ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(4):35-47
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.33+620.179.16 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_35

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СДВИГОВЫХ ВОЛН И ЕГО АПРОБАЦИЯ НА ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ И ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

П.Н. Иванов

Горный институт, НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: pavelnivanov@mail.ru

Аннотация: Представлены теоретические и экспериментальные данные по усовершенствованию современных методов лазерно-ультразвуковой диагностики в части регистрации сдвиговых упругих волн в геоматериалах. На основе численных расчетов и компьютерного моделирования был спроектирован и разработан макет широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн (макет ПЛУ-СВ-01). Исследования показали сходимость результатов измерений сдвиговых упругих волн на изотропных модельных образцах из стекла и нержавеющей стали, сгенерированных с помощью классического эхо-режима лазерно-ультразвуковой диагностики и макета ПЛУ-СВ-01. Разница результатов этих измерений составила менее 1%, что находится в пределах погрешности определения скоростей сдвиговых упругих волн. При исследовании горных пород, на примере образцов мрамора, были выявлены недостатки классического эхо-режима лазерно-ультразвуковой диагностики. Во-первых, при работе с маленькими по размерам образцами (до 2 мм) возникает проблема в выделении в акустическом треке импульса сдвиговой волны из-за его наложения на импульсы первого и второго отражения продольной волны. Во-вторых, из-за конструкционных особенностей классического преобразователя, приводящих к возникновению паразитных сигналов, один из полезных сигналов может быть расположен вблизи них, что влияет на качество его регистрации. Разработанный макет ПЛУ-СВ-01 устраняет описанные эти недостатки. Также в работе описаны ограничения рабочей области регистрации сдвиговой волны разработанного макета, предложены рекомендации по их устранению для будущих исследований в данном направлении. Полученные результаты показывают перспективность комплексного использования классических методов ЛУД и разработанного широкополосного преобразователя сдвиговых упругих волн при исследовании гетерогенных материалов.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковая диагностика, временная форма сигнала, оптическое стекло, широкополосный преобразователь сдвиговых волн, эхо-режим, компьютерное моделирование, мрамор.

Для цитирования: *Иванов П. Н.* Разработка широкополосного лазерно-ультразвукового преобразователя сдвиговых волн и его апробация на изотропных материалах и образцах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 35–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_35.

© П.Н. Иванов. 2023.

Wideband laser-ultrasound transducer for shear waves: Design and tests on isotropic materials and rock samples

P.N. Ivanov

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: pavelnivanov@mail.ru

Abstract: The article describes the theory and experimentation on improvement of modern laser-ultrasound diagnostics in recording of elastic shear waves in geomaterials. The numerical computation and computer-aided modeling resulted in design and manufacture of a model wideband laser-ultrasound transducer for shear waves (model PLU-SV-01). The studies proved the within-run precision of elastic shear wave measurements in isotropic model samples made of glass and stainless steel using the classical echo-regime laser-ultrasound diagnostics and model PLU-SV-01. The measurement difference is less than 1%, which is within the error of the elastic shear wave measurements. The tests of rocks represented by marble samples revealed some shortages of the classical echo-regime laser-ultrasound diagnostics. First, in case of small-size samples (to 2 mm), it is problematic to distinguish a shear wave impulse in the acoustic track because of superposition of the shear wave impulse and the impulses of the first and second reflections of the compressional wave. Second, due to design features of the classical transducer, a useful signal may appear nearby unwanted signals, which affects the recording quality. Model PLU-SV-01 has no these defaults. The article also describes limitations of the recording work area of the designed model and puts forward some recommendations to remove these limitations in the further research. The research findings prove the promising nature of integrated application of the classical laser-ultrasound diagnostics and the new wideband transducer for elastic shear waves in the studies of heterogeneous materials.

Key words: laser-ultrasound diagnostics, time waveform, optical glass, wideband transducer for shear waves, echo regime, computer-aided modeling, marble.

For citation: Ivanov P. N. Wideband laser-ultrasound transducer for shear waves: Design and tests on isotropic materials and rock samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(4):35-47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_35.

Введение

Ключевыми параметрами контроля и мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород являются деформационные характеристики [1, 2], значения которых используются практически во всех расчетных моделях при проведении компьютерного моделирования. При выполнении расчетов необходимо учитывать, что вследствие неоднородности структуры горные породы обладают в той или иной степени анизотропией упругих свойств [3].

Следует отметить, что хаотическая ориентация минералов, составляющих образцы горных пород, и действующее в массиве НДС приводят к тому, что значительная часть пород может рассматриваться как трансверсально-изотропная среда [4], для которой необходимо использовать по крайней мере пять упругих модулей. Более того, для оценки влияния процессов деформирования, возникающих при воздействии различными физическими полями на геоструктуру и приводящих к накоплению дефектов, появлению микро- и макротре-

щин, также необходимо знать все элементы матрицы жесткости [5].

