МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАТНЫХ ВОЛН В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Допустить к защите:
Заведующий кафедрой информатики,
Доктор физико-математических наук,
Член-корреспондент РАН

Петров И.Б.

Дипломная работа
Студентка 4 курса
Перегуд Юлия Игоревна

Научный руководитель:
Фаворская Алена Владимировна

АННОТАЦИЯ

Работа направлена на изучение исследования свойств материалов тонких пластин и параметров тел, состоящих из определенных материалов, при помощи лазерного ультразвука. В работе представлены постановки двух задач: определение скоростей распространения упругих волн в тонкой пластине на примере двух материалов и определение толщины пластины при известных скоростях продольных и поперечных волн в данном материале. Также рассмотрены два варианта регистрации времени прихода упругих волн: регистрация времен прихода волн на ту сторону пластины, на которую воздействует лазер и регистрация на обеих сторонах пластины. Приведены расчетные формулы времен регистрации различных типов и групп волн на границах пластины, решены обе поставленные задачи и сделаны выводы об оптимизации экспериментов. Также проведено тестирование метода исследования свойств пластины лазерным ультразвуком с помощью полноволнового моделирования на примере различных материалов.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ **2**

СОДЕРЖАНИЕ **3**

ОБОЗНАЧЕНИЯ **4**

ВВЕДЕНИЕ **6**

1 Постановки задач **7**

1.1 Предмет исследования 8

1.2 Три варианта регистрации времени прихода волн на стороны пластины 9

1.3 Выводы об оптимизации эксперимента 13

2 Расчет времен регистрации различных типов и групп волн на границах пластин **14**

2.1 Случай регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер 14

2.2 Случай регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины 15

3 Определение скоростей распространения упругих волн в материале пластины с помощью регистрации кратных волн **17**

3.1 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер 17

3.2 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины 18

4 Определение толщины пластины с помощью регистрации кратных волн **19**

4.1 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер 19

4.2 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины 20

5 Апробация метода исследования свойств пластины лазерным ультразвуком с помощью полноволнового моделирования **22**

5.1 Алюминиевая пластина 22

5.2 Пластина «1.7» 24

ЗАКЛЮЧЕНИЕ **28**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ..... Ошибка! Закладка не определена.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Материал «ALU» – алюминий.

Материал «1.7» – материал с той же плотностью и скоростью продольных волн, что и у алюминия, но со скоростью поперечных волн в 1.7 раз меньшей скорости продольных волн.

P-волна – альтернативное название продольной волны.

S-волна – альтернативное название поперечной волны.

PP-волна – P-волна, образовавшаяся в результате отражения P-волны от контрастной границы, например, от границы пластины с газом или жидкостью

PS-волна – S-волна, образовавшаяся в результате отражения P-волны от контрастной границы, например, от границы пластины с газом или жидкостью, является примером обменной волны.

SP-волна – P-волна, образовавшаяся в результате отражения S-волны от контрастной границы, например, от границы пластины с газом или жидкостью, является примером обменной волны.

SS-волна – S-волна, образовавшаяся в результате отражения S-волны от контрастной границы, например, от границы пластины с газом или жидкостью.

nPmS-волна – совокупность (группа) волн, образовавшихся в результате многократного переотражения исходной волны в пластине, характеризующихся одинаковым временем прихода к границе пластины. В сокращении «*n*P*m*S» *n*, *m* – натуральные числа, возможно нулевые. Когда, к примеру, *m* нулевое, условимся писать 3P. Тогда классические обозначения типов волн, перечисленные выше, являются частным следствием такого алгоритма обозначения типов упругих волн в среде.

cP – скорость P-волн

cS – скорость S-волн

dZ – толщина пластины

Полноволновое моделирование – численное моделирование, естественным образом учитывающее все типы волн, не только скорости, характер движения материи, но и топологические особенности и т.д.

Модель расширения – начальное условие в расчете, моделирующее расширение материала от воздействия лазерного источника.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование упругих свойств материалов и параметров тел, состоящих из определенных материалов, может быть осуществлено с помощью регистрации кратных волн, образующихся в них под воздействием лазерного ультразвука [1-5]. В зависимости от поставленной задачи есть возможность достаточно точно определять скорости продольных и поперечных упругих волн в телах, а также некоторые геометрические параметры тел, например, толщину тонкой пластины.

В данной работе рассмотрены несколько задач прикладного характера: определение толщины тонкой пластины и скоростей распространения упругих волн в ней на примере двух материалов. Также рассмотрены особенности определения этих параметров в зависимости от того, с какой стороны пластины по отношению к источнику волн регистрируются времена прихода волн. Это является важным параметром, т.к. в зависимости от специфики поставленной задачи может быть удобным регистрировать время прихода волн либо на какой-то одной из сторон пластины, либо на обеих сторонах сразу. Например, если необходимо определить толщину слоя льда в океане (что необходимо, например, для проектирования маршрутов ледоколов), то было бы логично рассматривать случай регистрации волн на стороне пластины, на которой находится источник.

Полноволновое численное моделирование [6-16] позволяет найти метод определения параметров различных материалов и объектов и выявить наиболее оптимальные для регистрации типы и группы волн для решения конкретной задачи. Для примеров задач, перечисленных выше, проанализирован вклад различных типов и групп волн в решение этих задач.

