

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

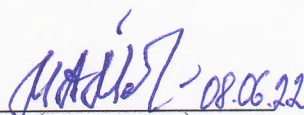
Факультет: Инженерно-физический
Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зам. зав. кафедрой
В.В. Соловьев
« 05 » 06 2022 г

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

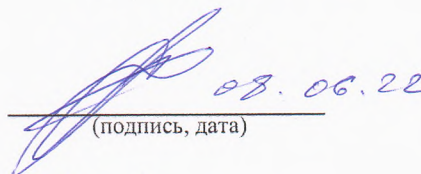
на тему: Моделирование распространения ультразвуковой волны в стали
10ХСНД при воздействии нагрузки

Исполнитель
студент группы 817-об


(подпись, дата)

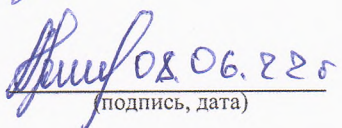
М.А. Мечковский

Руководитель
канд. техн. наук, доцент


(подпись, дата)

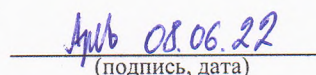
В.В. Соловьев

Консультант по БЖД:
канд. техн. наук, доцент


(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
ассистент кафедры СиТРК


(подпись, дата)

М.А. Арёвков

Благовещенск 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет: Инженерно-Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. зав. кафедрой

В. В. Соловьев

« 26 » 05 2022 г.

ЗАДАНИЕ

к выпускной квалификационной работе студента Мечковского Максима Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Моделирование распространения ультразвуковой волны в стали 10ХСНД при воздействии нагрузки

учреждена приказом от 05.04.2022 № 679-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2022г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: частота преобразователя 5 МГц, расстояние между источником и приемником ультразвуковых волн 28 мм, длина образца 400 мм, ширина 30 мм, толщина 12 мм, скорость деформации 5 мм/мин, максимальная нагрузка 94900 Н.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): использование ультразвуковой диагностики для оценки внутренних напряжений при внешней деформации, моделирование напряженно-деформированного состояния, моделирование распространения ультразвуковой волны при возникновении напряженно-деформированного состояния, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.): титульный лист, цель и задачи ВКР, блок-схема «Постановка задачи напряженно-деформированного состояния»; эквивалентные напряжения по Мизесу при различном удлинении образца, эквивалентные пластические деформации при различном удлинении образца, блок-схема «Постановка задачи ультразвукового

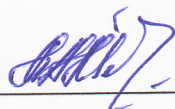
неразрушающего контроля, моделирование распространения ультразвуковой волны в стали 10ХСНД, график «Изменение скорости распространения продольной волны при переменном НДС», заключение.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): БЖД Козырь Аркадий Валентинович, доцент, канд. техн. наук.

7. Дата выдачи задания 26.05.2022г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Владислав Викторович Соловьев, доцент, канд. техн. наук.

Задание принял к исполнению (дата) 26.05.2022 г.



РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 66 с., 58 рисунков, 8 таблиц, 18 источников.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, РАСТЯЖЕНИЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, COMSOL MULTIPHYSICS, ЗАКОН ГУКА, УЛЬТРАЗВУК, МЕХАНИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА, СЕТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВОЛНА ДАВЛЕНИЯ, ОСНОВНОЕ ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ

Существует много методов неразрушающего контроля. Одним из таких является ультразвуковой контроль. Суть такого метода состоит в том, что производят исследование объекта с учетом сохранения его работоспособного состояния и целостности. Акустическому контролю предшествует анализ НДС объекта контроля. И только после этого уже создаются различного рода акустические модели, например, с целью моделирования распространения УЗ волн при воздействии какого-либо рода нагрузки. Это позволяет рассчитать разность скоростей в недеформированном и деформированном образце. Это позволяет оценить долговечность и работоспособность агрегатов (например, платформы транспортно-установочного агрегата).

Цель работы: проведение оценки напряженно-деформированного состояния образца, а также моделирование распространения ультразвуковой волны в образце при растяжении.

Задачи работы:

- смоделировать напряженно-деформированное состояние образца методом конечных элементов, вывести графики эквивалентных напряжений по Мизесу, а также графики пластических деформаций при растяжении образца;
- провести моделирование ультразвуковой волны в стали 10ХСНД с использованием ПО Comsol Multiphysics;

– рассчитать разность скоростей распространения продольной волны в недеформированном и деформированном образце, построить график зависимости изменения скорости распространения продольной волны при воздействии различной нагрузки;

– произвести расчет затрат на моделирование НДС и УЗ волны.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Использование ультразвуковой диагностики для оценки внутренних напряжений при внешней деформации	11
1.1 Общие сведения о механических нагрузках	11
1.2 Общие сведения об ультразвуке	11
1.3 Методы неразрушающего контроля для выявления деформированного состояния	15
1.4 Способы и методы моделирования НДС	17
1.4.1 Задача теории упругости	17
1.4.2 Метод конечных элементов для определения НДС	19
1.5 Моделирование распространения акустических волн методом КЭ	21
1.5.1 ПО COSMOS/M (Стержень)	21
1.5.2 ПО COSMOS/M (Пластина)	22
1.5.3 COMSOL Multiphysics	23
1.6 Выводы по главе	25
2 Моделирование напряженно-деформированного состояния	26
2.1 Постановка задачи	26
2.2 Результаты моделирования	35
2.3 Выводы по главе	39
3 Моделирование распространения ультразвуковой волны при возникновении НДС	40
3.1 Постановка задачи	40
3.2 Результаты моделирования	44
3.3 Расчет скоростей распространения продольной волны при переменном НДС	47
3.4 Выводы по главе	54

4 Требования безопасности труда	55
4.1 Оборудование, типы и способы распространения ультразвука	55
4.2 Оценка влияния ультразвуковых волн на человеческий организм	56
4.3 Стандартизация ультразвуковой волны	57
4.4 Способы контроля ультразвука	57
4.5 Средства защиты от влияния ультразвуковых волн	58
5 Экономическая часть	60
Заключение	63
Библиографический список	65

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

МКЭ – метод конечных элементов;

КЭ – конечные элементы;

УЗ – ультразвук;

ПО – программное обеспечение;

НК – неразрушающий контроль;

УИМ – универсальная испытательная машина;

НДС – напряженно-деформированное состояние.

ВВЕДЕНИЕ

Если на тело действует какая-либо из вне система нагрузок или, например, температура, то возникает группа напряжений и деформаций, которая иначе называется напряженно-деформированным состоянием.

Значительная часть способов контроля НДС конструкции базируется на тарировании прототипов, подверженных растяжению.

Для того чтобы оценить прочность, а также пластичность материала, необходимо задать его физико-механические свойства, такие как модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент Пуассона, плотность. Обычно данные характеристики либо определяют экспериментально, либо пользуются готовыми справочными данными.

Испытания на растяжение чаще всего проводят на моделях круглого или прямоугольного поперечного сечения. Лучше всего длину образца принимать большего его диаметра в 10 раз.

По обе стороны от суженной части образца находятся концевые утолщения, они необходимы для закрепления эталона в захватах машины.

Исследование на растяжение осуществляют при помощи многофункциональных разрывных машин. Такое оборудование имеет устройство, измеряющее силу, а также аппаратуру, которая производит запись диаграммы растяжения, обычно в системе координат сила – удлинение.

Испытание на растяжение сопровождается локальным сужением образца. Это возникает вследствие того, что при достижении конкретной нагрузки деформация становится неравномерной, это приводит к образованию так называемой шейки.

Если нагрузка невелика, деформация будет непостоянной во времени, и при снятии нагружения исследуемый образец приобретает первоначальные размеры и форму, то есть возникает упругая деформация.

Но с ростом нагрузки в образцах возможно накопление пластической (необратимой) деформации, которая в свою очередь может привести к разрушению модели. Такие материалы являются упругопластическими.

Испытание на растяжение является известным методом получения диаграммы деформирования.

Исследование на растяжение сопровождается контролем перемещений, то есть идет регистрация силы, и вследствие уменьшения поперечного сечения при возникновении шейки она может уменьшаться. К таким условиям предъявляются повышенные требования, так как при достижении максимальной нагрузки может произойти разрушение образца.

Далее на образец устанавливают пьезодатчики и производят расчет скоростей распространения волн при растяжении.

Цель работы: проведение оценки напряженно-деформированного образца, а также моделирование распространения ультразвуковой волны в образце при растяжении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- смоделировать напряженно-деформированное состояние образца методом конечных элементов, вывести графики эквивалентных напряжений по Мизесу, а также графики пластических деформаций при растяжении образца;
- провести моделирование ультразвуковой волны в стали 10ХСНД с использованием ПО Comsol Multiphysics;
- рассчитать разность скоростей в недеформированном и деформированном образце, построить график зависимости изменения скорости распространения продольной волны при воздействии различной нагрузки;
- произвести расчет затрат на моделирование НДС и УЗ волны.

1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВНЕШНЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1 Общие сведения о механических нагрузках

Под механической нагрузкой следует понимать какое-либо влияние извне, которое, в свою очередь, приводит к возникновению напряжений и деформаций в материалах.

Нагрузки могут быть статические, то есть неизменяющиеся во времени, и динамические, которые быстро меняются с течением времени. В случае статических нагрузок мы можем не брать во внимания ускорения узлов конструкции, которые возникают при действии такого рода нагрузок. Однако при действии динамических нагрузок уже не представляется возможным пренебрегать такими ускорениями, возникают колебания в конструкциях [10].

Нагрузки могут действовать непрерывно и прерывно. Хороший пример первых – это собственный вес сооружений. Временные же нагрузки действуют с определенной периодичностью. Пример – нагрузка вдоль конструкции от силы тяги.

Нагрузки могут действовать дискретно и распределенно.

Если нагрузка прикладывается локально, то есть площадь приложения несоизмерима с размерами конструкции, то имеют место быть дискретные нагрузки [10].

Но если же происходит равномерное воздействие, то нагрузка будет уже распределенной по поверхности тела [10].

1.2 Общие сведения об ультразвуке

Человек способен воспринимать звуки частотой до 16 кГц. Однако механические колебания, имеющие большую частоту (обычно от 20 кГц), выходят за пределы диапазона слышимости. Это и есть ультразвук (рисунок 1.1) [11].



Рисунок 1.1 – Частота ультразвука

Аналогично слышимому звуку, ультразвук есть упругая волна. Но волны света могут распространяться в вакууме, а ультразвуку необходима твердая, жидкая либо газообразная среда [11].

Основные параметры ультразвука: длина волны, период и частота (рисунок 1.2).

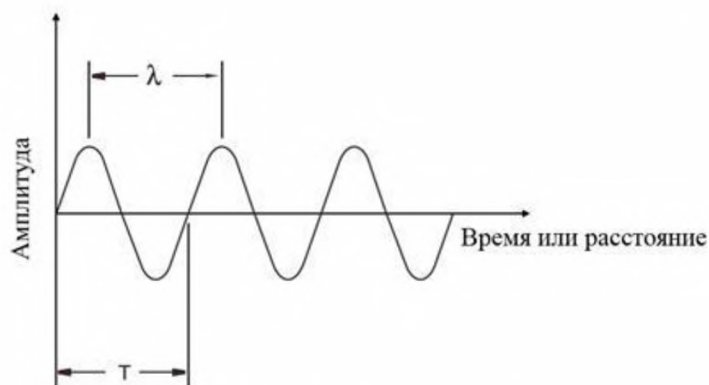


Рисунок 1.2 – Параметры УЗ волны

Период – это время, которое необходимо для совершения одного полного колебания (измеряется в секундах).

Частота – это число циклов за одну секунду (измеряется в Гц).

Длина волны λ есть отношение скорости волны к частоте:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{1.1}$$

где c – скорость звука;

f – частота.

Скорость продольной волны c_l можно оценить по следующему соотношению:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (1.2)$$

где E – модуль упругости, Па;

μ – это коэффициент Пуассона;

ρ – плотность среды, кг/м³;

Скорость поперечной волны c_t :

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (1.3)$$

где G – модуль сдвига, Па.

При акустическом анализе важны колебания импульсов. Они являются конечными, то есть имеют порог по времени. Амплитуда колебаний импульсов будет превышать фиксированное значение. Огибающая является характеристикой изменения амплитуды (рисунок 1.3) [11].

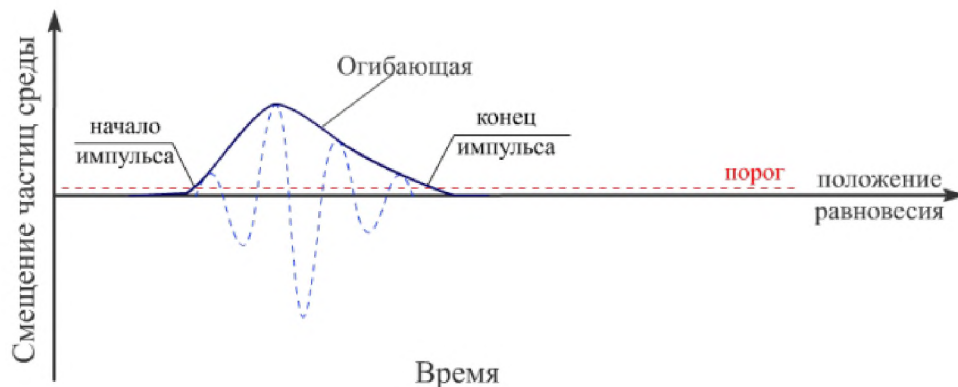


Рисунок 1.3 – Импульсные колебания

В среде распространяются следующие типы волн: продольные, поперечные (сдвиговые), поверхностные, крутильные и нормальные волны. Каждая из них будет иметь собственное направление распространения и свою скорость.

Если колебание частиц будет иметь то же направление, что распространение волны, то она будет являться продольной. Такие волны распространяются в твердых жидких и газообразных телах (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Продольная волна

Но если колебания частиц будут распространяться нормально к направлению волны, то имеет место быть сдвиговая (поперечная) волна (рисунок 1.5). Такие уже не будут распространяться в газообразных телах.



Рисунок 1.5 – Сдвиговая волна

Если частицы движутся по эллиптическим линиям, то возникают волны Релея. Их можно создать на свободной поверхности тела (рисунок 1.6).

