УДК 550.34.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОТОКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА НА ОБРАЗЦЕ ИЗ ПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

© 2011 г. А.А. Хромов, В.А. Луцкий

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Рассматриваются результаты эксперимента по изучению процесса разрушения образцов из пластичного однородного материала (эпоксидных блоков) при силовом воздействии невзрывной разрушающей смеси (НРС), размещаемой в шпуре внутри блока.

Контроль режимов нагружения и разрушения образцов производился средствами акустических измерений и тензометрии. Для регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии (АЭ) использовался комплекс *Aline* 32*D*, для регистрации тензосигналов (измерения деформаций) – система тензометрии *MD* 155.

Предлагается способ проведения локации источников сигналов на выделенных интервалах времени на основе анализа моментов вступления сигналов АЭ.

Ключевые слова: акустика, тензометрия, НРС, сигналы АЭ, локация, разрушение, образцы.

Введение

Исследования процесса разрушения образцов горных пород в лабораторных условиях проводятся в ИФЗ РАН с целью моделирования таких естественных процессов, как землетрясения и горные удары. В 2004–2009 гг. была выполнена серия экспериментов по разрушению образцов горных пород при внешнем и внутреннем нагружении с применением невзрывной разрушающей смеси (НРС), результаты которых представлены в ряде работ, в том числе в [*Ребецкий и др.*, 2005; *Дьяур и др.*, 2006; *Лементуева, Бубнова,* 2009]. В основном испытаниям подвергались образцы из хрупкого материала (мрамор, известняк, гранит) с небольшими линейными размерами порядка 10–15 см. Цель представляемой работы – исследование динамики развития магистрального разрыва при внутреннем нагружении более крупного образца из пластичного материала с использованием современного комплекса акустических и тензометрических измерений.

Поскольку разрушающее воздействие HPC сопровождается шумами, была выполнена экспериментальная оценка их уровня в сравнении с уровнем сигналов акустической эмиссии, наблюдаемых при разрушении эпоксидного образца.

Регистрация и обработка данных АЭ, полученные результаты

При экспериментах использовался эпоксидный блок, имеющий форму параллелепипеда с размерами 220×220×195 мм (рис. 1). Устье шпура, в который помещалась HPC, располагалось на верхней грани на равных расстояниях от боковых граней 1 и 2; диаметр шпура – 17 мм, глубина – 80 мм. На верхней и боковых гранях блока были размещены восемь акустических датчиков *GT* 200.

Координаты устья шпура и точек размещения датчиков приведены в табл. 1.



Рис. 1. Схема эксперимента по разрушению эпоксидного блока с применением НРС. Вид модели после разрушения (описание см. в тексте)

Таблица 1. Координаты точек размещения на гра-
нях эпоксидного блока восьми датчиков <i>GT</i> 200 и
устья шпура с НРС

№ дат-	Ζ,	Х,	Υ,	Примечание	
чика (j)	MM	MM	MM		
1	110	90	0	Грань 2 (прав.)	
2	130	190	0	Грань 2 (прав.)	
3	175	120	220	Невидимая грань	
4	90	80	220	Невидимая грань	
5	195	140	150	Верхняя грань	
6	35	0	85	Грань 1 (левая)	
7	70	20	220	Невидимая грань	
8	195	35	115	Верхняя грань	
Устье	105	55	55		
шпура	193	33	33	серхняя грань	

Положение акустических датчиков 1–8 на видимых частях граней 1, 2 и верхней грани образца отображено кружками с соответствующими номерами. Цифрами 1–6 обозначены зоны области разрушения, для которых проводилась локация источников АЭ; зоны 5–6 – шпур, в который помещалась HPC.

Акустические датчики с номерами 1–4 располагались в зоне вероятной области сжатия, с номерами 5, 8 – в промежуточной зоне. Порог принимаемых измерительными каналами сигналов составлял 38 дБ, полоса частот – 30–500 кГц, претриггеринг (текущий временной интервал запоминаемой информации, предшествующий моменту превышения сигналом порогового значения) – 200 мкс.

В ходе эксперимента с помощью акустического комплекса *Aline 32D* регистрировались накопление событий АЭ, энергия сигналов, фиксируемых каждым из восьми датчиков, и осциллограммы сигналов АЭ.

Для измерения деформаций использовалась система тензометрии *MD* 155. Тензометрические датчики были установлены на боковых гранях 1 и 2 в зоне предполагаемого развития магистральной трещины (на рис. 1 не показаны).

Места установки акустических и тензометрических датчиков выбирались на основании физических представлений и результатов предварительного эксперимента, проведенного на подобном образце. Теоретически при известном пространственном положении источника и датчиков можно определить тип разрыва магистральной трещины (сдвиг или отрыв) по фазе вступления первых сигналов АЭ [Виноградов, 1980]. В нашем эксперименте ожидаемым типом разрушения был отрыв.