1 Постановки задач

Система уравнений, описывающая распространение упругих волн

Пространственные динамические упругие волны описываются следующей системой уравнений.

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \tag{0.1}$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \tag{0.2}$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}, \tag{0.3}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}, \tag{0.4}$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y}, \tag{0.5}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}, \tag{0.6}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right), \tag{0.7}$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \tag{0.8}$$

$$\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \tag{0.9}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}. \tag{0.10}$$

Уравнения (0.1) − (0.3) являются записанным покомпонентно локальным уравнением движения.

В (0.1) − (0.10) ρ – плотность материала, $\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}^{\mathrm{T}}$ – локальная скорость материала движения бесконечно малых объемов рассматриваемой

среды, $\boldsymbol{\sigma}$, заданный выражением (22), – тензор напряжений Коши, являющийся симметричным в силу закона парности касательных напряжений, варьируемый относительно статически устойчивого состояния.

Уравнения (0.4) − (0.9) выводятся из закона Гука путем дифференцирования по времени.

Данная система гиперболических уравнений (0.1) − (0.9) решается при помощи сеточно-характеристического метода.

1.1 Предмет исследования

Рассматривается тонкая пластина размером 1 см на 1 мм для двумерного моделирования и два типа материалов со следующими параметрами среды: обычный алюминий «ALU» и материал «1.7». У материала «1.7» скорость распространения продольных волн равна скорости распространения продольных волн в материале «ALU», а скорость распространения поперечных волн в 1.7 раз меньшее.

В качестве источника упругих волн использовалась так называемая «модель расширения». В «модели расширения» задается начальное поле вектора скорости, расходящееся от этого центра широкой грани пластины. В случае двумерного моделирования, рассматриваемого в данной статье, схема распределения вектора скорости в начальный момент времени показана на рисунке 1.1. Воздействие лазерного импульса необходимо осуществлять точно по центру верхней стороны пластины.

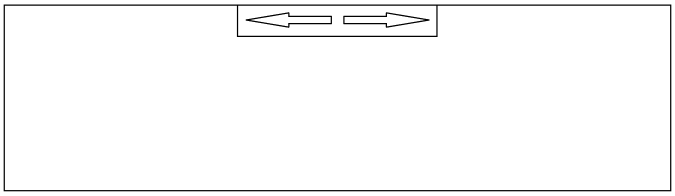

Рисунок 1.1 – Модель расширения пластины от воздействия лазерного импульса: схема распределения вектора скорости в начальный момент времени для двумерного моделирования

В эксперименте регистрация времен прихода волн осуществляется либо на той же стороне пластины, на которой находится источник, либо на обоих сторонах пластины, что будет более подробно описано в пункте 1.2 данного раздела.

В данной работе рассматриваются два типа прикладных задач.

Первая задача заключается в нахождении скоростей распространения продольных и поперечных волн в пластине при известных геометрических параметрах пластины. То, какие типы и группы волн будут использоваться для измерений, зависит от геометрических параметров пластины. Эти параметры подбираются на основе коэффициента затухания волн в пластине и соотношения ее толщины и длины.

Вторая задача – определение толщины пластины при известных скоростях продольных и поперечных волн в данном материале.

1.2 Три варианта регистрации времени прихода волн на стороны пластины

Для обеих задач необходимо измерять время прихода волн по одной из следующих схем:

1) Измерять времена прихода волн на грань пластины, противоположную лазеру,

2) Измерять времена прихода волн на ту сторону пластины, на которую воздействует лазер,

3) Измерять времена прихода волн на обе стороны пластины.

О схеме измерений, соответствующей пункту 1 (Таблицы 3 и 4), уже были проведены исследования, поэтому не будем останавливаться на них слишком подробно, а опишем только ключевые результаты. Схема, соответствующая пункту 2 (Таблицы 1 и 2), не была исследована ранее, поэтому она будет описана в данной работе. Схема, соответствующая пункту 3

(Таблицы 5 и 6), также не была рассмотрена ранее. Она является объединением схемы 1 и 2.

Таблица 1. Время прихода групп ультразвуковых волн на грань пластины, на которую действует лазер, материал «1.7»

t2P, нс	312.50
tPS, нс	421.92
t2S, нс	531.34
t4P, нс	625.00
t3PS, нс	734.42
t2P2S, нс	843.84

Таблица 2. Время прихода групп ультразвуковых волн на грань пластины, на которую действует лазер, материал «ALU»

t2P, нс	315.10
tPS, нс	483.54
t2S, нс	646.78
t3PS, нс	796.04

Таблица 3. Время прихода групп ультразвуковых волн на грань пластины, противоположную лазеру, для материала «1.7»

tP, нс	156.25
tS, нс	265.67
t3P, нс	468.75
t2PS, нс	578.17
tP2S, нс	687.60
t5P, нс	781.25

Таблица 4. Время прихода групп ультразвуковых волн на грань пластины, противоположную лазеру, для материала «ALU»

tP, нс	160.15
tS, нс	323.39
t3P, нс	472.65
t2PS, нс	638.49
t5P, нс	787.75

Таблица 5. Время прихода групп ультразвуковых волн на обе грани пластины, материал «1.7»

tP, нс	156.25
tS, нс	265.67
t2P, нс	312.50
tPS, нс	421.92
t3P, нс	468.75
t2S, нс	531.34
t2PS, нс	578.17
t4P, нс	625.00
tP2S, нс	687.60
t3PS, нс	734.42
t5P, нс	781.25
t2P2S, нс	843.84

