

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита

О.В. Муравьева^{1,2}, А.В. Блинова¹, Л.А. Денисов¹, О.П. Богдан¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 18.07.2024

Принята к печати 05.09.2024

Терморасширенные графиты относятся к новому классу графитовых материалов, обладающих уникальными физико-химическими и механическими свойствами. Скорость акустических волн – одна из важнейших характеристик при исследованиях пористых материалов, в том числе, тонких пористых листов терморасширенного графита. В статье экспериментально исследованы особенности распространения симметричной моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в листах терморасширенного графита. Для определения скоростей использована дифференциальная схема измерений, реализованная на базе низкочастотного акустического дефектоскопа DIO1000 LF и специализированных пьезопреобразователей с сухим точечным контактом. Дополнительно определена скорость продольной волны в направлении толщины листа с использованием пьезопреобразователей на основе поливинилиденфторида. Построены индикатрисы скоростей нормальных волн в плоскости проката и показано, что максимальная акустическая анизотропия его свойств характерна для используемой S0 моды, при этом минимум скорости соответствует продольному направлению плоскости проката, в котором наблюдается максимальная вытянутость газовых пор. Исследовано влияние толщины и плотности листов терморасширенного графита на скорость нормальных волн и показано наличие области толщин, где наблюдается их минимальное значение вследствие максимальной неоднородности слоёв, формируемых в процессе прокатки. Предложена методика определения динамических упругих модулей пористых листов терморасширенного графита по данным экспериментально измеренных скоростей нормальных волн и показано, что в продольном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательное значение, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам.

Ключевые слова: листы терморасширенного графита, акустические нормальные волны, скорость волн, акустическая анизотропия, динамические упругие модули

Адрес для переписки:

Муравьева О.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Muravieva O.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О.П. Богдан.
Особенности распространения акустических нормальных волн
в тонких пористых листах терморасширенного графита.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С. 213–230
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

For citation:

Muravieva OV, Blinova AV, Denisov LA, Bogdan OP.
The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin
Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):213–230. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite

O.V. Muravieva^{1,2}, A.V. Blinova¹, L.A. Denisov¹, O.P. Bogdan¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 18.07.2024

Accepted for publication 05.09.2024

Abstract

Thermally expanded graphite belongs to a new class of graphite materials with unique physical, chemical and mechanical properties. Acoustic wave velocity is one of the most important characteristics for study of porous materials including thin porous sheets of thermally expanded graphite. In this paper peculiarities of symmetric mode S0 Lamb wave propagation and SH-wave with horizontal polarization in sheets of thermally expanded graphite are experimentally investigated. To determine their velocities a differential measurement scheme on the base of a low-frequency acoustic flaw detector DIO1000 LF and specialized piezoelectric transducers with dry point contact was used. Additionally the longitudinal wave velocity in direction of sheet thickness was determined using piezoelectric transducers based on polyvinylidene fluoride. Indicatrices of normal wave velocities in the rolling plane were plotted and it was shown that the maximum acoustic anisotropy is characteristic for the S0-mode. The velocity minimum corresponds to the longitudinal direction of the rolling plane in which the maximum elongation of gas pores was observed. Influence of thickness and density of thermally expanded graphite sheets on the velocities of normal waves was investigated and presence of the thickness range where the minimum velocity values were observed due to the maximum inhomogeneity of layers formed in the rolling process. Method for determination of dynamic elastic moduli of porous thermally expanded graphite sheets using experimentally measured velocities of normal waves was proposed. It was shown that in the longitudinal direction of the rolling plane the Poisson's ratio took negative values which allow to attribute the specified material to auxetics ones.

Keywords: thermally expanded graphite sheets, acoustic normal waves, velocity, acoustic anisotropy, dynamic elastic moduli

Адрес для переписки:

Муравьева О.В.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: pmkk@istu.ru

Address for correspondence:

Muravieva.O.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Для цитирования:

О.В. Муравьева, А.В. Блинова, Л.А. Денисов, О.П. Богдан.
Особенности распространения акустических нормальных волн
в тонких пористых листах терморасширенного графита.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С.213–230.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

For citation:

Muravieva OV, Blinova AV, Denisov LA, Bogdan OP.
The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin
Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):213–230. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230

Введение

Терморасширенные графиты (ТРГ) относятся к новому классу графитовых материалов, обладающих уникальными физико-химическими и механическими свойствами. Получение ТРГ включает несколько стадий: интеркаляция (взаимодействие графита с кислотами в присутствии окислителя); гидролиз интеркалированных соединений графита с образованием окисленного графита; терморасширение окисленного графита при резком нагреве до высоких температур. Полученный ТРГ обладает высокой удельной поверхностью и пористостью, что позволяет прессовать его в изделия различной формы и плотности. Прессование или прокатка ТРГ приводит к сцеплению червеобразных частиц без применения связующего и получению спрессованного материала – гибкой графитовой фольги различной толщины и плотности [1].

Графитовая фольга обладает уникальным комплексом эксплуатационных характеристик, ключевыми из которых являются: стойкость к воздействию высоких температур; высокая термостабильность; высокая теплопроводность; стойкость к воздействию химически агрессивных сред; высокая степень сжимаемости и восстанавливаемости после снятия давления; стойкость к истиранию и ударным нагрузкам, прочность и гибкость; низкий коэффициент трения; высокая электропроводность [2].

Указанные свойства обеспечивают использование графитовой фольги для улучшения эксплуатационных характеристик и надёжности разъёмных соединений трубопроводной арматуры, сосудов, аппаратов, насосов, компрессоров и другого оборудования, работающего под давлением в нефте- и газодобыче, химической, нефтеперерабатывающей, машиностроительной, металлургической, энергетической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности, а также в атомной энергетике [3].

Несмотря на длительный период изучения, в настоящее время к исследованию технологий изготовления, структуры и физико-химических и механических свойствам ТРГ сохраняется большой интерес в связи с разнообразием технологических применений [4–6]. Вопросам экспериментальной оценки коэффициента

прохождения и его неравномерности по площади для пористых листов ТРГ посвящены работы [7, 8].

Скорость акустических волн – одна из важнейших характеристик при исследованиях новых перспективных материалов и изделий. Знание скоростей акустических волн необходимо как при разработке методик дефектоскопии материалов и изделий на наличие несплошностей, так и при решении задач акустической структуроскопии. Методы акустической структуроскопии успешно используются для определения динамических упругих модулей материалов [9–13] благодаря наличию однозначных связей со скоростями и плотностью материалов; при оценке остаточных напряжений с использованием метода акустоупругости [14–16]; при оценке циклического нагружения на материал [17–19]; при оценке структуры и физико-механических свойств (твёрдость, качество термообработки, качество упрочнения и др.) [20–24] за счёт выявленных корреляционных связей со скоростями акустических волн.

Теория распространения акустических волн в пористых средах использует преимущественно уравнения Био [25]. Теоретические исследования скоростей акустических волн, распространяющихся в пористом материале, и их связи с упругими свойствами среды основаны на применении различных теорий, уравнений и моделей, дополняемых к классическим представлениям новыми граничными условиями, упрощениями и дополнениями [26–28].

Теоретические и экспериментальные исследования направлены на изучение взаимосвязи скорости акустической волны с плотностью и пористостью материала, размером, распределением и ориентацией пор [29]. В частности, показано, что увеличение пористости материала приводит к уменьшению скорости продольной волны, при этом влияние на скорость поперечной волны отсутствует [30]. Установлены зависимости скорости акустической волны, распространяющейся в пористом материале, от её частоты, что позволило получить дисперсионные кривые, описывающие акустические свойства пористого материала [31–33]. Анализ дисперсии акустических волн в пористых материалах показывает возможность возникновения на определённых частотах резонансов, приводящих к различным

видам колебаний пор, и возможности проявления пористыми средами при определённых условиях свойств метаматериалов с отрицательными инерционными и упругими свойствами [30, 34, 35].

Особый интерес представляет исследование «медленной» продольной акустической волны (волны сжатия II типа), возникающей при определённых резонансных частотах. Показано, что продольная волна второго типа зависит от свойств материала, заполняющего поры [36] и практически полностью поглощается при длине волны, намного превышающей толщину образца [37]. Активно исследуются возможности измерения скоростей распространения акустической волны в пористых средах для задач акустической структурографии: определение температуры среды [38], исследование эффектов смачивания и гидратации в насыщенных жидкостью пористых средах [39], состава газа в порах [40].

Экспериментальные измерения скорости акустической волны, распространяющейся в пористом материале, реализуются преимущественно с использованием продольных, поперечных и поверхностных волн звукового и ультразвукового диапазона. Имеются сведения об использовании для исследований направленных волн горизонтальной поляризации [41], а также возможностях использования для исследований методов широкополосной лазерно-ультразвуковой спектроскопии [33].