Экспериментальная часть

При анализе деформаций по данным тензометрии рассматривались две компоненты – максимальная деформация сдвига γ и средняя деформация θ [*Ребецкий и др.*, 2005]. В течение всего эксперимента, вплоть до выхода разрыва на поверхность образца, деформация грани 2 превышала деформацию грани 1 ($\gamma \approx 100\%$, $\theta \approx 20-25\%$), что может свидетельствовать о внутренней структурной неоднородности образца, проявившейся в ходе эксперимента.

На нижнем фрагменте рис. 2 приведены графики, демонстрирующие динамику потока акустической эмиссии, на верхнем – деформации, наблюдаемые при образовании и развитии трещины отрыва в эпоксидном блоке. Графики вариаций энергии акустических сигналов при формировании зоны разрушения представлены на рис. 3.



Рис. 2. Динамика потока акустической эмиссии (*внизу*) и деформации, наблюдаемые при образовании и развитии трещины отрыва в эпоксидном блоке, (*вверху*). γ₁, θ₁ – максимальная и средняя деформации сдвига для грани 1; γ₂, θ₂ – то же для грани 2. I–VI – условные временные интервалы, выделенные при анализе разрушения образца; вертикальные стрелки – их границы. Цифры 1–8 над графиками АЭ – номера датчиков

При совместном рассмотрении графиков, приведенных на рис. 2, 3, процесс разрушения образца может быть условно разделен на шесть временных интервалов I–VI.

Интервал I, в начале которого наблюдается практически линейный рост компонент деформаций γ и θ , длился около семи часов. Через 3.5–4 часа от его начала была отмечена активность АЭ и изменение наклона графика γ_1 . В этот период фиксировались редкие (5–6 в час) события АЭ с энергией до 70–80 дБ, которые, вероятно, обусловлены микроразрушениями внутри образца.

В течение интервала II, длившегося около 11 часов, отмечалось значительное уменьшение скорости роста у и θ. В его начальной части наблюдалось перераспределение потока АЭ между датчиками 1 и 8 – количество сигналов АЭ, фиксируемых датчиком 1, стало больше, чем фиксируемое датчиком 8 (до этого соотношение было обратным).



Рис. 3. Вариации энергии акустических сигналов при формировании зоны разрушения в эпоксидном блоке. Грань 1. I–VI – условные временные интервалы, выделенные при анализе разрушения образца; вертикальные стрелки – их границы

Видимо, к началу интервала внутри образца сформировалась зона разрушения, изменившая условия прохождения упругих волн в направлении датчиков 1, 8.

Интервал III длился около 11 часов. На графиках γ и θ отмечены отрицательная локальная аномалия при относительном уменьшении γ до 20% и θ до 10%. Наблюдалось также уменьшение количества событий АЭ (1–2 в час) и возрастание энергии сигналов АЭ до величин, превышающих 80 дБ; появилась визуально просматриваемая оптическая неоднородность в полупрозрачном материале образца. Начала формироваться скрытая трещина отрыва, поверхность которой была обнаружена при разборке образца после завершения эксперимента.

В течение интервала IV, продолжительность которого составила 4.5 часа, для обеих боковых граней эпоксидного блока наблюдался медленный рост значений γ и θ . Число фиксируемых событий АЭ возросло до 15–20 в час при увеличении энергии сигналов до 85–90 дБ. В конце интервала рост значений γ и θ завершился их скачкообразным увеличением на грани 2 и уменьшением на грани 1; произошло увеличение потока АЭ и энергии сигналов до 100–120 дБ. Вероятно, это связано с образованием разрывов, приведших в дальнейшем к формированию магистральной трещины. Методом приближенной локации было вычислено местоположение источников АЭ в зонах 1, 3, 6 (см. рис. 1).

На интервале V активность АЭ не проявлялась. В середине интервала произошло скачкообразное изменение γ и θ в обратном направлении по отношению к их изменениям на интервале IV. В конце интервала поток АЭ резко возрос; уровень энергии достиг 120 дБ и более; началось окончательное разрушение образца с образованием видимой трещины.

На интервале VI, длившемся 2–2.5 часа, разрушение образца завершилось с образованием магистральной трещины отрыва. При этом отмечен повышенный уровень активности АЭ, поток АЭ превысил 120–150 событий в час при энергии сигнала выше 120 дБ. Произошел обрыв тензометрического датчика при выходе трещины на поверхность грани 2.

