

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  
« 15 » 06 2022 г

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Предельное состояние стеклопластиковых материалов при продольном нагружении

Исполнитель  
студент группы 817–об

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Н.А. Валуй

Руководитель  
доцент, канд. тех. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультанты:  
по БЖД  
доцент, канд. тех. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль  
ассистент кафедры СИТРК

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.А. Аревков

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

  
подпись И.О.Фамилия

«26» мая 2022 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Валуи Натальи Андреевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Предельное состояние стеклопластиковых материалов при продольном нагружении

учреждена приказом от 05.04.2022 № 679-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы 08.06.2022 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работы: научная литература, научно–исследовательские работы, ГОСТы, отчеты по практикам

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): стеклопластик как композиционный материал, проведение УЗК для композиционных материалов, расчет на прочность корпуса из стеклопластика, безопасность и экологичность производства, экономическая часть

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, цели и задачи, технологическая карта ультразвукового контроля, блок–схема «Проведение испытания на сжатие стеклопластикового корпуса ракеты», результаты испытания корпуса ракеты на сжатие, график «Изменение скорости поперечных волн от напряжений», блок–схема «Последовательность создания сетки модели корпуса ракеты методом конечных элементов», статический анализ напряженно-деформированного состояния модели корпуса ракеты, заключение

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относя-

щихся к ним разделов): БЖД Козырь Аркадий Валентинович, доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания 26.05.2022 г.

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

Задание принял к исполнению (дата) 26.05.2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'СВ', is written over a horizontal line.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 70 с., 35 рисунков, 11 таблиц, 28 источников, 1 приложение.

НАГРУЗКА, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, НАПРЯЖЕНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, СТЕКЛОПЛАСТИК, ДЕФЕКТ, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ, ТЕНЗОДАТЧИК

В последнее время композиционные материалы широко используются во многих отраслях промышленности, особенно в авиакосмической. Это связано с их уникальными свойствами: за счет меньшей массы детали из композиционного материала будут обладать высокой прочностью, не подвергаться коррозии, и иметь большой срок службы. Обеспечить гарантию наилучшего качества и безопасности продукта из композиционного материала нельзя без использования действующих способов неразрушающего контроля.

Цель работы: Определение характеристик при продольном сжатии и использование полученных характеристик для определения конструкции при проектировании.

Задачи работы:

- Изучить информацию про стеклопластик, как композиционный материал;
- Произвести эксперимент на сжатие стеклопластикового корпуса, обработать полученные результаты;
- Построить компьютерную модель, на основании полученных данных эксперимента рассмотреть рассредоточенную и сосредоточенную нагрузку;
- Провести оценку безопасности при работе со стеклопластиком;
- Рассчитать затраты на: создание модели корпуса ракеты из стеклопластика, проектирование компьютерной модели и её расчет на прочность.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1 СТЕКЛОПЛАСТИК КАК КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ	10
1.1 Наполнители для стеклопластика	10
1.2 Связующие материалы для стеклопластика	12
1.3 Свойства и характеристики стеклопластика	13
1.4 Методы изготовления стеклопластика	14
1.5 Преимущества стеклопластика перед металлическими материалами	18
1.6 Методы моделирования и исследования модели	19
1.7 Ультразвуковой контроль стеклопластика	22
2 ПРОВЕДЕНИЕ УЗК ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	26
2.1 Выбор оборудования для УЗК композиционных материалов	26
2.1.1 Дефектоскоп А1212 Мастер	26
2.1.1.1 Назначение и область применения	26
2.1.1.2 Условия эксплуатации	27
2.1.1.3 Основные параметры прибора	27
2.1.1.4 Устройство прибора	27
2.1.1.5 Режим работы прибора	28
2.1.1.6 Клавиатура	29
2.1.2 Датчики ПЭП	29
2.1.3 Датчик ПЭП СП–15 импедансный	30
2.1.4 Стандартные образцы	32
2.1.5 Настройка оборудования	33
2.2 Технологическая карта на обнаружение дефектов в композиционных материалах	34
2.3 Эксперимент на сжатие стеклопластикового корпуса	37