Одним из широко применяемых методов определения динамических модулей упругости и исследования структуры образцов является ультразвуковой [6—8]. Использование нескольких типов акустических волн (например, продольных, сдвиговых, поверхностных), распространяющихся в различных направлениях, позволяет по измеренным скоростям акустических волн [9—11] восстанавливать полный набор динамических модулей упругости, а также исследовать структурные особенности [12—15]. В работе [16] были экспериментально подтверждены теоретические соотношения между объемной плотностью трещин и скоростью сдвиговых волн. В эксперименте [17] была найдена зависимость дисперсии скорости продольных волн от толщины слоев в слоистой среде. В работе [18] авторы показали возможность использования отношений продольных волн к сдвиговым для идентификации жидкости, находящейся в порах, по вариациям ее вязкости.

В анизотропной трещиноватой среде влияние частоты зондирующих импульсов на скорость распространения упругих волн определяется размерами неоднородностей. Так, в работе [19] использовались источники сдвиговых волн на трех различных частотах зондирующих импульсов (90, 431, 840 кГц) при исследовании модельной анизотропной среды. Было показано, что затухание, обусловленное как упругим, так и неупругим рассеянием волн, дисперсия скорости сдвиговой волны и размеры трещин связаны между собой. Получено, что увеличение затухания и уменьшение анизотропии скорости сдвиговых волн наблюдается с увеличением частоты.

Однако использование ультразвуковых преобразователей сдвиговых волн на пьезоэлементах дает значительную погрешность при определении скоростей распространения волн данного типа и делает невозможным даже для изотропных сред расчет коэффициента Пуассона с точностью выше 15—20%. Более того, применение резонансных преобразователей для эффективного возбуждения сдвиговых волн с достаточно узкой полосой частот не позволяет учесть дисперсию фазовой скорости, возникающей за счет дифракции и затухания, и оставляет открытым вопрос, какую скорость определили — фазовую или групповую, и как по данным скоростям рассчитывать динамические модули упругости. В связи с этим возникает необходимость в разработке широкополосного преобразователя сдвиговых волн.

Теоретическое обоснование и методы

При лазерном возбуждении ультразвука эффективность генерации продольных волн значительно выше, чем поперечных, вследствие малости сдвиговых деформаций [20]. Известно, что при падении продольных волн на границу раздела двух твердых тел происходит отражение и преломление, а также трансформация части их энергии в сдвиговую волну. Важной особенностью является то, что при определенном угле падения на свободную границу раздела с изотропным твердым телом продольная волна полностью трансформируется в сдвиговую. Найдем, при каких условиях происходит такая конверсия.

Пусть перпендикулярно к передней грани призмы, выполненной из материала с малым значением коэффициента затухания ультразвука в широком диапазоне частот, падает продольная волна $L_1^{\Gamma\rightarrow}$. Поскольку наклонная поверхность призмы граничит с воздухом (является акустически свободной), то вся энергия падающей волны отражается в материал призмы. В классическом случае в от-

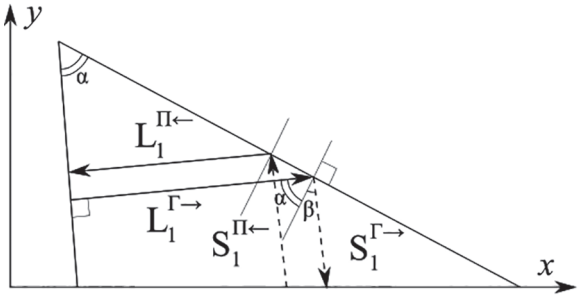

Рис. 1. Рассматриваемая геометрия задачи отражения продольной волны на границе «изотропное твердое тело — воздух»

Fig. 1. Considered geometry of the problem of reflection of a longitudinal wave at boundary «isotropic solid — air»

раженном сигнале возникает две волны: продольная и вертикально поляризованная сдвиговая. Далее по тексту и в рисунках приняты следующие обозначения: «$L_1^{Г\rightarrow}$» — продольная волна, распространяющаяся от генератора; «$L_1^{П\leftarrow}$» — продольная волна, распространяющаяся к приемнику; «$S_1^{Г\rightarrow}$» — сдвиговая волна, распространяющаяся от генератора; «$S_1^{П\leftarrow}$» — сдвиговая волна, распространяющаяся к приемнику; *1* — волна, распространяющаяся в среде призмы; *2* — волна, распространяющаяся в среде образца.

Пусть угол падения и отражения продольной волны α (совпадает с одним из углов призмы, рис. 1), угол отражения сдвиговой волны β. При данных условиях в соответствии с [21] получим, что коэффициенты отражения продольной волны R_{LL} и коэффициент трансформации продольной в вертикально поляризованную сдвиговую волну R_{LS} примут следующий вид:

$$R_{LL} = \frac{ab - p^2}{ab + p^2}, \quad (1)$$

$$R_{LS} = \frac{2ap}{ab + p^2}, \quad (2)$$

где

$$a = \frac{\cos\alpha}{V_L}; b = \frac{\cos\beta}{V_S};$$

$$p^2 = \left(\sin^2\beta - \frac{1}{2}\right)^2 V_S^{-2}\sin^{-2}\beta;$$

V_L — скорость продольных волн; V_S — скорость сдвиговых волн.