Таблица 6. Время прихода групп ультразвуковых волн на обе грани пластины, материал «ALU»

tP, нс	160.15
t2P, нс	320.30
tS, нс	323.39
t3P, нс	472.65
tPS, нс	483.54
t2PS, нс	638.49
t2S, нс	646.78
t5P, нс	787.75
t3PS, нс	796.04

1.3 Выводы об оптимизации эксперимента

Для реализации схем измерения времен прихода волн, соответствующих пунктам 1 и 2 раздела 1.2 приходится исключать некоторые времена из таблиц в связи с тем, что некоторые из них очень близки к тем, которые уже есть в таблице. Из-за этого в эксперименте было бы очень сложно определить, какой из групп волн соответствует какое из измеренных времен.

Для реализации схем измерения времен прихода волн, соответствующих пункту 3 раздела 1.2 можно использовать больше измерений времени. В таблицах 5 и 6 некоторые времена близки друг к другу, но это не является проблемой в данном случае, т.к. эти близкие по значениям времена регистрируются на разных сторонах пластины.

Можно прийти к выводу, что учет времен прихода волн на обе стороны пластины сразу даст более точный результат, чем учет времен прихода волн на какую-то одну из сторон пластины. Это связано с тем, что будет проведено больше измерений, и погрешность в целом станет меньше. Поэтому, если при проведении эксперимента есть возможность регистрировать приход волн на обе стороны пластины, то имеет смысл ее использовать. Если такой возможности нет, то в зависимости от специфики задачи можно выбрать либо пункт 1, либо пункт 2 раздела 1.2.

2 Расчет времен регистрации различных типов и групп волн на границах пластины

Рассмотрим задачу на примере пластины из материала «1.7». Соответственно, будем использовать времена из таблиц 1 и 5. Для пластины из материала «ALU» расчеты будут аналогичными, но времена будут браться из таблиц 2 и 6. В разделах 3 и 4 будет также рассматриваться пластина из материала «1.7».

2.1 Случай регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер

Сначала вычисляется время, которое необходимо продольной и поперечной волнам, чтобы пересечь пластину поперек нее и отразиться от пластины, вернувшись на исходную сторону, т.е. пройти расстояние $2dZ$, равное двойной толщине пластины.

$$t_{2\mathrm{P}} = 2\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}, \tag{1}$$

$$t_{2\mathrm{S}} = 2\frac{dZ}{c_S}. \tag{2}$$

Далее очевидным образом вычисляются значения $\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}$ и $\frac{dZ}{c_S}$, которые понадобятся для дальнейших вычислений:

$$\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} = \frac{t_{2\mathrm{P}}}{2}, \tag{3}$$

$$\frac{dZ}{c_S} = \frac{t_{2S}}{2}. \tag{4}$$

Затем для группы волн nPmS время регистрации вычисляется по

следующей формуле:

$$t_{n\mathrm{P}m\mathrm{S}} = n\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + m\frac{dZ}{c_S}. \tag{5}$$

После проведения измерений становятся известны времена прихода различных групп волн, которым далее ставятся в соответствие натуральные числа m и n (одно из них может быть равно нулю):

$$t_{4\mathrm{P}} = 4\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}, \tag{6}$$

$$t_{\mathrm{PS}} = \frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + \frac{dZ}{c_S}, \tag{7}$$

$$t_{2\mathrm{P}2\mathrm{S}} = 2\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + 2\frac{dZ}{c_S}, \tag{8}$$

$$t_{3\mathrm{PS}} = 3\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + \frac{dZ}{c_S}, \tag{9}$$

Выражения (6) – (9) не являются вырожденной системой уравнений, т.к. существует погрешность измерения каждого из времен $t_{n\mathrm{P}m\mathrm{S}}$.

2.2 Случай регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины

Когда регистрируются времена прихода волн на обеих стороны пластины по отношению к лазеру, к выражениям (1), (2) и (6) – (9) добавляются времена регистрации прихода волн на сторону пластины, противоположную лазеру. Эти времена вычисляются по формулам (10) – (15):

$$t_{\mathrm{P}} = \frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}, \tag{10}$$

$$t_{\mathrm{S}} = \frac{dZ}{c_S}, \tag{11}$$

$$t_{3\mathrm{P}} = 3\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}, \tag{12}$$

$$t_{5\mathrm{P}} = 5\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}, \tag{13}$$

$$t_{\mathrm{P2S}} = \frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + 2\frac{dZ}{c_S}, \tag{14}$$

$$t_{2\mathrm{PS}} = 2\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}} + \frac{dZ}{c_S}. \tag{15}$$

3 Определение скоростей распространения упругих волн в материале пластины с помощью регистрации кратных волн

3.1 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер

Задача состоит в том, чтобы определить продольную скорость распространения упругих волн в пластине c_{P} и поперечную скорость распространения упругих волн c_S при известной толщине пластины dZ.

