

## ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,  
[kat.dama@mail.ioffe.ru](mailto:kat.dama@mail.ioffe.ru)

Работа посвящена исследованию влияния условий деформирования на процесс разрушения гетерогенных материалов, в данном случае, горных пород. Интерес к этой проблеме связан с тем, что в естественных условиях на горные породы действуют многие факторы: всестороннее давление; давление жидкости, заполняющей поры; давление вышележащих пластов. Кроме того, во многих регионах Земная кора рассечена многочисленными разломами, по которым может происходить проскальзывание (stick-slip), и трещинами, которые являются концентраторами напряжений. Лабораторные эксперименты позволяют дифференцировать влияние каждого фактора на развитие разрушения.

В работе проведен анализ накопления дефектов в экспериментах 3 типов: I – деформирование изначально целых образцов в условиях управляемого режима нагружения; II – деформирование водонасыщенных образцов; III – деформирование образцов, моделирующих stick-slip.

Во всех экспериментах на установке, подробно описанной в [1,2], деформировали цилиндрические образцы гранита Вестерли ( $h = 190.5$  мм,  $d = 76,2$  мм). Образцы находились в условиях всестороннего давления ( $P_c = 50$  МПа) и одноосного сжатия. В процессе эксперимента измерялись осевая нагрузка, продольная и поперечная деформации. Для наблюдения за дефектообразованием использовалась акустическая эмиссия (АЭ). С помощью 6-канальной системы регистрировались импульсы АЭ. Каждый сигнал в базе данных характеризуется временем излучения, 3 координатами и амплитудой, приведенной к референс-сфере радиуса  $R_f = 10$  мм. Приведенная амплитуда не зависит от геометрии расположения пьезопреобразователей и может служить энергетической характеристикой сигнала. Точность определения координат гипоцентров сигналов АЭ составляет  $\approx 3$  мм во всем объеме образца, для более, чем  $10^5$  сигналов.

### I. Деформирование изначально целых образцов в условиях управляемого режима нагружения

Главной особенностью экспериментов I типа является режим нагружения: осевая нагрузка изменяется таким образом, чтобы активность АЭ сигналов определенной амплитуды не превышала заранее установленного уровня. Такой режим позволил растянуть времени обычно быстропротекающую очаговую стадию и детально исследовать ее.

Обнаружено, что на начальной стадии дефекты образуются дисперсно. Затем наблюдается локализация, формируется очаг, из которого распространяется макроразрыв. Таким образом, в данных экспериментах разрушение происходит по двухстадийному механизму [4].

### II. Деформирование водонасыщенных образцов

Для исследования роли воды в развитии разрушения образец до начала опытов был полностью насыщен водой. В ходе эксперимента образец деформировали в условиях постоянного всестороннего давления 50 МПа, вода нагнеталась под давлением 1 МПа. Дискретными шагами задавалась осевая деформация.

Представляло интерес проследить картину накопления дефектов в периоды времени, когда деформация и нагрузка оставались практически неизменными. Были вы-

браны три этапа: на I этапе нагрузка составляла 76 % разрушающей, на II этапе – 86 % и на III этапе – 95 %.

На I этапе мы наблюдали дисперсное образование дефектов, а затем локализацию. То есть картина такая же, как и в предыдущем эксперименте. Как показано в [1], на этом этапе при увеличении нагрузки происходит «выдавливание» воды из образца. В результате материал в центральной части образца оказывается сухим, и картина развития разрушения соответствует закономерностям разрушения сухого образца.

На II и III этапах нагружения картина принципиально изменяется. Не наблюдается локализация, дефекты образуются дисперсно во всем объеме образца. Мы полагаем, что это связано с наличием воды в материале образца. На основании этих экспериментов можно сделать предположение о том, что роль воды состоит в следующем:

1. Вода заполняет все уже имеющиеся в материале по всему объему дефекты типа трещин, пор, капилляров. Эти дефекты распределены дисперсно по объему образца.

2. Как известно [5], гидролитический механизм значительно уменьшает энергию активации процесса разрушения.

3. Рост заполненных водой трещин сопровождается выделением упругой энергии, которую система регистрации АЭ не фиксирует. При скачкообразном увеличении деформации образуются новые трещины, что сопровождается резким увеличением активности АЭ. Эти трещины распределены хаотично по всему образцу. Затем в условиях практически постоянной деформации происходит постепенное заполнение новых трещин водой.

4. В результате получаем сильно поврежденный материал, который разрушается при приложении нагрузки меньшей величины, чем в экспериментах с сухим образцом.