Из выражения (1) видно, что если выполняется условие $ab = p^2$, то в отраженном от свободной границы сигнале исчезает продольная волна $L_1^{Г\rightarrow}$ (R_{LL} = = 0). Записав данное выражение через угол падения, получим:

$$\sqrt{\frac{V_L^2}{V_S^2} - \sin^2\alpha} = \left(\sin^2\alpha - \frac{V_L^2}{2V_S^2}\right)^2. \quad (3)$$

Следует отметить, что в выражении (3) фигурирует отношение скоростей V_L/V_S, которое определяется только коэффициентом Пуассона μ:

$$\frac{V_L}{V_S} = \sqrt{2\frac{1-\mu}{1-2\mu}}. \quad (4)$$

Расчет с использованием (3) и (4) показал, что при отражении наибольшая часть энергии продольной волны $L_1^{Г\rightarrow}$ преобразуется в сдвиговую $S_1^{Г\rightarrow}$, если $\mu \leqslant 0{,}26$.

Таким образом, при проектировании призмы, в которой осуществлялась бы полная трансформация энергии продольной волны в сдвиговую, необходимо:

- подобрать материал призмы с коэффициентом Пуассона $\mu \leqslant 0{,}26$, значение которого можно рассчитать по прецизионно измеренным значениям скоростей продольных и сдвиговых волн в соответствии с выражениями (3) и (4);

• для выбранного материала с $\mu \leqslant \leqslant 0{,}26$ выполнить численную оценку угла падения (одного из углов призмы) α плоской монохроматической продольной волны на свободную границу (см. рис. 1), при котором в отраженном сигнале наблюдается полная конверсия ее энергии в сдвиговую. Также нужно оценить угол отражения β сдвиговой вертикально поляризованной волны, что можно сделать на основании закона Снелла:

$$\frac{\sin\alpha}{V_L} = \frac{\sin\beta}{V_S}. \qquad (5)$$

С учетом (5) уравнение (3) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\sqrt{\frac{V_S^2}{V_L^2} - \sin^2\beta \times \tan^2(2\beta)} = \cos\beta. \qquad (6)$$

Выражения (3), (5), (6), получены при условии, что на свободную границу призмы падает плоская монохроматическая продольная волна. Однако в нашем случае на границу раздела падает широкополосный ультразвуковой сигнал с ограниченной апертурой, в котором присутствуют лучи с углом падения, незначительно отличающимся от угла α. Поэтому при численной оценке необходимо было подобрать значения углов α и β, при которых наибольшая часть энергии продольной волны преобразуется в сдвиговую для широкополосных пучков продольных волн с ограниченной апертурой.

Для решения этой задачи были измерены скорости упругих ультразвуковых волн, распространяющихся в оптическом стекле как в потенциальном материале для призмы. Использовался эхорежим лазерно-ультразвуковой диагностики (ЛУД), который дает возможность измерения скоростей продольных и сдвиговых волн с точностью не ниже 0,2%. Скорости прохождения упругих волн двух типов были измерены в 7 образцах стекла различной толщины. Отклонение параллельности граней составляло менее 0,02 мм при диапазоне толщин 3,98—6,98 мм. Значения скоростей продольных и сдвиговых волн оказались равными V_L = 5848±47 м/с и V_s = 3355±28 м/с соответственно, коэффициент Пуассона составил μ = 0,26 ±0,01.

Уравнения (3) и (6) должны иметь два решения для угла призмы α и угла отражения β сдвиговой волны. Численное решение (3) и (6) дало следующие пары значений углов: α_1 = 61,74°, β_1 = 30,35° и α_2 = 75,65°, β_2 = 33,76°.

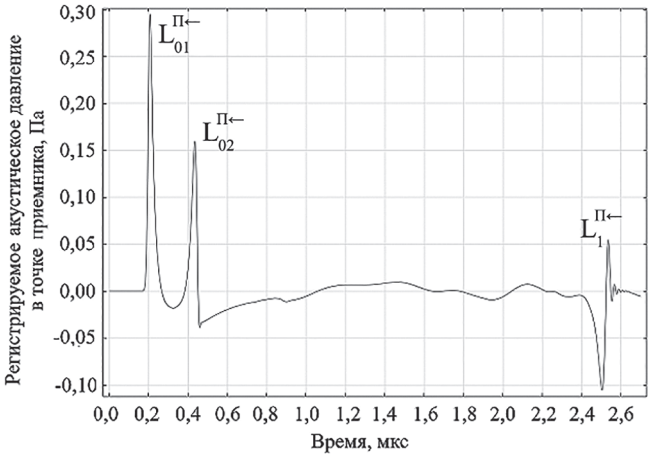

Рис. 2. Полученный при моделировании временной профиль сигнала
Fig. 2. The time profile of the signal obtained by modeling

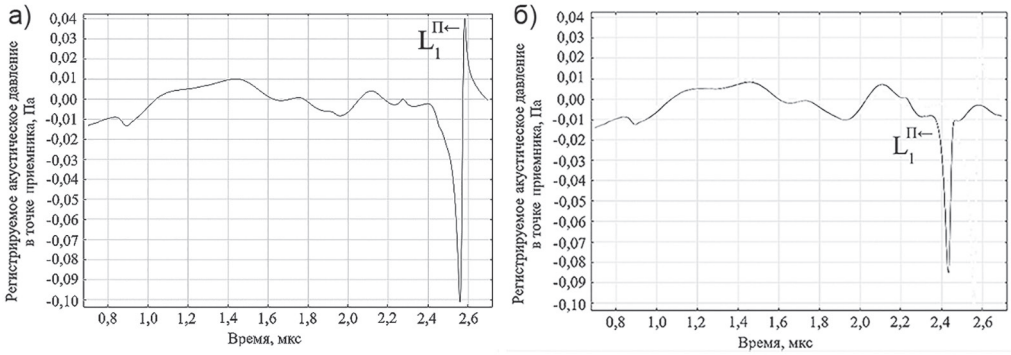

Рис. 3. Импульсы сдвиговой волны для различных углов призмы: α_1 = 61,74°, β_1 = 30,35° (а); α_2 = 75,65°, β_2 = 33,76° (б)