Из уравнений (1), (2) и (6) – (9) можно сначала найти значения c_{P} по формуле (16), усреднив четыре слагаемых, каждое из которых соответствует значению c_{P}, т.к. каждое из времен в предыдущих уравнениях является отдельным измерением.

$$c_{\mathrm{P}} = \frac{1}{4}\left(\frac{2dZ}{t_{2\mathrm{P}}} + \frac{4dZ}{t_{4\mathrm{P}}} + \frac{2dZ}{t_{3\mathrm{PS}} - t_{\mathrm{PS}}} + \frac{4dZ}{2t_{3\mathrm{PS}} - t_{2\mathrm{P2S}}}\right). \qquad (16)$$

Далее по формуле (17) найдем c_S:

$$c_S = \frac{1}{4}\left(\frac{2dZ}{t_{2\mathrm{S}}} + \frac{dZ}{t_{\mathrm{PS}} - \frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}} + \frac{dZ}{t_{3\mathrm{PS}} - 3\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}} + \frac{2dZ}{t_{2\mathrm{P2S}} - 2\frac{dZ}{c_{\mathrm{P}}}}\right). \qquad (17)$$

Если не известно время начала действия лазера на пластину, то можно использовать следующую схему расчета:

3.2 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины

Если учитываются времена прихода волн на обе стороны пластины, то расчеты изменятся, в них будет включены формулы (10) – (15).

Сначала по формуле (18) находится c_{P}^{*} – усредненная продольная скорость распространения волн в пластине, найденная из времен прихода волн на сторону платины, противоположную лазеру:

$$c_{\text{P}}^{*} = \frac{1}{3}\left(\frac{dZ}{t_{\text{P}}} + \frac{3dZ}{t_{3\text{P}}} + \frac{5dZ}{t_{5\text{P}}}\right). \tag{18}$$

Далее аналогично пункту раздела 3.1 по формуле (19) находится c_{S}^{*} – усредненная поперечная скорость распространения волн, найденная из времен прихода волн на сторону платины, противоположную лазеру:

$$c_{S}^{*} = \frac{1}{3}\left(\frac{dZ}{t_{\text{S}}} + \frac{dZ}{t_{2\text{PS}} - \frac{2dZ}{c_{\text{P}}}} + \frac{2dZ}{t_{\text{P2S}} - \frac{dZ}{c_{\text{P}}}}\right). \tag{19}$$

Чтобы найти итоговые c_{P}^{**} и c_{S}^{**} для случая регистрации времени прихода волн на обе стороны пластины, необходимо усреднить c_{P} и c_{S}, c_{P}^{*} и c_{S}^{*} по формулам (20) и (21) соответственно:

$$c_{\text{P}}^{**} = \frac{1}{2}(c_{\text{P}} + c_{\text{P}}^{*}), \tag{20}$$

$$c_{\text{S}}^{**} = \frac{1}{2}(c_{S} + c_{S}^{*}). \tag{21}$$

4 Определение толщины пластины с помощью регистрации кратных волн

4.1 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на стороне пластины, на которую действует лазер

Из формул (1), (2) и (5) – (9) можно найти толщину пластины для случая регистрации времени прихода волн с той же стороны, где находится лазер:

$$dZ_1 = \frac{1}{2} c_{\mathrm{P}} \cdot t_{2\mathrm{P}}, \tag{22}$$

$$dZ_2 = \frac{1}{2} c_S \cdot t_{2\mathrm{S}}, \tag{23}$$

$$dZ_3 = \frac{1}{4} c_{\mathrm{P}} \cdot t_{4\mathrm{P}}, \tag{24}$$

$$dZ_4 = \frac{c_{\mathrm{P}} c_S}{c_{\mathrm{P}} + c_S} \cdot t_{\mathrm{PS}}, \tag{25}$$

$$dZ_5 = \frac{2 c_{\mathrm{P}} c_S}{c_{\mathrm{P}} + c_S} \cdot t_{2\mathrm{P2S}}, \tag{26}$$

$$dZ_6 = \frac{c_{\mathrm{P}} c_S}{c_{\mathrm{P}} + 3 c_S} \cdot t_{3\mathrm{PS}}, \tag{27}$$

Усреднив, найдем итоговую толщину пластины dZ:

$$dZ = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{6} dZ_i \,. \tag{28}$$

4.2 Расчетные формулы для случая регистрации времен прихода волн на обеих сторонах пластины

Если учитываются времена прихода волн на обе стороны пластины, то расчеты изменятся, в них будет включены формулы (10) – (15).

Сначала аналогично пункту 4.1 находятся dZ_i^* для случая регистрации времен прихода волн на противоположную лазеру сторону пластины по формулам (29) – (34):

$$dZ_1^* = c_{\text{P}} \cdot t_{\text{P}}, \tag{29}$$

$$dZ_2^* = \frac{1}{3} c_{\text{P}} \cdot t_{3\text{P}}, \tag{30}$$

$$dZ_3^* = \frac{1}{5} c_{\text{P}} \cdot t_{5\text{P}}, \tag{31}$$

$$dZ_4^* = c_S \cdot t_S, \tag{32}$$

$$dZ_5^* = \frac{c_{\text{P}} c_S}{2c_{\text{P}} + c_S} \cdot t_{\text{P}2S}, \tag{33}$$

$$dZ_6^* = \frac{c_{\text{P}} c_S}{c_{\text{P}} + 2c_S} \cdot t_{2\text{P}S}. \tag{34}$$

Далее по формуле (35) находится dZ^* – усредненная толщина пластины, найденная из времен прихода волн на сторону платины, противоположную лазеру:

$$dZ^* = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{6} dZ_i^*. \tag{35}$$

Чтобы найти итоговую толщину пластины dZ^{**} для случая регистрации времени прихода волн на обе стороны пластины, необходимо усреднить dZ и dZ^{*} по формуле (36):

$$dZ^{**} = \frac{1}{2}(dZ + dZ^{*}) . \qquad (36)$$

5 Апробация метода исследования свойств пластины лазерным ультразвуком с помощью полноволнового моделирования

5.1 Алюминиевая пластина

На рисунках 5.1 – 5.9 можно увидеть отражение от грани пластины групп волн, указанных в таблицах 2 и 6.