2.3.1 Тензометрические датчики	37
2.3.2 Пресс установка	38
3 РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КОРПУСА ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА	45
3.1 Методика расчета	45
3.2 Создание 3D модели трубы	51
3.3 Создание проекта в ANSYS Workbench и задание свойств материалов	51
3.4 Расчет на прочности	52
4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ СО СТЕКЛОПЛАСТИКОМ	58
4.1 Негативное воздействие стеклопластика на человека и окружающую среду	58
4.2 Требования техники безопасности	60
4.3 Средства индивидуальной защиты работника	62
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	68
ПРИЛОЖЕНИЕ	71

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

КМ – композиционный материал;

МКЭ – метод конечных элементов;

УЗ – ультразвук;

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;

УЗК – ультразвуковой контроль;

ПДК – предельно допустимые концентрации.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время композиционные материалы широко используются во многих отраслях промышленности, особенно в авиакосмической. Это связано с их уникальными свойствами: за счет меньшей массы детали из композиционного материала будут обладать высокой прочностью, не подвергаться коррозии, и иметь большой срок службы. Обеспечить гарантию наилучшего качества и безопасности продукта из композиционного материала нельзя без использования действующих способов неразрушающего контроля.

Стеклопластик относится к композитным материалам, которые состоят из наполнителя на основе стекловолокна и связующего полимера. Его отличает от других материалов соотношение прочности и упругости к массе. Он легкий, но при этом стойкий к воздействию на излом, растяжению, давлению. В связи с этими качествами стеклопластик широко используется в таких отраслях, как кораблестроение, самолетостроение, химическая промышленность, строительство. Предельное состояние стеклопластикового материала при продольном напряжении позволяет выявить критерии разрушения полимерных композиционных материалов, в том числе и стеклопластика. Поэтому, по моему мнению, тема данного исследования очень актуальна.

Вопросы изготовления стеклопластиковых материалов, а также их свойства и технические характеристики рассмотрены в литературе достаточно широко. Их изучали такие ученые как В.А. Барынин, О.Н. Будадин, А.А. Кульков, В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков, В.В. Воробей, В.Б. Маркин, А.Н. Елпатьевский, А.А. Дудченко, П.А. Зиновьев и многие другие.

Цель работы: Определить характеристики при продольном сжатии и использование полученных характеристик для определения конструкции при проектировании.

Для выполнения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

– Изучить материал про стеклопластик, как композиционный материал;



- Произвести эксперимент на сжатие стеклопластикового корпуса, обработать полученные результаты;
- Построить компьютерную модель, на основании полученных данных эксперимента рассмотреть рассредоточенную и сосредоточенную нагрузку;
- Провести оценку безопасности при работе со стеклопластиком;
- Рассчитать затраты на: создание модели корпуса ракеты из стеклопластика, проектирование компьютерной модели и её расчет на прочность.

# 1 СТЕКЛОПЛАСТИК КАК КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ

## 1.1 Наполнители для стеклопластика

Для изготовления стеклопластика используются различные наполнители и связующие. Рассмотрим некоторые из них.

Как отмечает В.В. Мурашов, что одним из основных элементов стеклоком-  
позита служит армирующий наполнитель, который определяет его механические  
характеристики.

В состав стеклянных наполнителей входят оксиды кремния, алюминия,  
магния, кальция. Для получения волокон с особыми свойствами включают в со-  
став оксиды бора, натрия, циркония [13, с. 17].

Согласно ТУ 2296–250–24046478–95 в состав стеклопластика также вхо-  
дит *волоконный наполнитель*. Выглядит как жгут, выполненный из стеклянных  
нитей, не скрученных между собой. Прямой стеклоровинг применяется в стеклот-  
кане и стекломате.

Стеклоровинг включает в себя алюмоборосиликатное вещество, имеющее  
марку типа Е, с присутствием циркония. Для исключения повреждений и лучшей  
подходимости со связующими нити проходят обработку замасливателями.

Выделяют следующие виды стеклоровинга:

1. Прямой. Представляет собой жгут, не скрученный в нить, используется  
вместе с полиэфирными и эпоксидными смолами.

