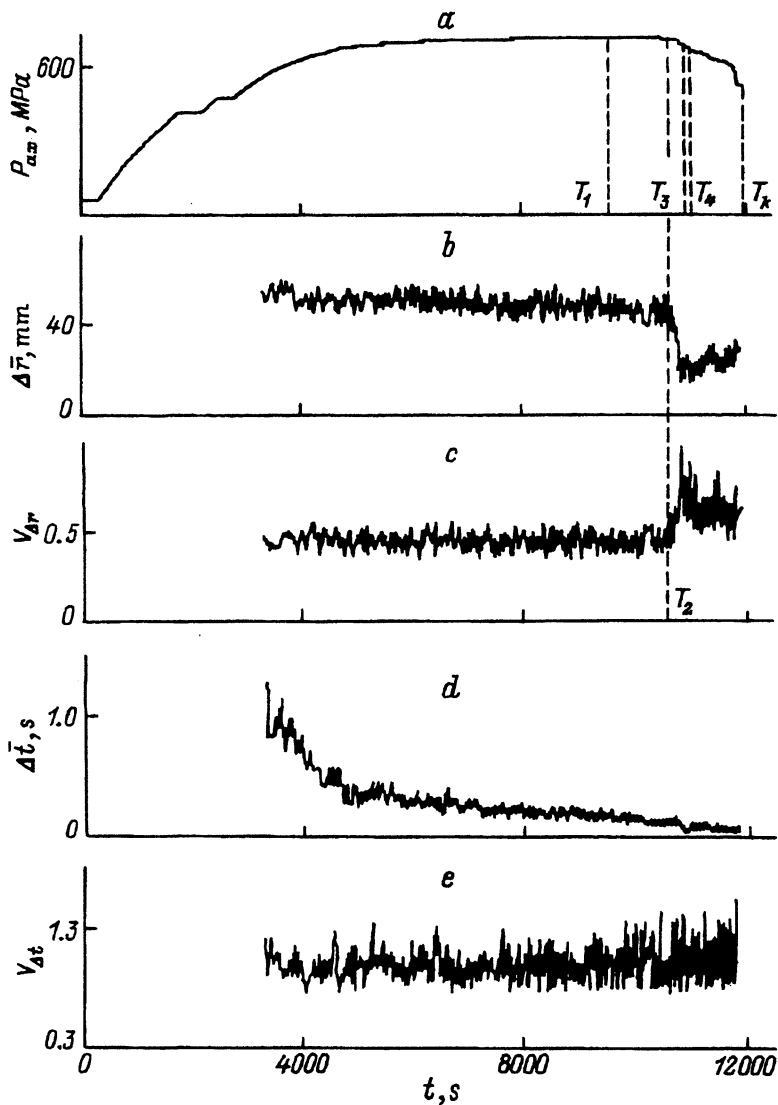


Рис. 2. Временные зависимости аксиальной нагрузки (а), средних значений пространственных (b) и временных (d) интервалов между АЭ событиями и соответствующих коэффициентов вариации (с,е), рассчитанных для выборки постоянного размера $LQ = 100$ и шага смещения начала выборки $LQ_1 = 20$.

Центр тяжести пространственного распределения гипоцентров, характеризуемый параметрами X_c , Y_c , Z_c , соответствует геометрическому центру образца (рис. 5). Таким образом, на стадии $T_1 - T_2$ поток дефектов можно рассматривать как квазистационарный пуассоновский.

С позиций двухстадийной модели разрушения гетерогенных материалов [4] после стадии дисперсного накопления дефектов по всему объему в локальной области (называемой очагом) концентрация дефектов достигает некоторого порогового значения. Это приводит к