Fig. 3. Shear wave impulses for different angels of prism: α_1 = 61,74°, β_1 = 30,35° (a); α_2 = 75,65°, β_2 = 33,76° (b)

Для определения комбинации углов падения и отражения, при которых наибольшая часть энергии продольной волны с ограниченной апертурой преобразуется в сдвиговую, было проведено компьютерное моделирование с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics в модуле Acoustic Solid Interaction Transient.

На рис. 2 представлен полученный для угла призмы α_1 = 61,74° и угла отражения сдвиговой волны β_1 = 30,35° временной профиль модельного сигнала. На рисунке обозначены зондирующий $L_{01}^{П\leftarrow}$ и опорный $L_{02}^{П\leftarrow}$ импульсы, а также импульс сдвиговой волны, который регистрируется приемником как импульс продольной волны $L_1^{П\leftarrow}$ (в соответствии с рис. 1), амплитуда которой достигает 0,102 Па, а характерная длительность порядка 80 нс, что примерно соответствует частотному диапазону 50 кГц — 30 МГц.

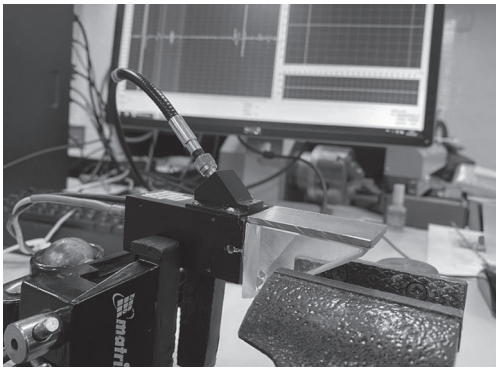

Рис. 4. Макет преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01

Fig. 4. Layout of the shear wave converter PLU-SV-01

Компьютерное моделирование было также проведено для второго набора углов α_2 = 75,65°, β_2 = 33,76°, чтобы определить, при каких значениях α и β амплитуда сдвиговой волны максимальна. На рис. 3 приведены результаты сравнения двух комбинаций углов, из которых видно, что бóльшая амплитуда достигается при α_1, β_1 и уровень помех сигнала при использовании данной комбинации в целом ниже.

В результате численных оценок и компьютерного моделирования были выбраны параметры призмы (оптическое стекло с коэффициентом Пуассона μ = = 0,26, угол призмы α_1 = 61,74°, что соответствовало углу отражения сдвиговых волн β_1 = 30,35°). Согласно разработанной схеме измерения на свободной границе призмы устанавливается исследуемый образец. Акустический контакт между классическим оптико-акустическим преобразователем и призмой обеспечивается водой, а между образцом и призмой — специальной акустической склейкой.

Таким образом, был изготовлен макет преобразователя ПЛУ-СВ-01, внешний вид которого приведен на рис. 4.

Результаты и обсуждение

Для верификации результатов измерений, выполненных с помощью разработанного макета ПЛУ-СВ-01, были определены скорости распространения сдвиговых волн в образцах из оптического стекла и нержавеющей стали и сравнены с результатами, получаемыми при использовании стандартного оптико-акустического преобразователя ПЛУ-6П-02.

В табл. 1 приведены результаты измерения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классического эхо-режима (с использованием преобразователя ПЛУ-6П-02) и с помощью разработанного макета ПЛУ-СВ-01. Из результатов видно, что значения скоростей сдвиговых волн, измеренных с помощью макета ПЛУ-СВ-01, близки к скоростям, измеренным в эхо-режиме ЛУД. Разница скоростей для образцов стекла составляет от 0,53 до 0,97%.

При измерении скоростей распространения сдвиговых волн в образцах нержавеющей стали также выявлена близость в значениях измеренных скоростей. Разница варьировалась от 0,6 до 1,47%.

На рис. 5 приведена типичная волновая форма сигнала, который регистрируется при использовании макета преоб-

Таблица 1

Результаты измерения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классического эхо-режима и с помощью разработанного макета ПЛУ-СВ
Results of measuring the propagation velocities of shear elastic waves using the classical echo mode and using the developed PLU-SV layout

№	Толщина образца*, мм	V_L, м/с	V_{S1}, м/с ПЛУ-6П-02	V_{S2}, м/с ПЛУ-СВ-01	$\lvert V_{S1} - V_{S2}\rvert$, м/с	$\left\lvert \frac{V_{S1} - V_{S2}}{V_{S2}} \right\rvert$, %
Оптическое стекло						
1	6,98	5817	3365	3397	32	0,93
2	5,20	5853	3351	3384	33	0,97
3	5,70	5878	3375	3393	18	0,53
4	4,96	5885	3350	3415	29	0,85
5	4,65	5860	3350	3412	32	0,95
6	3,98	5894	3360	3420	28	0,83
7	6,34	5836	3373	3402	26	0,77
Нержавеющая сталь						
1	2,98	5817	3069	3101	32	1,03
2	2,98	5772	2984	3002	18	0,60
3	2,98	5817	2996	3041	45	1,47
4	2,98	5793	3005	3038	33	1,08
5	2,98	5795	3009	3046	37	1,21
6	2,98	5823	3047	3089	42	1,35
7	2,98	5789	2998	3021	23	0,76

* Измерения производились с точностью ±0,02 мм.