2. Сложенный. Имеет вид сплошных нитей.

Также для производства стеклопластика используются стекломаты, имею-  
щие вид нетканного полотна, которое собирается из хаотично выполненных ни-  
тей, имеющих различные размеры, пропитываемые смолами.

От того, какой плотности будет полотно и смола, различают следующие  
виды матов:

- порошок. Для склеивания применяют порошок наполнитель. Он  
обладает рассыпчатой структурой, плотностью 100–850 г/м<sup>2</sup>, не высокой пла-  
стичностью.

– эмульсионный. Волокна, имеющие длину 5–45 мм, которые склеиваются эмульсионным клеевым составом, обладающие плотностью 100–850 г/м<sup>2</sup>.

– длинноволокнистый. Волокна, которые склеиваются с помощью связующих полимеров, обладающие плотностью 120–920 г/м<sup>2</sup> [8].

Выделяют стеклоткань – это материал, состоящий из тканного волокна, имеющий плотность нити 30–90 мкм. Преобладает множество видов стеклоткани, но как армирующий материал используется конструкционная ткань, а так же имеет применение ровинговая ткань, имеющая плотность материала 30–1800 г/м<sup>2</sup>.

По способу плетения нити стеклоткани различают:

– с полотняным переплетением (стеклорогожа), где нити пересекаются во всех переплетениях, так ткань получается более плотной и плохо подвергается изгибам;

– с саржевым переплетением, нити по диагонали создают рубчики в сплетениях, таким образом ткань получается менее плотная, но за счет этого подходит для изготовления деталей сложных конструкций;

– с сатиновым переплетением, нити выполняют рисунок в плетении, так достигается гибкость ткани, и она преобладает низкой плотностью [10].

Рубленое стекловолокно, которое производится следующими методами:

1. Разделение тканых жгутов на нити, имеющих длину 6–35 мм.
2. Обработка нитей на молотковой дробилке с достижением длины 0,8 мм, в последующем которые применяются как армирующие составляющие.

Стеклопластиком, имеющим основу рубленого волокна, присущи анизотропные свойства. Составляющим для рубленого волокна приходится полиэфирные, винилэфирные или формальдегидные смолы [6].

Основой для изготовления стекловолокон являются отходы стекол, например такие как:

- разбитые оконные стекла, стеклянные бутылки;
- не подлежащие использованию или разбитые изделия, которые создаются на производствах.

Дефективные и не нужные стекла подвергаются сто процентному перерабатыванию, что позволяет судить о экономии сырья и экологичности окружающей среды.

Таким образом, для изготовления стеклопластика используются различные наполнители в виде стекловолокнистых материалов. Сырьем для их изготовления являются отходы стекла. Это, по моему мнению, выгодно как для производства стеклопластика, так и для защиты окружающей среды битым стеклом. Наиболее выгодными видами волокнистого наполнителя оказались: крученые изделия – шнуры, жгуты, шпагаты; ткани – ленты, маты, холсты.

## **1.2 Связующие материалы стеклопластика**

Для соединения армирующих стеклянных нитей в единую матрицу, применяются связующие, которые основываются на синтетических веществах. В итоге стеклопластик имеет представление армированной и полимеризированной смолы.

Связующие части не имеют способности проходить в состав наполнителя, их обязанность, постепенное окутывание внешних поверхностей всех волокон и доброкачественное склеивание волокон при отвердевании смолы.

Главными требованиями, относящимися к связующим смолам, являются:

- не низкие смачивающие требования;
- высокая адгезия к стекловолокну [3].

Более широко применяющиеся виды синтетических смол с хорошей адгезией к волокну, которые необходимы в производстве стеклопластиковых деталей, являются:

- эпоксидные смолы, например ЭД–5, ЭД–20, ЭД–22;
- полиэфирные смолы, такие как M105, M 251, G 200 LE;
- кремний–органические смолы;
- фенольно–формальдегидные смолы и их другие похожие модификации

[5].

Имеют большое применение стеклопластики, которые состоят из эпоксидных и полиэфирных составляющих, такие стеклопластики имеют соответствующее название, эпоксидные и полиэфирные.