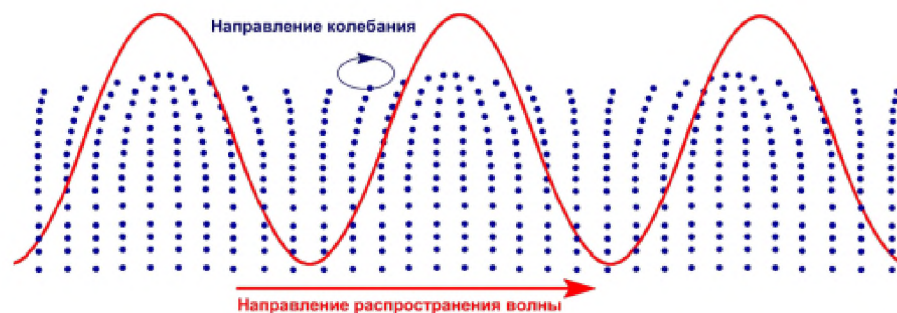


Рисунок 1.6 – Волна Релея

Нормальные волны (волны Лэмба) возбуждаются в оболочках (пластины, например), то есть толщина таких тел мала по сравнению с другими размерами.

Крутильные волны используются при прозвучивании объектов, имеющих протяженность [7].

1.3 Методы неразрушающего контроля для выявления деформированного состояния

Для того чтобы правильно оценить состояние металлических конструкций, исследовать их НДС, осуществляется неразрушающий контроль при помощи технических средств, которые базируются на различных методах.

Методы определения внутренних напряжений могут быть разделены на 2 большие группы: аналитические и экспериментальные [1].

Современные ЭВМ дают возможность смоделировать напряженно-деформированное состояние, возникающее в конструкциях. Однако нельзя недооценивать роль экспериментальных методов для оценки внутренних напряжений. Обосновано это тем, что аналитические методы построены на применении определенных допущений, ведь происходит всего лишь идеализация реальных условий. И если, например, неправильно задать граничные условия, либо нагрузки, то это приведет к существенному расхождению при анализе НДС. Зачастую вообще не удастся теоретически произвести такой расчет. Вследствие этого экспериментальные методы довольно актуальны, они помогают произвести адекватную оценку реального нагруженного состояния [13].

К основным методам НК для выявления деформированного состояния можно отнести оптические, магнитные, рентгеновские методы контроля, тензометрию, а также акустические (ультразвуковые) методы [1].

Но наибольшее применение нашли именно ультразвуковые методы, так как УЗ колебания имеют относительно высокую проникающую способность, что не характерно, например, для магнитных и рентгеновских методов.

В основу контроля НДС ультразвуковым методом положена зависимость скорости УЗ волн от механических напряжений. Такие методы НК необходимы для анализа физико-механических свойств материалов [1].

Имеет место быть соотношение изменения скорости УЗ волны Δv от механической нагрузки:

$$\Delta v / v = \gamma \sigma, \quad (1.4)$$

где γ – постоянная акустической упругости.

Ультразвуковые методы получили широкое распространение благодаря хорошей проникаемости акустических колебаний. С помощью таких методов можно дать оценку не только напряжениям, возникающим на поверхности материала, но и внутренним.

Наибольшее распространение получил метод акустоупругости. Он основан на исследовании закономерностей распространения упругих волн в предварительно напряженных телах.

Поверхностные УЗ волны (волны Релея) дают возможность провести оценку НДС на поверхностном слое материала. Применение объемных волн позволяет измерить напряжения не только на свободной поверхности материала, но и внутри [8].

Изменение скоростей распространения УЗ волн связано с тем, что меняются свойства материала, подверженного различным методам нагружения (растяжение, сжатие, изгиб и т.п.). То есть происходит изменение значений модуля упругости, коэффициента Пуассона, а также плотности материала.

Внешние нагрузки являются причиной появления анизотропии [13].

В таких материалах поперечная волна будет разделяться на две, то есть имеет место быть эффект двойного лучепреломления. Такие волны будут иметь различные скорости, а значит, будет возникать разность фаз, которая и дает возможность определить напряжения [1].

Разность скоростей поперечных волн будет пропорциональна разности главных напряжений.

Пятиконстантная теория упругости в математическом виде дает возможность определить связь скоростей УЗ волн и напряжений.

Например, для сжатия материала связь объемных волн и напряжений может быть представлена в виде следующего уравнения:

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} - 1 = 2 \left(\frac{v_1^2}{v_2^2} - 1 \right) = \frac{1}{3E} \left(\lambda + 2\mu + m + \frac{\lambda n}{\mu 4} \right) \sigma = 2k\sigma, \quad (1.5)$$

где v_1 и v_2 – это скорости поперечных волн, которые поляризованы соответственно вдоль и поперек действия напряжений;

λ – длина волны;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга;

m, n – модули нелинейной упругости;

k – некоторая постоянная.

Основное преимущество метода акустической упругости заключается в том, что он применим для использования в любых конструкционных материалах [1].

1.4 Способы и методы моделирования НДС

1.4.1 Задача теории упругости

Для того чтобы определить НДС, применяется краевая задача механики деформируемого тела. Она включает в себя уравнение Навье (уравнение равно-

веса), уравнения Коши (взаимосвязь перемещений и деформаций), уравнения деформаций Сен – Венана для конкретных краевых условий.

– уравнения равновесия Навье:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0, \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0. \quad (1.8)$$

– уравнения Коши:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \varepsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}, \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right), \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right), \varepsilon_{31} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right). \quad (1.10)$$

– уравнения совместности деформаций Сен-Венана:

$$\begin{aligned}
2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2}, \\
2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{13}}{\partial x_1 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_1^2}, \\
2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{23}}{\partial x_2 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_2^2}, \\
\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2 \partial x_3} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{13}}{\partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} \right), \\
\frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1 \partial x_3} &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} \right), \\
\frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} + \frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{13}}{\partial x_2} \right).
\end{aligned}$$

Рисунок 1.7 – Совместность деформаций [6]

где σ_i, τ_{ij} – компоненты тензора напряжений (нормальные и касательные напряжения);

X, Y, Z – проекции компонента вектора поверхностных сил на соответствующие оси;

ε_{ij} – тензор деформаций;

u_i – тензора перемещений.

Существует 2 задачи теории упругости.

Плоская задача теории упругости обычно делится на 2 типа: плоское напряженное состояние, плоское деформированное состояние.

Плоское деформированное состояние используется для определения НДС толстых пластин. В этом случае образец зажат двумя пластинами, а значит, накладывается ограничение на перемещение вдоль оси z . Это означает, что деформации будут нулевыми.

Плоское напряженное состояние позволяет определить НДС тонких пластин (толщина стремится к нулю). Поэтому здесь компоненты тензора напряжений которые имеют связь с осью z – нулевые.

1.4.2 Метод конечных элементов для определения НДС

Существует большое количество методов для численного анализа краевых задач. Так, для определения НДС можно использовать метод Ритца, Бубнова – Галеркина, метод конечных разностей, метод граничных элементов. Однако одним из основных и часто используемых методов является МКЭ [9].

Основоположниками данного метода являются Александр Хренников и Рихард Курант.

Мы имеем реальную конструкцию. С помощью МКЭ она подлежит замене на некую модель. В этом аспекте данный метод ничем не отличается от других.

Суть МКЭ заключается в том, что какая-либо непрерывная величина (температура, например) подлежит аппроксимации целочисленной моделью. Причем создание такой модели происходит с помощью кусочных непрерывных функций, которые являются определенными на конечном числе подобластей. Сам этап, в процессе которого осуществляется разбиение на конечные элементы, называется дискретизацией (рисунок 1.8) [5].

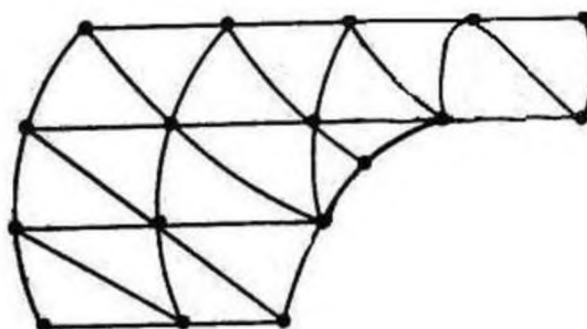


Рисунок 1.8 – Разбиение двухмерной области на конечные элементы

Решение задачи МКЭ состоит из следующих этапов (рисунок 1.9):

- 1) определяют параметры;
- 2) задают геометрию модели;
- 3) определяют свойства материалов;
- 4) задают граничные условия;
- 5) подбирают сетку;

- б) задают шаг по времени (при необходимости);
- 7) запускают исследование и проводят анализ результатов.

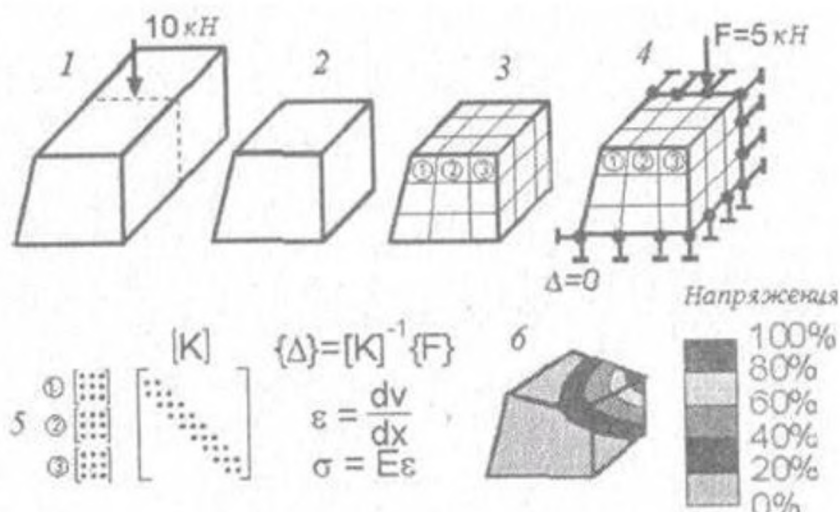


Рисунок 1.9 – Этапы реализации МКЭ [9]

1.5 Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов

Сходимость задачи напрямую зависит от шага времени Δt . При его уменьшении увеличивается точность результатов. Если шаг увеличивать, будет соответственно расти погрешность. Но с другой стороны уменьшение шага приводит к увеличению времени решения задачи. Поэтому важно провести оптимизацию шага по времени.

Посмотрим как происходит моделирование упругих волн в различных пакетах прикладных программ.

1.5.1 ПО COSMOS/M (Стержень)

Создана модель – стержень, имеющий длину 5 м. Балочные двухузловые элементы позволяют провести моделирование такого стержня. Нижняя грань стержня закреплена и не перемещается вдоль оси y . Концы стержня испытывают воздействие импульсов. Рассмотрим рисунок 1.10.

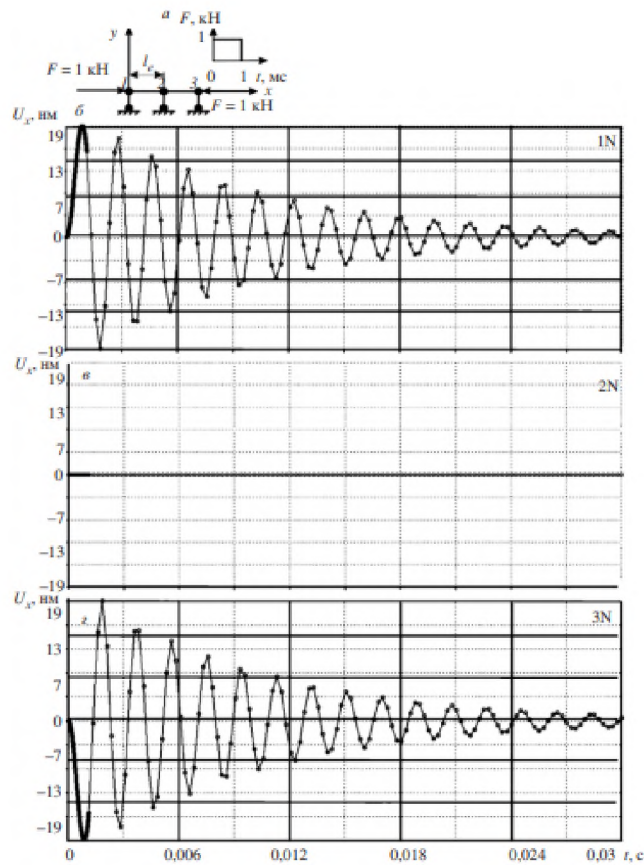


Рисунок 1.10 – результаты, где а – краевое условие;
 б – узел 1 (перемещения), в – узел 2 (перемещения), г – узел 3 (перемещения) [4]

Узлы 1-3 демонстрируют то, что характер перемещений хаотичный. Видно, в середине такого стержня колебания сложились. На концах стержня наблюдается антифаза колебаний.

1.5.2 ПО COSMOS/M (Пластина)

Имеем плоскую модель тела. Рассматривается несколько промежутков времени. На нижнюю границу положено ограничение на перемещения. Вертикальные грани испытывают распределенную нагрузку величиной 10Н.

Импульс имеет длительность 10^{-3} с, его форма изображена на рисунке 1.11.

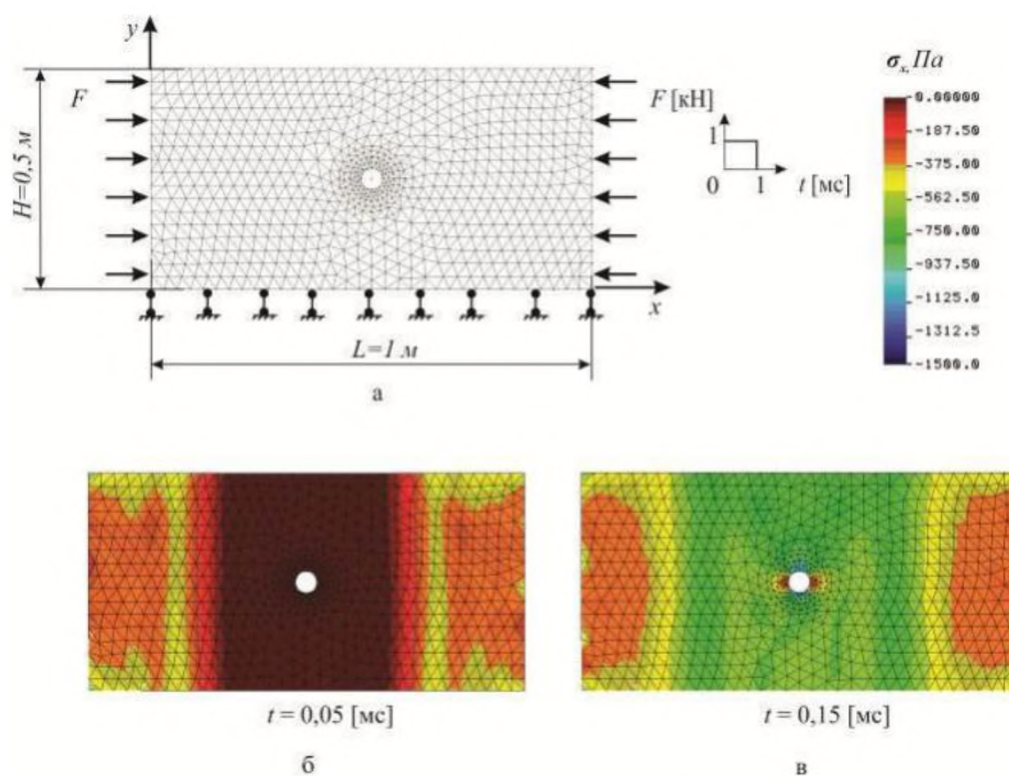


Рисунок 1.11 – результаты, где а – пластина, б – форма волны через время 0,06 мс после приложения нагрузки, в – форма волны через время 0,20 мс после приложения нагрузки [4]

На рисунке 1.11 изображены напряжения σ_x в различные моменты времени. Рисунок 1.11б – импульс проходит четверть пластины. Рисунок 1.11в – волна проходит уже 75% пластины, при этом возле отверстия наблюдается сосредоточение напряжений. Волны складываются в середине пластины.

