© С.А. Коваленко, 2008

УДК 622.611:620.179.16

С.А. Коваленко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХОСКОПИИ

Электронная микроскопия шлифов и рентгено-структурный анализ являются на сегодня основными методами изучения закономерностей структурных изменений образцов горных пород под влиянием внешних воздействий различной физической природы. Для этих методов характерны высокая чувствительность, разрешающая способность, уровень методического и аппаратурного обеспечения. В тоже время значительная трудоёмкость и себестоимость серьёзно ограничивают возможности применения указанных методов при проведении массовых испытаний на статистически значимом количестве образцов. В связи с этим представляет интерес использование для структурной диагностики геоматериалов ультразвукового метода отражённых волн [1].

Этот метод до настоящего времени для исследования структуры образцов горных пород и динамики её разрушения практически не применялся. Связано это было прежде всего с отсутствием мощных широкополосных импульсных источников ультразвука для получения отражённого сигнала от акустических неоднородностей, размеры которых соизмеримы и даже меньше характерных размеров зерна. Сейчас такие источники созданы на базе оптико-акустических (лазерных) генераторов (ОАГ), возбуждающих импульсы продольных упругих волн длительностью менее 100 нс и амплитудой давления до 10 МПа. К тому же лазерно-ультразвковая эхоскопия позволяет свести мёртвые зоны к минимуму и не требует специальной обработки двух противоположных поверхностей образца [2].

Принцип работы установки лазерно-ультразвуковой эхоскопии заключается в следующем. Оптические импульсы твёрдотельного лазера, работающего в режиме модуляции добротности, поступают через оптоволоконный кабель в оптическую систему, закреплённую на корпусе оптоакустического преобразователя. При этом сам лазер обеспечивает следующие параметры излучения: длина волны $\lambda = 1{,}06$ мкм, длительность импульса $\tau = 15$ нс, максимальная энергия в импульсе $E = 200$ мкДж.

Оптическая система формирует световой пучок радиусом 2,5 мм, поступающий в прозрачную призму из оргстекла с плоскопараллельными основаниями. Эта призма в дальнейшем используется в качестве звукопровода для акустических сигналов.

К рабочей плоскости призмы (на ко-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-00281).

торую падает оптический пучок) приклеена пластина из чёрного пластика толщиной 300 мкм, который имеет акустический импеданс, близкий к импедансу оргстекла, и высокое значение коэффициента теплового расширения. Эта пластинка и выполняет функции оптико-акустического генератора. Действительно, она интенсивно поглощает падающее на неё лазерное излучение, которое приводит к быстрому локальному нагреву приповерхностной области, тепловому расширению этой области и, как следствие, к возбуждению в образце геоматериала ультразвукового импульса продольных упругих волн.

При этом длительность возбуждаемых импульсов не превышает 100 нс, что с учётом реальных скоростей распространения акустических сигналов в горных породах, соответствует пространственной протяжённости менее 0,5 мм. Диаметр возбуждаемого в образце ультразвукового пучка равен диаметру светового пучка, падающего на поверхность оптико-акустического генератора, и составляет соответственно 5 мм.

Ультразвуковые сигналы возбуждаемые оптико-акустическим генератором, и распространяющиеся в исследуемом образце, рассматриваются в качестве зондирующих импульсов, а распространяющиеся в призме – в качестве опорных.

Опорные сигналы, сигналы отражённые от дефекта, а также сигналы отражённые от нижней поверхности образца (донные) принимаются демпфированным широкополосным пьезоприёмником и преобразуются последним в электрические сигналы, которые далее усиливаются предусилителем и обрабатываются по специально разработанной программе «SCAN» для получения качественного и наглядного изображения на компьютере.

По акустическому треку, полученному от образца в режиме эхоскопии, скорость распространения продольных волн C_l вычисляется по разнице времен Δt прихода на пьезодатчик опорного и отражённого от нижней стороны образца импульсов, а также измеренному значению толщины h образца:

$$C_l = 2 \cdot h / \Delta t \qquad (1)$$

Измеряя время задержки Δt_{cr} между опорным и отражённым от дефекта (микротрещины, поры, уплотнения и др.) импульсами, можно вычислить глубину залегания h_{cr} дефекта от поверхности из соотношения:

$$h_{cr} = C_l \cdot \Delta t_{cr} / 2 \qquad (2)$$

Погрешность определения скорости распространения ультразвука и глубины залегания дефекта определяется погрешностями измерения толщины образца и соответствующих временных интервалов и составляет около 3 %.

Возбуждаемые в оптико-акустическом генераторе зондирующие импульсы имеют длительность порядка 100 нс, что с учётом реальных скоростей распространения продольных волн в горных породах даёт возможность обнаружить дефект (микротрещину) на глубине от 0,1–1 мм. Помимо этого, существует возможность оценки соотношения акустических импедансов вещества, заполняющего микротрещину, и вмещающей её горной породы на основе соотношения полярностей опорного и отражённого от микротрещины сигналов. Если данные сигналы обладают разными полярностями, то заполняющее микротрещину вещество имеет относительно меньший импеданс, в противном случае – больший [3].