Полиэфирные стеклопластики качественно выполняют работу в диапазонах температур от 130 до 150°С, эпоксидные стеклопластики до 200°С.

Стеклопластики, которые состоят на кремний–органических составляющих могут выполнять работу при температурах до 350–370°С и выносить не долгие нагревания до 540°С [5].

Таким образом, для соединения армирующих нитей в одно составляющее применяются связующие, основанные на синтетических веществах. В итоге стеклопластик имеет представление армированной и полимеризованной смолы.

### 1.3 Свойства и характеристики стеклопластика

Стеклопластики имеют наивыгодное различие от иных конструкционных металлов, совмещая в себе высокие прочностные характеристики, но при этом имея малый удельный вес, поэтому они имеют название «легкие металлы».

В связи с модификацией пространственной ориентировки армирующих волокон и составляющих связующих смол, имеется возможность исправлять в необходимом направлении технические характеристики и механические свойства.

В таблице 1 приведены усредненные прочностные показатели для стеклопластиковых материалов на различных связующих смолах.

Таблица 1 – Свойства стеклопластиков на различных смолах

Наименование показателя	Единица измерения	Значения показателей для стеклопластиков на основе различных смол		
		Полиэфирная	Эпоксидная	Фенолформальдегидная
Плотность	г/см <sup>3</sup>	1,4–1,75	1,6–1,9	1,5–1,8
Плотность при растяжении	МПа	140–450	400–600	300–500
Прочность при статическом изгибе	Мпа	150–500	400–800	200–600
Прочность при сжатии	МПа	150–300	200–400	100–300
Модуль упругости при растяжении	ГПа	11–25	22–32	18–25

Как показывают данные таблицы, значения показателей для стеклопластиков на основе эпоксидных смол, выгодно отличаются от остальных рассмотренных.

Для сопоставления физико–механических характеристик стеклопластика с аналогичными показателями других материалов в таблице 2 приведено сравнение данные для стеклопластика, ПВХ, стали и алюминия.

Таблица 2 – Сравнительные данные стеклопластика, ПВХ, стали и алюминия

Физико–механические характеристики	Стеклопластик	ПВХ	Сталь	Алюминий
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600–2000	1400	7800	2700
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	420	41–48	410–480	80–430
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21–41	2,8	210	70
Модуль упругости при изгибе, Гпа	21–41	2,8	210	70
Коэффициент теплопроводности, Вт/мК	0,3–0,5	0,15–0,16	46	140–190
Коэффициент линейного расширения, *10 <sup>-6</sup> м/град	5–14	57–75	11–14	140–190

Таким образом, данные таблицы свидетельствуют о том, что такие свойства стеклопластика, как разрушающее напряжение при сжатии и изгибе уступают стали и в некоторых случаях алюминию. Такие же качества стеклопластик проявляет по показателям модулей упругости при растяжении и изгибе. Коэффициенты линейного расширения и теплопроводности у стеклопластика самые низкие.

#### **1.4 Методы изготовления стеклопластика**

Согласно ТУ 2296–001–26757545–2005. Трубы стеклопластиковые. Стеклопластиковые конструкции изготавливаются различными способами. Зачастую такие способы не требуют больших затрат на станки, материалы. Наиболее простой и доступный способ изготовления деталей – ручное формование. Для такого способа требуется всего лишь изготовить матрицу и необходимые, доступные инструменты. На данный момент большое применение имеют мат-

рицы из стеклопластика, изготовление которых не составит большого труда, так же они являются долговечными и прочными [17].

Рассмотрим более детально изготовление стеклопластиков.

Стеклопластик относится к листовым пластикам. Их производят путем горячего прессования полимерной смолы, которую смешивают с волокном или тканью, они относятся к армирующим элементам. За счет армирующего элемента готовая деталь приобретает высокие физико-механические свойства.

В промышленности при изготовлении деталей из стеклопластика используются различные полимерные смолы. Большое применение имеют смолы состоящие на основе полиэфиров, винилэфирные, а также эпоксидные пластики.

