





Эволюция дефектной структуры и оценка степени критичности состояния деформированной горной породы

Е.Е. Дамаскинская¹, В.Л. Гиляров¹, И.А. Пантелеев², Д.В. Корост³, Д.И. Фролов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

² Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Проблема :

Прогнозирование развития разрушения и оценка степени критичности состояния материалов, находящихся под действием механической нагрузки. Гетерогенный материал, в котором развивается дефектная структура, - нелинейная неоднородная система с положительными обратными связями.

Динамический хаос - явление, при котором поведение нелинейной системы выглядит случайным, несмотря на то, что оно определяется детерминистическими законами.

Сложные системы чрезвычайно *зависимы от начальных условий*, и **небольшие изменения** в этих условий **могут привести к непредсказуемым последствиям**.

Нелинейные динамические системы могут находиться как в устойчивом («неопасном») состоянии, так и в метастабильном («опасном») состоянии, в котором малое возмущение может привести к глобальной потере устойчивости и последующей катастрофе.

Цель работы :

поиск признаков, позволяющих оценить состояние материала.

Неопасное состояние материала: появление новых дефектов не приводит к потере прочности материала.

Опасное состояние: сформировалась дефектная структура, развитие которой неизбежно приведет к катастрофическому разрушению.

Ранняя стадия деформирования ($\sigma << \sigma_{\text{разрушающее}}$) :

Совокупность *дефектов* можно рассматривать как систему, в которой *отсутствует память*. Это означает, что состояние системы в будущем не зависит от предыстории и определяется только состоянием в данное конкретное время.

Известно, что такие процессы (*марковские*) описываются экспоненциальным распределением их параметров.

Параметр системы – энергия сигналов акустической эмиссии (AE), которая сопровождает появление дефектов.

Финальная стадия деформирования :

Совокупность *дефектов* эволюционирует в состояние *самоорганизованной критичности* [Bak, P., *How Nature Works*. 1996], в котором малое возмущение может привести к катастрофе.

Это состояние обладает свойством пространственно-временной инвариантности и описывается *степенными* распределениями параметров.

Объекты исследований:

Westerly гранит; метапесчаник; песчаник Berea.

Минерал	Quartz	Plagioglase	K-feldspar	Biotite	Muscovite
	(кварц)	(плагиоклаз)	(полевой	(биотит)	(мусковит)
			шпат)		
	28%	33%	33%	3.5%	1.9%
плотность	2600 - 2650	2620 - 2760	2560 кг/м ³	2800 - 3400	2760 - 3100
	$K\Gamma/M^3$	кг/м ³		$K\Gamma/M^3$	$K\Gamma/M^3$

Таблица 1. Минеральный состав гранита Westerly

Таблица 2. Минеральный состав метапесчаника

Минерал	Quartz	Biotite	Muscovite	Garnet	Ore mineral
	(кварц)	(биотит)	(мусковит)	(гранат)	(рудный
					минерал)
	40-50%	20-25%	20%	15%	5-10%
плотность	2600 - 2650	2800 - 3400	2760 - 3100	3470 - 3830	??? кг/м³
	$K\Gamma/M^3$	$K\Gamma/M^3$	$K\Gamma/M^3$	<u>кг/м³</u>	

Таблица 3. Минеральный состав песчаника Berea

Минерал	Quartz	Plagioglase	K-feldspar	Kaolinite	Calcite
	(кварц)	(плагиоклаз)	(полевой	(каолинит)	(кальцит)
			шпат)	(силикат	CaCO ₃
				алюминия)	
	85-90 %	1-2 %	3-6 %	2-6 %	6-8 %
плотность	2600 - 2650	2620 - 2760	2560 кг/м ³	2600 кг/м ³	2710 кг/м ³
	КГ/М ³	$K\Gamma/M^3$			

Лабораторные эксперименты по деформированию образцов гетерогенных материалов



Для сравнения: характерный размер структурного элемента материала ≈ 100 mkm

Особенность экспериментов : на каждом этапе деформирования одного и того же образца используются оба метода (АЕ и СТ), что позволяет проследить эволюцию дефектной структуры и сопоставить ее с параметрами сигналов АЕ.