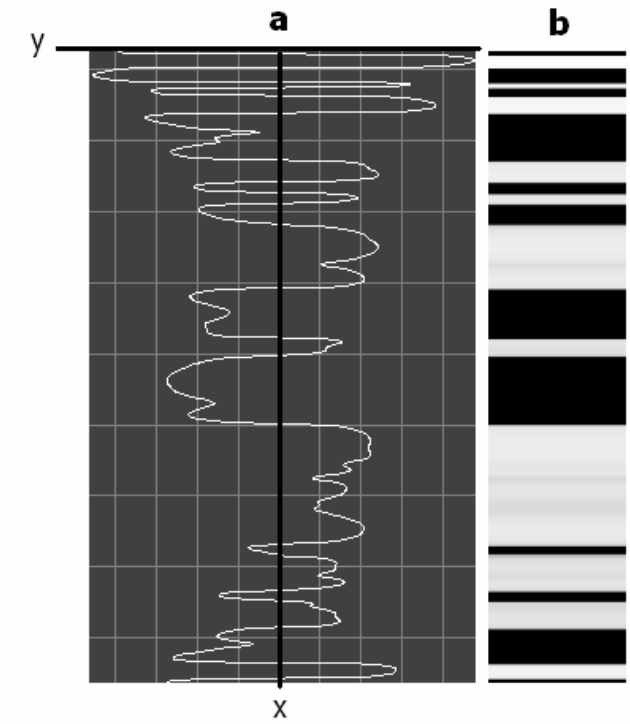

Рис. 1. Изображение сигнала: a – фрагмент сигнала полученный при эхолокации; b - перекодированное цветовое изображение сигнала

Рассмотрим технологию проведения эксперимента лазерным оптико-акустическим сканером. Любое плоское изображение, получаемое при проведении эксперимента состоит из 50 отдельных изображений, каждое из которых разрешением 2500 точек и длиной порядка 1 мм. Последующая компьютерная обработка результатов такого сканирования обеспечивает переход к визуальным оценкам акустической жесткости отдельных участков каждого из слоев. При этом в соответствии с принятым «цветовым правилом» на полученном разрезе образца черным цветом отображаются участки с максимальной акустической жесткостью, а белым – с минимальной. Участкам с промежуточными значениями акустической жесткости соответствуют разные оттенки серого цвета. Таким образом, фактически, осуществляется переход от классической эхолокации образца к его эхоскопии или интроскопии, то есть внутривидению.

Лазерный оптико-акустический сканер (ЛОАС) возбуждает в конкретной точке на поверхности исследуемой среды мощный широкополосный ультразвуковой импульс. Последний распространяется вглубь, частично отражаясь от каждой из лежащих на пути распространения неоднородностей. При этом отраженный сигнал принимается приемным пьезопреобразователем ЛОАС в той же точке. Трек этого сигнала, условно показан на рис.1., он несёт одномерную диагностическую информацию.

Далее ЛОАС последовательно перемещают от точки к точке вдоль профиля, повторяя в каждой точке процесс излучения и приема, и, получая таким образом второй, третий и, наконец, n-й сигнал. Совокупность таких сигналов, полученных во всех n точках контроля (в нашем случае в 50), расположенных на соответствующем профиле дискретного сканирования, образует плоскую картину распределения структурных неоднородностей, представленную на рис.2. Входящие в него сигналы после временной и частотной фильтрации группируются в матрицу, содержащую трехмерный массив чисел, отражающих глубину сканирования, координаты точек сканирования и соответствующие им амплитуды сигналов. Этот массив чисел используется непосредственно

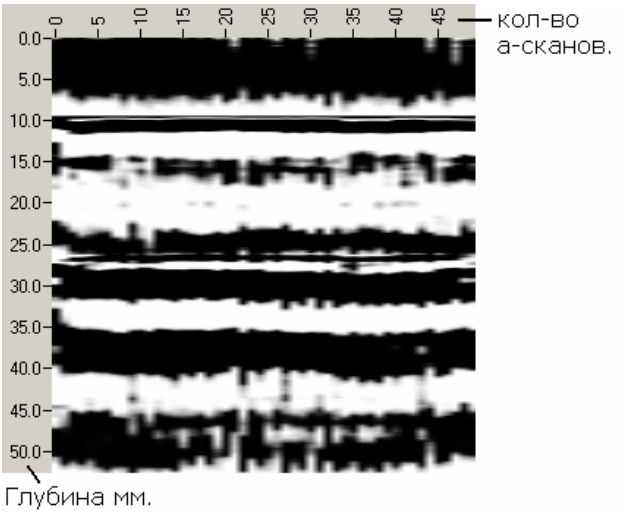

Рис. 2. Изображение разреза образца, построенное при помощи программы SCNR

для построения изобра-жения. При этом яркость точки на указанном изображении, или точнее ее цветовой тон, определяется амплитудой принятого сигнала, подвергшегося фильтрации с учетом его частото-зависимого затухания на двукратном расстоянии между точками излучения и отражения. Фактически это изображение несет информацию о коэффициенте отражения ультразвука по глубине в плоскости сканирования, а следовательно, о структурных неоднородностях в этой плоскости.