Применяемые полимеры можно разделить на две группы:

1) по методу изготовления:

- ручное;
- вакуумный впрыск;
- горячее прессование;
- намотка;
- пултрузия.

2) по назначению:

- стандартные конструкционные;
- химически стойкие;
- пожаробезопасные;
- тепловыносливые;
- прозрачные [7].

Остановимся подробнее на методах и способах получения изделий из стеклопластика.

#### *Ручное формование*

При использовании данной технологии стекловолокно или стеклоткань пропитывают полимером, применяя ручной инструмент, например, валик или кисть. В результате изготовления получают – стекломат. Затем стекломат укладывают в форму, в которой производят обработку благодаря валиков. Прока-

точные валики используются для убирания пузырей воздуха и равномерного размещения полимеров. Далее необходимо что бы произошло отверждение детали при комнатной температуре. По окончанию деталь достается из формы, и подвергается дальнейшей обработке, удаляется грат, вырезаются пазы и отверстия.

Для ручного формования можно использовать различные типы смол и стекловолокон, которые между собой будут совместимы. Среди достоинств данной технологии следует отметить наличие не дорогостоящего оборудования, широкий выбор компонентов, низкая цена, относительно большое количество используемого стекловолокна при изготовлении. Недостатком является маленькая производительность, большой процент качества изготовленных деталей зависящий от человека.[10].

#### *Способ напыления*

Используя метод напыления, стеклянную нить пропускают через специальную установку, которая разрезает ее на стекловолокно малой длины, это называется рубленным ровингом. Рубленный ровинг смешивается в воздухе со смолой и катализатором, далее переходит в формы, подвергается прокатке валиком для удаления воздуха. Затем стеклопластик отверждается при комнатной температуре.

Для использования рубленного ровинга применяются эфирные полимеры и стеклянные нити. Достоинством является быстрота изготовления. Но этот способ имеет важные недостатки, которые тормозят его более широкое внедрение в производство. Среди них можно выделить большие траты смолы, из-за чего получается большая масса стеклопластика. Так же обладает маленькой прочностью из-за того, что применяются не длинные волокна. [3].

#### *Пултрузия*

Стекловолокно проходит через емкость, где находится смола, затем проходит через катушечную раму и поступает в разогретый формовочный инструмент. В нем происходит избавление от лишнего полимера, и в дальнейшем стеклопластик отвердевает. В конце готовая деталь подвергается разрезанию на необходимые части.



В данном методе используются следующие смолы: эпоксидные, полиэфирные или винилэфирные, а также различные волокна. Достоинствами такого метода являются производительность и автоматизация процесса, способность менять составы композиций. Как итог детали имеют высокую прочность. К недостаткам метода относятся маленькая производительность изготавливаемых деталей.

#### *Метод намотки*

Такой способ чаще используется, когда необходимо сделать емкость, трубу или же другие пустотелые изделия. Метод основан на прохождении волокна через емкость, где находится смола, затем проходит через валик и поступает на намотку. Валик предназначен для избавления излишек смолы и для натяжения волокна. Волокно поступает на оправку необходимых размеров. По окончании готовая деталь снимается с оправки.

Когда происходит намотка, нет определенного ограничивающего количества при использовании связующих или волокон. Достоинства этого метода изготовительность и быстрота, большая прочность и малый удельный вес. Так же при таком методе стекловолокно ориентировано, что позволяет повысить свойства материала. Недостатками являются большая цена установок и оправок, а так же не большой выбор используемых материалов.

#### *Препреги*

Для использования метода препрегов используется заранее подготовленные смолой связующие стеклоткани. Они насыщаются при высоком давлении. При изготовлении они размещаются на формовочную поверхность и применяется мешок для вакуума. Материал подвергают нагреву, все зависит от того, какая смола используется, примерно до 120 – 180° С. Связующее приобретает текучесть, затем пластик растекается по всей форме. Далее переходят к сшивке полимеров, и они приобретают твердую форму.