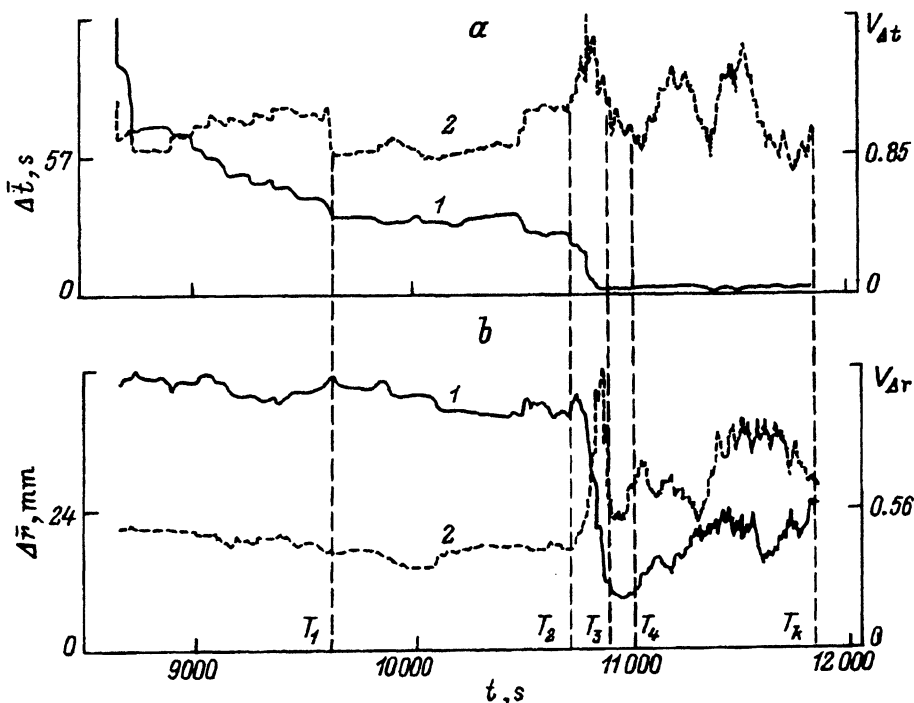


Рис. 3. Временные зависимости ($LQ = 40, LQ_1 = 1$) среднего значения временных (а,1) и пространственных (b,1) интервалов и соответствующих им коэффициентов вариации (а,2; b,2) при деформировании образца ($A \geq 40$ мВ).

взаимодействию между трещинами и стимулирует их ускоренное зарождение. Тем самым нарушаются условия стационарности потока дефектов, о чем свидетельствует одновременное уменьшение $\overline{\Delta t}$ и $\overline{\Delta r}$ при возрастании соответствующих коэффициентов вариации (рис. 3). Начиная с момента T_2 разрушение переходит на вторую, очаговую, стадию. К моменту T_3 заканчивается стягивание дефектообразования в локальную зону (рис. 4). В интервале времени $T_3 - T_4$ наблюдается резкое уменьшение $V_{\Delta r}$, $V_{\Delta t}$ при маломеняющихся значениях $\overline{\Delta r}$, $\overline{\Delta t}$ (рис. 3), что свидетельствует о стабилизации процесса. При этом пространственная область ($\approx 40 \times 15 \times 10$ мм), в которой происходит образование дефектов, не изменяется. Это можно видеть на временных зависимостях центра тяжести гипоцентров (рис. 5). На протяжении интервала $T_3 - T_4$ положение центра тяжести по трем координатам остается неизменным. Угол между направлением большего размера рассматриваемой области и осью $Z \approx 26^\circ$. В дальнейшем эту фазу процесса ($T_3 - T_4$), характеризующую предельной степенью локализации, будем называть фазой ядра очага разрушения или зародышем макроразрыва. В момент времени T_4 заканчивается период стабильного развития ядра очага и из него начинается распространение макроразрыва. Однако более подробно проанализировать этот этап не позволяют рамки данной статьи.