1.5.3 COMSOL Multiphysics

Программа Comsol Multiphysics – это интегрированная среда для численного моделирования мультифизических задач. С помощью данной программы пользователь может моделировать самые разные физические процессы с учетом их взаимного влияния, то есть используются инструменты для решения междисциплинарных задач. В Comsol можно моделировать процессы механики, гидрогазодинамики, электромагнитные явления, химические реакции, теплообмен, акустику и т.п., причем моделировать эти процессы можно в рамках одной

вычислительной задачи с учетом взаимосвязи между величинами, входящими в разные уравнения математической модели.

Для решения сложных междисциплинарных задач приходится использовать, как правило, несколько различных пакетов для моделирования. Но пакет Comsol Multiphysics позволяет решать весь комплекс задач в единой среде.

Иногда возникает случай, когда необходимое граничное условие или уравнение еще не встроено в пакет. Здесь уместно отметить еще одно преимущество данной программы – Comsol позволяет пользователю добавлять в модель собственные дифференциальные уравнения (общие или в ЧП) и решать их, таким образом еще больше расширяется область применения ПО.

Для решения задачи механики используется интерфейс Solid Mechanics. Непосредственный расчет модели проводится во временном модуле Time Dependent. Задают шаг по времени. И чем меньше этот шаг, тем дольше будет идти расчет и потребуется больше памяти ЭВМ.

Синусоида определяет форму импульса:

$$F(t) = A_0 \sin(2\pi ft + \frac{\pi}{2}) \quad (1.11)$$

где A_0 – амплитуда сигнала;

f – частота источника.

Статья [4] демонстрирует моделирование для образца с размерами 150×150 мм, выполненного из стали ($E=210$ ГПа, $\mu = 0,30$, $\rho = 7850$ кг/м³). Показаны результаты распространения волны в момент времени 1,8 мкс. Частота излучателя составляет 5 МГц (рисунок 1.12).

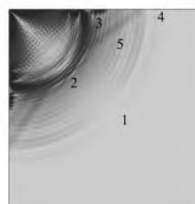


Рисунок 1.12 – Точечный источник, генерирующий волну [5]

Выделяются следующие типы волн: продольные (5678 м/с) и сдвиговые (3425 м/с). На свободной поверхности материала образуются волны Релея (3325 м/с). Было построено акустическое поле, по которому считались как раз скорости распространения ультразвуковых волн.

1.6 Выводы по главе

Таким образом, наибольшее распространение для диагностики НДС получили ультразвуковые методы в силу хорошей проникаемости упругих колебаний. Из всех ультразвуковых методов диагностики наибольшее распространение получил метод акустоупругости, так как он позволяет измерить напряжения не только внутри материала, но и на его свободной поверхности.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

2.1 Постановка задачи

Образец имеет длину 400 мм, причем его ширина неравномерна по всей длине, длина суженной части составляет 180 мм, ей соответствует ширина 15,2 мм, концевые утолщения, необходимые для захвата УИМ, имеют длины 110 мм шириной 30 мм. Толщина образца по всей длине составляет 12 мм. Образец растягивают с помощью разрывной машины, удлинению подлежит суженная часть образца, оставшаяся левая часть жестко закреплена, а к правой части прикладывается нагрузка, имеющая максимальное значение $P_{max} = 94900$ Н. Образец растягивают на 18 мм. Скорость деформации образца составляет 5 мм/мин. Материал образца – сталь 10ХСНД.

Рассчитаем площадь поперечного сечения F (a, b – поперечные размеры):

$$F = a \cdot b = 15,2 \text{ мм} \cdot 12 \text{ мм} = 182 \text{ мм}^2. \quad (2.1)$$

Запишем закон Гука при растяжении:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.2)$$

где E – модуль упругости [14].

На основании этого закона мы и будем моделировать процесс растяжения материала.

Откроем новый файл в Comsol Multiphysics. Перейдем в мастер построения моделей Model Wizard. Решать задачу будем в двумерной постановке, но с учетом толщины образца, поэтому выбираем соответствующую размерность 2D. Далее выберем физический интерфейс Solid Mechanics (solid), так как задача из области механики твердого деформируемого тела. Будем использовать

стационарное исследование, то есть задачу будем решать перебором параметра delta. Поэтому выбираем модуль Stationary.

Обозначим параметры, необходимые для создания геометрии образца, для задания свойств материала, а также параметр delta, который будет определять приращение длины растяжения образца (рисунок 2.1).

Name	Expression	Value	Description
sigma0	390[MPa]	3.9E8 Pa	Initial yield stress
sigmaSF	500[MPa]	5E8 Pa	Saturation flow stress
H	450[MPa]	4.5E8 Pa	Linear hardening coeffici...
zeta	16.93	16.93	Saturation exponent
delta	0[m]	0 m	Top displacement
W	20[mm]	0.02 m	Wedge width
L	16[mm]	0.016 m	Wedge lateral side length
D	14[mm]	0.014 m	Transducer diameter
W_ts	180[mm]	0.18 m	Test sample width
H_ts	15.2[mm]	0.0152 m	Test sample height
Depth	12[mm]	0.012 m	

Рисунок 2.1 – Задание параметров

Построение выполним в двумерной постановке, но учтем толщину образца (рисунок 2.2).

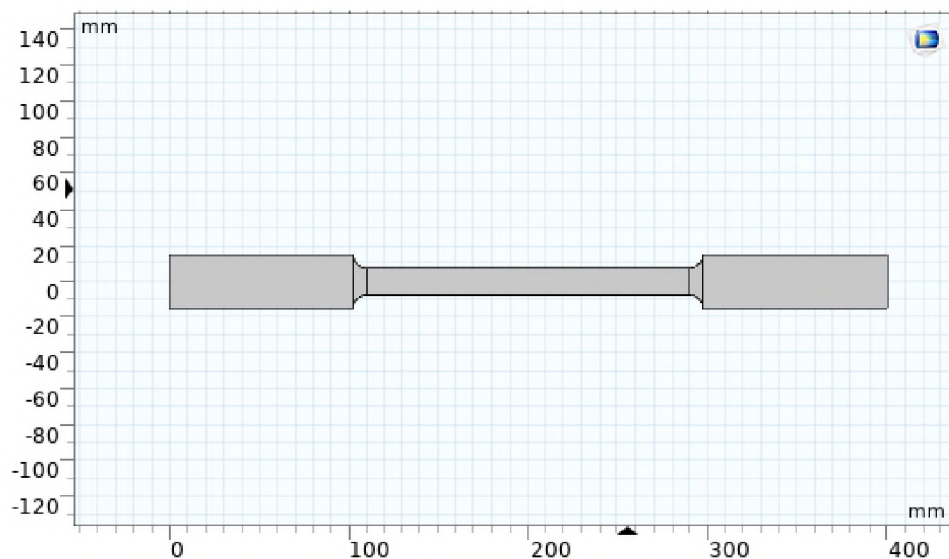


Рисунок 2.2 – 2D модель

Трёхмерная модель представлена на рисунке 2.3.

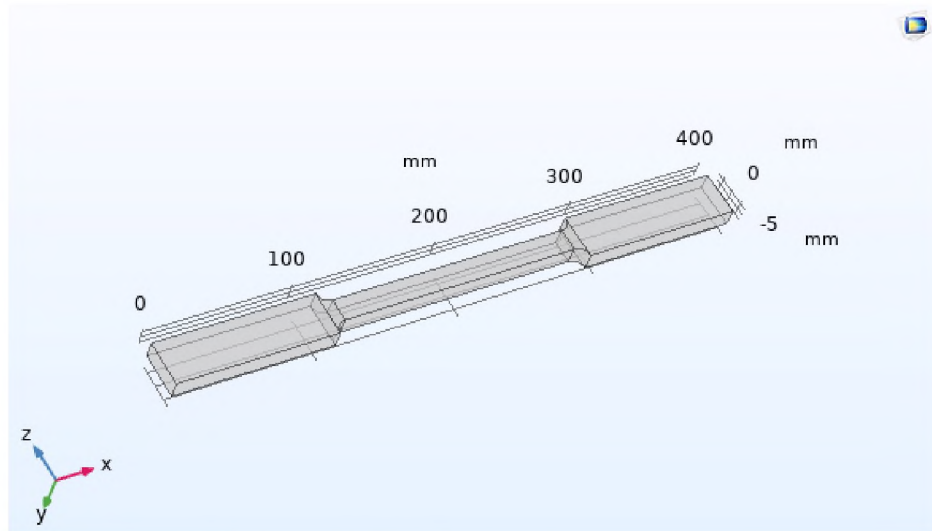


Рисунок 2.3 – Трехмерная модель

Основные физико-механические характеристики для стали 10ХСНД приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Основные физико-механические характеристики стали 10ХСНД

Модуль упругости E, ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность ρ , кг/м ³
197	0,25	7850

В программе Comsol Multiphysics в библиотеке нет стали 10ХСНД. Поэтому зададим свойства материала в данном пакете самостоятельно. Для этого во вкладке Materials выберем узел Blank Material. Далее согласно таблице 1 введем значения параметров, такие как плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона (рисунок 2.4).

<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	7850[kg...	kg/m ³
<input checked="" type="checkbox"/>	Young's modulus	E	197e9[Pa]	Pa
<input checked="" type="checkbox"/>	Poisson's ratio	nu	0.25	1

Рисунок 2.4 – Задание свойств стали 10ХСНД в программе Comsol

Также создадим узел Elastoplastic material model. В нем мы укажем предел текучести стали 10ХСНД – 390 МПа.

Перейдем непосредственно к выбору граничных условий, то есть настроим интерфейс Solid Mechanics.

Используется уравнение Навье для определения НДС:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \sigma + F, \quad (2.3)$$

где σ – механическое напряжение;

F – сторонние силы;

u – вектор смещения;

ρ – плотность среды.

Настроим узел Linear Elastic Material. Он добавляет уравнения для линейного упругого твердого тела и интерфейс для определения свойств упругого материала. В программе по умолчанию выбирается глобальная система координат. Система координат используется для интерпретации направлений ортотропных и анизотропных данных о материалах, а также когда напряжения или деформации представлены в локальной системе. Выберем изотропную модель твердого тела, то есть материал обладает одинаковыми свойствами во всех направлениях.

Добавим узел Plasticity, чтобы учесть нелинейность задачи. Выберем большие пластические деформации. Также аналитически зададим кривую, определяющую свойства материала (рисунок 2.5).

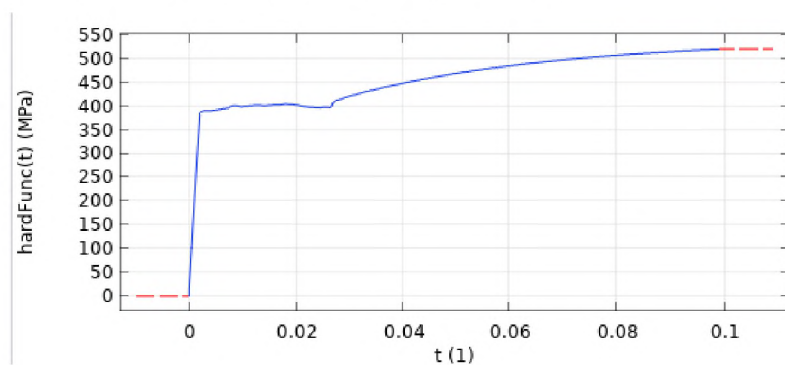


Рисунок 2.5 – Кривая деформации

Узел Initial Values добавляет начальные значения для поля смещения и поля структурных скоростей, которые могут служить начальным условием для моделирования переходного процесса или в качестве начального предположения для нелинейного анализа.

Введем выражения для начальных значений поля смещения поля скорости конструкции (рисунок 2.6).

u	0	X	m
	0	Y	
Structural velocity field:			
$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$	0	X	m/s
	0	Y	

Рисунок 2.6 – Задание начальных условий смещения и скоростей

Узел Prescribed Displacement добавляет условие, при котором смещения предписываются в одном или нескольких направлениях геометрическому объекту (области, границе, краю или точке).

Зададим условие закрепления левой части образца (рисунок 2.7).

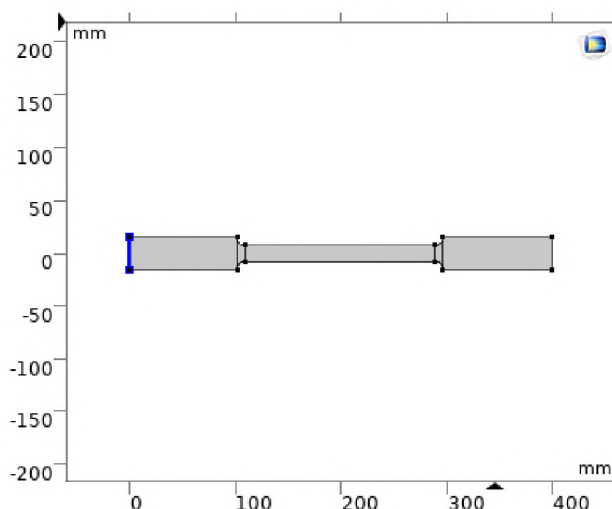


Рисунок 2.7 – Жесткое закрепление

Зададим условие перемещения суженной части образца (рисунок 2.8).

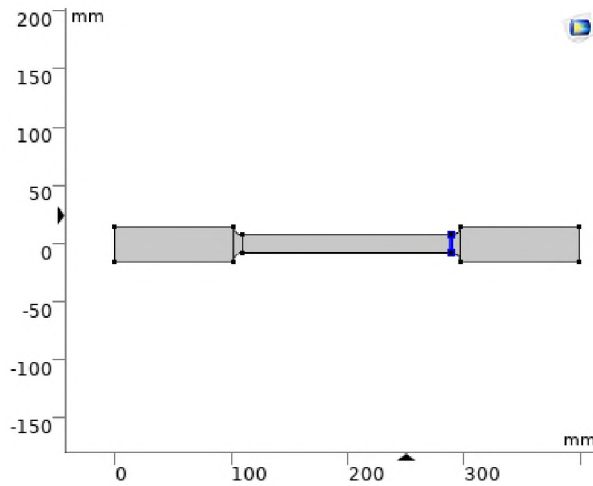


Рисунок 2.8 – Свободное перемещение

Также в этом узле с помощью опции Thickness учтем толщину образца.