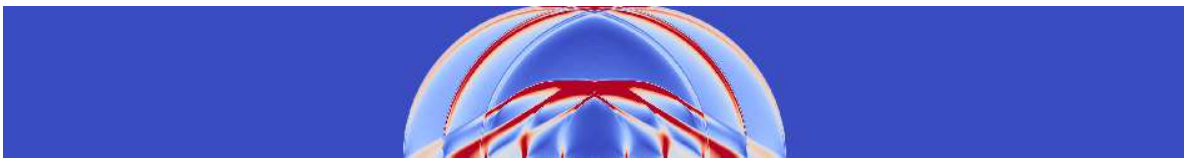

Рисунок 5.1 – Отражение P-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 160 нс

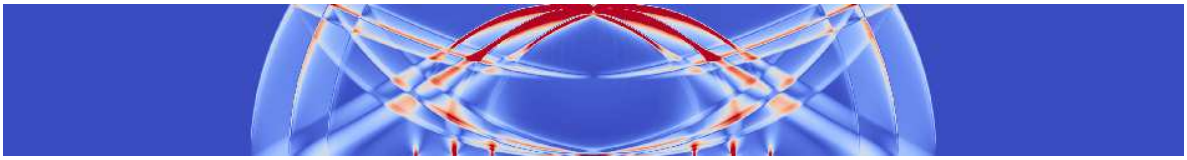

Рисунок 5.2 – Отражение 2P-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 315 нс

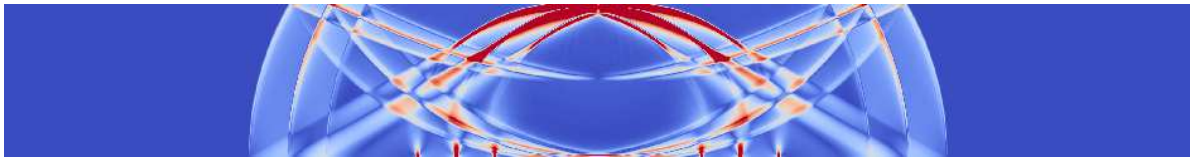

Рисунок 5.3 – Отражение S-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 323 нс

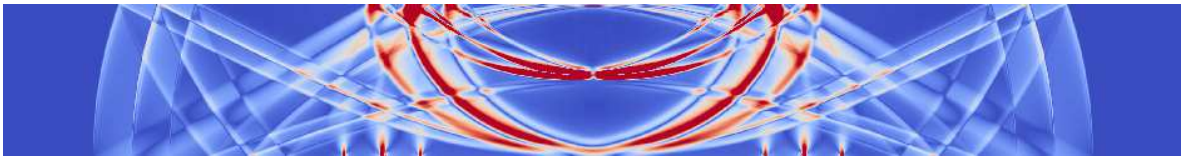

Рисунок 5.4 – Отражение 3P-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 473 нс

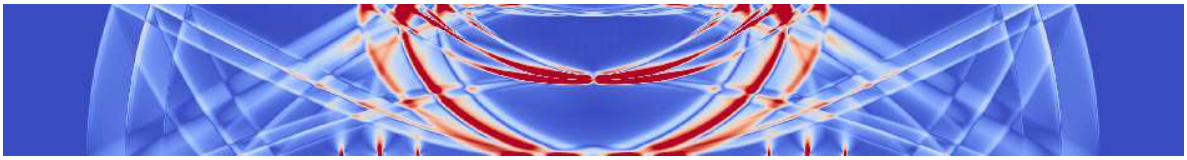

Рисунок 5.5 – Отражение PS-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 484.5 нс

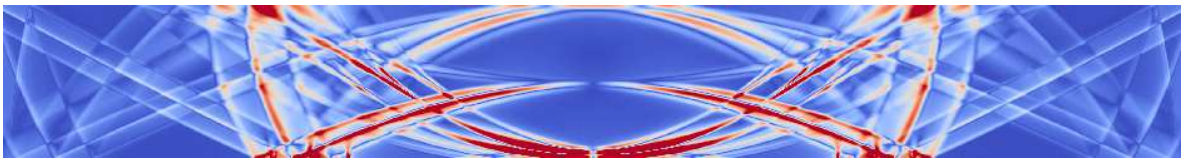

Рисунок 5.6 – Отражение 2PS-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 638.5 нс

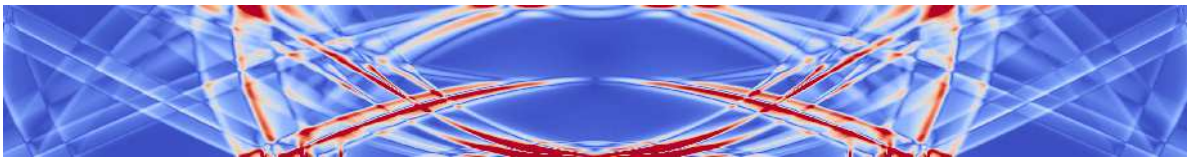

Рисунок 5.7 – Отражение 2S-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 647 нс