Листы ТРГ представляют собой тонкий пористый материал с неоднородной

структурой по толщине (слоем закрытых пор с поверхностями) и анизотропией свойств по площади, обусловленных технологией прокатки. Следует отметить, что в общем случае, скорость акустических волн в пористой среде определяется рядом параметров (пористость, эффективные упругие модули насыщенного материала; упругие модули скелета и среды, заполняющей поры (газ, жидкость), зависящих как от свойств твёрдой фазы и поровой среды, так и от многих других факторов (геометрии порового пространства, характера контактов в скелете, эффективного давления и др.) [26], многие из которых применительно к ТРГ являются неизвестными величинами и могут быть определены только эмпирически.

Цель работы: экспериментальные исследования особенностей распространения акустических волн в тонких пористых листах терморасширенного графита, определение их упругих модулей и оценка анизотропии акустических свойств как в плоскости проката, так и по его толщине.

Методика эксперимента

Экспериментально исследованы листы терморасширенного графита в количестве 5 образцов различной толщины h в диапазоне от 0.2 до 1.5 мм, с плотностью в диапазоне 850–970 кг/м³. Характеристики исследованных листов терморасширенного графита (толщина h , плотность ρ и поверхностная плотность ρh) представлены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

Характеристики исследуемых образцов терморасширенного графита

Characteristics of investigated thermally expanded graphite samples

№ образца No.	Толщина листа h , мм Sheet thickness h , mm	Плотность листа ρ , кг/м ³ Sheet density ρ , kg/m ³	Поверхностная плотность ρh , кг/м ² Surface density ρh , kg/m ²
1	1.52	940	1.429
2	1.03	970	0.999
3	0.6	850	0.511
4	0.4	910	0.364
5	0.2	885	0.177

В тонких пластинах возможно существование нормальных волн Лэмба, формируемых вследствие последовательного отражения и интерференции плоских волн, падающих и отражающихся от стенок волновода. Нормальные волны Лэмба подразделяются на осесимметричные продольные (S), антисимметричные изгибные (A) и поперечные волны горизонтальной поляризации (SH-волны). Основной характеристикой нормальных волн являются дисперсионные кривые, характеризующие зависимости групповых и фазовых скоростей от частоты колебаний и толщины листа.

В области минимальной дисперсии скорости при $fh \rightarrow 0$ (h – толщина листа, f – частота волны) фазовая и групповая скорости нулевой моды симметричной волны S0 не зависят от частоты и определяются только плотностью ρ материала и упругими свойствами среды (модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν) [42]:

$$C_{S0} |_{fh \rightarrow 0} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}. \quad (1)$$

При этом скорость нулевой симметричной моды SH-волны горизонтальной поляризации равна скорости объемной поперечной волны во всем диапазоне частот:

$$C_{SH} = C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (2)$$

Для измерения скоростей распространения нормальных акустических волн в образцах ТРГ использована информационно-измерительная система, собранная на базе низкочастотного акустического дефектоскопа DIO1000 LF (рисунок 1). Для экспериментального возбуждения и приёма SH-волны и симметричной моды S0 волны Лэмба использованы пьезопреобразователи (ПЭП) с сухим точечным контактом с рабочей частотой 75 кГц, обеспечивающие передачу колебаний, направленных тангенциально к поверхности листа. Изменяя взаимную ориентацию ПЭП, возможно добиться излучения (приёма) SH-волны с поляризацией поперёк направления распространения либо симметричной моды S0 волны Лэмба с поляризацией вдоль направления распространения. ПЭП подключались в раздельном варианте к низкочастотному дефектоскопу DIO 1000 LF. Особенностью низкочастотного дефектоскопа DIO 1000 LF является возможность сохранения регистрируемого импульса с частотой дискретизации 200 МГц для дальнейшей численной обработки, что обеспечивает точность определения временных интервалов 5 нс. Вид осциллограммы, получаемой при прозвучивании образцов листов ТРГ SH-волной иллюстрирует рисунок 2.

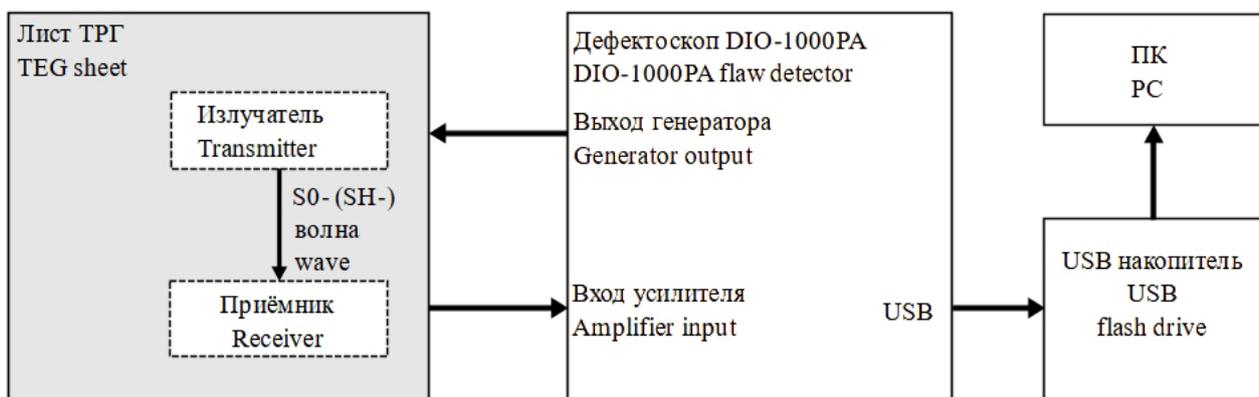


Рисунок 1 – Схема определения скоростей моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в плоскости прокатки

Figure 1 – Scheme for determination of velocities of S0 Lamb wave mode and of horizontally polarized SH-wave in the rolling plane

С целью учёта времени в ПЭП и времени отсчёта импульса использована диффе-

ренциальная схема измерений времени его прохождения согласно рисунку 3а.

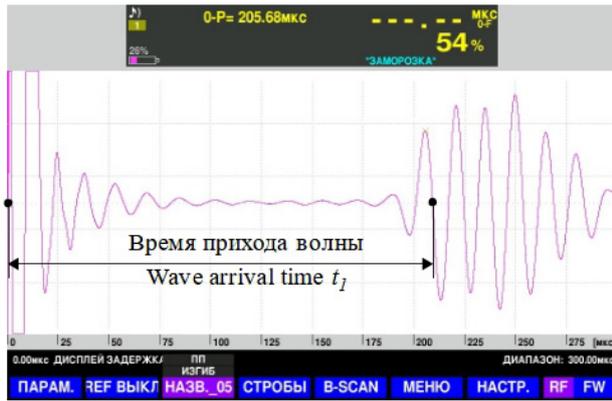


Рисунок 2 – Эхограмма SH-волны при прозвучивании листа ТРГ

Figure 2 – Echogram of the SH-wave during sonic test of the TEG sheet

Скорости нормальных волн C_{S0} и C_{SH} определялись по формуле:

$$C_{S0,SH} = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 – времена прихода акустических импульсов, прошедших расстояния l_1 и l_2 – соответственно.

Ввиду невозможности точного определения времени начала импульса на фоне зондирующего импульса, время прихода импульса регистрировалось по точке перехода через ноль второго периода колебаний (рисунок 2).

Временная задержка в пьезопреобразователе t_p , обусловленная особенностями его конструкции, и учётом переноса точки измерений из начала импульса (рисунок 2), может быть определена согласно формуле:

$$t_p = \frac{l_2 t_1 - l_1 t_2}{l_2 - l_1}, \quad (4)$$

где t_1 и t_2 – времена прихода волны на базе l_1 и l_2 соответственно.

Измерения проведены на базах $l_1 = 200$ мм и $l_2 = 400$ мм. Схема измерений угловой диаграммы скоростей нормальных волн относительно отклонения направления распространения и поляризации волн от направления проката листа ТРГ, позволяющая оценить анизотропию акустических свойств листа, представлена на рисунке 3б. Преобразователи перемещались по круговому шаблону с шагом, равным 15 градусам.