Построение сетки является довольно важным элементом в процессе моделирования. Дело в том, что сетка определяет затраты на вычисление процесса, а также отвечает за точность расчетов и сходимость задачи. Поэтому имеет смысл осуществить выбор наиболее подходящего типа и размера конечных элементов.

В пакете Comsol имеется 4 конечных элемента: тетраэдр, гексаэдр (он же параллелепипед), призма, а также пирамида (рисунок 2.9).

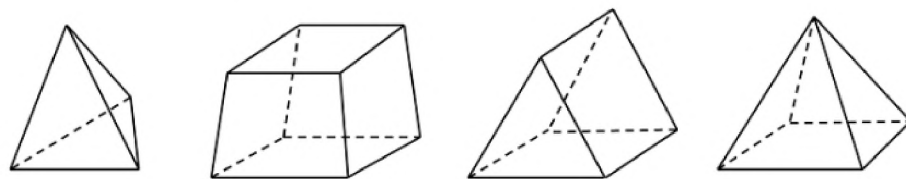


Рисунок 2.9 – Типы конечных элементов в пакете Comsol

Основной элемент, который используется при построении сетки – это тетраэдр (он же симплекс). Сетка из тетраэдров имеет большое преимущество: любое тело, которое имеет трехмерную размерность, можно разбить на конечные симплексы, независимо от профиля и конфигурации этого тела. Также можно отметить, что лишь тетраэдры могут быть использованы для сгущения адаптивной сетки.

Пирамиды как конечные элементы нашли меньшее применение, они используются только при формировании переходной сетки между шестигранными и четырехгранными элементами, то есть между тетраэдром и кубом.

Гексаэдры (кубы) следует применять, если они на самом деле нужны. Весомая причина, почему следует использовать такие элементы – это хорошая возможность уменьшить число элементов в самой сетке.

Но на сходимость задачи влияет не только форма элементов. Также большую роль играет число и размеры используемого элемента, их распределение по геометрии модели.

В программе Comsol при помощи операции Mapped можно разбивать поверхность на конечные элементы. С помощью функции Distribution можно указать количество элементов.

В качестве КЭ для концевых утолщений будем использовать симплексы (рисунок 2.10).

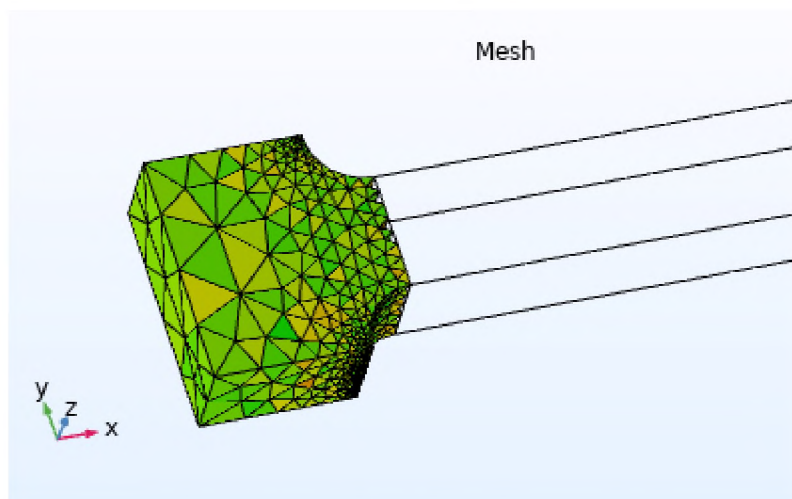


Рисунок 2.10 – Построение тетраэдров

Для суженной части (которая подлежит растяжению) в качестве КЭ будем использовать кубы (рисунок 2.11).

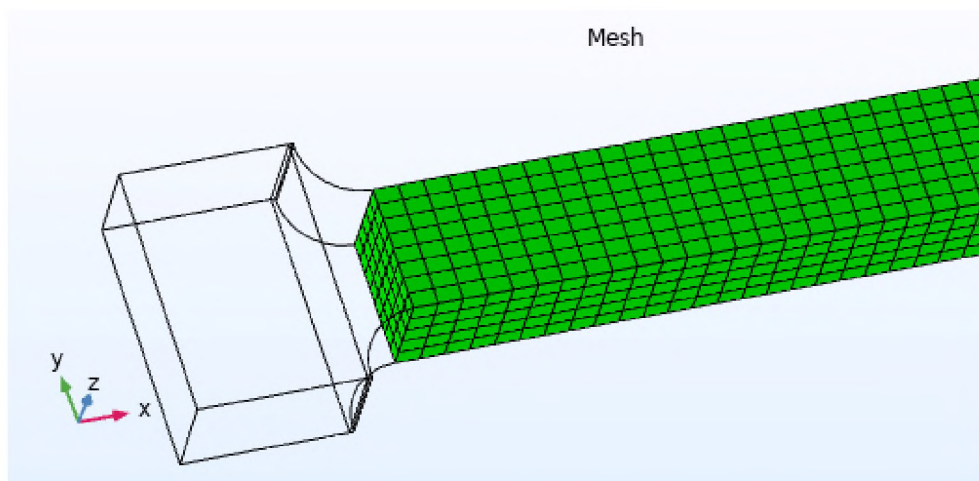


Рисунок 2.11 – Построение гексаэдров

В качестве переходных элементов будем использовать пирамиды (рисунок 2.12).

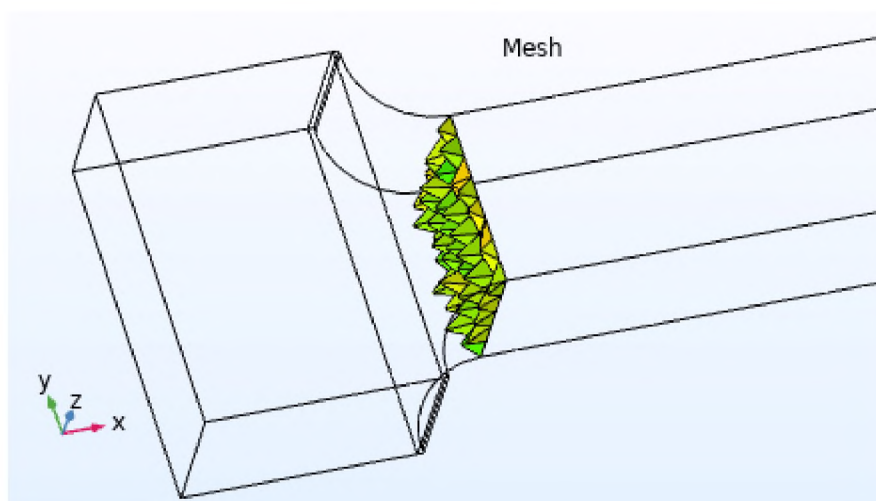


Рисунок 2.12 – Построение пирамид

Конечный вид сетки для всей геометрии модели представлен на рисунке 2.13.

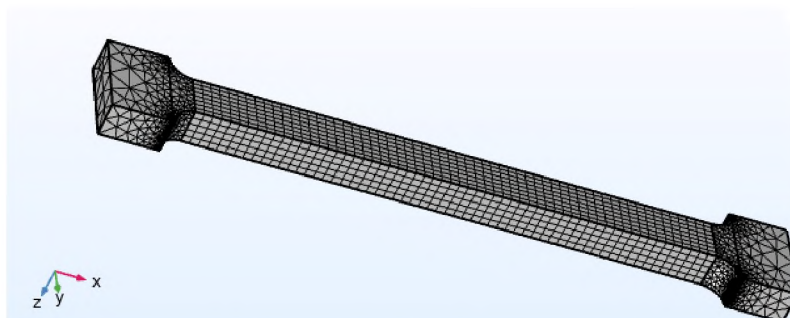


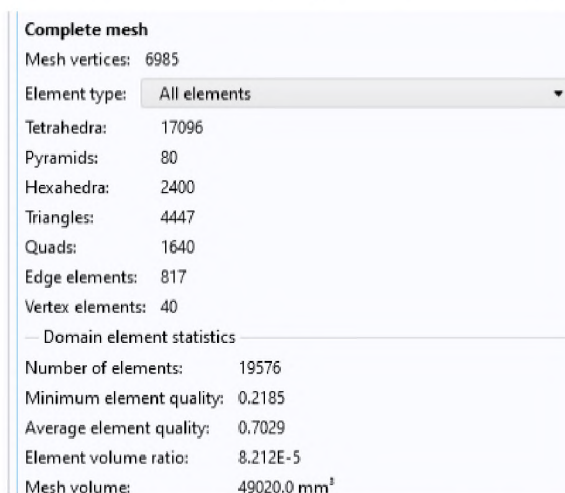
Рисунок 2.13 – Сетка

Важно отметить, что качество построенной сетки в большой степени определяет корректность результатов. Поэтому проведем оценку качества сетки.

Качество конечных элементов измеряется в диапазоне от нуля до единицы. Причем 1 – это максимальный регулярный качественный элемент, 0 – это дегенеративный резко вытянутый элемент.

В среде Comsol Multiphysics имеется возможность вывести гистограмму распределения качества. Из нее можно получить минимальное и среднее значение качества. В трехмерных задачах необходимо стремиться, чтобы минимальное качество было более 10%, а среднее качество – более 50%.

Построим такую гистограмму для созданной сетки (рисунок 2.14). Для этого правой кнопкой мыши щелкнем по узлу Mesh и выберем раздел Statistics.



Complete mesh	
Mesh vertices:	6985
Element type:	All elements
Tetrahedra:	17096
Pyramids:	80
Hexahedra:	2400
Triangles:	4447
Quads:	1640
Edge elements:	817
Vertex elements:	40
— Domain element statistics —	
Number of elements:	19576
Minimum element quality:	0.2185
Average element quality:	0.7029
Element volume ratio:	8.212E-5
Mesh volume:	49020.0 mm ³

Рисунок 2.14 – Гистограмма качества сетки

Можно увидеть, что гистограмма распределения качества, представленная на рисунке, отображает также количество конечных элементов. Так, тетраэдров 17096, пирамид 80, кубов 2400. Также отображается общее число всех элементов. Среднее качество сетки составило 70,29%.

Качество элементов в используемом пакете также можно визуализировать непосредственно на самой геометрии модели (рисунок 2.15).

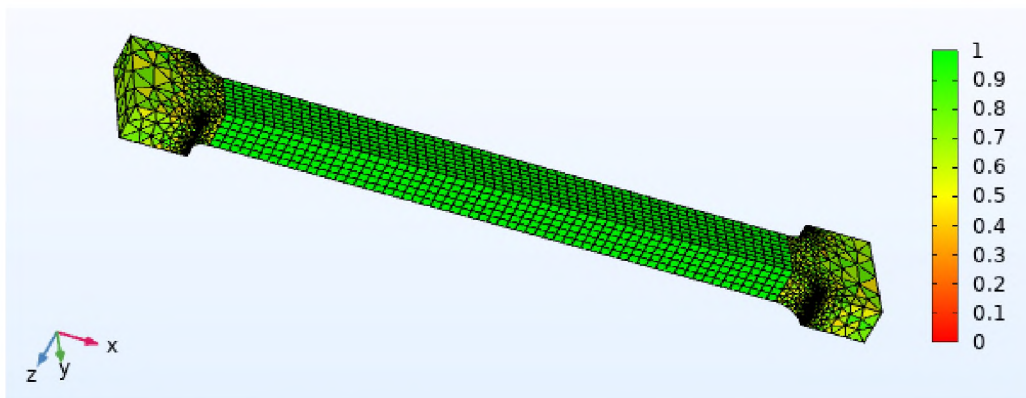


Рисунок 2.15 – Визуализация качества сетки

Перейдем к настройке исследования. Будем варьировать параметр delta. Удлиним образец на 18 мм. Шаг зададим 0,1 мм (рисунок 2.16).

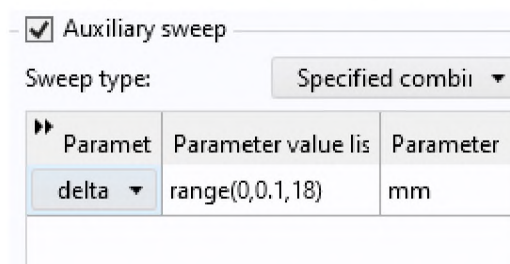


Рисунок 2.16 – Настройка исследования

Запустим исследование с помощью команды Compute.

2.2 Результаты моделирования

На рисунках 2.17-2.19 представлены эквивалентные напряжения по Мизесу при различном удлинении образца.