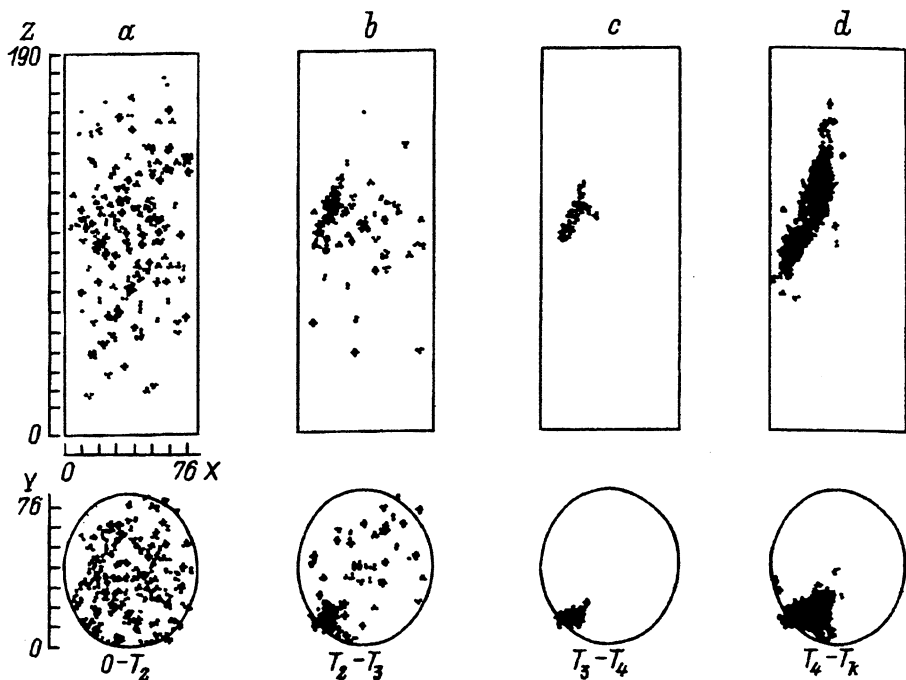


Рис. 4. Пространственное распределение гипоцентров источников АЭ с $A \geq 40$ мВ.

Таким образом, обнаружено, что на очаговой стадии разрушения существует фаза длительностью в сотни секунд, на которой процесс стабилизируется как в пространстве, так и во времени. Рассмотрим возможные причины этой стабилизации. Одним из объяснений могло быть уменьшение внешней нагрузки, что возможно в силу используемого режима нагружения. Однако видно (рис. 5), что в интервале температур $T_3 - T_4$, когда существует ядро, нагрузка остается постоянной. Поэтому стабилизацию разрушения на этом этапе нельзя объяснить кратковременной разгрузкой образцов.

Вторая возможная интерпретация базируется на представлении о так называемом «прочном включении». Существование локального структурного барьера в неоднородной среде может затормозить развитие макроразрыва. Для проверки этого предположения обратимся к результатам компьютерного моделирования. На рис. 6 показано пространственное распределение дефектов, полученное в модельном эксперименте. Резкое уменьшение $\Delta\tau$ (рис. 6) и его дальнейшая стабилизация и одновременное уменьшение $V_{\Delta\tau}$ демонстрируют, что и в модели существует фаза, интерпретируемая как ядро. Ее статистическая значимость подтверждена в широком диапазоне начальных параметров при реализации сценария модели для различных последовательностей случайных чисел. Для выяснения влияния структуры на образование ядра был проведен анализ распределения прочности элементов (рис. 7). Усреднение проводилось по 100 элементам, поскольку зона ядра равна ≈ 100 cond.un. Оказалось, что в области ядра нет особо прочных элементов, которые могли бы затормозить развитие