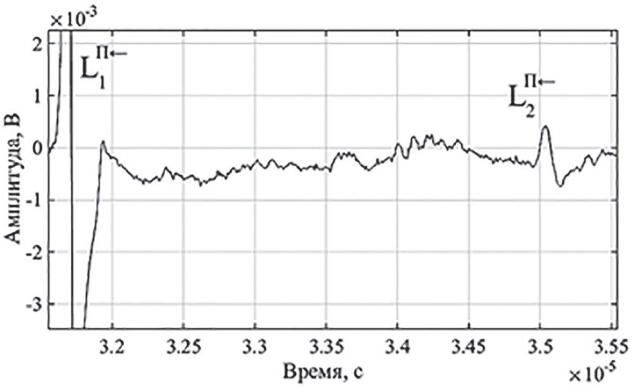

Рис. 5. Типичная волновая форма сигнала, который регистрируется при использовании макета преобразователя сдвиговых волн

Fig. 5. Typical waveform of a signal that is recorded using a shear wave converter layout

разователя сдвиговых волн. На временной форме импульс от примыкающей к образцу грани изготовленной призмы является искомым сигналом сдвиговой волны, регистрируемой приемником как продольная. Следует отметить, что в случае использования эхо-режима ЛУД скорость сдвиговой волны пересчитывается, исходя из временных задержек первого и второго донного отражения. При использовании разработанного макета ПЛУ-СВ-01 скорость сдвиговой волны считается по максимуму ее импульса. За зондирующий импульс будет считаться импульс $L_1^{П\leftarrow}$ (см. рис. 5).

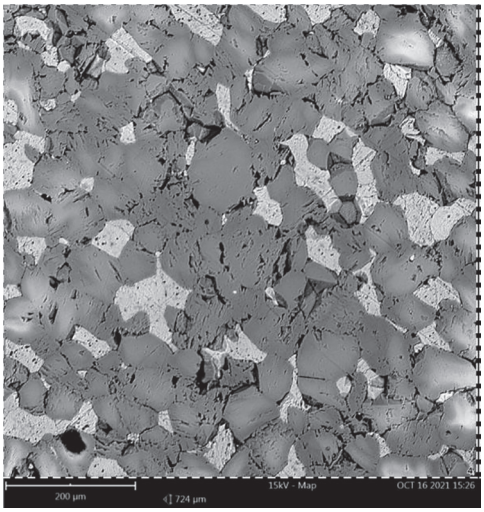

Рис. 6. Характерная поверхностная текстура образцов мрамора

Fig. 6. Characteristic surface texture of marble samples

Следующим этапом являлось определение скоростей распространения сдвиговых волн в горных породах. Для этого были выбраны образцы мрамора месторождения Volakas (Греция) толщиной от 1,50 до 6,30 мм.

С помощью растровой электронной микроскопии выявлено, что основная поверхность образцов мрамора представлена однородным массивом карбонатов кальция и магния с преимущественно гранобластовой и классической мраморовидной поверхностной текстурой (рис. 6). Форма зерен в большей степени изометричная. Размеры зерен варьируются от 50 до 200 мкм.

В табл. 2 представлены результаты измерения скоростей сдвиговых волн в исследованных образцах мрамора.

Можно заметить, что у части образцов не удалось зафиксировать скорость сдвиговой волны в эхо-режиме. При исследовании с помощью классических методов ЛУД довольно часто встречаются следующего рода проблемы:

- во-первых, в случае недостаточного количества геологического материа-

Таблица 2

Результаты измерения скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классического эхо-режима и с помощью разработанного макета ПЛУ-СВ-01
The results of measuring the propagation velocities of shear elastic waves using the classical echo mode and using the developed layout PLU-SV-01

№	Толщина образца*, мм	V_L, м/с	V_{S1}, м/с ПЛУ-6П-02	V_{S2}, м/с ПЛУ-СВ-01	$\lvert V_{S1} - V_{S2}\rvert$, м/с	$\left\lvert \frac{V_{S1} - V_{S2}}{V_{S2}} \right\rvert$, %
1	1,50	5111	не определена	2839	–	–
2	1,55	5124	не определена	2975	–	–
3	4,45	5174	2766	2884	118	4,10
4	4,10	5200	2817	2940	123	4,18
5	6,30	5147	2846	не определена		
6	5,35	4999	не определена	2831		
7	4,15	4917	2573	2790	217	7,78

* Измерения производились с точностью ±0,02 мм.