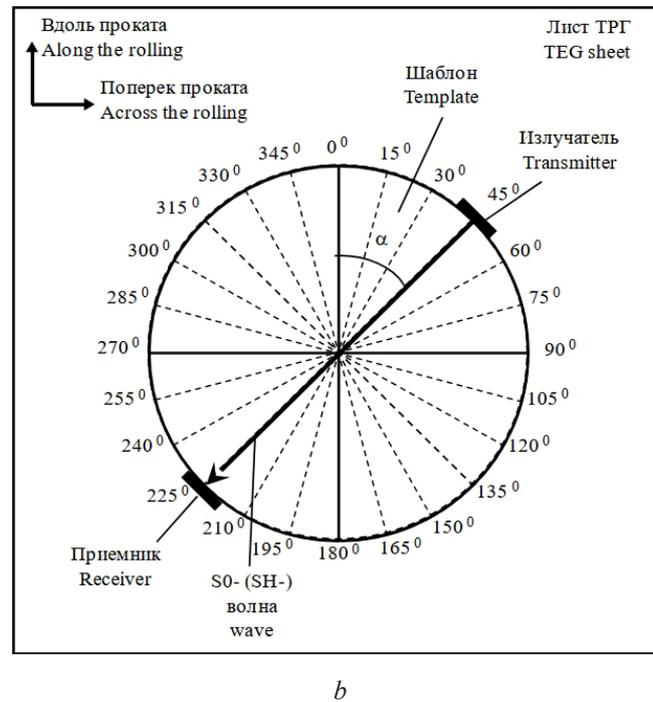
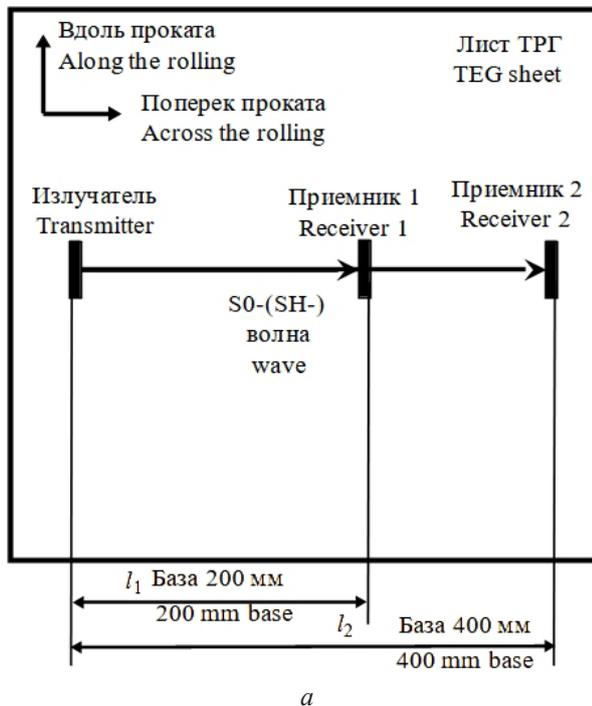


Рисунок 3 – Дифференциальная схема определения скоростей S0 и SH волн (a) и схема измерений угловой диаграммы скоростей нормальных волн относительно направления в плоскости проката (b)

Figure 3 – Differential scheme for determination of S0- and SH-waves' velocities (a) and measurement one of wave velocities' angular diagrams relative to the rolling direction (b)

Угловая зависимость скорости акустических нормальных волн определялась по формуле:

$$C(\alpha) = \frac{l}{t(\alpha) - t_p}, \quad (5)$$

где l – расстояние, пройденное волной ($l = 400$ мм); $t(\alpha)$ – время прихода импульса волны, распространяющейся в направлении.

Расчёт коэффициентов анизотропии R_a произведён из условия разницы скоростей волн в продольном C_{0° и поперечном C_{90° направлениях в плоскости проката:

$$R_a = 2 \left(\frac{C_{0^\circ} - C_{90^\circ}}{C_{0^\circ} + C_{90^\circ}} \right) \cdot 100\%. \quad (6)$$

Дополнительно определена скорость продольной волны в направлении толщины листа (рисунок 4). В качестве акустических излучателей и приёмников использованы

пьезопреобразователи, где для генерации-приёма применены выполненные из поливинилиденфторида (ПВДФ) гибкие пьезоплёнки. Отличительной особенностью преобразователей на основе ПВДФ является возможность получения широкополосных и высокочастотных сигналов малой длительности для определения времени прихода акустической волны с высокой точностью, а также обеспечить наилучшее акустическое согласование контактирующих материалов.

Скорость C_l продольной волны в направлении толщины образца h с учётом времени задержки в преобразователе t_{PVDF} определяется по формуле:

$$C_l = \frac{h}{t - t_{PVDF}}, \quad (7)$$

где t – время между зондирующим и прошедшим импульсами.

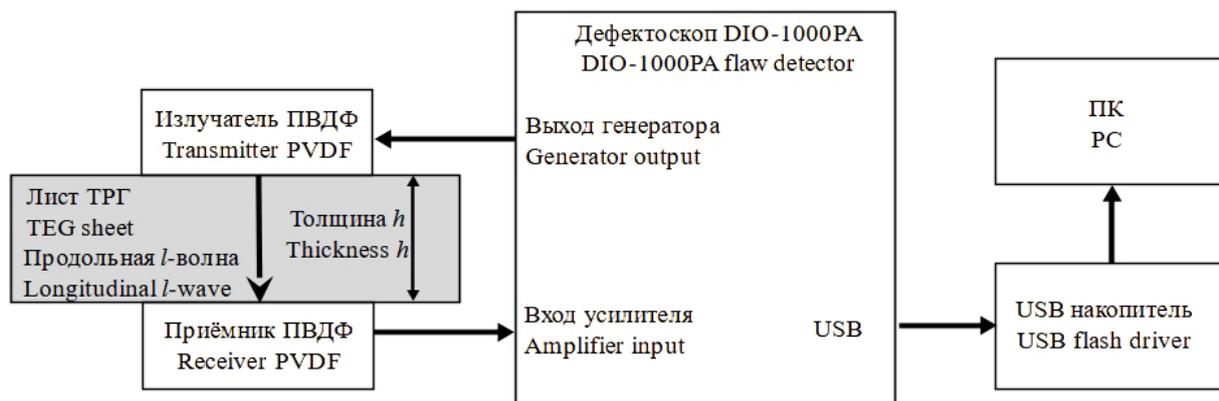


Рисунок 4 – Схема определения скорости продольной волны в толщине образца с использованием пьезопреобразователя на основе ПВДФ

Figure 4 – Scheme for determination of the longitudinal wave velocity through the thickness of the specimen using a PVDF-based piezoelectric transducer

По измеренным скоростям C_{SH} и C_{S0} акустических нормальных волн появляется возможность определения динамических упругих модулей материала ТРГ. Решение системы уравнений (1)–(2) с учётом известной формулы связи упругих модулей E и G :

$$G = E/2(1+\nu); \quad (8)$$

позволяет получить следующие формулы для – модуля Юнга E :

$$E = C_{S0}^2 \rho (1-\nu^2); \quad (9)$$

– модуля сдвига G :

$$G = C_{SH}^2 \rho; \quad (10)$$

– коэффициента Пуассона:

$$\nu = \frac{C_{S0}^2 - 2C_{SH}^2}{C_{S0}^2}. \quad (11)$$

Как правило, определение упругих модулей производят выборочно с использованием разрушающих испытаний, получая значения статических упругих модулей. Учитывая сложность определения

предела пропорциональности на диаграмме механического нагружения листов ТРГ, возможность определения динамических упругих модулей по измеренным скоростям акустических нормальных волн является единственно возможным методом определения модулей упругости листов ТРГ в технологическом цикле изготовления.

Расчёт косвенных методических погрешностей определения величин плотности, скорости и упругих модулей при погрешности измерения массы с использованием весов Kromatech Pocket Scale МН-200 – 5 мг, измерения линейных размеров образца с использованием линейки измерительной металлической 500 мм по ГОСТ 427-75 – 0,5 мм, измерения толщины образца с использованием микрометра МК Ц 25, ГОСТ 6507-90 – 0,5 мкм, измерения времени – 50 нс (при частоте дискретизации 200 МГц)

на примере образца № 1 представлен в таблице 2.

Для оценки случайной погрешности измерения проводились по пять раз в каждой зоне исследуемых образцов. Следует отметить, что экспериментальное определение скорости продольной волны по толщине образца с высокой точностью сопряжено со сложностями реализации методики импульсного временно-теневого метода. Случайные погрешности измерений обусловлены малой базой прозвучивания и неравномерностью толщины стенки листа; сложностью надёжного позиционирования измерительного инструмента на легко деформируемой поверхности; возможными различиями локальной плотности (в точке измерений) от интегральной (измеренной на листе в целом) вследствие разнородности.

Таблица 2/Table 2

Косвенные погрешности определения физических величин

Indirect errors of determination of physical quantities

Плотность $\Delta\rho$, кг/м ³ Density $\Delta\rho$, kg/m ³	Скорость моды S0 ΔC_{S0} , м/с Velocity of the S0-mode ΔC_{S0} , m/s	Скорость SH-волны ΔC_{SH} , м/с Velocity of the SH-wave ΔC_{SH} , m/s	Скорость продольной волны ΔC_l , м/с Velocity of the longitudinal wave ΔC_l , m/s	Модуль сдвига ΔG , ГПа Shear modulus ΔG , GPa	Коэффициент Пуассона, $\Delta\nu$ Poisson's, ratio $\Delta\nu$	Модуль Юнга ΔE , ГПа Young's modulus ΔE , GPa
2.5	25	20	4	0.05	0.006	0.01

Результаты и обсуждение

Типичные картины углового распределения скоростей (индикатриса скорости) моды S0 волны Лэмба и SH-волны в зависимости от направления распространения (поляризации) волн относительно направления проката в декартовой и цилиндрической системе координат для образца №1 показаны на рисунках 5 и 6.