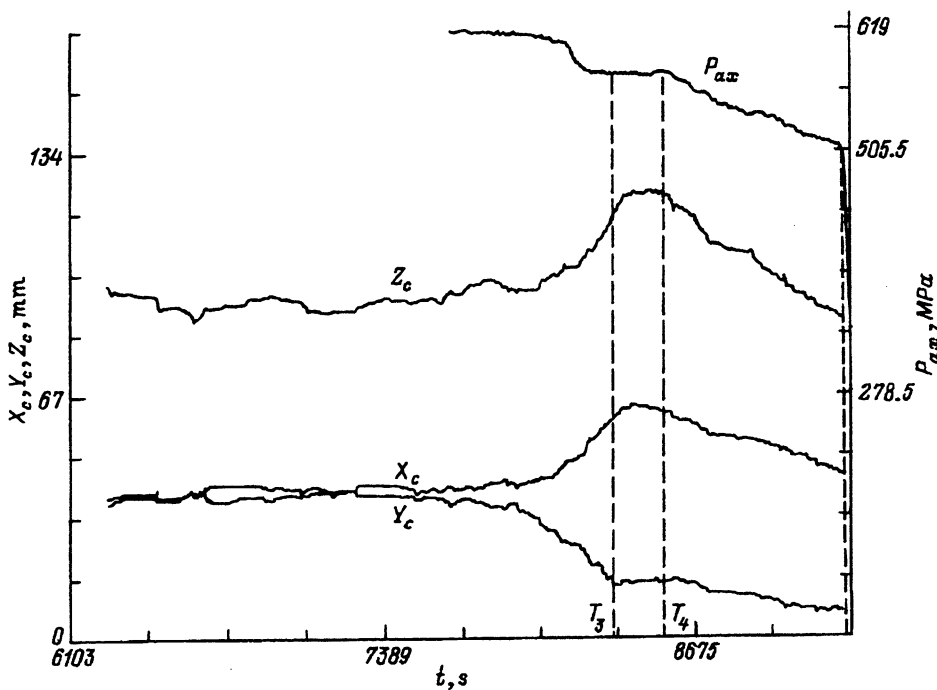


Рис. 5. Изменения аксиальной нагрузки и параметров, характеризующих центры тяжести гипоцентров АЭ источников в выборке ($LQ = 40$, $LQ_1 = 1$), при деформировании образца ($A \geq 40$ мВ).

макроразрыва. Кроме того, при одинаковой структуре менялись случайные значения вероятностей разрушения элементов при неизменном законе их распределения. При этом местоположение ядра оказывалось произвольным. Это означает, что место образования ядра очага разрушения определяется кинетическими особенностями процесса. Таким образом, существование ядра очага не задается локальной неоднородностью материала или спецификой режима нагружения, а пределяется внутренними физическими закономерностями.

Анализ данных фрактографических исследований этих же образцов и аналитические оценки, приведенные в [5], позволяют объяснить существование фазы стабильного развития очага следующим образом. Для начала распространения макроразрыва необходимо время, в течение которого плотность трещин в локальной обалсти достигает величины, достаточной для их взаимодействия и последующего слияния. А это формирует вне рассматриваемой зоны поля напряжений, обеспечивающие дальнейшее развитие макроразрыва.

3. Обсуждение

Характерные стадии потока АЭ ($0-T_2$, T_2-T_3 , T_3-T_4) удалось выделить в серии экспериментов, что подтверждает их закономерность. Как уже отмечалось выше, наибольшая контрастность образа очага достигается при анализе АЭ сигналов с $A \geq 40$ мВ. При этом признаки соответствующих стадий сохраняются и в более широком ам-

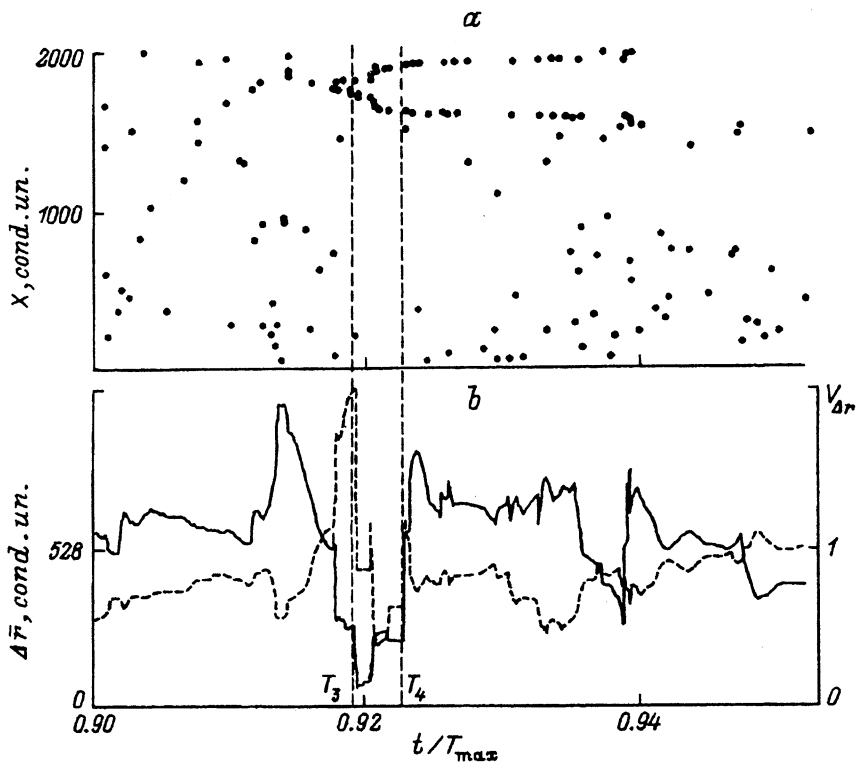


Рис. 6. Компьютерное моделирование.