ла или его хрупкости приходится работать на довольно маленьких по размерам образцах. Тогда возникает проблема в выделении в акустическом треке импульса сдвиговой волны из-за его наложения на импульсы первого и второго отражения продольной волны (образец № 1, 2);

- во-вторых, из-за конструкционных особенностей классического преобра-

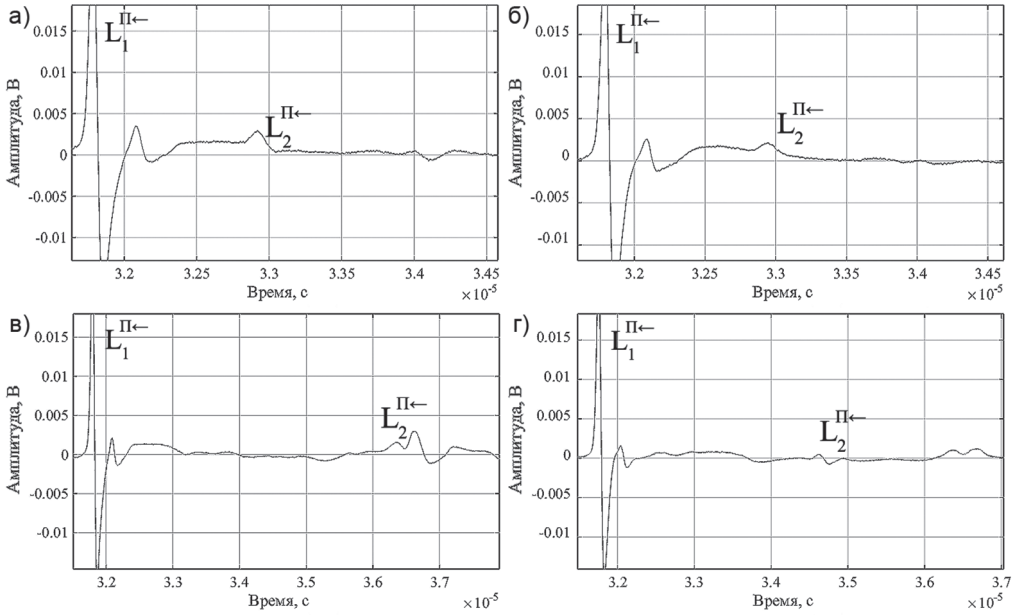

Рис. 7. Волновые формы сигналов, полученные при использовании макета ПЛУ-СВ-01: образец № 1 (а); образец № 2 (б); образец № 6 (в); образец № 7 (г)

Fig. 7. Waveforms of signals obtained using the layout PLU-SV-01: Sample no. 1 (a); Sample no. 2(b); Sample no. 6 (v); Sample no. 7 (g)

зователя, приводящих к возникновению паразитных сигналов, один из полезных сигналов может быть расположен вблизи них (образец № 6).

Для решения вышеперечисленных проблем скорости сдвиговых волн были повторно измерены с помощью макета ПЛУ-СВ-01. Как видно из результатов (рис. 7, *а*, *б*), на образцах № 1 и 2 удалось измерить скорость V_S. На временных формах сигналов достаточно отчетливо видны искомые импульсы. Аналогичные результаты (рис. 7, *в*, *г*) были получены по образцам № 6, 7. При этом на образце № 7 значение скорости V_S изменилось более чем на 7% по сравнению с результатом, полученным в эхо-режиме, и сравнимо с результатами на других образцах.

Из временных форм, полученных при использовании макета ПЛУ-СВ-01, видно, что присутствует так называемая рабочая область, которая ограничивается импульсами, регистрируемыми из-за возникающих в призме переотражений, вызывающих паразитные сигналы. Так, в образце № 5 толщиной 6,30 мм не удалось зафиксировать импульс сдвиговой волны, поскольку он располагается вблизи границы рабочей области, а именно вблизи паразитного сигнала.

Заключение

В работе рассмотрены теоретические предпосылки к созданию широкополосного источника сдвиговых волн, на основе которых изготовлен преобразователь.

Были получены следующие результаты.

1. На основе численных расчетов и компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics была спроектирована и изготовлена призма из оптического стекла, с помощью которой был разработан макет преобразователя сдвиговых волн ПЛУ-СВ-01.

2. Апробация работы макета на изотропных модельных образцах стекла и нержавеющей стали показала хорошую сходимость результатов измерений скоростей распространения сдвиговых упругих волн с помощью классического эхо-режима лазерно-ультразвуковой диагностики и макета ПЛУ-СВ-01. Разница измерений составила менее 1%.

3. Существующие проблемы классических измерений ЛУД, в частности, ограничение диапазона толщин при определении скоростей сдвиговых волн на тонких образцах (до 2 мм) и попадание полезных сигналов на паразитные импульсы, возникающие вследствие конструкционных особенностей классического преобразователя, частично решает разработанный макет ПЛУ-СВ-01, демонстрирующий сходимость результатов определения скоростей сдвиговых упругих волн в пределах погрешности.

4. У разработанного макета выявлены ограничения, заключающиеся в ограниченной рабочей области регистрации сдвиговой волны. При работе с макетом также возникают паразитные импульсы, возникающие вследствие переотражений в разработанной призме. Данный факт возможно учесть изготовлением набора съемных призм из оптического стекла, различных по геометрическим параметрам, для увеличения/уменьшения рабочей области в зависимости от исследования конкретного образца геоматериала.