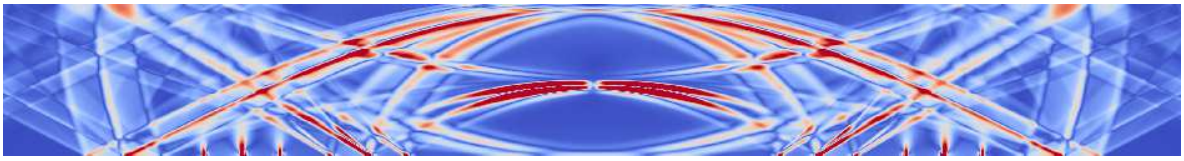

Рисунок 5.8 – Отражение 5P-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 788 нс

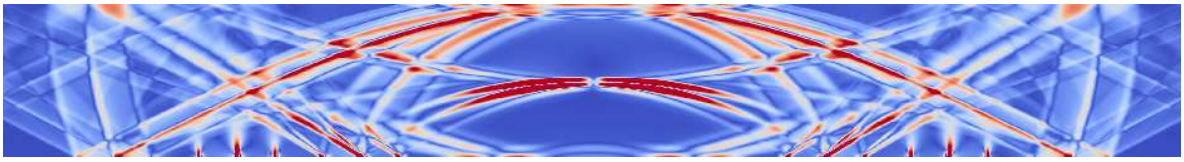

Рисунок 5.9 – Отражение 3PS-волны от грани пластины, материал «ALU», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 796 нс

5.2 Пластина «1.7»

На рисунках 5.10 – 5.21 можно увидеть отражение от грани пластины групп волн, указанных в таблицах.

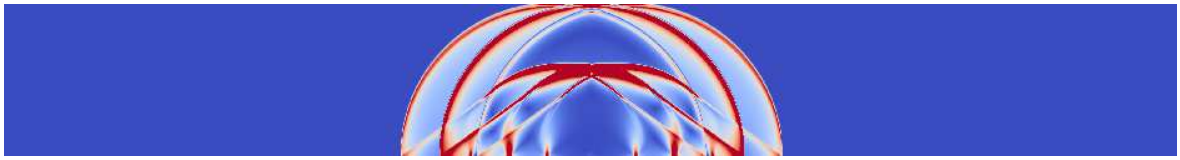

Рисунок 5.10 – Отражение P-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 156 нс

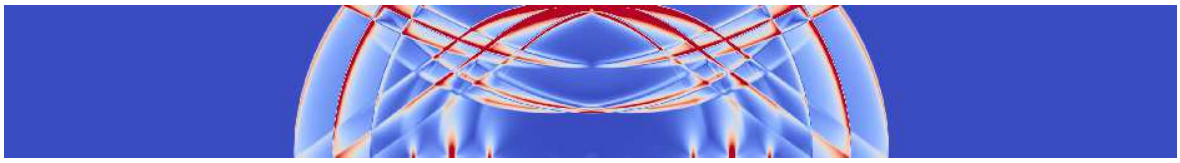

Рисунок 5.11 – Отражение S-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 257 нс

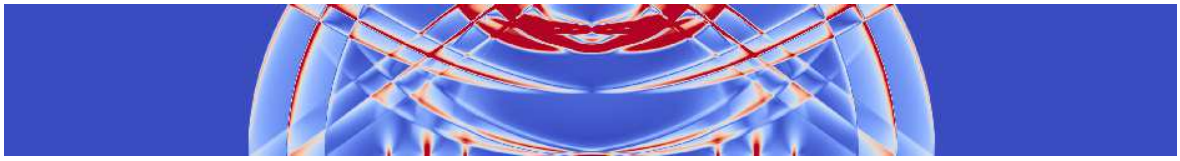

Рисунок 5.12 – Отражение 2P-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 312.5 нс

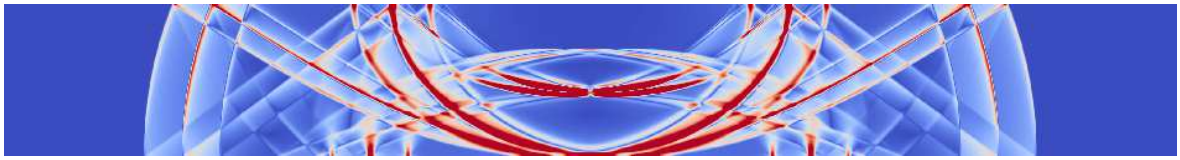

Рисунок 5.13 – Отражение PS-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 422 нс

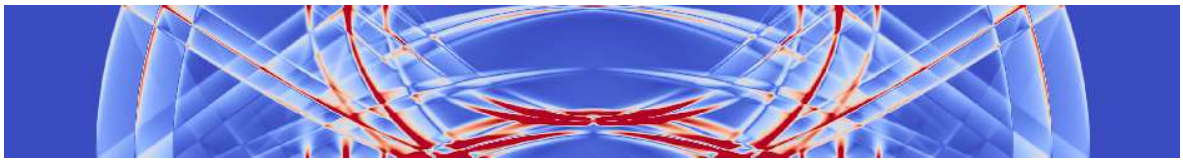

Рисунок 5.14 – Отражение 3P-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 467 нс