В процессе формирования зоны разрушения в эпоксидном блоке происходило изменение характера потока сигналов АЭ (см. рис. 3). На временных интервалах I, II наблюдался поток случайно распределенных во времени сигналов, имеющих сравнительно невысокую энергию (60–80 дБ). В пределах интервала III всеми акустическими датчиками регистрировались группы единовременных сигналов (столбцы точек на рис. 3). На временных интервалах IV, VI происходила консолидация сигналов всех датчиков при увеличении максимальной энергии сигналов до 130 дБ и выше. На интервале IV наблюдалось до восьми групп сигналов АЭ, следовавших друг за другом с интервалом 0.5–1 ч.

Отметим, что при развитии микротрещин на временных интервалах III, IV, VI все датчики, кроме одного, зарегистрировали положительные фазы вступления сигналов АЭ; датчик 5, расположенный на верхней грани блока, зафиксировал отрицательную фазу вступления. Подобный характер вступлений сигналов АЭ свидетельствует о возникновении трещины отрыва.

Приближенное определение места образования и развития трещины

Авторами предлагается способ проведения локации источников сигналов на выделенных интервалах времени на основе анализа моментов вступления сигналов АЭ. Отметим, что предлагаемый способ предполагает акустическую однородность материала образца.

Рассмотрим последовательность зарождения и развития микроразрушений образца на начальных временных интервалах II, III, IV. По упрощенной методике определим местоположение источников сигналов АЭ.

Выберем несколько представительных групп событий, имеющих достаточно высокие уровни энергии (превышающих 75–80 дБ). Каждая группа должна включать осциллограммы сигналов АЭ, принятые разными датчиками, но инициированные одним источником АЭ. Времена вступления таких сигналов различаются на величину времен распространения акустических волн в пределах образца.

Поверхность произошедшего отрыва в разрушенном образце делим на несколько участков (зон) с учетом предположений о местах возникновения сигналов АЭ и отмечаем координаты "центров" этих участков. ("Центры" не обязательно должны быть геометрическими центрами фигур – они могут быть смещены в сторону вероятного, по выбору исследователя, места источника сигналов АЭ). Обозначив номер участка индексом *i*, а номер датчика индексом *j*, определим R_{ij} – геометрические расстояния между "центрами" выбранных участков и центрами рабочей поверхности каждого акустического датчика, установленного на образце:

$$R_{ij} = \left(\left(x_i - x_j \right)^2 + \left(y_i - y_j \right)^2 + \left(z_i - z_j \right)^2 \right)^{1/2} , \qquad (1)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты "центров" участков; x_j, y_j, z_j – координаты датчиков.

В нашем случае рассматривались шесть зон разрушения (i = 1,..., 6), местоположение которых отмечено на рис. 1; использовались восемь акустических датчиков (j = 1,..., 8), установленных в точках с координатами, приведенными в табл. 1. В результате расчета по формуле (1) было получено 48 численных значений расстояний между каждым датчиком и каждым "центром" выделенных зон поверхности отрыва.

Зная время приходы сигналов АЭ от источника излучения на каждый из датчиков, можно оценить местоположение данного источника. В результате проведенных оценок для 12 групп событий (генерации сигналов АЭ), наблюдавшихся на временных интервалах II, III, IV, а также четырех групп, наблюдавшихся на интервале VI, были определены зоны излучения акустических сигналов (табл. 2).

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2011. Том 12. № 1

Условный временной интервал	Номер регистрируемого события	Номер зоны, в которой расположен источник АЭ	Условный временной интервал	Номер регистрируемого события	Номер зоны, в которой расположен источник АЭ
II	1	1 или 6	IV	9	3, 6
III	2	3	IV	10	3
III	3	1,6	IV	11	3
III	4	2*, 6*	IV	12	1*, 6*
IV	5	3	VI	13	3, 4
IV	6	3	VI	14	3, 4
IV	7	1,6	VI	15	3**, 4**
IV	8	1,6	VI	16	4**

Таблица 2. Зоны источников сигналов АЭ, определенные способом приближенной локации

* возможна погрешность; ** точное определение координат затруднено.

Оценка уровня шумовых сигналов, создаваемых НРС

В ходе эксперимента по оценке интенсивности уровня шумов, возникающих при разрушающем воздействии НРС, сигналы АЭ регистрировались датчиком системы *Aline* 32*D*, установленным на алюминиевой трубке (диаметр трубки 10 мм, длина 90 мм). Трубка заполнялась раствором НРС и закрывалась пробкой.