Для моды S0 волны Лэмба (рисунок 5) в продольном направлении плоскости проката наблюдается максимальное значение скорости (около 2330 м/с), при этом минимальное значение (около 1885 м/с) соответствует направлению 90° (поперёк проката). Различия в значениях скоростей в направлении проката и под углом 90° достаточно существенно и составляет около 450 м/с или 20 %.

В отличие от моды S0 волны Лэмба скорость SH-волны имеет минимальные значения в направлениях 30–60° относительно направления проката, а максимальные – в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, при этом различие в скоростях в сравнении с модой S0 не превышает 30 м/с или 2 % и соизмеримо с косвенной погрешностью измерений.

Следует отметить, что согласно теории Гассмана о распространении акустических волн в пористых средах основным допущением является независимость модуля сдвига G двухфазной среды от свойств газообразной фазы [26]. Последнее позволяет предположить, что SH-волна горизонтальной поляризации может передаваться только по твёрдой фазе или

скелету ТРГ. При этом симметричная волна с продольной поляризацией и деформацией растяжения-сжатия переносится частицами двухфазной системы (ТРГ – воздух).

Учитывая, что процесс прокатки вытягивает воздушные поры преимущественно вдоль направления проката, последнее ведёт к формированию композитного материала ТРГ как слоистой среды, в которой связующим является скелет терморасширенного графита,

а слоями – вытянутые воздушные поры. При этом наблюдается эффект акустического каналирования, при котором скорость акустических волн, распространяющихся вдоль слоёв, существенно выше, чем поперёк слоев. Указанный эффект подтверждается экспериментальными работами по исследованию скоростей акустических волн в однонаправленных композитах [43, 44], а также теорией слоистых сред [45].

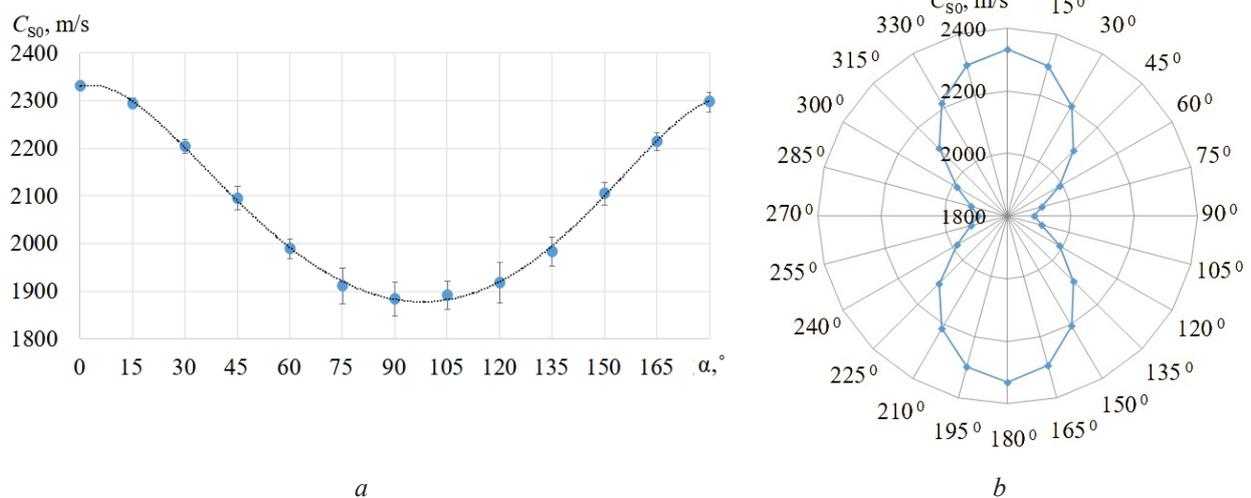


Рисунок 5 – Зависимости скорости C_{S0} моды S0 волны Лэмба от углового направления распространения α в плоскости проката в декартовой (a) и цилиндрической (b) системах координат для образца № 1

Figure 5 – Dependences of the Lamb wave S0-mode velocity C_{S0} on the propagation angle direction α in the rolling plane in Cartesian (a) and cylindrical (b) coordinate systems for specimen No 1

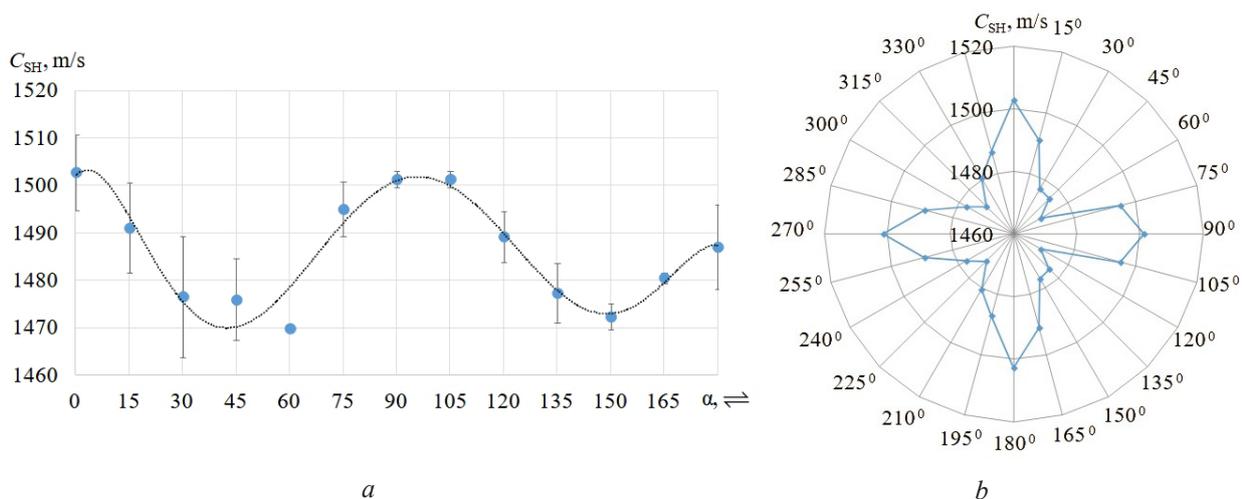


Рисунок 6 – Зависимости скорости C_{SH} SH-волны от углового направления распространения α в плоскости проката в декартовой (a) и цилиндрической (b) системах координат для образца № 1

Figure 6 – Dependences of SH-wave velocity C_{SH} on the propagation angle direction α in the rolling plane in Cartesian (a) and cylindrical (b) coordinate systems for specimen No 1

Поведение индикатрисы скорости SH-волны относительно направлений в плоскости проката может быть описано согласно представлениям о кристаллической структуре ТРГ, идентичной исходному графиту с гексагональной решёткой [4], при этом схема ориентирования плоскостей гексагональной решётки при плоской прокатке соответствует

базисной системе лёгкого скольжения – (1120). Согласно ориентации кристаллографических осей в гексагональной решётке графита максимум значений скорости SH-волны соответствует направлению [1010] (продольное направление в плоскости проката) и направлению [1210] (поперечное направление в плоскости проката), а минимум – направлениям [2110] (30, 60°).

Таблица 3/ Table 3

Результаты определения скоростей упругих волн и акустической анизотропии

Results of elastic wave velocities and acoustic anisotropy determination

№ образца No	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	h , мм h , mm	ρh , кг/м ² ρh , kg/m ²	C_{S0} , м/с		R_a , %	C_{SH} , м/с		C_l , м/с C_l , m/s	
				Вдоль проката Along the rolling	Поперек проката Across the rolling		Вдоль проката Along the rolling	Поперек проката Across the rolling		
1	940	1.52	1.429	2204±3	1818±3	19.2	1536±6	1535±7	0.11	352±8
2	970	1.03	0.999	2031±3	1674±2	19.3	1439±8	1415±4	1.72	361±8
3	851	0.6	0.511	1939±3	1684±4	14.1	1390±6	1405±4	-1.02	555±2
4	910	0.4	0.364	2024±5	1750±3	14.5	1449±8	1454±4	-0.36	450±1
5	887	0.2	0.177	2193±4	1845±2	17.2	1626±3	1610±11	0.97	-

Результаты определения скоростей упругих волн и акустической анизотропии для пяти исследованных образцов представлены в таблице 3. Как видно, имеется однозначная связь скоростей моды S0 волны Лэмба и скорости SH-волны, как вдоль, так и поперёк проката (рисунок 7).