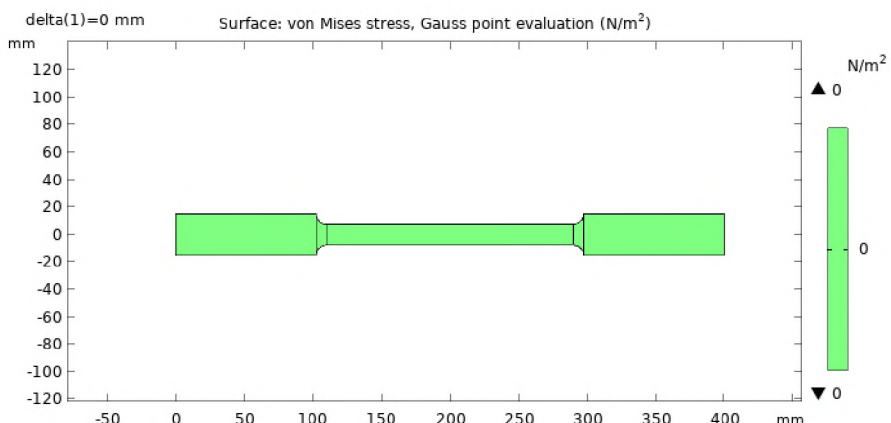


Рисунок 2.17 – Напряжения по Мизесу в ненагруженном образце

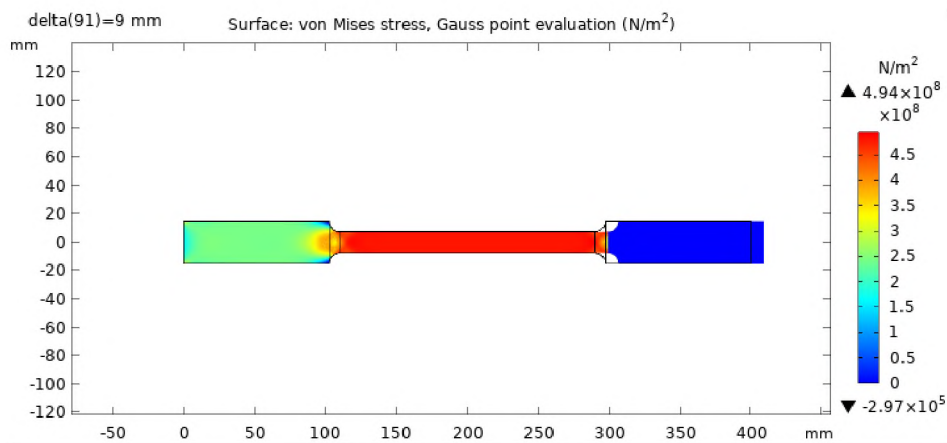


Рисунок 2.18 – Напряжения в образце, растянутом на 9 мм

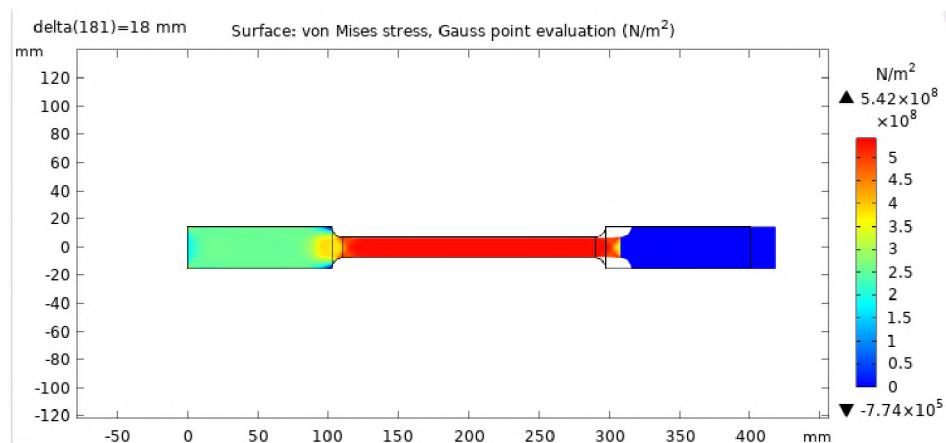


Рисунок 2.19 – Напряжения в образце, растянутом на 18 мм

Из рисунка 2.19 видно, что максимальное напряжение в образце составило 542 МПа (при удлинении на 18 мм).

На рисунке 2.20 видно, что образец действительно удлинился на 18 мм.

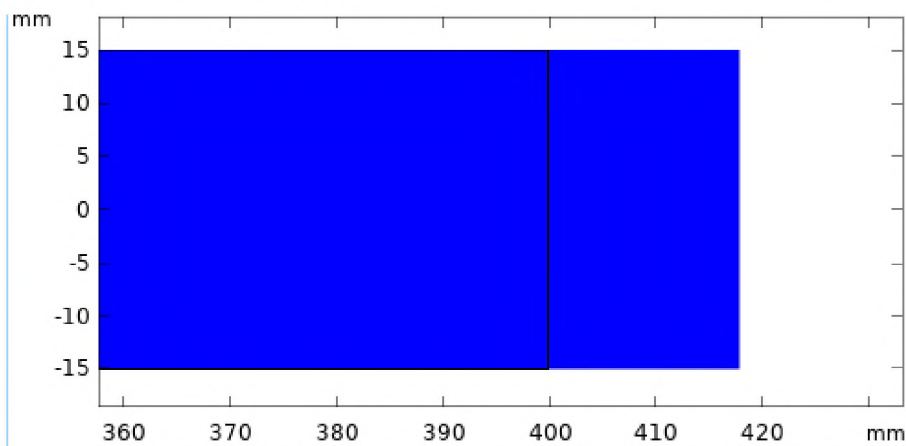


Рисунок 2.20 – Удлинение образца

При растяжении образца образуется утонение (рисунок 2.21). Видно, что сужение составило примерно 1 мм (по обе стороны материала).

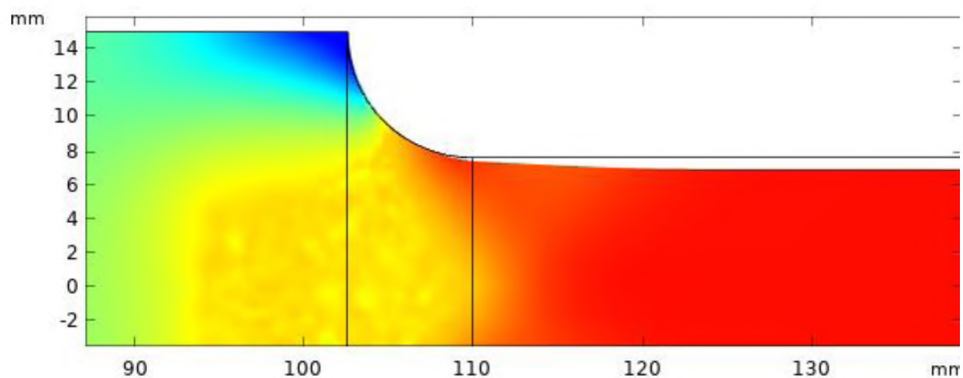


Рисунок 2.21 – Образование утонения в образце

Также можно вывести графики эквивалентной пластической деформации (рисунки 2.22-2.27).

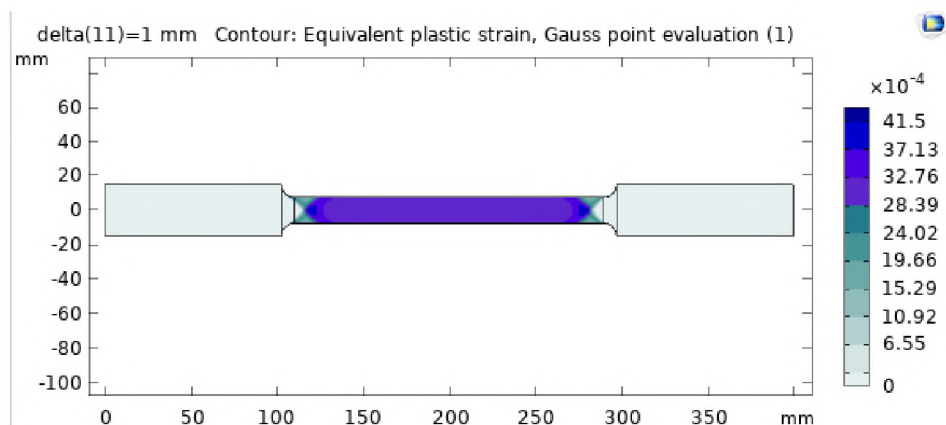


Рисунок 2.22 – Пластическая деформация при растяжении на 1 мм

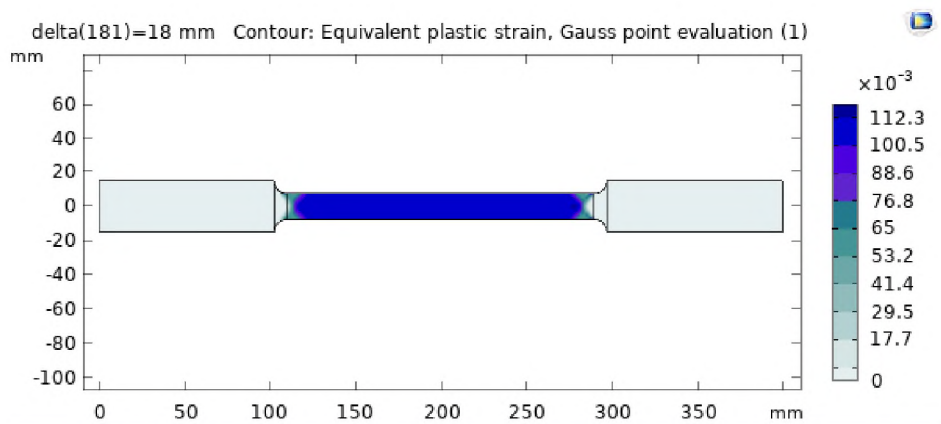


Рисунок 2.23 – Пластическая деформация при растяжении на 18 мм

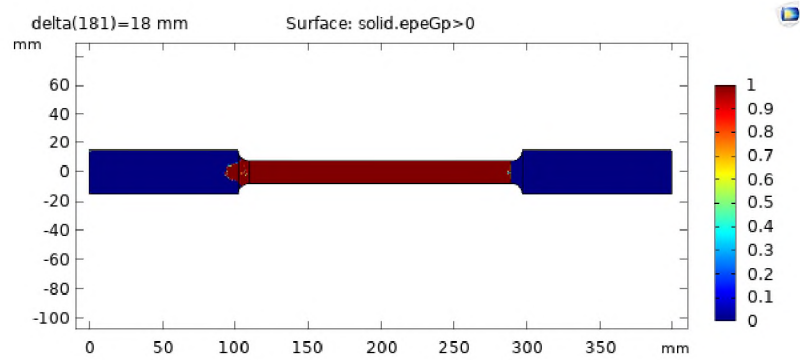


Рисунок 2.24 – Локализация пластической деформации

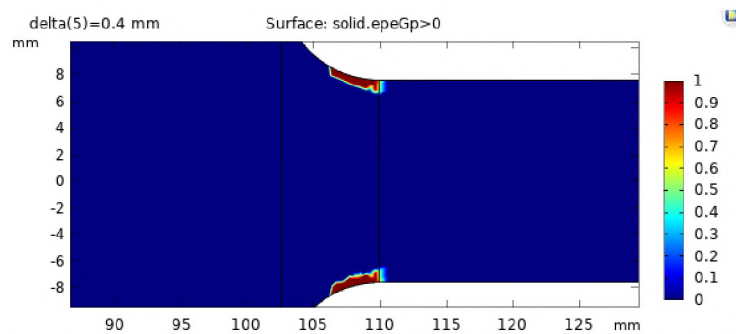


Рисунок 2.25 – Пластическая деформация при растяжении на 0,4 мм

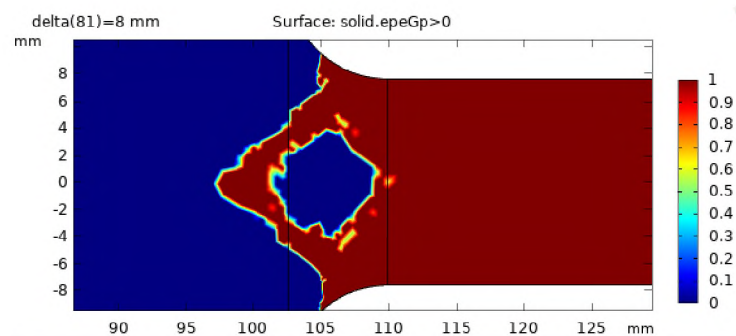


Рисунок 2.26 – Пластическая деформация при растяжении на 8 мм

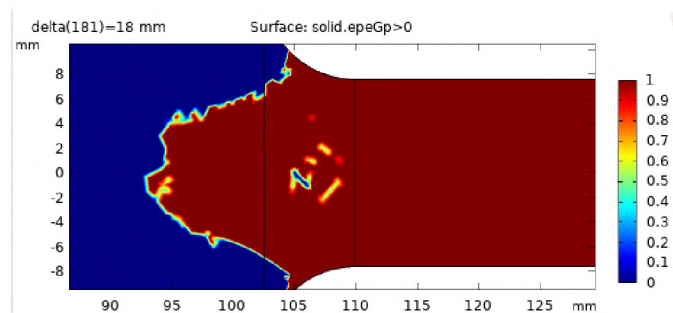


Рисунок 2.27 – Пластическая деформация при растяжении на 18 мм

Из рисунка 2.23 видно, что максимальное значение эквивалентной пластической деформации при удлинении образца на 18 мм составило порядка $112,3 \cdot 10^{-3}$.

На рисунках 2.24-2.27 красным цветом обозначена эквивалентная пластическая деформация. Видно, что деформация с ростом удлинения разрастается.

Выведем график, который отображает рост пластической деформации с увеличением параметра delta (рисунок 2.28).

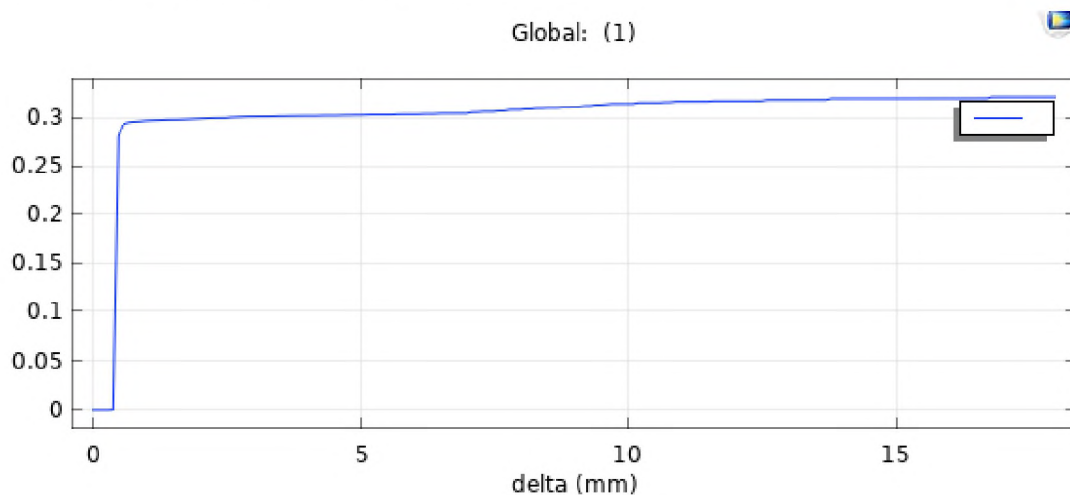


Рисунок 2.28 – График изменения пластической деформации

Можно отметить, что при растяжении на 1 мм наблюдается резкий прирост пластической деформации, а далее по мере растяжения образца она также растет, но незначительно.

2.3 Выводы по главе

Таким образом, для моделирования НДС использовался основной закон при растяжении – закон Гука. Было проведено исследование на растяжение образца. В результате были выведены графики эквивалентных напряжений по Мизесу. А также графики пластических деформаций.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ НДС

3.1 Постановка задачи

Для решения акустических задач методом конечных элементов во временной области используется основное волновое уравнение:

$$\frac{1}{\rho_i c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \beta \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left(-\frac{1}{\rho_i} \right) = V, \quad (3.1)$$

где ρ_i – плотность;

c – скорость волны;

p – давление на источнике УЗ волн;

t – время прохождения УЗ волны от источника к приемнику;

β – демпфирование;

V – скорость УЗ волны;

∇ – оператор Гамильтона [8].