Томографические срезы

До механических испытаний



10 mm

После механических испытаний





Структура метапесчаника

гранат



Структура песчаника Berea

Томографическая съемка всех образцов с пространственным разрешением 3 mkm, проведенная до начала механических испытаний, показала, что в материале не обнаружено структурных аномалий, которые могли стать источниками развития разрушения.

Эксперименты І типа

Многоэтапное нагружение одного и того же образца

Серия из 11 образцов

Этапы нагружения образца (гранит Westerly)







Предразрушающий этап нагружения



10

Вычисление относительного объема дефектов по данным томографии



Рентгеновская компьютерная микротомография

Объемная доля дефектов



Предразрушающий этап нагружения



13

Sample 1

(предразрушающий этап нагружения)

Результат

Функциональный вид распределения сигналов АЕ по энергии позволил выделить «неопасную» и «опасную» области образца.



Этапы нагружения образца (песчаник Berea)



25000

- 20000

Energy, arb.un.

- 5000

0

10000

800

600

Activity ($\Delta N/\Delta T$), s⁻¹

200

Распределение числа сигналов АЕ по энергии



Эксперименты ІІ типа

Один этап нагружения образца

2 серии из 7 образцов

Изменение напряжения



Образец "W" – гранит Westerly

Образец "S" - метапесчаник

Распределение числа сигналов АЕ по энергии



Временные зависимости глобального коэффициента Херста и ширины

спектра сингулярностей



Монотонное увеличение во времени коэффициента **H** и уменьшение ширины спектра **w** отражает фрактальную самоорганизацию процесса – тенденцию к монофрактализации.

Дефектная структура в объеме образца (по данным СТ)



Несмотря на локализованный (в пространстве) характер накопления дефектов, выявленный методом рентгеновской микротомографии, анализ энергетических распределений сигналов акустической эмиссии позволил выделить принципиально различные стадии развития магистральной трещины.

Дефектная структура (по данным СТ)



Эксперименты по деформированию образцов гранита

USA Geological Survey, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИФЗ им. О.Ю. Шмидта



Lockner, D.A., J.D. Byerlee, V. Kuksenko, A. Ponomarev and A. Sidorin, 1992, Observations of Quasistatic Fault Growth from Acoustic Emissions, in B. Evans and T.-F. Wong, eds., Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks Academic Press, 3–31.

Ранняя стадия деформирования (~0.5-0.6 времени жизни образца)



По всей вероятности, это означает, что в различных пространственных частях образца характер дефектообразования различный.

Ранняя стадия деформирования (~0.5-0.6 времени жизни образца)

Пространственное сканирование образца



Финальная стадия деформирования. Локализованое разрушение.



26

Дефектная структура в объеме образца (по данным СТ)



Крупномасштабное разрушение (действующее горное предприятие)

Размер «природного образца» 120 × 400 × 60 м³

Структура базы данных:

параметры сигналов микросейсмичности:

t - время,

х, у, z - координаты гипоцентра,

Е – энергия, приведенная к источнику (Дж)

Период наблюдений: январь 2010 – январь 2011 6835 событий диапазон энергии от единиц до тысяч Дж

Дисперсное разрушение



Локализованное разрушение



Результаты

Установлено, что тип функции распределения сигналов АЕ по энергии может использоваться как индикатор состояния деформированного материала и перехода на критическую стадию разрушения.

 Экспоненциальная функция указывает на некритическое состояние деформированного материала;

степенная функция указывает на то, что процесс накопления повреждений перешел на «опасную» стадию.

Показано, что формирование магистральной трещины является многостадийным процессом.

Тип функции распределения сигналов АЭ по энергии позволяет выделить

стадию равновесной устойчивой эволюции – экспоненциальное распределение

и стадию неустойчивого развития – степенное распределение.

Подтверждением этого заключения являются результаты мультифрактального анализа временных интервалов между соседними сигналами АЕ : в обеих сериях наблюдается переход от мультифрактальной динамики акустической эмиссии к монофрактальной при приближении к 31

Спасибо за внимание !

Томографические срезы

До механических испытаний



После механических испытаний



Томографическая съемка всех образцов с пространственным разрешением 3 mkm, проведенная до начала механических испытаний, показала, что в материале не обнаружено структурных аномалий, которые могли стать источниками развития разрушения. 34

Структура метапесчаника



– гранат

3D визуализация включений граната



Дефектная структура в объеме образца (по данным СТ)