Применяя этот метод, используют смолы: эпоксидные, полиэфирные, фенольные, и волокна любого вида. Плюсы – большое количество волокна и мне

большое количество газа, экологичность. Минусами являются дорогие компоненты и ограниченность выбора размеров изготовленной продукции [7].

Таким образом, в производстве стеклопластиков используются различные методы. Их разделяют по методу формования (ручное; вакуумный впрыск; горячее прессование; намотка; пултрузия) и по назначению (стандартные конструкционные; химически стойкие; пожаробезопасные; тепловыносливые; прозрачные).

### **1.5 Преимущества стеклопластика перед металлическими материалами**

Стеклопластик, безусловно, имеет ряд преимуществ перед металлическими материалами.

Главными преимуществами стеклопластика являются такие факторы, как:

- высокая прочность, стеклопластики превосходят большое количество полимеров и сплавов цветных металлов, их даже можно сопоставить с конструкционной сталью;

- малый удельный вес, значения которого находятся в диапазоне 1,4–2,1 г/см<sup>3</sup>. Для понимания – удельный вес стали 7,8 г/см<sup>3</sup>;

- высокий показатель удельной прочности, для стеклопластика удельная прочность находится в пределах 90,0 единиц, для примера, у стали 3,1;

- высокая химическая инертность, стеклопластик благоприятно относится к действию на него бытовых загрязнителей, не поддаются действию многих растворителей;

- стоек к бактериальным воздействиям, стеклопластик не подвергается гниению и разложению;

- низкую теплопроводность, за счет этого стеклопластик используется для изготовления теплоизолирующих конструкций в авиастроении, судостроении, строительстве, и т.п.;

- высокие диэлектрические свойства;

– вероятность покраски стеклопластика на этапе производства. Стеклопластик имеет возможность не выгорать, хорошо сохраняет красящий цвет, есть возможность делать узоры [11].

Но стеклопластик имеет и ряд недостатков. Среди «минусов» стеклопластиковых материалов отмечает следующие:

- относительно малый модуль упругости, исходя из чего может подвергаться деформациям при изгибе;
- низкая износостойкость, не хорошо переносит абразивные воздействия;
- предрасположенность к утрате прочности и деформациям, когда истекает срок эксплуатации;
- возникновение канцерогенной пыли при механической обработке, поэтому необходимо использовать средства индивидуальной защиты;
- обусловленность качества деталей от этапов изготовления;
- анизотропность прочностных и др. качеств [6].

Таким образом, как видим, стеклопластик, если его сравнивать с металлическими изделиями, имеет больше преимуществ, чем недостатков. Поэтому, использование таких изделий чаще целесообразно, чем нежелательно.

### **1.6 Методы моделирования и исследования модели**

Существуют различные методы моделирования модели из стеклопластика. Остановимся на них подробнее.

Для моделирования модели требуются человеческие руки, резиновые перчатки, респиратор, валик, кисть.

В большинстве случаев необходимо сделать одну деталь, и так же сэкономить расходные материалы и время на изготовление, для этого изготавливается макет и на него наносится стеклопластик. Макет необходимо изготавливать меньшим размером, чем должна быть деталь.

Другой способ, деталь изготавливается по матрице. Находит свое применение, когда деталь необходимо «размножить», но так же, если деталь была сделана в единственном экземпляре, но есть возможность ее деформирования во время использования.

Первым делом требуется создать макет, так называемую будущую форму из разных подручных материалов.

Для ровных, гладких изогнутых плоскостей зачастую применяют ткань которую натягивают между жесткими краями.

Для больших и крупноразмерных поверхностей, и для прямых длинных и тонких применяется листовая металл, фанера, ДСП. Для того, чтобы сделать ребра, можно использовать картон, вырезается форма детали, ставится по основанию, далее заполняются пеной, где осталось пространство, либо натягивается ткань.

Хорошо в качестве материала для макета применяется пенопласт, его можно без труда порезать, шкурить, хорошо склеивается между собой, и имеет низкую цену.

Когда уже макет сделан, можно переходить к следующему этапу – «покраска». Для того что бы смола не попала на пенопласт, его можно обклеить газетой на ПВА клей, он не допускает попадание смолы и служит дополнительным каркасом для макета. Существует возможность оградить пенопласт от смолы с помощью алюминиевого скотча. Затем деталь подвергается обработке наждачной бумагой до получения желаемых форм и размеров.