На боковой поверхности образца устанавливаются два преобразователя – источник и приемник УЗ волн. Расстояние между их центрами составляет 28 мм. Геометрия модели для решения акустической задачи представлена на рисунке 3.1.

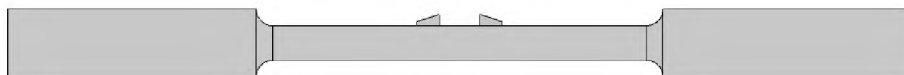


Рисунок 3.1– Геометрия модели

Далее необходимо задать основные параметры для моделирования. Зададим частоту излучателя $f_0 = 5$ МГц. Ко всему этому необходимо определить начальные скорости в каждом из материалов. Для стали 10ХСНД в недеформи-

рованном состоянии скорость продольной волны составляет 5965 м/с, а скорость волны сдвига (поперечной волны) – 3240 м/с. В органическом стекле скорость волны давления составляет 2680 м/с, скорость поперечной волны – 1100 м/с (рисунок 3.2).

f0	5 [MHz]	5E6 Hz
cp_poly	2680 [m/s]	2680 m/s
cs_poly	1100 [m/s]	1100 m/s
cp_steel	5965 [m/s]	5965 m/s
cs_steel	3240 [m/s]	3240 m/s

Рисунок 3.2 – Задание основных параметров для моделирования

Основные физико-механические характеристики для органического стекла приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные физико-механические характеристики органического стекла

Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность ρ , кг/м ³
3210	0,35	1200

Далее необходимо задать форму возбуждающего импульса. Для этого в программе Comsol зададим аналитическую гармоническую функцию с огибающей по Гауссу (рисунок 3.3).

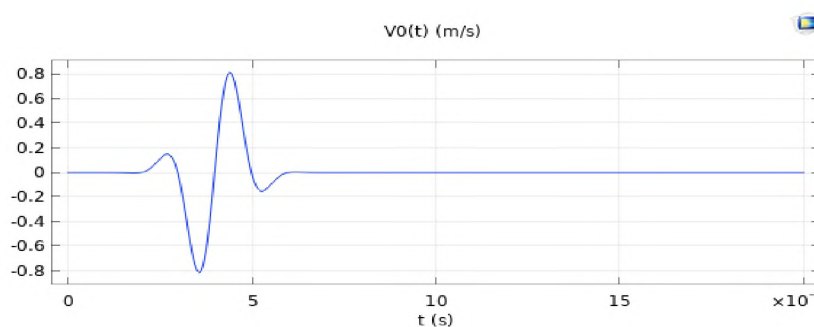


Рисунок 3.3 – Возбуждающий импульс

Также необходимо задать коэффициенты демпфирования для стали и органического стекла (рисунки 3.4-3.5).

Rayleigh damping	
Input parameters:	
Damping ratios	
Frequency 1:	
f_1	0.99*f0
Damping ratio 1:	
ζ_1	2.5e-3
Frequency 2:	
f_2	1.01*f0
Damping ratio 2:	
ζ_2	2.5e-3

Рисунок 3.4 – Демпфирование для органического стекла

Damping ratios	
Frequency 1:	
f_1	0.99*f0
Damping ratio 1:	
ζ_1	5e-3
Frequency 2:	
f_2	1.01*f0
Damping ratio 2:	
ζ_2	5e-3

Рисунок 3.5 – Демпфирование для стали

Далее необходимо настроить такое граничное условие как Prescribed velocity, которое определяет излучающую грань (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Излучающая грань призмы

Сетку необходимо задавать вручную и привязывать ее к длинам волн в каждом из материалов (рисунок 3.7). Для этого необходимо провести оценку размера элемента по скорости волн. Для каждого из материалов мы берем максимальную (волну давления) скорость и делим на частоту, получаем минимальный размер элемента.

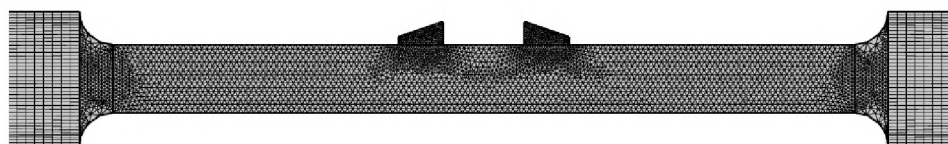


Рисунок 3.7– Создание сетки МКЭ

Далее переходим к настройке исследования. Посмотрим распространение импульса в течение 60 периодов. Результаты будем сохранять с шагом 1/20 от периода (рисунок 3.8). Как раз за 60 периодов волна должна дойти до границы раздела, преломиться, выделиться несколько типов волн, то есть получим импульсную характеристику на приемопередатчике.

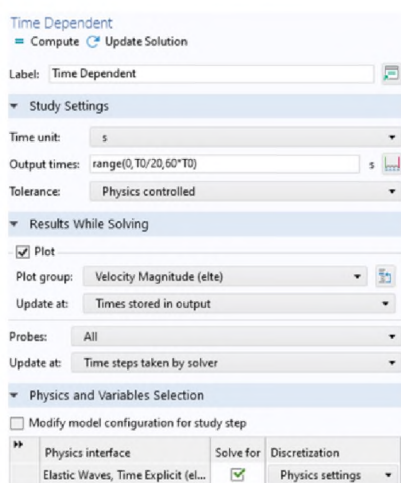


Рисунок 3.8– Настройка исследования

3.2 Результаты моделирования

На рисунке представлено распространение УЗ волн в стали с течением времени. Установлено, что волна давления доходит от источника к приемнику за $8,6 \cdot 10^{-6}$ с.

Можно заметить, что происходит большое количество переотражений, выделяется несколько типов волн. В частности, выделяется волна давления (продольная волна), у которой направление колебаний частиц совпадает с направлением распространения волны. Сдвиговая волна, у которой направление колебаний перпендикулярно направлению распространения волны. На поверхности материала образуется поверхностная волна (волна Релея). Траектории движения частиц такой волны – эллипсы (рисунки 3.9-3.12).

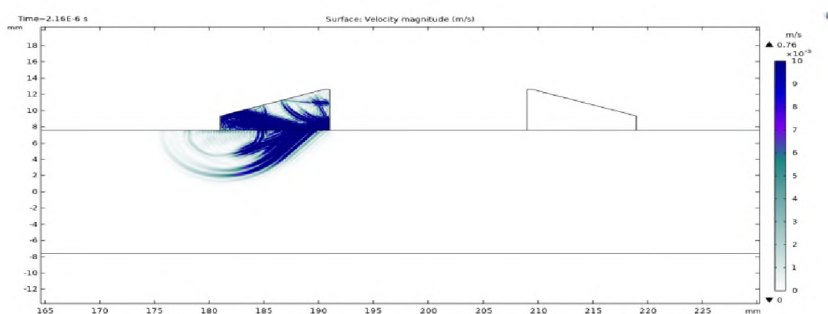


Рисунок 3.9 – Моделирование распространения волны в момент времени

$2,16 \cdot 10^{-6}$ с

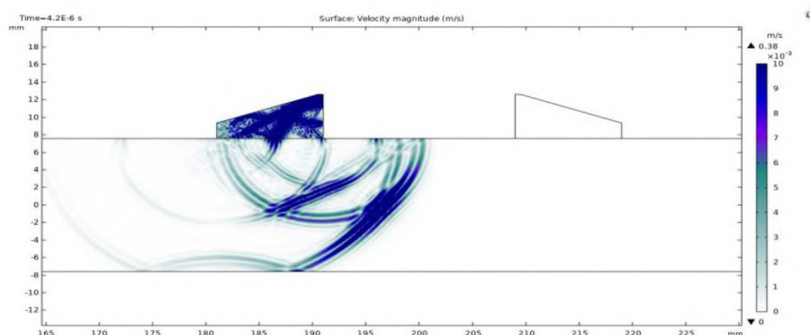


Рисунок 3.10 – Моделирование распространения волны в момент времени

$4,2 \cdot 10^{-6}$ с

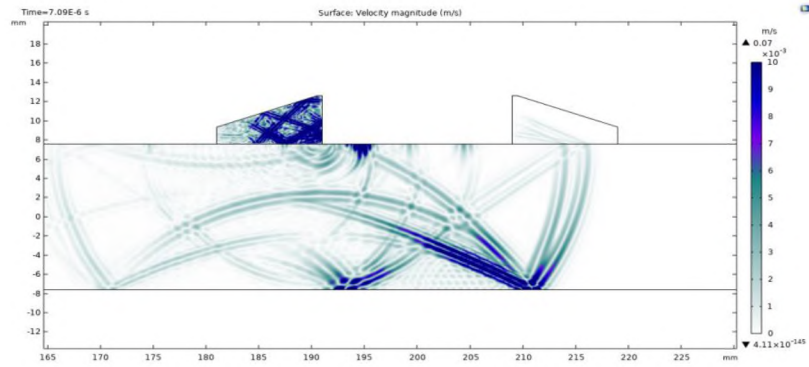


Рисунок 3.11 – Моделирование распространения волны в момент времени

$$8,85 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

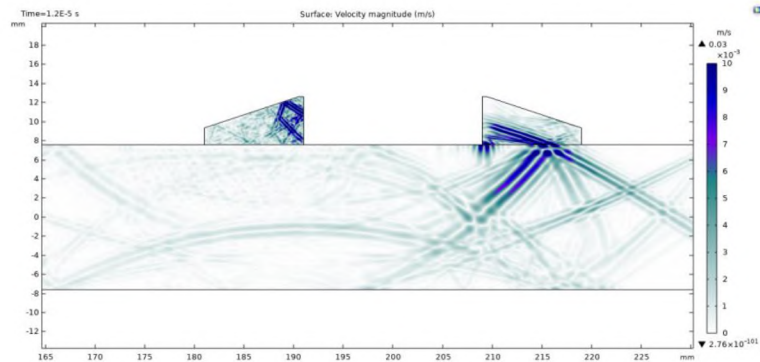


Рисунок 3.12 – Моделирование распространения волны в момент времени

$$1,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$$

На рисунке 3.13 представлено распространение ультразвуковой волны в деформированном образце (растяжение на 18 мм).

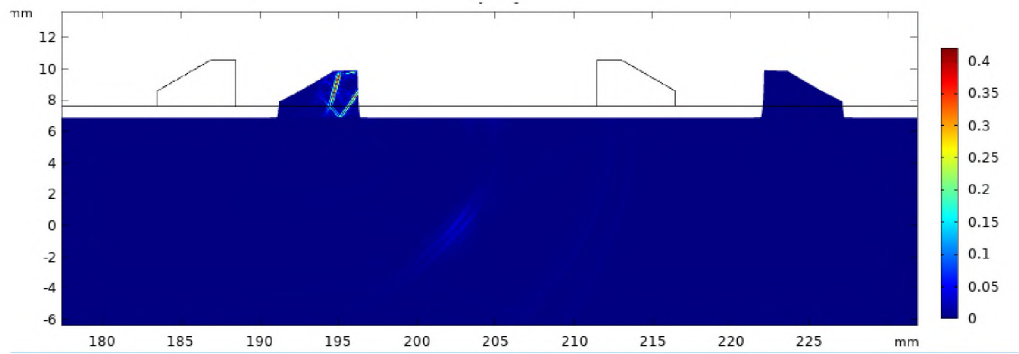


Рисунок 3.13 – Распространение ультразвуковой волны в деформированном образце

Как видно из рисунка 3.14, фронт распространения УЗ волны аналогичен визуализации распространения волны в недеформированном образце.

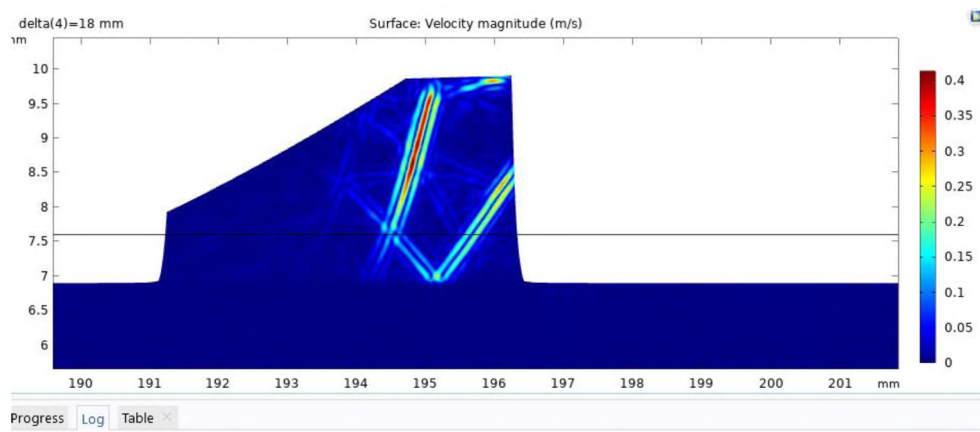


Рисунок 3.14– Скорости колебаний частиц на свободной поверхности деформированного образца (в точке излучателя)

Можно более наглядно представить поляризацию волн. Для этого используется второй инвариант тензора напряжений. На рисунке 3.15 оранжевым цветом представлена сдвиговая волна, а синим – волна давления.

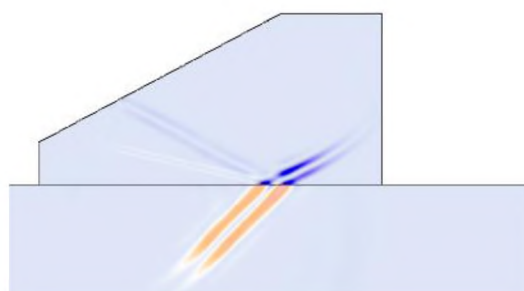


Рисунок 3.15 – Второй инвариант тензора напряжений

Можно оценить усредненное давление на излучателе, чтобы оценить его импульсную характеристику. Мы видим исходный и отраженный импульс. Небольшие колебания – это как раз проходящие импульсы при переотражениях в призме (рисунок 3.16).

Наибольшее значение давления на источнике УЗ волн составило порядка $4,25 \cdot 10^5$ Па (рисунок 3.16).

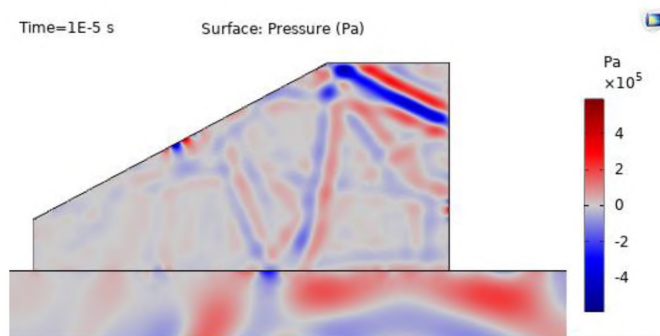


Рисунок 3.16 – Давление на источнике УЗ волн

Также мы можем предварительно оценить начальные скорости в каждом из материалов (рисунок 3.17).