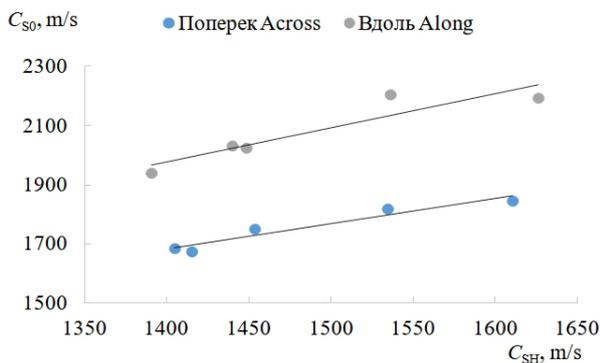


Рисунок 7 – Корреляция скоростей C_{S0} моды S0 волны Лэмба и C_{SH} SH-волны в продольном и поперечном направлениях плоскости проката

Figure 7 – Correlation of Lamb wave S0-mode C_{S0} and SH-wave C_{SH} velocities in longitudinal and transverse directions of the rolling plane

Влияние толщины исследованных листов на скорости моды S0 волны Лэмба и скорости SH-волн иллюстрирует рисунок 8. Полагаем, что влияние толщины листа является определяющим, ввиду того, что значения плотности исследованных листов меняются в небольших пределах (от 885 до 970 кг/м³), а значения толщины – в существенно больших пределах (от 0,2 до 1,5 мм) (таблица 1).

Необходимо отметить, что для всех исследованных образцов наблюдается неоднозначная зависимость скоростей нормальных волн от толщины листа с минимальным значением в области толщин 0,6–0,8 мм. Последнее может быть обусловлено значительной неоднородностью структуры по толщине листа вследствие совместного влияния более плотных поверхностных слоёв с закрытыми порами и центрального менее плотного пористого слоя, что обусловлено технологией проката. Тонкие листы (0,2 мм) являются более однородными по структуре ввиду двустороннего формирования более плотных поверхностных слоёв (рисунок 9a). Толстые листы (1 мм и более) имеют более равномерную структуру

ввиду меньшего влияния толщины плотных поверхностных слоёв в сравнении с внутренним менее плотным пористым слоем большей толщины. Для листов толщиной 0,6–0,8 мм толщина поверхностных слоёв соизмерима с толщиной внутреннего слоя, а, следовательно, имеет более неравномерную структуру

(рисунок 9b). Учитывая, что для моды S0 волны Лэмба и SH-волны горизонтальной поляризации в низкочастотном диапазоне имеет место равномерная эпюра смещений по толщине листа, степень неравномерности структуры по толщине листа ТРГ оказывает существенное влияние на их скорости.

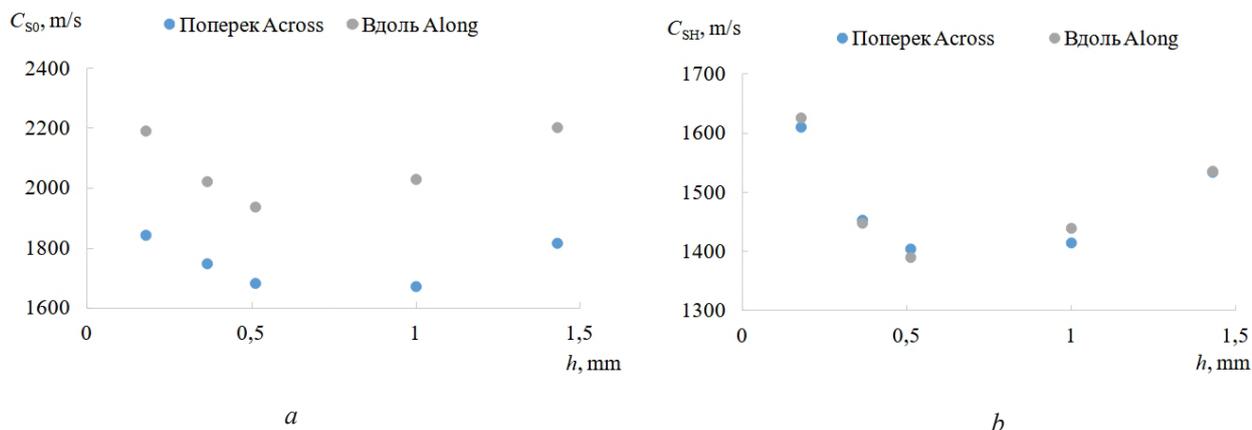


Рисунок 8 – Зависимости скоростей C_{S0} и C_{SH} волн, распространяющихся вдоль и поперёк проката от толщины листов терморасширенного графита h

Figure 8 – Dependences of S0- and SH-waves velocities in longitudinal and transverse directions of the rolling plane on the thickness of thermally expanded graphite sheets h

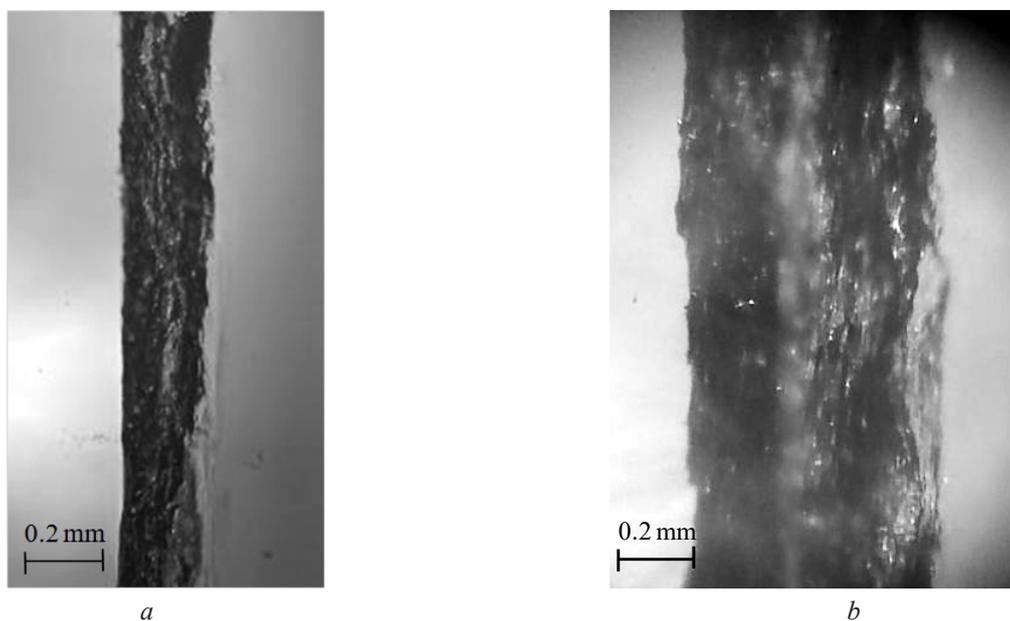


Рисунок 9 – Фото макроструктуры поперечного сечения листов терморасширенного графита: № 1 (толщина $h = 0,2$ мм) (a) и № 3 (толщина $h = 0,6$ мм) (b)

Figure 9 – Photo of thermally expanded graphite sheets' cross-section macrostructure for: No 1 (thickness $h = 0.2$ mm) (a) и No 3 (thickness $h = 0.6$ mm) (b) samples

Для продольных объёмных волн, распространяющихся по толщине листа, максимальная скорость соответствует минимальной плотнос-

ти листа (рисунок 10), что согласуется с известной корреляцией скорости C_l с модулем Юнга E и плотностью среды ρ : $C_l \sim (E/\rho)^{0.5}$.

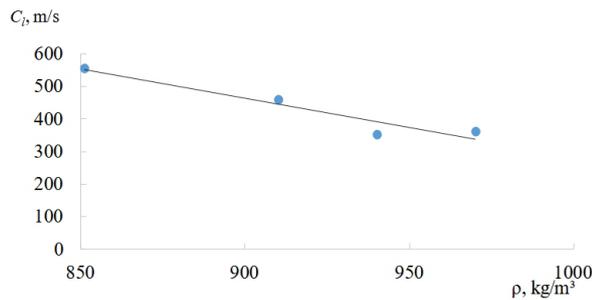


Рисунок 10 – Зависимость скорости C_l продольной волны в направлении толщины проката от плотности ρ листов терморасширенного графита

Figure 10 – Dependence of the longitudinal compressive-tension wave velocity C_l in the thickness rolling direction on the density of thermally expanded graphite sheets ρ

Представленные результаты оценки коэффициента акустической анизотропии исследованных листов по данным скоростей упругих мод, измеренных в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, свидетельствуют о том, что наибольшие значения указанного коэффициента достигаются при использовании именно S0 моды (14–19 %) для исследованных листов ТРГ. В то же время применение SH моды для этой цели неэффективно ввиду пренебрежимо малого изменения исследуемой величины.