a — пространственно-временное распределение дефектов, *b* — временные зависимости среднего ($LQ = 15$, $LQ_1 = 1$) значения пространственных интервалов и коэффициента вариации пространственных интервалов (T_{\max} — время жизни моделируемой системы).

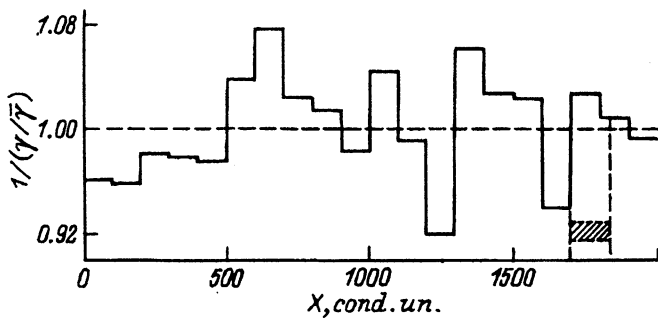


Рис. 7. Распределение элементов моделируемой системы по прочности ($\approx 1/\gamma$, где γ — структурно-чувствительный параметр [3], $\bar{\gamma}$ — среднее значение параметра).

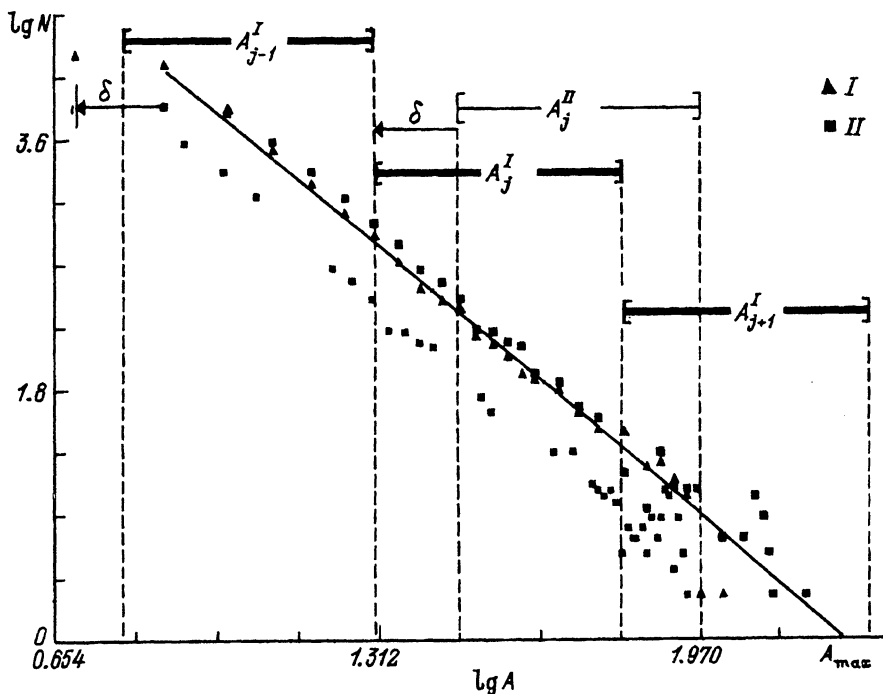


Рис. 8. Плотность распределения АЭ сигналов по амплитуде.