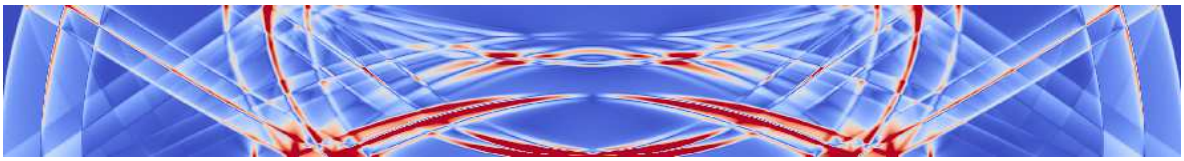

Рисунок 5.15 – Отражение 2S-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 531 нс

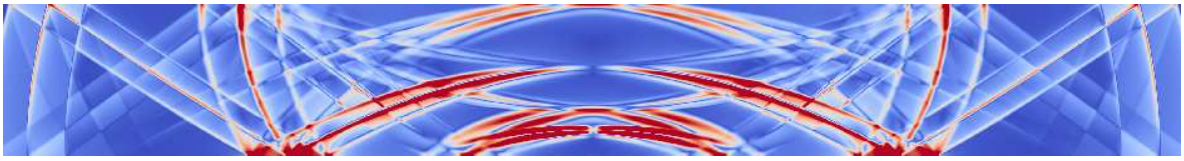

Рисунок 5.16 – Отражение 2PS-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 578 нс

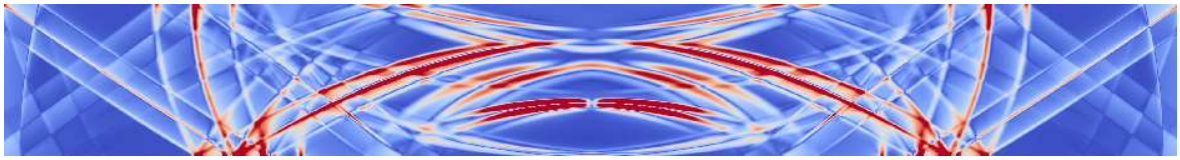

Рисунок 5.17 – Отражение 4P-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени 625 нс

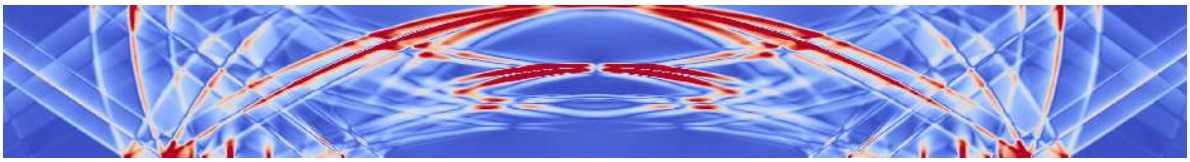

Рисунок 5.18 – Отражение P2S-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени нс

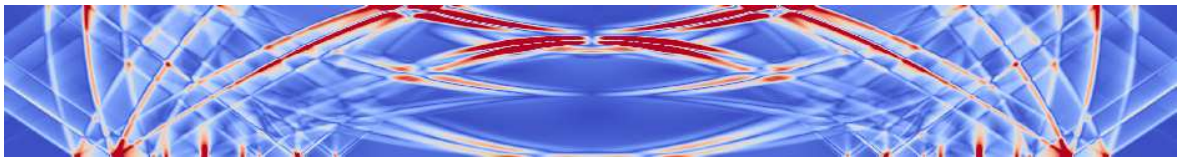

Рисунок 5.19 – Отражение 3PS-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени нс

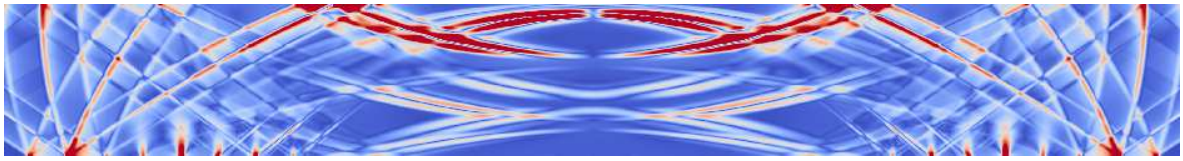

Рисунок 5.20 – Отражение 5P-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени нс

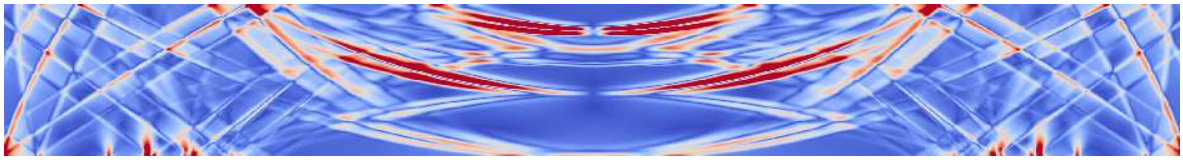

Рисунок 5.21 – Отражение 2P2S-волны от грани пластины, материал «1.7», модель расширения, лазерный импульс сверху, волновая картина в моменты времени нс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были выполнены следующие работы и сделаны следующие выводы из выполненных работ:

1) Обозначены два типа прикладных задач, решение которых найдено в данной работе и два вида материала, которые будут исследованы в данной работе. Описаны три возможные схемы регистрации времени прихода волн: либо регистрировать приход волн на одной из сторон, либо на обеих сразу. Выявлена наиболее оптимальная схема регистрации времени прихода волн на стороны пластины.