Следует отметить высокий уровень акустической анизотропии скоростей S0 моды,

распространяющейся вдоль проката и продольной волны – по толщине проката. При этом различие скоростей может достигать $\approx 500\%$. Полученные результаты не противоречат данным, полученным при исследовании анизотропии механических свойств [46], свидетельствующим о существенном увеличении предела прочности и упругих модулей в направлении параллельно ориентированных слоев графита в ТРГ (в плоскости проката). Кроме того, согласно справочным данным о свойствах ТРГ имеет место увеличение электрического сопротивления ТРГ в 50–100 раз, и уменьшение коэффициента теплопроводности в 20–30 раз в направлении по толщине проката в сравнении с направлением вдоль проката.

На основе полученных экспериментально данных о скоростях упругих волн и использованием формул (9)–(11) рассчитаны динамические упругие модули Юнга и сдвига и коэффициент Пуассона в продольном и поперечном направлениях плоскости проката, представленные в таблице 4. Как видно, модуль сдвига для листов различной толщины изменяется в диапазоне 1,7–2,4 ГПа и имеет практически одинаковые значения, измеренные в направлении как вдоль, так и поперёк проката. В то же время имеет место существенное различие модуля Юнга, измеренного в продольном и поперечном направлениях проката, что в среднем в полтора-два раза больше.

Таблица 4/ Table 4

Результаты расчёта динамических упругих модулей

Results of dynamic elastic moduli calculation

№ образца No.	Модуль G , ГПа Modulus G , GPa		Модуль Юнга E , ГПа Young's modulus E , GPa		Коэффициент Пуассона ν Poisson's ratio ν	
	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling	Вдоль проката Along the rolling
1	2.22	2.21	4.56	2.55	0.03	-0.42
2	2.01	1.94	4.00	2.21	-0.01	-0.43
3	1.65	1.68	3.20	2.04	-0.03	-0.39
4	1.91	1.92	3.72	2.38	-0.02	-0.38
5	2.35	2.30	4.22	2.19	-0.10	-0.52

Весьма важно, что в продольном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона,

характеризующий сопротивление материала поперечным деформациям, стремится к нулю,

что означает отсутствие поперечной деформации при растяжении в указанном направлении. В то же время, в поперечном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам, для которых характерно поперечное расширение при продольном растяжении. Полученные результаты не противоречат исследованиям других пористых струк-

тур (метаматериалов), которые проявляют ауксетические свойства [34, 35].

Полученные значения упругих модулей позволили рассчитать дисперсионные кривые фазовых и групповых скоростей SH-моды и симметричной S0 моды (волн Лэмба), используя программное обеспечение «Acoustic Waveguide Tracer» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615397) (рисунок 11).

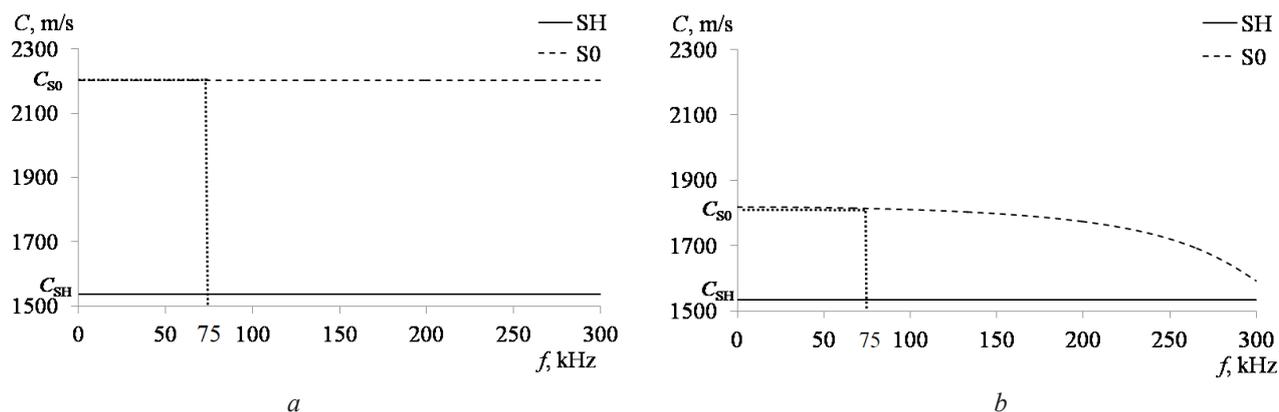


Рисунок 11 – Дисперсионные кривые групповых скоростей C SH-волны и моды S0 в продольном (а) и в поперечном (b) направлениях в плоскости проката для образца № 1

Figure 11 – Dispersion curves of the group velocities C of SH-wave and S0-mode in the longitudinal (a) and transverse (b) directions in the rolling plane for sample No 1

Видно, что в исследуемом диапазоне частот (75 кГц) в тонком листе наблюдается возбуждение бездисперсионной SH-волны. Для симметричной S0 моды проявляется дисперсия скорости (зависимость от частоты). Согласно рисунку 11 дисперсия её мала при распространении в продольном направлении в плоскости проката и проявляется в существенно большей степени в поперечном направлении. Полученные значения скоростей C_{SH} и C_{S0} при 75 кГц соответствуют экспериментальным значениям таблицы 3, что говорит об адекватности предложенной методики оценки динамических упругих модулей по измеренным скоростям нормальных волн.

Заключение

Экспериментально исследованы особенности распространения акустических волн в тонких пористых листах терморасширенного графита (ТРГ). Показана возможность

эффективного возбуждения в таких листовых материалах симметричной S0 моды волны Лэмба и SH-моды, имеющей горизонтальную поляризацию, и достаточно точной оценки скоростей указанных мод в низкочастотной области. В результате исследования влияния толщины листов ТРГ на скорости нормальных мод установлено, что в области толщин 0,6–0,8 мм наблюдаются минимальные значения скоростей, что, как предполагается, вызвано весьма высокой неоднородностью структуры слоёв, формируемых в процессе прокатки.

Оценены индикатрисы скоростей нормальных волн в плоскости проката и показано, что максимальная акустическая анизотропия характерна для S0 моды, при этом максимум скорости соответствует направлению распространения её вдоль проката, в котором наблюдается максимальная вытянутость газовых пор.

Предложена методика определения динамических упругих модулей пористых листов ТРГ по экспериментально измеренным

скоростям нормальных волн и показано, что в поперечном направлении плоскости проката коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения, что позволяет отнести указанный материал к ауксетикам.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/>, and made use of the USF "Information and measurement complex for the study of acoustic properties of materials and products" (reg. no. 586308).

Список использованных источников

1. Исаев О.Ю. Технология и аппаратурное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита / О.Ю. Исаев, Д.В. Смирнов, В.П. Лепихин [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. № 4. – С. 76–79.

2. Яковлев А.В. Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения (Обзор) / А.В. Яковлев, А.И. Финаенов, С.Л. Забудьков, Е.В. Яковлева // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79. – № 11. – С. 1761–1771.

3. Ханов А.М. Особенности строения и использования терморасширенного графита / А.М. Ханов, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14. № 1. – С. 92–106.

4. Murugan P. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors – a review / P. Murugan [et al.] // Nanoscale Advances. – 2021. – Vol. 3. – Pp. 6294–6309.

5. Караваев Д.М. Влияние структурно-морфологических особенностей терморасширенного графита на износостойкость композиционного материала с кремнийорганическим связующим / Д.М. Караваев, А.М. Ханов, Е.В. Матыгуллина,

Л.Д. Сиротенко // Известия Самарского научного Центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4(6). – С. 378–381.

6. Афанасов И.М. Теплопроводность и механические свойства терморасширенного графита / И.М. Афанасов [и др.] // Неорганические материалы. 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 540–544.

7. Богдан О.П. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом / О.П. Богдан [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – № 8. – С. 21–31.

DOI: 10.31857/S0130308223080031

8. Богдан О.П. Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / О.П. Богдан [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 97–105. **DOI:** 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105

9. Макалкин Д.И. Измерение локальных модулей упругости конструкционных материалов с использованием лазерных источников ультразвука / Д.И. Макалкин [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 502. – № 1. – С. 63–66. **DOI:** 10.31857/S2686740022010126

10. Шibaев И.А. Определение динамических модулей упругости образцов горных пород при использовании различных методов лазерной ультразвуковой диагностики / И.А. Шibaев // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. – № 4-1. – С. 138–147.

DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138

11. Murav'eva O. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology / O. Murav'eva [et al.] // Additive Manufacturing. 2022, vol. 51, P. 102635.

DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635

12. Муравьева О.В. Акустические свойства маргенично-старейшей стали ХМ-12 после энергетических воздействий / О.В. Муравьева [и др.] // Frontier Materials & Technologies. – 2024. – № 2. – С. 87–100. **DOI:** 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Murav'ev V.V. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, A.L. Vladykin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 59. – No. 5. – Pp. 515–523.

