© С.О. Вдовин, А.Н. Жаринов, А.А. Карабутов, П.Ю. Лысенко, Е.Б. Черепецкая, 2013

УДК 622.611:620.179.16

С.О. Вдовин, А.Н. Жаринов, А.А. Карабутов, П.Ю. Лысенко, Е.Б. Черепецкая

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОПТИКОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭХОСКОПИИ*

Приведены блок-схема и описан принцип работы созданного лазерно-ультразвукового структруроскопа «ГЕОСКАН-02МУ», работающего в режиме эхоскопии. Даны его технические характеристики. Проведены предварительные эксперименты по изучению структуры и свойств геоматериалов.

Ключевые слова: анизотропия горных пород, оптикоакустической эхоскопии, поврежденность геоматериалов.

Анизотропия горных пород является одним из важнейших физико-механических свойств геоматериалов, связанных с их нарушенностью, возникающей, например, при проходке различного типа выработок. Наиболее полную информацию о поврежденности образцов горных пород, на сегодняшний день, дают ультразвуковые (УЗ) методы. В качестве одного из приоритетных направлений развития данных методов исследования геологических объектов всегда рассматривалось расширение частотного диапазона и увеличение амплитуды возбуждаемых сигналов упругих волн. Часто возникает необходимость оценки структуры и свойств горных пород на образцах с размерами от 10 см и крупномасштабной поврежденностью до 2-3 мм, когда не удается получить из склонного к дискованию керна сверхглубоких скважин образцы больших размеров [1, 2]. Для данных целей удобно использовать лазерные источники ультразвука, позволяющие возбуждать короткие мощные импульсы, что обеспечивает высокие абсолютную чувствительность, лучевую и фронтальную разрешающую способность и отсутствие мертвой зоны [3, 4]. При этом для исследования свойств геоматериалов возникает необходимость оценки масштабов зерен, трещин и других структурных элементов от нескольких сантиметров до 10 мкм.

Сказанное выше привело к необходимости разработки и созданию лазерно-ультразвукового структуроскопа «ГЕОСКАН-02МУ» с расширенным в область низких частот диапазоном и работающем в режиме эхоскопии.

В настоящей работе приводится описание принципа действия структуроскопа «ГЕОСКАН-02МУ», его метрологическиетехнические характеристики, а также предварительные экспериментальные результаты, полученные с его использованием, по исследованию структуры и свойств геоматериалов.

*Работа выполнена в рамках Государственного контракта №14.518.11.7044 от 20 июля 2012 г. и гранта РФФИ № 11-05-00574-А

1. Описание экспериментальной установки

Лазерно-ультразвуковой структуроскоп «ГЕОСКАН-02МУ» предназначен для измерений скорости продольных ультразвуковых волн в образцах геоматериалов и различных конструкционных материалов (металлов, сплавов, керамик, пластмасс, композитных материалов) при одностороннем доступе к объекту контроля в режиме эхоскопии.

Принцип работы прибора основан на лазерном термооптическом возбуждении наносекундных ультразвуковых импульсов продольных акустических волн в специальном широкополосном оптико-акустическом преобразователе и измерении скорости распространения этих импульсов в исследуемом образце геоматериала при одностороннем доступе преобразователя к образцу. По известной толщине образца и измеряемой разности времен прихода на пьезоприемник преобразователя зондирующего ультразвукового импульса и сигнала, отраженного от тыльной поверхности образца, рассчитывается скорость продольных ультразвуковых волн в образце. Методика обработки сигналов основана на спектральном анализе и обратной фильтрации (деконволюции) ультразвукового сигнала, прошедшего в образец и отраженного от его тыльной поверхности, с зондирующим (опорным) сигналом оптико-акустического преобразователя.