Рассматриваемый ниже пример призван продемонстрировать возможности лазерной ультразвуковой спектроскопии для оценки структурных изменений в геологических объектах, обусловленных внешними воздействиями той или иной физической природы.

Эксперименты проводились с образцом железистого кварцита. Основные характеристики образца приведены в таблице.

Образец был трижды просканирован, первый раз в исходном состоянии, ненарушенном, второй и третий раз после соответственно первого и второго импульсного электромагнитного воздействия. Первое электромагнитное воздействие соответствовало мощности одного порогового значения, а второе - мощности четырёх пороговых значений. Оценку структурных изменений образца предполагалось осуществить по статическим состояниям в различные периоды разрушения.

Результаты экспериментов изображены на рис. 3. Как видно из рисунка, он содержит три области, каждая из которых соответствует определённой стадии разрушения образца. В первой области располагаются изображения срезов образцов с ненарушенной структурой, во второй области изображение срезов образцов, подверженных одному электромагнитному воздействию и в третьей - двум, соответственно.

Как мы видим, наблюдается чёткая картина изменения внутренней структуры. Для ненарушенного состояния характерно прослеживание областей с различными физико-механическими характеристиками, что определяет некое подобие слоистой структуры исследуемого образца.

После проведения первого электромагнитного воздействия наблюдается некоторое нарушение внутренней

Образец	Плотность кг/м^3	Толщина мм.	Масса г.	Скорость м/с
Железистый кварцит	3,6	0,4	24,6	5600

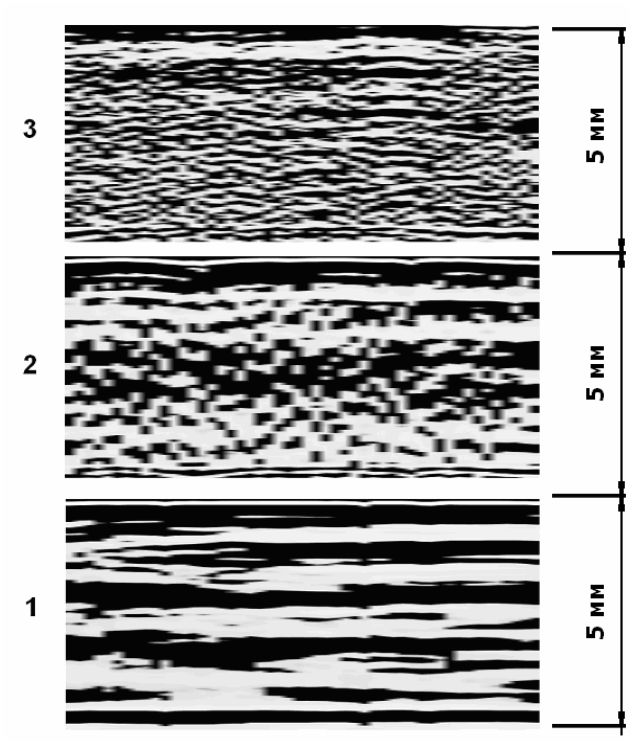

Рис. 3. Структура железистого кварцита, полученная по результатам УЗ эхоскопии: *1* – исходное состояние, *2* – после первого электромагнитного воздействия, *3* – после второго электромагнитного воздействия

структуры, неоднородность слоёв становится более частой и зернистой, слоистость выявить уже сложнее, тем не менее её общие черты ещё просматриваются.

После второго воздействия структура становится сильно измельчённой, слоистость уже не наблюдается. На всех представленных рисунках высота одного экспериментального изображения соответствует 4 мм, т.е. реальной толщине образца, а длина соответствует 3 см., т.е. реальной длине образца.

Таким образом, данные полученные при лазерно-ультразвуковой эхоскопии свидетельствуют о том, что этот метод может являться эффективным инструментом изучения динамики разрушения горных пород под воздействием полей различной физической природы, в том числе и электромагнитных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шкуратник В.Л.* Горная геофизика. Ультразвуковые методы. М.: МГИ, 1990.

2. *В.Н. Иньков, Е.Б. Черепецкая, В.Л. Шкуратник, А.А. Карабутов, В.А. Макаров.* Ультразвуковая эхоскопия геоматериалов с использованием термооптических источников продольных волн. ФТПРПИ, № 3, 2004.

3. *Иньков В.Н.* Разработка метода оценки микротрещиноватости горных пород с использованием мощных лазерных ультразвуковых источников. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. МГГУ, 2006 г. ГИАБ

Коротко об авторе

Коваленко С.А. – аспирант кафедры ФТКП Московский государственный горный университет.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник.*