DOI: 10.1134/s1061830923700365

14. Муравьев В.В. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В.В. Муравьев [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 87–96.

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

15. Углов А.Л. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ / А.Л. Углов [и др.] // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 3–9.

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9

16. Муравьев В.В. Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки / В.В. Муравьев, А.Ю. Будрин, М.А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 4. – С. 4–10.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10

17. Mishakin V.V. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy / V.V. Mishakin [et al.] // International Journal of Engineering Science. – 2021. – Vol. 168. – Pp. 103567.

DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103567

18. Хлыбов А.А. Исследование поврежденности образцов из стали 12Х18Н10Т при малоцикловой усталости методами неразрушающего контроля / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Рябов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87. – № 5. – С. 61–67.

DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67

19. Абабков Н.В. Исследование дислокационной структуры, внутренних напряжений и перераспределения атомов углерода в зоне локализованной деформации в конструкционной стали 20 / Н.В. Абабков, В.И. Данилов, А.Н. Смирнов [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2024. – Т. 21. – № 1. – С. 112–121.

DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.013

20. Бритенков А.К. Исследование методом акустического зондирования физико-механических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V, полученного методом послойного лазерного сплавления / А.К. Бритенков, В.М. Родюшкин, А.В. Иляхинский // Физика и механика материалов. – 2021. – Т. 47. – № 1. – С. 139–158. **DOI:** 10.18720/MPM.4712021_14

21. Муравьев В.В. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн / В.В. Муравьев, А.Ю. Будрин, М.А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 37–43. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

22. Baev A. Possibilities of using of surface and sub-surface waves' amplitude-angle characteristics for control of materials with surface-hardened inhomogeneous layer / A. Baev [et al.] // Devices and Methods of Measurements. 2022, vol. 13, no 4, pp. 263-275.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

23. Муравьев В.В. Структуроскопия витков пружин после высокотемпературной механической

обработки на основе измерения скорости рэлеевских волн / В.В. Муравьев, Л.В. Гущина // Приборы и методы измерений. – 2022. – Т. 13. – № 2. – С. 147–154. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

24. Муравьев В.В. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей / В.В. Муравьев и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 59–70. **DOI:** 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70

25. Biot M.A. Acoustics, elasticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America, 1992. 265 p.

26. Князьков Н.Н. Акустика пористо-упругих насыщенных жидкостью сред (обзор теории Био) / Н.Н. Князьков, Б.П. Шарфарец // Научное приборостроение. – 2016. – Т. 26. – № 1. – С. 77–84.

27. Kidner M. A comparison and review of theories of the acoustics of porous materials / M. Kidner, C. Hansen // International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008, vol. 13, pp. 1-27.

28. Jimenez N. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous Media: From Fundamentals to Industrial Applications / N. Jimenez, O. Umnova, J.-P. Groby // Topics in Applied Physics. Springer. 2021, 444 p. **DOI:** 10.1007/978-3-030-84300-7

29. Omella A.J. A simulation method for the computation of the effective P-wave velocity in heterogeneous rocks / A.J. Omella, J. Alvarez-Aramberri, M. Strugaru, et al. // Computational Mechanics. 2021, vol. 67, pp. 845-865. **DOI:** 10.1007/s00466-020-01966-3.

30. Ba A. Thomas Brunet Soft porous silicone rubbers with ultra-low sound speeds in acoustic metamaterials / A. Ba, A. Kovalenko, C. Aristégui, O. Mondain-Monval, T. Brunet // Scientific Reports. 2017, vol. 7, P. 40106. **DOI:** 10.1038/srep40106

31. Magliacano D. Computation of dispersion diagrams for periodic porous materials modeled as equivalent fluids / D. Magliacano [et al.] // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020, vol. 142, P. 106749. **DOI:** 10.1016/j.ymsp.2019.05.040

32. Dmitriev V.L. Propagation of Acoustic Waves in a Water-Saturated Porous Medium Formed by a Gas Hydrate / V.L. Dmitriev, I.G. Khusainov, I.K. Gimaltdinov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021, vol. 94, no. 6, pp. 1563-1570. **DOI:** 10.1007/s10891-021-02437-z

33. Sokolovskaya Y.G. Using Broadband Acoustic Spectroscopy with a Laser Source of Ultrasound to Study the Frequency Dependences of the Phase Velocity of Longitudinal Acoustic Waves in Porous Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites / Y.G. Sokolovskaya, N.B. Podymova, A.A. Karabutov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021, vol. 85, no. 1, pp. 93-97. **DOI:** 10.3103/S1062873821010251

34. Федотовский В.С. Пористая среда как акустический метаматериал с отрицательными инерционными и упругими свойствами / В.С. Федотовский // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64. – № 5. – С. 547–553. DOI: 10.1134/S0320791918050027

35. Бобровницкий Ю.И. Акустический метаматериал с необычными волновыми свойствами / Ю.И. Бобровницкий // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60. – № 4. – С. 347. DOI: 10.7868/S0320791914040017

36. Ситдикова Л.Ф. Акустические волны в пористых средах, насыщенных водой с пузырьками газа на стенках пор / Л.Ф. Ситдикова // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18. – № 5. – С. 36–42. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-5-36-42

37. Groby J.-P. The use of slow waves to design simple sound absorbing materials / J.-P. Groby, W. Huang, A. Lardeau, Y. Auregan // Journal of Applied Physics. 2015, vol. 117, no. 12. DOI: 10.1063/1.4915115

38. Guo J. Exploring Acoustic Wave Propagation and Equivalent Path in Quasi-Porous Medium of Loose Coal Mass / J. Guo [et al.] // Natural Resources Research. 2024, vol. 33, pp. 389–403. DOI: 10.1007/s11053-023-10297-y

39. Губайдуллин А.А. Скорость и поглощение линейных волн в пористых средах, насыщенных газом и его гидратом / А.А. Губайдуллин, О.Ю. Болдырева, Д.Н. Дудко // Прикладная механика и техническая физика. – 2022. – Т. 63. – № 4(374). – С. 56–63. DOI: 10.15372/PMTF20220406

40. Секоян С.С. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения звуковых волн / С.С. Секоян [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50. – № 4(296). – С. 121–127.

41. Dai Z. The influence of slip boundary effect on the propagation of shear horizontal guided waves in a fluid-saturated porous medium / Dai Z. [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. 2024, vol. 144, no. 15. DOI: 10.1007/s10665-023-10318-y

42. Rose J.L. Ultrasonic guided waves in solid media / Joseph L. Rose // Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2014, 530 p.

43. Драчев К.А. Измерение скорости звука и коэффициента затухания в композиционных материалах на основе полимерных связующих с различной степенью армирования / К.А. Драчев, В.И. Римлянд, Т.В. Сянина // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2020. – № 4(59). – С. 47–54.

44. Wilkinson S.J. The propagation of ultrasonic waves in carbon-fibre-reinforced plastics / S.J. Wilkinson, W.N. Reynolds // Journal of Physics D: Applied Physics. 2002, vol. 7, P. 50. DOI: 10.1088/0022-3727/7/1/313

45. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – 2-е изд. дополненное и переработанное. М.: Наука, 1973. – 340 с.

46. Караваев Д.М. Анизотропия механических свойств композиционного материала на основе терморасширенного графита / Д.М. Караваев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1243–1245.

References

1. Isaev OYu, Smirnov DV, Lepikhin VP, Belova MYu, Kolesova SM. Technology and the hardware solution of a process of manufacture of thickening materials from thermal expanded graphite. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*. 2006;4:76-79. (In Russ.).

2. Yakovlev AV, Finaenov AI, Zabud'kov SL, Yakovleva EV. Thermally expanded graphite: Synthesis, properties, and prospects for use. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006;79(11):1741-1751. DOI: 10.1134/S1070427206110012

3. Hanov AM, Makarova LE, Degtyarev AI, Karavaev DM, Moskalev VA, Nesterov AA, Smirnov DV, Isaev OYu. Structural and applications peculiarities of the expanded graphite. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2012;14(1):92-106. (In Russ.).

4. Murugan P, Nagarajan RD, Shetty BH, Govindasamy M, Sundramoorthy AK. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors – a review. *Nanoscale Advances*. 2021;3: 6294-6309.

5. Karavaev DM, Khanov AM, Matygullina EV, Sirotenko LD. Vliyanie strukturno-morfologicheskikh osobennostei termorasshirennogo grafitna na iznosostoičnost' kompozitsionnogo materiala s kremniorganicheskim svyazuyushchim. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2013;15(4):378–381. (In Russ.).