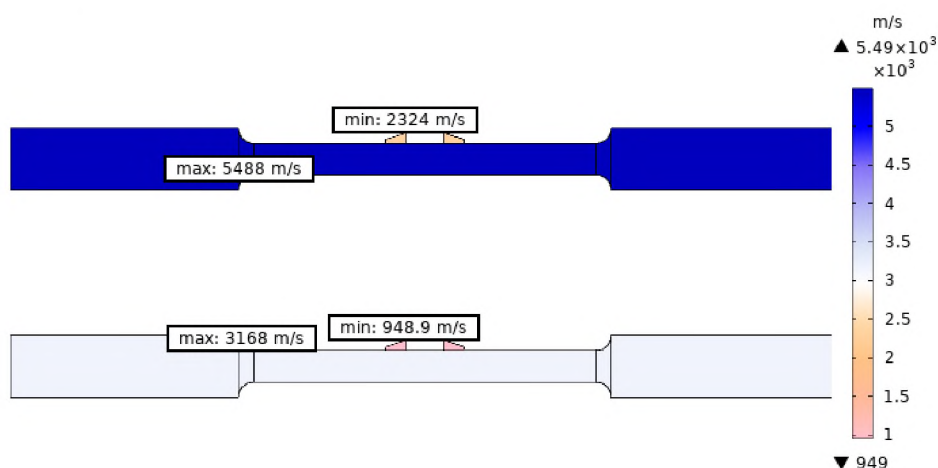


Рисунок 3.17 – Визуализация скоростей

На верхнем рисунке представлены скорости распространения волны давления, а на нижнем – скорости сдвига.

3.3 Расчет скоростей распространения продольной волны при переменном НДС

Все задачи лучше решать в исходной системе координат, то есть не рассчитывать деформации, потом изменять геометрию и решать задачу на распространение ультразвука в этой переменной геометрии, а лучше в исходной геометрии изменять параметры материалов так, чтобы все сохранялось.

В таком случае смотрится зависимость исходной скорости ультразвука от управляющих параметров. Для продольной поляризации такими параметрами будут являться модуль Юнга E и плотность ρ .

Для определения новых параметров после растяжения нужно построить линейную задачу:

$$X^* = \varepsilon(X) \cdot X, \quad (3.2)$$

где X^* – новая координата тела;

$\varepsilon(X)$ – функция растяжения;

X – координата, жестко связанная с телом.

Границы тела в координате X^* изменяются, а в координате X остаются прежними, так как у тела не появляется новых точек.

Значит, если датчики были в координатах X_1, X_2 , то останутся в тех же самых координатах при растяжении образца.

Любую непрерывную новую величину можно представить как сумма начального значения и константы, которая стремится к нулевому значению, то есть ей можно пренебречь:

$$L = L_0 + G, \quad (3.3)$$

где L – некая новая величина;

L_0 – начальное значение непрерывной величины;

G – константа второго порядка малости, стремящаяся к нулю [12].

Если мы будем учитывать, что деформации пластические (напряжение зависит от степени растяжения по какому-то закону), то имеет смысл на картину статического растяжения выделить дополнительное малое возмущение, вызванное распространением звука.

Для этого перераскладываем в ряд в окрестности точки статических деформаций и выделяем линейную составляющую по малому этому возмущению.

В результате (в соответствии с формулой) получим новый модуль Юнга:

$$\tilde{E} = E_0 + 3\kappa\varepsilon_0^2, \quad (3.4)$$

где \tilde{E} – новый модуль Юнга;

E_0 – старый модуль Юнга;

κ, ε_0 – постоянные.

Деформации неоднородны, следовательно, модуль Юнга также будет неоднородным.

При это следует иметь в виду эффект второго порядка малости, то есть отношение постоянных κ и ε_0 стремится к нулю [12].

Если рассмотреть некоторый элемент объема до деформаций и найти его массу, то после деформаций она также не изменится:

$$m_0 = \rho \cdot V = \rho_0 \cdot V_0, \quad (3.5)$$

где ρ, V – соответственно плотность и объем материала до деформации;

ρ_0, V_0 – соответственно плотность и объем материала после деформации;

m_0 – масса материала.

С другой стороны дифференциал плотности, отнесенный к плотности, есть минус дифференциал объема, отнесенный к объему. А это есть объемная деформация:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z). \quad (3.6)$$

Тогда новая плотность будет определяться как сумма начальной плотности и приращение этой плотности:

$$\tilde{\rho} = \rho_0 + d\rho_0. \quad (3.7)$$

Новая скорость есть корень квадратный из отношения нового модуля Юнга к новой плотности:

$$\tilde{c} = \sqrt{\frac{\tilde{E}}{\tilde{\rho}}}. \quad (3.8)$$

Подставляя вместо нового модуля Юнга и новой плотности соответствующие им выражения 3.4 и 3.7, получим следующее выражение:

$$\tilde{c} = \sqrt{\frac{E_0 \left(1 + \frac{3\mu \varepsilon_0^2}{E_0}\right)}{\rho_0 \left(1 + \frac{d\rho_0}{\rho_0}\right)}}. \quad (3.9)$$

Учитывая формулу, запишем выражение в следующем виде:

$$\tilde{c} = c_0 \cdot \sqrt{\frac{\left(1 + \frac{3\mu \varepsilon_0^2}{E_0}\right)}{\left(1 + \frac{d\rho_0}{\rho_0}\right)}}. \quad (3.10)$$

Представим корень квадратный как степень, знаменатель преобразуем в выражение в минус первой степени, получим:

$$\tilde{c} = c_0 \left(\left(1 + \frac{3\mu \varepsilon_0^2}{E_0}\right) \cdot \left(1 + \frac{d\rho_0}{\rho_0}\right)^{-1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.11)$$

Разложим квадратный корень в ряд Маклорена, который имеет следующий вид:

$$(1+x)^\lambda = 1 + \frac{\lambda}{1!}x + \frac{\lambda(\lambda-1)}{2!}x^2 + \dots (-1 < x < 1). \quad (3.12)$$

Тогда, в соответствии с формулой 3.12, новая скорость звука будет определяться следующим выражением:

$$\tilde{c} = c_0 \left(1 + \frac{3\mu \varepsilon_0^2}{2E_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{d\rho_0}{2\rho_0} \right). \quad (3.13)$$

Учитывая, что μ и ε_0 – величины второго порядка малости, а также принимая во внимание выражение 3.6, получим конечное выражение для определения новой скорости УЗ волны:

$$\tilde{c} = c_0 \left(1 - \frac{(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)}{2} \right). \quad (3.14)$$

где \tilde{c} – новая скорость УЗ волны;

c_0 – начальная скорость УЗ волны;

$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – объемная деформация.

В программе Comsol Multiphysics объемная деформация $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ считается через функцию `solid.J`.

После первого расчета необходимо запустить второй расчет с различными деформациями и в этом втором расчете задать в свойстве материала домножение начальной скорости на величину $1 + \frac{(\text{solid.J})}{2}$.

В программе Comsol Mulyipysics были вычислены объемные деформации, возникающие при растяжении образца (при переменной нагрузке). Они представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Объемные деформации, рассчитанные в ПО Comsol Multiphysics

L, мм	solid.J
1	0,00176
2	0,00189
3	0,00191
4	0,00206
5	0,00357
6	0,00652
7	0,00761
10	0,00893
12	0,00924
14	0,00931
16	0,00940
18	0,00956

Используя формулу 3.14, получим значения скоростей продольной волны c_l в зависимости от изменения напряжений, возникающих на свободной поверхности образца в точке приемника. Эти значения представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Изменение скорости распространения продольной волны при воздействии нагрузки

σ , МПа	c_l , м/с
0	5965
52	5959,75
97	5959,36
154	5959,25
191	5958,85
238	5954,56

295	5945,61
337	5942,33
386	5938,45
429	5937,56
465	5937,26
527	5936,48

Получим зависимость скорости волны давления от напряжений $c_t(\sigma)$. Она представлена на рисунке 3.18.

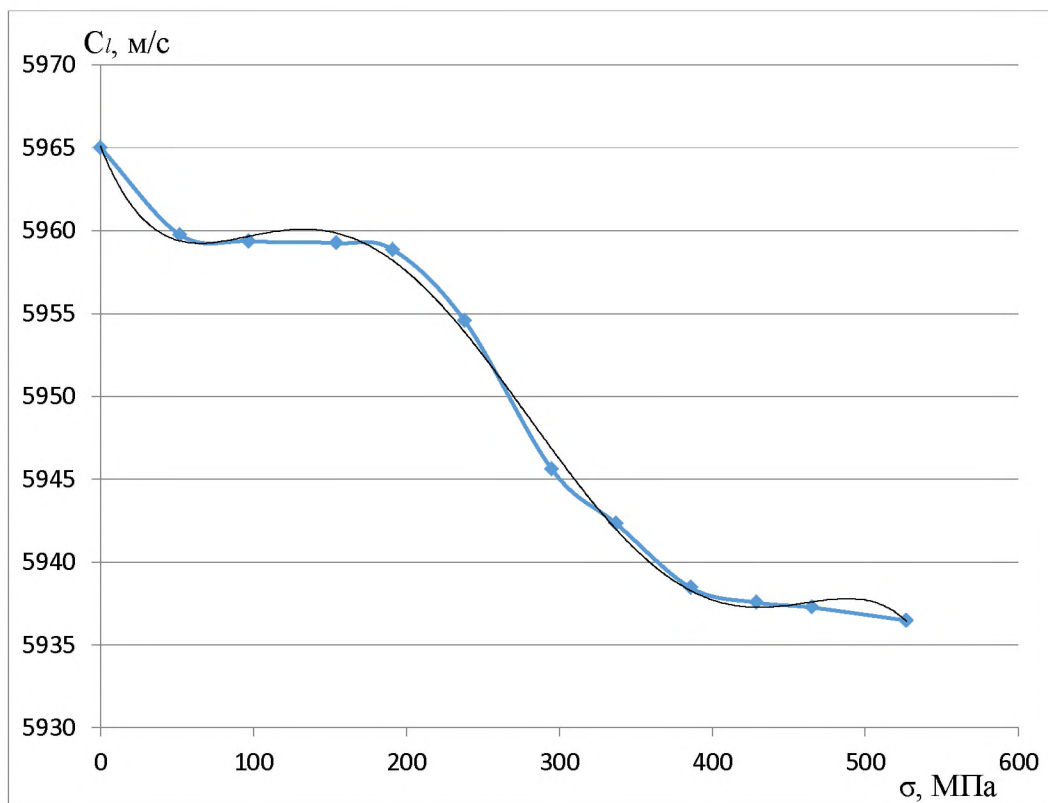


Рисунок 3.18 – Изменение скорости продольных волн от приложенной нагрузки

Таким образом, исходя из таблицы 3, разность скоростей распространения продольной волны в недеформированном образце и деформированном образце составила 28,52 м/с.

Анализируя рисунок 58, можно заметить скорость распространения продольной волны с ростом нагрузки уменьшается. Наибольшее уменьшение наблюдается непосредственно до зуба предела текучести. Это связано с тем, что имеют место пластические деформации. При дальнейшем изменении НДС образца скорость также падает, но не так резко, и напряжение достигают значения предела прочности (для стали 10ХСНД это значение составляет порядка 485 МПа). При растяжении образца доля деформированного материала части данного образца, расположенной между преобразователями измерительного прибора, увеличивается, и, следовательно, изменения ультразвуковых скоростей связаны с такими процессами, как дислокационные сдвиги.

3.4 Выводы по главе

Таким образом, была получена зависимость скорости распространения волны давления от приложенной нагрузки. Видно, что скорость падает при увеличении НДС. Это связано с тем, что в стали 10ХСНД возникают пластические течения. Разность скоростей распространения продольной волны в недеформированном образце и деформированном образце составила 28,52 м/с. Скорость колебаний частиц в недеформированном образце в 10 раз больше, чем в деформированном образце.

4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

Так как в данной выпускной квалификационной работе рассматриваются ультразвуковые датчики, то необходимо провести оценку влияния ультразвуковых волн на человеческий организм, а также учитывать соответствующие меры безопасности при работе с ультразвуком. Это важно, поскольку ультразвуковые установки генерируют определенное акустическое поле, интенсивность которого может оказывать различное влияние на организм человека.

4.1 Оборудование, типы и способы распространения ультразвука

В соответствии с ГОСТ 12.1.001-89 «Ультразвук. Общие требования безопасности» к источникам ультразвука относятся следующие виды оборудования:

- оборудование для производства, при котором происходит возбуждение ультразвуковых волн для таких целей как реализация технологического процесса, проведения контроля и измерений;
- оборудование для производства, использование которого определяет ультразвук в качестве второстепенного фактора [16].

В соответствии с нормативным документом [16] имеет место быть классификация УЗ установок и приборов в зависимости от характеристики по частоте:

- аппаратура, которая используется для возбуждения волн с низкой частотой (частота колебаний 11 – 100 кГц);
- установки, которые используются для возбуждения волн с высокой частотой (частота колебаний 100 кГц – 1000 МГц);

По своей природе ультразвук – это упругие волны, которые человек не способен воспринимать (это диапазон неслышимых волн). Единица измерения интенсивности ультразвука – ватт на квадратный сантиметр ($\text{Вт}/\text{см}^2$), относительные единицы – дБ.

Ультразвук можно классифицировать по частотной характеристике:

- низкочастотный – от $1,12 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^5$ Гц;
- высокочастотный – от $1,0 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^9$ Гц [16].

Ультразвук может распространяться двумя путями:

- воздушным путем;
- контактным путем (когда происходит соприкосновение с жидкими и твердыми средами) [16].

Контактный ультразвук низкой частоты оказывает локальное воздействие на организм человека. Это происходит, когда происходит взаимодействие с деталями, в которых возбуждены колебания [16].

4.2 Оценка влияния ультразвуковых волн на человеческий организм

Согласно СанПиН 582-96 «Гигиенические требования при работе с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного назначения» ультразвук способен оказывать на организм человека следующие виды воздействия:

- тепловое;
- механическое;
- кавитационное [17].

Когда частота колебаний растет, увеличивается и доля поглощения тканями ультразвука, которые то сжимаются, то растягиваются при действии на них переменного звукового давления. Если интенсивность превосходит порядка $4 \cdot 10^4$ Вт/м², то свойства тканей меняются и происходит разрушение клеток.

Волны малой интенсивности вызывают преимущественно тепловой эффект, при средней интенсивности наблюдается паралитическое воздействие, а УЗ волны с большой интенсивностью вообще могут оказаться смертельными.