Далее этап необходим, если макет создается под матрицу. Большое количество материалов, из которых зачастую создаются макеты, имеющие хорошую обработку разделителями, всё равно будут продолжать впитывать в себя смолу, поэтому возникает потребность покрывать макет лаком.

Главное не пренебрегать рекомендациями производителя по добавлению смолы и отвердителя, потому что если отвердителя будет больше, то смола закипит, либо застынет до нанесения. Если будет не хватать отвердителя, то смола не кристаллизуется. Необходимо делать заготовку смолы столько, что бы она была использована в течении 20 минут.

Необходимо что бы температура при работе в помещении была не меньше 20 градусов. Сперва необходимо определить, матрица будет состоять из одной или из нескольких частей.

Следующим этапом создаются поля из тоненького картона, или же из пластика, прикрепляются на пластилин по краям матрицы. После готовности частей матрицы, нужно убрать поля и нанести воск на части, которые остались. Главное, чтобы макет и изделие оставались чистыми. Затем производят нанесение воска, наносится в несколько слоев, между этим слои просушиваются. Далее по возможности необходимо нанести поливиниловый спирт в один слой.

Далее необходимо нанести гелькоут, имеющий гелеобразный состав, необходимый для обеспечения создания искусственного защитного слоя изделий из композитов. Существует два вида нанесения, с помощью кисти и с помощью пульверизатора. Кистью необходимо наносить в два тонких слоя.

После того, как гелькоут застынет, нужно нанести второй слой гелькоута, или же стекловуаль. Необходимо осторожно промокнуть кистью, не повреждая гелькоут. После кристаллизации слоя вместе со стекловуалью нужно приступить к нанесению стекломата.

Можно поступить по другому, берется маленький кусок стекломата, промакивается смолой и не незамедлительно наносится с помощью кисти и пинцета на нужное место. Если не успеть нанести, то может произойти расхождение стекломата. После того как все нужные слои нанесены, необходимо создать каркас для матрицы. Нужно это для того, что бы матрица, после того как она будет снята, не деформировалась.

Формулы для подсчета материалов при изготовлении:

Расчет веса материалов.

Площадь поверхности · слои · удельный вес стекломата = вес стекломата.

Вес стекломата · 2 (отношение к смоле 1:2) = вес смолы.

Площадь поверхности · 0,6 (удельный вес гелькоута 0,6 кг · 1 м<sup>2</sup>) = вес гелькоута.

Вес смолы · 0,03 (удельный вес закрепителя (0,03 кг · 1 кг) = вес закрепителя.

Вес стеклоткани + Вес смолы + Вес гелькоута + Вес закрепителя = Вес детали (будущей) [8].

Также для моделирования/исследования изделия из стеклопластика можно использовать программу ANSYS, которая представляет собой гибкое, надежное средство проектирования и анализа.

Используемый элемент SOLID185 производит использования в нескольких режимах: при создании однородной среды, и неоднородной среды. Переключение режимов производится за счет задания величин главной опции KEYOPT(3) или k3. Значение 0 относится к однородной среде, 1 относится к слоистой среде.

Элемент SOLID185 имеет представление в виде криволинейного гексаэдра или же шестигранника, имеющий 8 узлов (рисунок 1).