Блок-схема лазерно-ультразвукового дефектоскопа представлена на рис. 1. В оптоэлектронный блок 1 входят импульсный Nd:YAG-лазер LCM-DTL-324QT с диодной накачкой, модуляцией добротности, адаптером оптического волокна SMA205 с частотой повторения импульсов не менее 0,01 кГц. Данный лазер служит для термооптического возбуждения широкополосных ультразвуковых сигналов. В блок *1* входит также аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Широкополосный оптико-акустический преобразователь *3* предназначен для ультразвукового облучения контролируемого образца и пьезоэлектрической регистрации рассеянных акустических сигналов. С помощью оптоволоконного кабеля *2* лазерное излучение доставляется в оптико-акустический преобразователь. Информационно-измерительный комплекс *4* включает в себя систему цифровой записи и накопления информации на базе персонального компьютера *5*. Комплекс *4* предназначен для организации автоматизированного сбора, математической обработки сигналов и отображения результатов измерений на мониторе компьютера *5*. Соединительный кабель *6* используется для связи аналого-цифрового преобразователя оптико-электронного блока с информационно-измерительным комплексом.

В широкополосном оптико-акустическом преобразователе (рис. 2) лазерный импульс падает через прозрачную призму под углом на лицевую поверхность специального оптико-акустического источника (ОАИ), представляющего собой плоскопараллельную пластину из поглощающего свет пластика. Прозрачная призма находится в акустическом контакте с ОАИ и является одновременно звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника.

Односторонний доступ к исследуемому образцу обеспечивается при ручном прижиме преобразователя к лицевой поверхности образца через тонкий слой дистиллированной воды или другой жидкости. При поглощении лазерного импульса в приповерхностном слое ОАИ происходит термооптическое

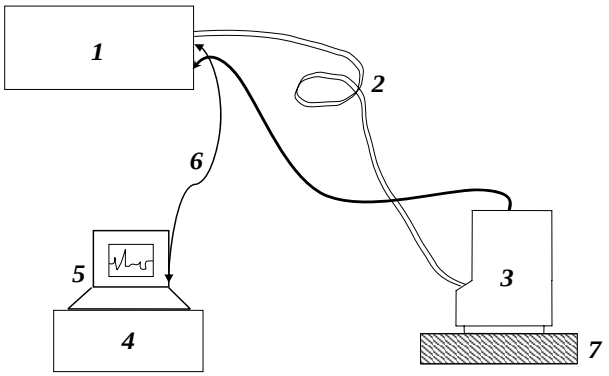


Рис. 1. Блок-схема лазерно-ультразвукового структуроскопа, модель «ГЕОСКАН-02МУ»: 1 – оптоэлектронный блок; 2 – оптоволоконный кабель; 3 – широкополосный оптико-акустический преобразователь; 4 – информационно-измерительный комплекс; 5 – компьютер; 6 – соединительный кабель связи портов USB 2.0; 7 – исследуемый образец

возбуждение ультразвукового импульса продольных акустических волн известной временной формы, определяемой коэффициентом поглощения света в ОАИ и граничными условиями возбуждения. Этот ультразвуковой импульс распространяется как в ОАИ (а затем в образец), так и в прозрачную призму-звукопровод (рис. 2, *а*).

Импульс *1*, возбуждаемый в приповерхностном слое ОАИ, прошедший звукопровод и зарегистрированный пьезоприемником, является зондирующим или опорным в данном преобразователе. Такой же ультразвуковой импульс *2*, изображенный на рисунке 2, а белым цветом, проходит в ОАИ и частично отражается на границе раздела ОАИ и лицевой (облучаемой) поверхности образца из-за рассогласования их акустических импедансов. Этот отраженный импульс *2* проходит в звукопровод с временной задержкой относительно импульса *1*, равной времени двойного пробега импульса *1* по толщине пластины ОАИ. Оставшаяся «часть» зондирующего импульса проходит в образец и отражается от его тыльной поверхности. Сигнал *3* зондирующего импульса проходит в образец и отражается от его тыльной поверхности, попадает в призму-звукопровод и тоже регистрируется пьезоприемником с некоторой временной задержкой относительно прихода сигнала *2*.

Скорость продольных ультразвуковых волн в исследуемом образце V определяется по разности времен прихода на пьезоприемник минимума ультразвукового импульса *3*, отраженного от тыльной поверхности образца, и экстремума импульса *2*, отраженного от границы раздела ОАИ – образец (максимума - в случае, когда акустический импеданс исследуемой среды больше импеданса ОАИ

$Z_{ОАИ} = (3.1 \pm 0.1) * 10^6\ кг/м^2 с$, и минимума – в противоположном случае).