УЗ установки генерируют определенное акустическое поле. Длительное нахождение в таком поле без средств защиты может привести к появлению усталости, головной боли, зачастую наблюдается боль в ушах, рвота. Может быть нарушена терморегуляция тела человека, иногда возникают сбои в нервной системе и нарушение функций щитовидной железы. Ко всему этому наблюдается выраженное снижение слуха [16].

4.3 Стандартизация ультразвуковой волны

В соответствии с ГОСТ 12.1.001-89 «Ультразвук. Общие требования безопасности», СН 9-88 РБ 98 «Ультразвук, передающийся контактным путем. Предельно допустимые уровни на рабочих местах», СН 9-87 РБ 98 «Ультразвук, передающийся воздушным путем. Предельно допустимые уровни на рабочих местах», параметры воздушного ультразвука, которые нормируются на рабочем месте – это уровни звукового давления. Они измеряются в децибелах в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 кГц [16].

Согласно [17] для каждой средней геометрической частоты есть свой допустимый уровень давления звука (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Предельно допустимые уровни звукового давления воздушного ультразвука на рабочих местах

Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровень звукового давления, дБ
12,5	80
16	90
20	100
25	105
31,5 – 100,0	110

4.4 Способы контроля ультразвука

В соответствии с ГОСТ 12.3.005-86 «Гигиенические требования к условиям труда работников, выполняющих ультразвуковые исследования» минимум один раз в год с целью диагностирования соответствия фактических уровней ультразвука на рабочих местах допустимым производят контроль уровней ультразвука. Проводится оценка (анализ) эффективности проводимых мероприятий с целью наилучшей защиты от ультразвука [18].

Оборудование для производства, в котором возбуждается УЗ волна, подлежит контролю уровней ультразвука, причем такой контроль нужно производить в нормируемом диапазоне частот с верхней граничной частотой равной либо большей рабочей частоты производственного оборудования.

Воздушный ультразвук имеет точки измерения. На рабочих местах они обычно находятся на расстоянии 1,5 м от основания (например, пол, на котором стоит рабочий) либо непосредственно на уровне головы рабочего, когда он совершает операции сидя. Человек, который проводит измерения, должен находиться от этих точек на расстоянии 50 см и более [16].

Измерения проводят не менее 3 раз в каждой полосе третьоктавы для одной точки, затем находят среднее значение [16].

При контакте с твердой средой измерения уровней контактного ультразвука необходимо производить в месте колебаний, у которых амплитуда принимает максимальное значение [16].

4.5 Средства защиты от влияния ультразвуковых волн

В соответствии с [18] персонал, который производит обслуживание УЗ источников, необходимо защищать от их неблагоприятного воздействия. Для этой цели используют следующие способы защиты:

- удаленное управление ультразвуковым оборудованием;
- при проведении служебных операций устанавливают блокировки, которые производят отключение УЗ источников при выполнении таких мероприятий;
- для того, чтобы защитить руки от негативного воздействия ультразвука, применяют принадлежности для удерживания УЗ источника или детали, подверженной обработке;
- для уменьшения шума на 20-40 дБ применяют оборудование малой мощности;
- размещение оборудования в звукоизолированных помещениях или кабинетах с дистанционным управлением.

Кожухи и экраны используются для оборудования ультразвуковых источников, которые генерируют ультразвук с уровнями акустического давления, которые выходят за пределы допустимых уровней звука [16].

В качестве материалов для изготовления кожуха используют:

- листовые стали, обклеенные рубероидом;

- гетинакс (его толщина обычно 5 мм);
- резина (три слоя толщиной 1 мм).

Для повышения звуковой изоляции используют ребра жесткости, которые сваривают с кожухом и снаружи производят покрытие материалом с целью поглощения вибраций [16].

Кожух не должен иметь несплошностей (щелей, например).

Экраны, ограждающие от звука, должны быть оборудованы звукоизолирующими кабинами. Они обеспечивают уменьшение давления звука на рабочих местах.

Увеличивают диапазон рабочих частот в УЗ ваннах с целью уменьшения негативного воздействия шумов.

Согласно ГОСТ 12.1.001-89 «Ультразвук. Общие требования безопасности» используются следующие средства индивидуальной защиты:

- нарукавники для защиты рук при работе с контактным ультразвуком;
- рукавицы, перчатки (наружные резиновые и внутренние хлопчатобумажные).

К работе с источниками ультразвука допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие соответствующую квалификацию, прошедшие обучение и инструктаж по технике безопасности [16].

С точки зрения требований организационного плана, запрещается выполнение сверхурочных работ. Рекомендуют делать пятнадцатиминутный перерыв через каждые полтора часа работы при контакте с ультразвуковым оборудованием порядка половины рабочего времени. Ко всему этому хорошо проводить физиотерапевтические процедуры — массаж, УФ-облучение, водные процедуры. Желательно также принимать витаминный комплекс.

Проводят медицинские осмотры для предупреждения и выявления заболеваний у людей, работающих с ультразвуком [17].

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Необходимо провести расчет затрат на самостоятельное моделирование напряженно-деформированного состояния образца и распространения ультразвуковой волны, а также произвести расчет затрат, если прибегать к помощи каких-либо компаний. В конечном итоге сделать вывод о том, что выгоднее: проводить моделирование самостоятельно или обращаться за помощью к сторонним организациям. Также посмотреть, какая компания сможет решить задачу лучше всего и за меньшую цену.

В таблице 5.1 приведены затраты на самостоятельное моделирование.

Таблица 5.1 – Затраты на самостоятельное моделирование

Затраты на моделирование	Стоимость, в рублях	Краткая характеристика
1 ПО Comsol Multiphysics 6.0	190500	Тип поставки: Электронная (e-mail) Язык: Английский Лицензия имеет ключ активации сроком 1 год на непрерывной основе
2 Вебинары по обучению работы с ПО Comsol Multiphysics 6.0, посвященные механике твердого деформируемого тела	10500	Длительность прохождения курса – 1 месяц. В рамках вебинаров рассматривается анализ существующих возможностей Comsol Multiphysics 6.0 в различных областях. В частности, рассматриваются вопросы касающиеся механики твердого деформируемого тела (обзор постановки линейных и нелинейных задач, изучение различных случаев нагружения модели, такие как изгиб, сжатие, растяжение, кручение, прогнозирование усталостного разрушения конструкций)
3 Вебинары по обучению работы с ПО Comsol Multiphysics 6.0, посвященные моделированию ультразвуковых волн в материалах	15800	Длительность прохождения курса – 1 месяц. В рамках вебинаров рассматривается анализ существующих возможностей Comsol Multiphysics 6.0 в различных областях. В частности, рассматриваются вопросы касающиеся методам ультразвукового неразрушающего контроля. Рассматриваются способы и методы моделирования волн в нагруженных и ненагруженных конструкциях, рассматривается эффект акустоупругости, а также изучается вопрос предварительной оценки скоростей в материалах
4 Самостоятельное обучение	0	Изучение материала, который находится в свободном доступе и не требует затрат

Посмотрим, за какую сумму согласятся различные компании осуществить моделирование НДС, а также ультразвуковой волны.

В таблице 5.2 приведено краткое описание деятельности различных организаций, которые осуществляют подобные инженерные расчеты.

Таблица 5.2 – Краткое описание деятельности различных организаций

Наименование инженерной компании	Краткая характеристика
АО «ИСКРАТЕХ»	Используют преимущественно программные продукты Ansys. Проводят расчеты конструкций на прочность, устойчивость, работоспособность. Дополнительно могут провести оценку физических характеристик модели. Могут помочь оценить адекватность конструкторских решений, уменьшить количество опытных образцов изделия. Также такая компания готова провести обзор перспективных типов образцов для того, чтобы выбрать лучший. Поможет решить проблемы с готовой моделью.
«КАЕ Эксперт»	Компания около 30 лет специализируется на численном моделировании. Данная организация выполняет инженерные расчеты на прочность изделий и сооружений, осуществляет расчет на устойчивость, исследует механику разрушения, а также проводит виброакустические расчеты. Для компьютерного моделирования использует ПО Ansys. Компания готова автоматизировать инструменты численного моделирования, создать методику проектирования изделий.
КБ ИнженерГрупп (Конструкторское бюро Инженер-Групп)	Важное преимущество – компания использует для численного моделирования ПО Comsol Multiphysics. Использует метод конечных элементов для решения задач механики, акустики. Проводит расчет конструкций на прочность, усталость, на резонансные частоты, учитывает потерю устойчивости конструкций.

В таблице 5.3 приведена стоимость услуг, которые могут реализовать выше представленные компании.

Таблица 5.3 – Стоимость инженерного моделирования различных компаний

Компания	Услуга по моделированию напряженно-деформированного состояния (сумма, руб.)	Услуга по моделированию ультразвукового неразрушающего контроля (сумма, руб.)	Общая Сумма (в рублях)
АО «ИСКРАТЕХ»	350000	15500	365500
«КАЕ Эксперт»	210000	27900	237900
КБ ИнженерГрупп	398000	50500	448500

Анализируя таблицу, очевидно, что выполнение расчетов и моделирование лучше всего проводить самим. В противном же случае придется переплачивать, если брать заказ у других компаний.

Если же делать заказ, то лучше обращаться к организации «КАЕ Эксперт», так как она выполнит работу за меньшую сумму, чем другие компании. Вместе с этим данная организация выполнит моделирование за сравнительно короткий срок – до 3 недель, в то время как, например, тот же самый заказ АО «ИСКРАТЕХ» сможет выполнить не раньше, чем за полтора месяца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для реализации поставленной цели в выпускной квалификационной работе, в качестве численного пакета для моделирования было выбрано такое ПО как Comsol Multyphysics, так как эта программа достаточно понятна и проста в использовании.

В качестве способа для численного моделирования был выбран метод конечных элементов, который является универсальным.

В ходе выполнения работы было смоделировано напряженное деформированное состояние образца. Для решения этой задачи использовался основной закон при растяжении – закон Гука.

Максимальное напряжение по Мизесу при удлинении образца на 18 мм составило порядка 542 МПа.

Уже при растяжении на 1 мм пластические деформации становятся заметными, при дальнейшем нагружении они увеличиваются. Максимальное значение эквивалентной пластической деформации при удлинении образца на 18 мм составило порядка $112,3 \cdot 10^{-3}$.

Испытание на растяжение сопровождается локальным сужением образца. Это возникает вследствие того, что при нагружении деформация становится неравномерной.

Далее на боковой поверхности образца были установлены ультразвуковые датчики на фиксированном друг от друга расстоянии. Тем самым была получена акустическая модель, на основе которой с использованием основного волнового уравнения были смоделированы различного типа волны.

Скорости продольной волны были вычислены в точке приемника на свободной поверхности образца (где возникают волны Релея). Затем была построена зависимость скорости распространения продольной волны от приложенной нагрузки, из которой видно, что скорость уменьшается с ростом нагрузки. Это связано с тем, что в стали 10ХСНД возникают пластические деформации. Раз-

ность скоростей распространения продольной волны в недеформированном и деформированном образце, выполненного из стали 10ХСНД, составила -28,52 м/с.

Была выбрана сталь 10ХСНД, так как она используется для изготовления узлов транспортного установочного агрегата, к которому применительны требования по прочности. Сталь 10ХСНД является материалом, который используют при создании машин и агрегатов довольно большой степени надежности.

Возможно практическое применение полученных результатов для оценки ресурса исследуемых материалов и элементов конструкций. С помощью метода акустической упругости можно будет оценить долговечность и работоспособность транспортного установочного агрегата.

Экономические расчеты показали, что гораздо выгоднее проводить моделирование самостоятельно, нежели обращаться за помощью к другим компаниям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Никитина, Н.Е. Акустоупругость и ее применение для измерения напряжений в крупногабаритных конструкциях / Н.Е. Никитина. – Вестник научно-технического развития, 2009. № 2, С. 4-6.

2 Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Писаренко, Г.С. – Головное издательство, 1980 – 695 с.

3 Сыч, Т. В. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов / Сыч, Т.В. Герасимов, С.И. – Дефектоскопия, 2015. № 3. С. 6-7.

4 Авдеев, Д. А. Моделирование распространения ультразвука в твердых телах различной формы / Авдеев, Д. А. – Информатика и системы управления. 2016. № 2 (44). С. 15-25.

5 Молоканов, Б. М. Конечно-элементное моделирование распространения ультразвука в Comsol Multiphysics / Молоканов, Б. М. Драчев, К.Б. – Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование, 2020. С. 128-155.

6 Клубович, В. В. Исследование сопротивления материалов пластическому деформированию при их обработке давлением с наложением ультразвуковых колебаний / Клубович, В. В. – Вестник БНТУ, № 1, 2007 – 6 с.

7 Семухин, Б.С. Скорость ультразвука в низкоуглеродистой стали, деформируемой на нижнем пределе текучести: статья института физики прочности и материаловедения / Семухин, Б.С. Зуев, Л.Б., Бушмелева, К.И. – Издательство Самарского государственного технического университета, 2013 – 5 с.

8 Родимов, Г.А. Влияние ультразвуковых колебаний на изменение механических характеристик поверхностей контакта: статья Самарского государственного технического университета / Родимов, Г.А. Батищева, О.М. – Издательство Самарского государственного технического университета, 2015 – 3 с.

9 Уланов, А. М. Основы метода конечных элементов: лекции / Уланов, А. М. – Издательство СГАУ, 2016 – 25 с.

10 Рудаченко, А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие / Рудаченко, А.В. – Издательство Томского политехнического университета, 2015 – 139 с.

11 Бехер, С.А. Основы ультразвукового контроля: учебное пособие / Бехер, С.А. – Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения, 2013 – 64 с.

12 Щетинина, Е.В. Методы возмущений и решение обыкновенных дифференциальных уравнений: учебное пособие / Щетинина, Е.В. – Издательство Самарского государственного университета, 2011 – 30 с.

13 Казачек, С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / С.В. Казачек. – Вестник научно-технического развития, 2010. № 4, С. 22-24.

14 Деменчук, Н.П. Основы теории напряженного и деформированного состояния: лекции / Деменчук, Н. П. – Издательство ИТМО, 2016 – 118 с.

15 Максимова Н.Н. Математическое моделирование: учебное пособие / Максимова, Н.Н. – Издательство Амурского государственного университета, 2019 – 88 с.

16 ГОСТ 12.1.001-89 Ультразвук. Общие требования безопасности; введ. 2020-01-01. – М.: Стандартинформ, 2019

17 СанПиН 582-96 Гигиенические требования при работе с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного назначения; введ. 2019-03-03. – М.: Стандартинформ, 2019

18 ГОСТ 12.3.005-86 Гигиенические требования к условиям труда работников, выполняющих ультразвуковые исследования; введ. 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2019