Полученные результаты показывают перспективность комплексирования измерений с помощью классических методов ЛУД и разработанного широкополосного преобразователя сдвиговых упругих волн при исследовании гетерогенных материалов. Дальнейшие исследования будут направлены на усовершенствование макета, а также изучение на его основе динамических деформационных характеристик и их взаимосвязи со статическими параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осипов Ю. В.*, *Кошелев А. Е.* Современные способы определения деформационных свойств горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 11. — С. 68—75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

2. *Baryakh A., Toksarov V., Asanov V., Pankov I., Udartsev A.* Monitoring the stress-strain state of marginal saliferous rock mass // Procedia Engineering. 2017, vol. 191. pp. 925—934. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.263.

3. *Горбацевич Ф. Ф.* К проблеме оценки упругой анизотропии горных пород квазиортотропной симметрии // Физика Земли. — 2019. — № 6. — С. 130—139. DOI: 10.31857/S0002-333720196130-139.

4. *Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D.*, *Saar M. O.* On the direct measurement of the shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 113, pp. 220—240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.025.

5. *Bao Y., Jiang B.* Incompatible deformation model of rocks with defects around a thick-walled cylinder // Processes. 2021, vol. 9, no. 12, article 2215. DOI: 10.3390/pr9122215.

6. *Шибаев И. А.* Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 138—147. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138.

7. *Шибаев И. А.*, *Винников В. А.*, *Степанов Г. Д.* Определение упругих свойств осадочных горных пород на примере образцов известняка с помощью лазерной ультразвуковой диагностики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 125—134. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

8. *Винников В. А.*, *Захаров В. Н.*, *Малинникова О. Н.*, *Черепецкая Е. Б.* Исследование структуры и упругих свойств геоматериалов с помощью контактной широкополосной ультразвуковой структуроскопии // Горный журнал. — 2017. — № 4. — С. 29—32. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.05.

9. *Шибаев И. А.*, *Белов О. Д.*, *Сас И. Е.* Определение динамических и статических модулей упругости образцов гранитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 5—15. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_5.

10. *Hong Y.-D., Lin B.-Q., Zhu C.-J., Wang Z., Liu J.-Q., Saffari P., Nie W.* Image and ultrasonic analysis-based investigation of coal core fracturing by microwave energy // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020, vol. 127, article 104232. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104232.

11. *Dirgantara F.*, *Batzle M. L.*, *Curtis J. B.* Maturity characterization and ultrasonic velocities of coals / Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 81st Annual Meeting. 2011, pp. 2308—2312. DOI: 10.1190/1.3627668.

12. *Cherepetskaya E. B.*, *Sas I. E.*, *Makarov V. A.*, *Kravcov A. N.* Studying internal structure of quartz by broadband ultrasonic tomography under cyclic compression // Journal of Physics Conference Series. 2019, vol. 1172, no. 1, article 012100. DOI: 10.1088/1742-6596/1172/1/012100.

13. *Zarubin V., Bychkov A., Karabutov A., Simonova V., Cherepetskaya E.* A method of laser ultrasound tomography for solid surfaces mapping // MATEC Web of Conferences. 2018, vol. 145, article 05009. DOI: 10.1051/matecconf/201814505009.

14. *Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E.*, *Karabutov A. A.*, *Morozov D. V.*, *Shibaev I. A.* Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics // Key Engineering Materials. 2016, vol. 722, pp. 267—272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.267.

15. *Karabutov A. A.*, *Cherepetskaya E. B.*, *Bychkov A. S.*, *Morozov N. A.* Laser-ultrasound imaging for the investigation of heterogeneous media / Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis link is disabled. 2017, part F11, pp. 166—172. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9_19.

16. *Byun J. H.*, *Lee J. S.*, *Park K.*, *Yoon H. K.* Prediction of crack density in porous-cracked rocks from elastic wave velocities // Journal of Applied Geophysics. 2015, vol. 115, no. 2, pp. 110—119. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.020.

17. *Heng Zhang, Fanchang Zhang, Yawei Lu* Frequency-dependent energy attenuation and velocity dispersion in periodic layered media // Acta Geophysica. 2019, vol. 67, pp. 799—811. DOI: 10.1007/s11600-019-00294-2.

18. *Oloruntobi O., Butt S.* The shear-wave velocity prediction for sedimentary rocks // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020, vol. 76, article 103084. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103084.

19. *De Figueiredo J. S., Schleicher J., Stewart R. R., Dayur N., Omoboya B., Wiley R., William A.* Shear wave anisotropy from aligned inclusions: Ultrasonic frequency dependence of velocity and attenuation // Geophysical Journal International. 2013, vol. 193, pp. 475—488. DOI: 10.1093/gji/ggs130.

20. *Podymova N. B.*, *Karabutov A. A.* Conversion of thermooptically excited broadband pulses of longitudinal acoustic waves into pulses of shear waves in an isotropic solid plate in a liquid // Acoustical Physics. 2021, vol. 67, no. 5, pp. 465—473. DOI: 10.1134/S1063771021040114.