Снятие метрологических характеристик описанной установки проводилось следующим образом. С помощью калориметра измерялась энергия импульса лазера, которая варьировалась набором светофильтров. Длительность светового импульса бралась из паспорта лазера LCM-DTL-324QT. Для снятия передаточной функции оптико-акустического преобразователя в режиме приема в качестве генераторной среды тушь с жесткой границей в виде оптически прозрачного на длине волны 1,06 мкм кристалла кварца. Временной профиль возбуждаемого оптико-акустического в туши сигнала имеет

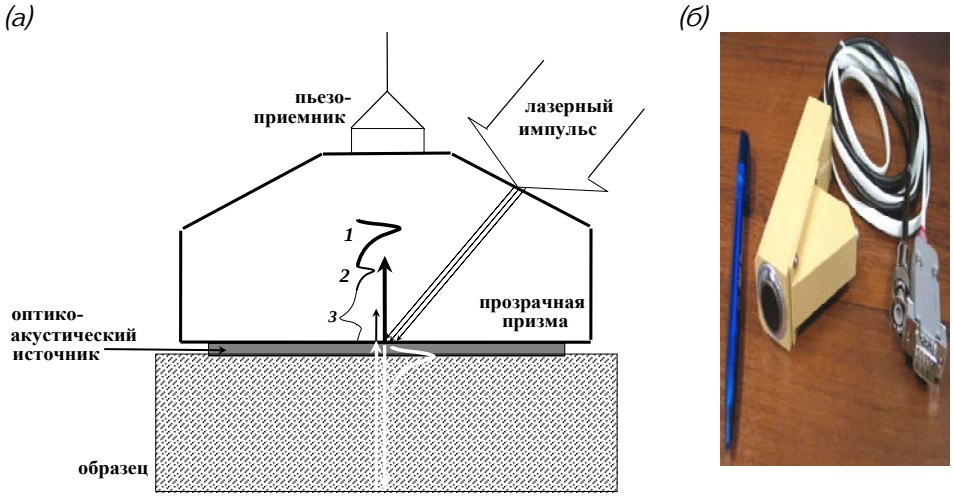


Рис. 2. Принцип работы (а) и внешний вид (б) широкополосногооптико-акустического преобразователя

универсальный вид. Его передний фронт есть экспонента, показатель которой равен произведению коэффициента поглощения света на скорость распространения продольных волн в туши. По измеренному коэффициенту поглощения света, энергии в оптическом импульсе и длительности лазерного импульса были рассчитаны амплитуды каждой гармоники и измерен частотный отклик оптико-акустического преобразователя. Полученная спектральная чувствительность оптико-акустического приемника приведена на рис. 3.

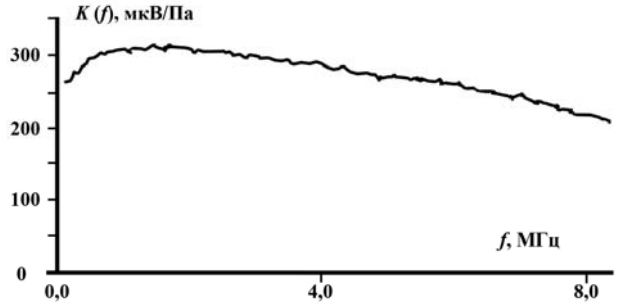


Рис. 3. Спектральная чувствительность оптико-акустического преобразователя

Динамический диапазон измерительного тракта составил 60 дБ. Основные технические характеристики установки «ГЕОСКАН-02МУ» приведены в табл. 1.

2. Предварительные экспериментальные результаты.