2) Приведены расчетные формулы времен регистрации различных типов и групп волн на границах пластины как для случая регистрации времени прихода волн на ту сторону пластины, на которую действует лазер, так и для случая регистрации времени прихода волн на обе стороны пластины.

3) Решена задача определения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в материале пластины с помощью регистрации кратных волн как для случая регистрации времени прихода волн на ту сторону пластины, на которую действует лазер, так и для случая регистрации времени прихода волн на обе стороны пластины. Приведены расчетные формулы.

4) Решена задача определения толщины пластины с помощью регистрации кратных волн как для случая регистрации времени прихода волн на ту сторону пластины, на которую действует лазер, так и для случая регистрации времени прихода волн на обе стороны пластины. Приведены расчетные формулы.

5) Проведена апробация метода исследования свойств пластины лазерным ультразвуком с помощью полноволнового моделирования для материала «ALU» и материала «1.7».

6) При наличии такой возможности, более точные результаты будут получены, если измерять время прихода волн на обеих сторонах пластины. В ситуации, когда скорость распространения поперечных волн и продольных волн отличается в близкое к целому число раз, важно брать в расчет только те измерения, которые не слишком близки друг к другу, потому что в таком специфическом случае таких близких по времени измерений будет намного больше. В этом случае особенно важно проводить измерения на обеих сторонах пластины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лямшев Л. М. Лазерное термооптическое возбуждение звука / Отв. ред. ВИ Ильичев; АН СССР, Акустический институт им. НН Андреева. – 1989.

2. Зацепин А. Ф. Акустический контроль // Екатеринбург. УГТУ. – 2005.

3. Болотских П. А., Травин Г. А. Лазерное возбуждение ультразвуковых колебаний. – 1997.

4. Тищенко В.Н., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Павлов А.А., Запрягаев В.И., Гулидов А.И., Бояринцев Э.Л., Кавун И.Н., Мелехов А.В., Голубев М.П., Павлов А.А., Голобокова Л.С., Мирошниченко И.Б., Шмаков А.С. Лазерный источник звука, создаваемый при облучении мишени широкоапертурным излучением // XXIV сессия Российского акустического общества, сессия Научного совета по акустике РАН. Ультразвук и ультразвуковые технологии, 2011.

5. Коваленко А. А., Грязнов А. С. К методике измерения продольной и поперечной скоростей ультразвука в листовых материалах // Вестник Бурятского государственного университета. – 2012. – №. 3.

6. Favorskaya A. V., Petrov I. B. Numerical modeling of dynamic wave effects in rock masses // Doklady Mathematics. – Pleiades Publishing, 2017. – V. 95. – №. 3. – С. 287-290.

7. Stognii, P., Petrov, D., Khokhlov, N., Favorskaya, A. Numerical modeling of influence of ice formations under seismic impacts based on grid-characteristic method // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 112. – С. 1497-1505.

8. Favorskaya A., Petrov I., Grinevskiy A. Numerical simulation of fracturing in geological medium // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 112. – С. 1216-1224.

9. Favorskaya, A. V., Petrov, I. B., Petrov, D. I., Khokhlov, N. I. Numerical modeling of wave processes in layered media in the Arctic region // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2016. – V. 8. – №. 4. – С. 348-357.

10. Petrov, D. I., Petrov, I. B., Favorskaya, A. V., Khokhlov, N. I. Numerical solution of seismic exploration problems in the Arctic region by applying the grid-characteristic method // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2016. – V. 56. – №. 6. – C. 1128-1141.

11. Favorskaya A. V., Petrov I. B. Wave responses from oil reservoirs in the Arctic shelf zone // Doklady Earth Sciences. – Pleiades Publishing, 2016. – V. 466. – №. 2. – C. 214-217.

12. Favorskaya A., Petrov I., Khokhlov N. Numerical modeling of wave processes during shelf seismic exploration // Procedia Computer Science. – 2016. – V. 96. – C. 920-929.

13. Biryukov, V. A., Muratov, M. V., Petrov, I. B., Sannikov, A. V., Favorskaya, A. V. Application of the grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes to the solution of direct problems in seismic exploration of fractured layers // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2015. – V. 55. – №. 10. – C. 1733-1742.

14. Muratov, M. V., Petrov, I. B., Sannikov, I. V., Favorskaya, A. V. Grid-characteristic method on unstructured tetrahedral meshes // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2014. – V. 54. – №. 5. – C. 837-847.

15. Petrov, I. B., Favorskaya, A. V., Muratov, M. V., Biryukov, V. A., Sannikov, A. V. Grid-characteristic method on unstructured tetrahedral grids // Doklady Mathematics. – Pleiades Publishing, 2014. – V. 90. – №. 3. – C. 781-783.

16. Petrov, I. B., Favorskaya, A. V., Vasyukov, A. V., Ermakov, A. S., Beklemysheva, K. A., Kazakov, A. O., Novikov, A. V. Numerical simulation of wave propagation in anisotropic media // Doklady Mathematics. – Pleiades Publishing, 2014. – V. 90. – №. 3. – C. 778-780.

17. Ермолов И. Н., Вопилкин А. Х., Бадалян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник) // М.: Эхо. – 2000.