21. *Varatharajulu V.*, *Pao Y. H.* Scattering matrix for elastic waves. I. Theory // The Journal of the Acoustical Society of America. 1976, vol. 60, p. 556. ГИАБ

REFERENCES

1. Osipov Yu. V., Koshelev A. E. Modern methods for determining the deformation properties of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 11, pp. 68—75. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

2. Baryakh A., Toksarov V., Asanov V., Pankov I., Udartsev A. Monitoring the stress-strain state of marginal saliferous rock mass. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 191. pp. 925—934. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.263.

3. Gorbatsevich F. F. On the problem of estimating the elastic anisotropy of rocks of quasi-orthotropic symmetry. *Fizika Zemli*. 2019, no. 6, pp. 130—139. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002-333720196130-139.

4. Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D., Saar M. O. On the direct measurement of the shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 113, pp. 220—240. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.025.

5. Bao Y., Jiang B. Incompatible deformation model of rocks with defects around a thick-walled cylinder. *Processes*. 2021, vol. 9, no. 12, article 2215. DOI: 10.3390/pr9122215.

6. Shibaev I. A. Determination of the dynamic moduli of elasticity of rock samples using various methods of laser ultrasonic diagnostics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4-1, pp. 138—147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138.

7. Shibaev I. A., Vinnikov V. A., Stepanov G. D. Determining elastic properties of sedimentary strata in terms of limestone samples by laser ultrasonics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 125—134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-125-134.

8. Vinnikov V. A., Zakharov V. N., Malinnikova O. N., Cherepetskaya E. B. Investigation of the structure and elastic properties of geomaterials using contact broadband ultrasonic structuroscopy. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 4, pp. 29—32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.05.

9. Shibaev I. A., Belov O. D., Sas I. E. Determination of dynamic and static moduli of elasticity of granite samples. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4-1, pp. 5—15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_5.

10. Hong Y.-D., Lin B.-Q., Zhu C.-J., Wang Z., Liu J.-Q., Saffari P., Nie W. Image and ultrasonic analysis-based investigation of coal core fracturing by microwave energy. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2020, vol. 127, article 104232. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104232.

11. Dirgantara F., Batzle M. L., Curtis J. B. Maturity characterization and ultrasonic velocities of coals. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 81st Annual Meeting*. 2011, pp. 2308 — 2312. DOI: 10.1190/1.3627668.

12. Cherepetskaya E. B., Sas I. E., Makarov V. A., and Kravcov A. N. Studying internal structure of quartz by broadband ultrasonic tomography under cyclic compression. *Journal of Physics Conference Series*. 2019, vol. 1172, no. 1, article 012100. DOI: 10.1088/1742-6596/1172/1/012100.

13. Zarubin V., Bychkov A., Karabutov A., Simonova V., Cherepetskaya E. A method of laser ultrasound tomography for solid surfaces mapping. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 145, article 05009. DOI: 10.1051/matecconf/201814505009.

14. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E., Karabutov A. A., Morozov D. V., Shibaev I. A. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 722, pp. 267 — 272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.267.

15. Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B., Bychkov A. S., Morozov N. A. Laser-ultrasound imaging for the investigation of heterogeneous media. *Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis link is disabled*. 2017, part F11, pp. 166 — 172. DOI: 10.1007/978-981-10-3247-9_19.

16. Byun J. H., Lee J. S., Park K., Yoon H. K. Prediction of crack density in porous-cracked rocks from elastic wave velocities. *Journal of Applied Geophysics*. 2015, vol. 115, no. 2, pp. 110 — 119. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.020.

17. Heng Zhang, Fanchang Zhang, Yawei Lu Frequency-dependent energy attenuation and velocity dispersion in periodic layered media. *Acta Geophysica*. 2019, vol. 67, pp. 799 — 811. DOI: 10.1007/s11600-019-00294-2.

18. Oloruntobi O., Butt S. The shear-wave velocity prediction for sedimentary rocks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020, vol. 76, article 103084. DOI: 10.1016/j.jngse.2019.103084.

19. De Figueiredo J. S., Schleicher J., Stewart R. R., Dayur N., Omoboya B., Wiley R., William A. Shear wave anisotropy from aligned inclusions: Ultrasonic frequency dependence of velocity and attenuation. *Geophysical Journal International*. 2013, vol. 193, pp. 475 — 488. DOI: 10.1093/gji/ggs130.

20. Podymova N. B., Karabutov A. A. Conversion of thermooptically excited broadband pulses of longitudinal acoustic waves into pulses of shear waves in an isotropic solid plate in a liquid. *Acoustical Physics*. 2021, vol. 67, no. 5, pp. 465 — 473. DOI: 10.1134/S1063771021040114.

21. Varatharajulu V., Pao Y. H. Scattering matrix for elastic waves. I. Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1976, vol. 60, p. 556.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Иванов Павел Николаевич аспирант,
e-mail: pavelnivanov@mail.ru,
Горный институт, НИТУ «МИСиС».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

P.N. Ivanov, Graduate Student,
e-mail: pavelnivanov@mail.ru,
Mining Institute, National University of Science
and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 01.02.2023; получена после рецензии 01.03.2023; принята к печати 10.03.2023.
Received by the editors 01.02.2023; received after the review 01.03.2023; accepted for printing 10.03.2023.