Исследовались образцы серпентинитов, отобранные из массивов, расположенных вдоль Главного Уральского Разлома: благородный светло-зеленый просвечивающий серпентинит (офиокальцит), сложенный крупно-равномерно-зернистыми выделениями карбонатов в тонко-зернистой серпентиновой основной массе (образец 1) и желтый благородный серпентин из магнезиальных скарнов с прожилками хризотил-асбеста в мелкозернистой спутанно-волокнистой основной массе (образец 2). Образцы были вырезаны в форме параллелепипеда. В работе с использованием установки

Таблица 1

Показатель	Значение
Способ измерения	ультразвуковой импульсный контактный
Рабочая полоса частот	0,05-5 МГц
Толщина объектов контроля	5 -150 мм
Диапазон измеряемых значений скорости ультразвука	$(0.2\text{-}20)\cdot 10^3$ м/с
Пределы относительной погрешности дефектоскопа измерения скорости ультразвука, %	(-3;3)
Диаметр ультразвукового пучка	8 - 10 мм
Частота повторения импульсов, кГц	Не менее 0,01 кГц
Производительность	Не менее 5 измерений в сек.
Рабочий диапазон температур, градусов С	+15 ... +35
Относительная влажность	50% ...80%
Электропитание	~220В; 50 Гц
Энергопотребление, Вт	Не более 250

Таблица 2

Направление	Толщина, мм	Задержка, мкс	Скорость продольных волн, м/с
OX	26.92	15.70	3.42
OY	25.58	14.53	3.52
OZ	32.49	11.45	5.68

«ГЕОСКАН-02МУ» регистрировались отраженные от тыльной поверхности образца эхо-сигналы, по временной задержке между ними определялась скорость распространения ультразвуковых волн в образце. Сравнение амплитуд первого и второго донных сигналов позволяло оценить коэффициент затухания. Результаты измерений для образца 2 приведены в табл. 2.

Измеренные в трех взаимно перпендикулярных направлениях значения скоростей показывают, что данный образец можно отнести к ортотропным средам. Точность измерения скоростей составляла 1%. Исследовалось влияние одноосного сжатияна информативные параметры оптико-акустических импульсов. Образец 2 механически сжимался вдоль направления *OY*. При этом измерялась скорость распространения ультразвуковых волн вдоль направления *OZ*. Оказалось, что изменение скорости распространения продольных волн лежит в пределах погрешности. Изменение внутренней структуры проявляется в увеличении вдоль OZ длительности донного сигнала с 80 нс до 140 нс и уменьшении амплитуды донного сигнала. Увеличение длительности сигнала привело к существенному уменьшению амплитуд высокочастотных гармоник, что свидетельствовало о появлении дополнительных микродефектов с характерными размерами порядка 60 мкм, которые при этом не влияли на скорость распространения упругих волн.

Таким образом, использование установки «ГЕОСКАН-02МУ» позволит проводить детальное исследование структуры и свойств геоматериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bezacier, L., Reynard, B., Bass, J.D.*, Sanchez-Valle, C. & Van de Moortule, B.* Elasticity of antigorite and seismic anisotropy of subduction zone IMA-2010.

2. *Cherepetskaya E.B., In'kov V.N., Shkuratnik V.L.* Laser Ultrasonic Spectroscopy for Geological Tasting, Forum Acusticum, 2005, Budapest, p. 2789-2794.

3. *Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л.* Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. М.: «Горная книга», 2008. 198 с.

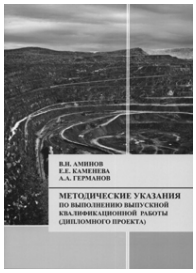
4. *Карабутов А.А., П.Ю. Лысенко, Панасьян Л.Л., Подымова Н.Б., Черепецкая Е.Б., Афанасьев Л.В., Пашкин А.И.* Исследование анизотропии серпентинов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии. ГИАБ, 2013, №3, с.232-236. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вдовин Станислав Олегович – аспирант,
Лысенко Павел Юрьевич – аспирант,
Черепецкая Елена Борисовна – профессор,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru

Карабутов Александр Алексеевич – профессор,
Жаринов Алексей Николаевич – старший инженер,
Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, enter@ilc.edu.ru

ГОРНАЯ КНИГА



Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы (дипломного проекта), направление подготовки 130400 «Горное дело», квалификация «Специалист», специализация «Открытые горные работы»

В.Н. Аминов, Е.Е. Каменева, А.А. Германов
2012 г.
28 с.
ISBN: 978-5-98672-337-2
UDK: 622.271

Методические указания по дипломному проектированию составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного стандарта высшего профессионального образования.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 130400 «Горное дело», квалификация «Специалист», утвержденного Приказом Министерства образования и науки РФ от 24.01.2011 г. № 89.