Эксперимент продолжался около 25 часов, в течение которых было зарегистрировано 2438 сигналов АЭ. Основной поток сигналов наблюдался в ходе первых 15 часов, когда его средняя интенсивность составляла примерно 160 событий в час. Сигналы в основном были короткими (менее 200 мкс), имели характерную форму (вероятно, определяемую частотными свойствами датчика) и невысокий уровень энергии. Уровень энергии большей части сигналов (до 85%) не превышал 45 дБ; лишь 1–1.5% сигналов имели уровень порядка 48–49 дБ. Типичная форма шумовых сигналов, создаваемых НРС, приведена на рис 4.



Рис. 4. Типичная форма шумовых сигналов, создаваемых НРС

Уровень шумового сигнала, измеряемый непосредственно на металлической трубке с HPC, не учитывает затухания сигналов в образце в реальном эксперименте. Затухание импульсов в образце при распространении от шпура с HPC до датчиков, установленных на разных расстояниях от него, по нашим оценкам, составит 15–20 дБ.

С учетом этого уровень помех, создаваемых HPC, составит 25–35 дБ, редко превышая пороговый уровень измерительных каналов (38 дБ). Визуально такие сигналы характерной колоколообразной формы можно видеть на осциллограммах при пороге регистрации 35 дБ.

Обсуждение результатов и заключение

Модули упругости таких горных пород, как мрамор, гранит, известняк, составляют $(50-55)\cdot10^3$ МПа, превышая более чем на порядок модуль упругости эпоксидного материала, который равен $(3.5-4.0)\cdot10^3$ МПа. Поэтому картина рушения эпоксидного блока, в отличие от образцов горных пород, имеет ряд особенностей, связанных с различием их пластичности и размеров.

При разрушении эпоксидного образца развитию магистральной трещины отрыва предшествует протяженная во времени (около 20 часов) серия коротких импульсных сигналов с энергией от 50 до 130 дБ. Латентное время "тихого" накопления упругой энергии, предшествующее началу разрушения, увеличивается в 2–3 раза. Паузы, определяющие периоды накопления упругой энергии, невелики по сравнению с периодами активного разрушения. В периоды активного разрушения наблюдается сравнительно плавное нарастание потока сигналов АЭ. Группы сигналов АЭ, разнесенные во времени (см. рис. 3), также определяют особенность разрушения образца из пластичного материала.

Комплекс тензометрического и акустического методов с определением местоположения источников сигналов АЭ позволил восстановить динамику развития разрушения эпоксидного образца. Были определены границы временных интервалов разрушения – начальный, пауза накопления энергии, этап активного разрушения с образованием трещины отрыва. Определение местоположения источника сигналов АЭ на начальных интервалах позволило сделать вывод о том, что разрушение зародилось внутри образца в районе нижней половины шпура.

Результаты измерения шумов, возбуждаемых НРС, носят оценочный характер. В развитие использованной методики может быть проведено более детальное их изучение – анализ спектров, энергии, затухания, – что позволит отделять эти шумы от сигналов АЭ, регистрируемых при нагружении образцов горных пород.

Литература

- Виноградов С.Д. Формирования излучений около сдвигового разрыва // Физика Земли. 1980. № 7. С.86–90.
- Дьяур Н.И., Ребецкий Ю.Л., Луцкий В.А., Майбук З.-Ю.Я., Михайлова А.В., Бубнова Н.Я. Исследование развития трещин сдвига на моделях горных пород // Материалы Седьмой международной конференции "Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле", Борок 25–26 сент. 2006 г. М.: ИФЗ РАН, 2006. С.24–25.
- *Лементуева Р.А., Бубнова Н.Я.* Акустическая эмиссия и экспериментальное применение новой методики невзрывной разрушающей смесью при разрушении образцов горной породы // Геофизические исследования. 2009. Т. 9, № 4. С.67–74.
- Ребецкий Ю.Л., Лементуева Р.А., Дьяур Н.И., Михайлова А.В. Соподчиненность микроструктурных деформаций и хрупкого макроразрушения // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 2. С.253– 257.

Сведения об авторах

ХРОМОВ Анатолий Алексеевич – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-23-30.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2011. Том 12. № 1

ЛУЦКИЙ Виктор Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (499) 254-34-97.

DYNAMICS OF ACOUSTIC FLOW AT FORMATION OF THE RUPTURE SURFACE ON PLASTIC SAMPLE

A.A. Khromov, V.A. Lutskiy

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The paper examines the results of experiments for failure of plastic epoxide compound block due to impact of nonexplosive destruction mix (NDM), placed into a borehole inside the block. Eight-channel acoustic emission acquisition system Aline32D and strain gauge system MD 155 were used for recording and processing AE signals. Using the plastic homogeneous material allows to receive stable and recurrent results. The zone of failure nucleation is estimated from AE data.

Keywords: acoustic emission, strain gauging, failure, AE location, nonexplosive destruction mix.