плитудном диапазоне сигналов, который оказался различным от эксперимента к эксперименту. Так, например, для одного из экспериментов (I) границы рассматриваемого амплитудного диапазона составляют $A_1 = 20 \pm 5$ мВ — $A_2 = 65 \pm 5$ мВ. Однако оказалось, что в другом аналогичном эксперименте образ очага наиболее четко проявляется в диапазоне от 30 мВ до 75 мВ. Для анализа этого расхождения рассмотрим плотности распределения амплитуд сигналов, зарегистрированных в этих одинаковых экспериментах (рис. 8). Видно, что начальные точки распределений смещены по оси абсцисс на величину δ . Поскольку материал и форма образцов I и II были идентичны и режимы нагружения подобны, трудно найти физическую интерпретацию этого смещения. Наиболее правдоподобное объяснение, на наш взгляд, заключается в изменении условий регистрации АЭ от образца к образцу, которое связано с изменением передаточной функции приемного тракта аппаратуры, включающей в себя неконтролируемые составляющие, например акустический контакт между образцом и пьезопреобразователем. Если теперь на основе этого предположения совместить начальные значения абсцисс графиков распределений I и II, то ранее разнесенные амплитудные диапазоны, выделенные при анализе разрушения двух образцов, совместятся. В дальнейшем для определенности значения амплитуд АЭ приведены к единой шкале (I).

Постоянство рассматриваемого амплитудного диапазона в анализируемой серии экспериментов можно объяснить следующим образом. Обширные экспериментальные данные [6] свидетельствуют о том, что горные породы имеют многоуровневую блочную структуру, характеризующуюся многомодальным распределением блоков по размерам. Со-

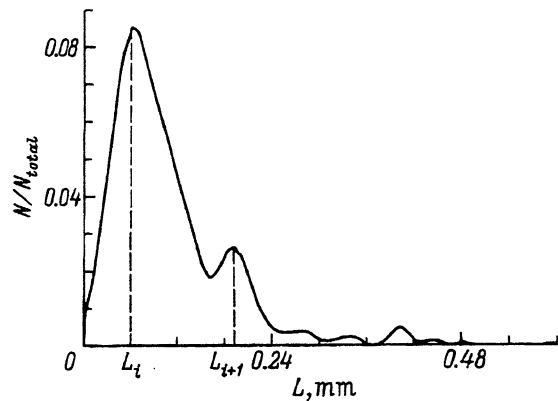


Рис. 9. Распределение структурных элементов в гранитном образце ($N_{total} = 553$, $L_{i+1}/L_i = 3$).

отношение двух соседних преимущественных размеров гетерогенности L_{i+1}/L_i лежит в диапазоне 2–5 и не зависит от масштаба этих размеров. Поскольку границы блоков являются стопорами для образующихся трещин, то можно предположить, что размеры трещин соответствуют размерам блоков и также имеют многомодальное распределение. Это позволяет ввести представление о ранговости трещинообразования или процесса разрушения горных пород. Подтверждением данного представления является распределение размеров структурных элементов (рис. 9), образовавшихся в гранитном образце к моменту T_k снятия с него нагрузки. Учитывая корреляционную связь между размером образующихся дефектов и энергетическими параметрами соответствующих упругих импульсов, предположим, что выделенный амплитудный диапазон сигналов, в котором наиболее отчетливо проявляется образ очага разрушения, соответствует одному (J -му) структурному уровню, а следовательно, и J -му рангу процесса.

При анализе сигналов с амплитудами, меньшими, чем нижняя граница A_1 рассматриваемого диапазона ($A_1 = 20 \pm 5$ мВ — $A_2 = 65 \pm 5$ мВ), наблюдается чередование признаков стационарных и очаговых стадий. На наш взгляд, это свидетельствует о том, что в анализируемый диапазон попали дефекты, относящиеся не только к J -уровню, но и к предыдущему $J-1$. Разрушение на $J-1$ масштабном уровне, как и на J , реализуется в виде двух последовательных стадий. Поэтому при анализе потока, включающего в себя события двух рангов, не наблюдается единой квазистационарной стадии.

С другой стороны, при увеличении значения нижней границы амплитуд обнаружено, что стадия T_1-T_2 уменьшается и смещается вправо по временной шкале. При $A > 65$ мВ эта стадия, вырождаясь, сливается с моментом T_3 . Источники АЭ указанных амплитуд с начала эксперимента генерируются в локальной очаговой зоне, минуя стадию дисперсного зарождения. Из этого можно сделать вывод, что при увеличении амплитудного порога выше некоторого значения наблюдаются проявления следующего $J+1$ ранга разрушения.