6. Afanasov IM, Savchenko DV, Ionov SG, Ruskov DA, Seleznev AN, Avdeev VV. Thermal conductivity and mechanical properties of expanded graphite. *Inorganic Materials*. 2009;45(5):486-490. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0020168509050057

7. Bogdan OP, Muraveva OV, Blinova AV, Zlobin DV. Density study of thermoexpanded graphite samples by acoustic amplitude-shadow method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023;8:21-31. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0130308223080031

8. Bogdan OP, Blinova AV, Denisov LA. Experimental Evaluation of the Possibility of Through Defects Detection in Thermally Expanded Graphite Workpieces

by Acoustic Method. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2024;27(2):97-105. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105

9. Makalkin DI, Karabutov AA, Savateeva EV, Simonova VA. Measurement of local modules of elasticity of construction materials using laser ultrasonic sources. Doklady Physics. 2022;502(1):63-66. (In Russ.).

DOI: 10.31857/S2686740022010126

10. Shibaev IA. Determination of the dynamic elastic modulus of rock samples using various methods of laser ultrasound diagnostics. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021;4-1:138-147. (In Russ.).

DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_138

11. Murav'eva O, Murav'ev V, Volkova L, Kazantseva N, Nichipuruk A, Stashkov A. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology. Additive Manufacturing. 2022;51:102635.

DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635

12. Murav'eva OV, Murav'ev VV, Volkova LV, Vladynkin AL, Belosludtsev KYu. Acoustic properties of 15-5 PH maraging steel after energy deposition. Frontier Materials & Technologies. 2024;(2):87-100. (In Russ.).

DOI: 10.18323/2782-4039-2024-2-68-8

13. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Vladynkin AL. Acoustic and Electromagnetic Properties of Maraging Iron–Chromium–Nickel Alloy with Addition of Copper in Mechanical Tension. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023;59(5):515-523.

DOI: 10.1134/s1061830923700365

14. Murav'ev VV, Khomutov AS, Murav'eva OV, Stepanova EA, Popova VD. Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2024;27(2):87-96. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96

15. Uglov AL, Khlybov AA, Bychkov AL, Kuvshinov MO. About non-destructive control of residual stresses in axisymmetric parts made of steel 03ni17co10w-10moti. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova. 2019;22(4):3-9. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-3-9

16. Murav'ev VV, Budrin AYu, Sintsov MA. Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2020;18(4): 4-10. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-4-10

17. Mishakin VV, Gonchar AV, Kurashkin KV, Klyushnikov VA, Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy. International Journal of Engineering Science. 2021;168:103567.

DOI: 10.1016/j.ijengsci.2021.103567

18. Khlybov AA, Kabaldin YuG, Ryabov DA, Anosov MS, Shatagin DA. Study of the damage to 12cr18ni10ti steel samples under low cycle fatigue using methods of nondestructive control. Industrial Laboratory. 2021;87(5):61-67. (In Russ.).

DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-61-67

19. Ababkov NV, Danilov VI, Smirnov AN, Popova NA, Pimonov MV. Study of dislocation structure, internal stresses and redistribution of carbon atoms in the zone of localized deformation in structural steel 20. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya. 2024;21(1):112-121. (In Russ.).

DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.013

20. Britenkov AK, Rodyushkin VM, Ilyakhinski AV. Acoustic sensing study of the physical and mechanical properties of titanium alloy ti-6al-4v, made by selective laser melting. Materials physics and mechanics. 2021;47(1):139-158. (In Russ.).

DOI: 10.18720/MPM.4712021_14

21. Murav'ev VV, Budrin AYu, Sintsov MA. Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2020;18(2):37-43. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43

22. Baev A, Asadchaya M, Mayorov A, Sergeeva O, Delenkovsky N. Possibilities of using of surface and subsurface waves' amplitude-angle characteristics for control of materials with surface-hardened inhomogeneous layer. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(4):263-275.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

23. Murav'ev VV, Gushchina LV. Structuroscopy of Coils after High-Temperature Mechanical Treatment on the Basis of Measurements of Rayleigh Waves Velocity. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(2):147-154. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-147-154

24. Murav'ev VV, Murav'eva OV, Vagapov TR, Makarova VE, Stepanova EA. Acoustic and Electromagnetic Properties of Civilian Gun Blanks. Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2023;21(1):59-70. (In Russ.).

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70

25. Biot MA. Acoustics, elasticity, and thermodynamics of porous media: twenty-one papers. New York: Acoustical Society of America. 1992:265.

26. Knyaz'kov NN, Sharfaret BP. Acoustics of porous-elastic fluid saturated medium (an overview of the biot theory). Nauchnoe priborostroenie. 2016;26(1):77–84.

27. Kidner M, Hansen C. A compARison and review of theories of the acoustics of porous materials. International Journal of Acoustics and Vibrations. 2008;13:1-27.

28. Jimenez N, Umnova O, Groby J-P. Acoustic Waves in Periodic Structures, Metamaterials, and Porous

Media: From Fundamentals to Industrial Applications. Topics in Applied Physics. Springer. 2021:444.

DOI: 10.1007/978-3-030-84300-7

29. Omella AJ, Alvarez-Aramberri J, Strugaru M, et al. A simulation method for the computation of the effective P-wave velocity in heterogeneous rocks. Computational Mechanics. 2021;67:845-865.

DOI: 10.1007/s00466-020-01966-3

30. Ba A, Kovalenko A, Aristégui C, Mondain-Monval O, Brunet T. Thomas Brunet Soft porous silicone rubbers with ultra-low sound speeds in acoustic metamaterials. Scientific Reports. 2017;7:40106.

DOI: 10.1038/srep40106

31. Magliacano D, Ouisse M, Khelif A, Rosa SD, Franco F, Atalla N, Collet M. Computation of dispersion diagrams for periodic porous materials modeled as equivalent fluids. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020;142:106749.

DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.05.040

32. Dmitriev VL, Khusainov IG, Gimaltdinov IK. Propagation of Acoustic Waves in a Water-Saturated Porous Medium Formed by a Gas Hydrate. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021;94(6):1563-1570. **DOI:** 10.1007/s10891-021-02437-z

33. Sokolovskaya YG, Podymova NB, Karabutov AA. Using Broadband Acoustic Spectroscopy with a Laser Source of Ultrasound to Study the Frequency Dependences of the Phase Velocity of Longitudinal Acoustic Waves in Porous Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021;85(1):93-97.

DOI: 10.3103/S1062873821010251

34. Fedotovskii VS. Poristaya sreda kak akusticheskkii metamaterial s otritsatel'nymi inertsionnymi i uprugimi svoistvami. Acoustical Physics. 2018;64(5):547-553. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/S0320791918050027

35. Bobrovnikskii YI. An acoustic metamaterial with unusual wave properties. Acoustical Physics. 2014;60(4):347. (In Russ.).

DOI: 10.7868/S0320791914040017

36. Sitdikova LF. Acoustic waves in porous media saturated with water with gas bubbles on the pore walls. Petroleum engineering. 2020;18(5):36-42. (In Russ.).

DOI: 10.17122/ngdelo-2020-5-36-42

37. Groby J-P, Huang W, Lardeau A, Auregan Y. The use of slow waves to design simple sound absorbing materials. Journal of Applied Physics. 2015;117(12).

DOI: 10.1063/1.4915115

38. Guo J, Chen C, Cai G, et al. Exploring Acoustic Wave Propagation and Equivalent Path in Quasi-Porous Medium of Loose Coal Mass. Natural Resources Research. 2024;33:389-403.

DOI: 10.1007/s11053-023-10297-y

39. Gubaidullin AA, Boldyreva OYu, Dudko DN. Velocity and attenuation of linear waves in porous media saturated with gas and its hydrate. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022;63(4):599-605. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/s002189442204006x

40. Sekoyan SS, Shlegel' VR, Batsanov SS [et al.]. Effect of the porosity and particle size of materials on sound-wave velocity. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2009;50(4):646-650. (In Russ.).

DOI: 10.1007/s10808-009-0086-y

41. Dai Z, Liu J, Geng H, et al. The influence of slip boundary effect on the propagation of shear horizontal guided waves in a fluid-saturated porous medium. Journal of Engineering Mathematics. 2024;144(15).

DOI: 10.1007/s10665-023-10318-y

42. Rose J.L. Ultrasonic guided waves in solid media. Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2014:530.

43. Drachev KA, Rimlyand VI, Syasina TV. Measurement of sound velocity and damping coefficient in composite materials based on polymer binders with different degrees of reinforcement. Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2020;4(59):47-54.

44. Wilkinson SJ, Reynolds WN. The propagation of ultrasonic waves in carbon-fibre-reinforced plastics. Journal of Physics D: Applied Physics. 2002;7:50.

DOI: 10.1088/0022-3727/7/1/313

45. Brekhovskikh LM. Volny v sloistykh sredakh - 2-e izd. Dopolnennoe i pererabotannoe. M.: Nauka. 1973;340.

46. Karavayev DM, Khanov AM, Degtyarev AI, Makarova LE, Smirnov DV, Isaev OYu. Mechanical properties anisotropy of composite material based on thermoexpanded graphite. News of the samara centre of science of the Russian academy of sciences. 2012;14(4): 1243-1245.