Таким образом, происходит изменение механизма разрушения. Если в сухих образцах дефекты, имеющиеся в образце до начала нагружения, не играют существенной роли в развитии процесса разрушения, то в водонасыщенных образцах их влияние оказывается наиболее существенным.

### **III. Деформирование образцов, моделирующих stick-slip**

Эксперименты проводили в условиях постоянной скорости деформации, гидростатического давления и одноосного сжатия. На первом этапе эксперимента в целом образце под действием приложенной нагрузки сформировали излом. Затем всестороннее давление было увеличено в 2 раза (до 100 МПа) и продолжено нагружение. В результате удалось получить практически классическую картину, моделирующую stick-slip. Уникальность этих экспериментов состоит в том, что условия для сдвига не были созданы заранее, а получились естественным образом (как в Земной коре).

Обнаружено, что непосредственно перед проскальзыванием АЭ-сигналы являются практически равномерно. Появление сигналов АЭ с относительно большой амплитудой интерпретируется как разрушение мощных стопоров. За время между этими событиями продолжалось деформирование образца, накапливалась упругая энергия, увеличивались напряжения. Когда величина напряжения достигла величины, достаточной для разрушения следующего стопора, происходил его срыв. Каждый следующий стопор мощнее предыдущего (на это указывает возрастающая амплитуда АЭ сигнала). Когда же был разрушен последний стопор, произошел stick-slip.

Таким образом, при деформировании образца, имеющего разлом, происходит разрушение стопоров, находящихся на берегах разлома. Последовательность их разрушения определяется геометрией и мощностью (т.е. напряжением, необходимым для срыва стопора).

## Результаты

1. При деформировании сухих изначально целых образцов разрушение развивается по двухстадийному механизму: дисперсное накопление дефектов, локализация и развитие очага.

2. При деформировании водонасыщенных образцов происходит изменение механизма разрушения. Наиболее существенным оказывается влияние дефектов, имеющихся в образце до начала нагружения.

3. При разрушении по механизму stick-slip происходит разрушение стопоров, находящихся на берегах разлома. Поэтому для понимания развития таких процессов в Земной коре необходима информация о топографии разломов, которую можно получить методами зондирования.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-00639 –а) и ФЦП государственный контракт № 02.740.11.0315.*

## Список литературы

1. S. A. Stanchits, D. A. Lockner, and A. V. Ponomarev Anisotropic Changes in *P*-Wave Velocity and Attenuation during Deformation and Fluid Infiltration of Granite. // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 4, pp. 1803–1822, August 2003
2. Н. Г. Томилин, Е. Е. Дамаскинская, П. И. Павлов. Разрушение горных пород как многоуровневый процесс. // Физика земли, 2005, N 8, с. 69-78.
3. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Лабораторные и теоретические исследования процесса подготовки землетрясения. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – № 10. – С. 2526-2530.
4. Kuksenko V., N. Tomilin, E. Damaskinskaya, and D. Lockner, A two-stage model of fracture of rocks. // Pure Appl. Geophys.- 1996. - v.146, N2 - p.253-263.
5. Берштейн В.А., Никитин В.В., Степанов В.А., Шамрей Л.М. Гидролитический механизм разрушения стекла под нагрузкой. // ФТТ. – 1973. – Т. 15. – Вып. 11. – С. 3260-3265.

## АВТОГЕНЕРАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА НА УРОВНЕ НАНОСТРУКТУРЫ СТАЛИ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Кольцун Ю. И.<sup>1</sup>, Хибник Т. А.<sup>1</sup>, Шептунова Н. А.<sup>2</sup>, Арестова М. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» (СГАУ), г.Самара, Россия,  
[koltoun\\_y.i@mail.ru](mailto:koltoun_y.i@mail.ru)

<sup>2</sup> Институт энергетики и транспорта СГАУ, г.Самара, Россия.

Траектория роста усталостной трещины определяется развитием области пластических деформаций в её устье как в глубь материала вдоль нормали к поверхности, так и в противоположных направлениях, перпендикулярной этой нормали. В этом случае фрактографический рисунок линии фронта усталостной трещины в зависимости от факторов внешнего воздействия становится различным. Фрактография траектории линии фронта усталостной трещины наиболее наглядна при испытаниях стальных образцов по типу III ГОСТ 25.506-85г. Как известно, определение коэффициента интенсивности напряжений в таких образцах основано на определении осредненной глубины усталостной трещины по пяти точкам на дугообразной линии фронта.