Оценим амплитудные диапазоны АЭ сигналов, соответствующие $J-1$ и $J+1$ рангам процесса, используя результаты, полученные в работе [7] при статистическом анализе крупномасштабных форм разрушения горных пород, сопровождающихся упругим энерговыделением от 10^2 до 10^{13} Дж. При изучении закономерностей формирования оча-

гов горных ударов и землетрясений было установлено, что энерговыделение на двух соседних уровнях разрушения удовлетворяет соотношению $\lg(E_{j+1}/E_j) = C$ во всем указанном диапазоне энергий сейсмических событий. Значение параметра C постоянно для конкретного региона, а для разных — изменяется в пределах 4.0 ± 0.5 . Исходя из представлений о подобии разрушения на различных масштабных уровнях [6], можно предположить существование аналогичной зависимости $\lg(A_{j+1}/A_j) = C_1$ для амплитудных диапазонов АЭ сигналов для различных уровней разрушения в образцах. Тогда с учетом $C_1 = 0.5$, определенного для выявленного амплитудного диапазона J -уровня, предыдущий $J-1$ -уровень разрушения представлен АЭ сигналами с $5 < A < 20$ мВ, а $J+1$ -уровень — $65 < A < 205$ мВ. В последний диапазон попадает значение максимально возможной амплитуды ($A_{\max} = 194$ мВ), оцененной из распределения (рис. 8) при условии $N = 1$ [8]. Это позволяет считать $J+1$ ранг максимально возможным в данном образце, соответствующим его макроскопическому разрушению.

Таким образом, используемый в эксперименте режим нагружения позволил детализировать особенности развития очага разрушения. После предельных локализации и ускорения дефектообразования вместо немедленного распространения макроразрыва обнаружена фаза процесса продолжительностью в сотни секунд, характеризующаяся генерацией дефектов в локальной неизменной области. И лишь затем наблюдается распространение макроразрыва.

Проведенные исследования АЭ при деформировании гранита позволили выделить определенный амплитудный диапазон акустических сигналов, интерпретируемый как единый ранг разрушения, для которого статистические закономерности АЭ потока, характеризующие первую, дисперсную, и вторую, очаговую, стадии процесса, проявляются максимально контрастно.

Представляет интерес количественное сопоставление эмпирических параметров C и C_1 , характеризующих разрушение горных пород на различных масштабных уровнях. Но необходимые для этого практические методы корректного расчета энергии, выделяемой в акустическом сигнале, пока недостаточно развиты. В случае же решения этой проблемы открываются дополнительные возможности как для поиска универсальных закономерностей процесса, так и для дальнейшего развития его модели.

Авторы выражают благодарность Dr.D.A.Lockner (U.S.Geological Survey), в лаборатории которого были получены экспериментальные результаты, анализируемые в данной работе.

Работа выполнена в рамках проекта «Закономерности формирования очага разрушения горных пород как физическая основа прогнозирования сейсмических явлений», поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 94-05-17278-а).

Список литературы

- [1] Lockner D.A., Byerlee J.D., Kuksenko V., Ponomarev A., Sidorin A. // Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks. London, Academic Press, 1992. P. 3-31.
- [2] Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н., Султонов У. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 6. С. 11-18.
- [3] Дамаскинская Е.Е., Томилини Н.Г. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 278-286.

- [4] Куксенко В.С. // Материалы I Всес. школы-семинара «Физика прочности и пластичности». Л., 1986. С. 36-41.
- [5] Lockner D.A., Reches Z., Moore D.E. // Proc. 33rd U.S.Symposium on Rock Mechanics, W.R.Wawersik (ed.). Santa Fe. New Mexico, June 1992.
- [6] Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Ширман М.Г. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 2. С. 3-15.
- [7] Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Фролов Д.И. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1989. № 3. С. 54-60.
- [8] Садовский М.А., Писаренко В.Ф. // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 4. С. 833-835.

Физико-технический институт
им.А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
11 апреля 1994 г.