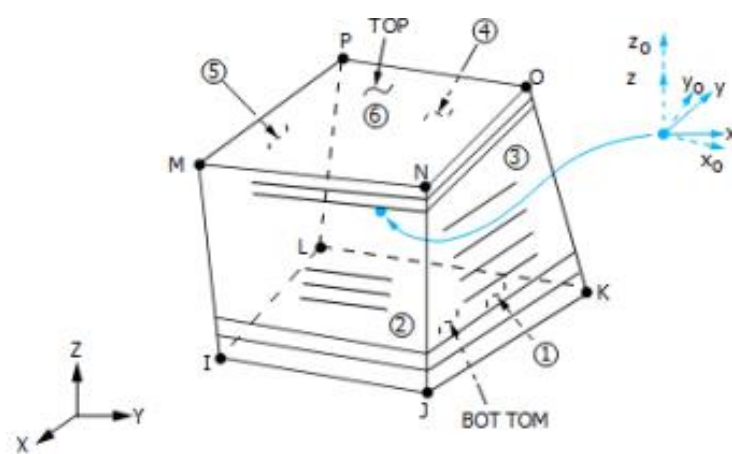


Рисунок 1 – Восьмиузловой слоистый конечный элемент

Выбирая технологию строения конечного элемента, можно осуществить благодаря главной опции KEYOPT(2). Где значение 2 будет соответствовать методу наилучшего представления деформаций, а значение 3 будет соответствовать методу простейшего улучшенного представления деформаций.

Таким образом, моделирование/исследование изделия из стеклопластика представляет собой довольно сложный многоступенчатый процесс, который включает такие этапы, как изготовление матрицы (болванки), расчет материалов, выведение «под покраску», нанесение смолы и гелькоута. Также для исследования может использоваться программа ANSYS, которая представляет собой гибкое, надежное средство проектирования и анализа.

## 1.7 Ультразвуковой контроль стеклопластика

Традиционный ультразвуковой контроль для выявления ламинарных трещин в стеклопластике используется тогда, когда нужно определить их наличие в резервуарах, трубах, корабельных корпусах, лопатках ветровых турбин и т.п.

Поскольку стеклопластик имеет ламинарную структуру, он способен со временем растрескиваться параллельно поверхности, под влиянием стрессовых воздействий или из-за производственных дефектов. Эти скрытые внутренние дефекты существенно влияют на прочность конструкции и обычно выявляются в ходе радиографического контроля.

Ультразвуковая дефектоскопия является простым способом обнаружения внутренних пустот. Высокочастотные звуковые волны, которые генерируются преобразователем, проникают в исследуемый объект и отражаются от трещин и пустот в предсказуемом направлении. Ультразвуковые волны проходят через материал до границы раздела двух сред, например, до дальней стенки. Если на пути ультразвука встречается трещина, то она вырабатывает дополнительный эхо-сигнал там, где его не должно быть. Путем внимательного изучения структуры эхо-сигналов, опытный оператор быстро определяет целостность материала.

Рассмотрим оборудование, которое может использоваться для этой цели.

Для данного контроля можно использовать любой дефектоскоп серии ЕРОСН<sup>®</sup>, ЕРОСН<sup>®</sup> 650 и ЕРОСН 6LT. Тип используемого преобразователя зависит от геометрии и толщины детали. Специальный преобразователь с линией задержки М2008 (частотой 0,5 МГц, диам. 25,4 мм) предназначен для контроля изделий из толстого стеклопластика и композиционных материалов (толщиной более 12,5 мм). Для измерения тонкого стеклопластика используется контактный преобразователь М1036 (2,25 МГц, диам. 12,7 мм). [13]

Порядок работы заключается в следующем. Ультразвуковая дефектоскопия основана на технике сравнения. Эхо-сигналы, которые получает оператор в тестовом образце, сопоставляются с эхо-сигналами в калибровочном (бездефектном) образце. Поскольку звуковые волны отражаются от пустот и трещин, любые изменения в структуре эхо-сигнала указывают на изменения во

внутренней структуре материала. При контроле стеклопластика, оператор обращает внимание на наличие эхо-сигналов в отмеченном строке или окне, представляющем внутреннюю часть исследуемого образца. Неоднородная структура стеклопластика часто генерирует шум, обусловленный рассеянием звуковых волн, даже в твердых материалах. Однако, трещины, площадь которых приближается к диаметру луча ультразвука, отражают сильные локализованные сигналы и быстро фиксируются опытным оператором [5].

Ниже представлен пример выявления крупных ламинарных трещин в стенках топливного бака из толстого стеклопластика (толщиной 25,578 мм) с помощью дефектоскопа EPOCH® 650 и преобразователя на 500 КГц. Преобразователь устанавливается на поверхности объекта. В бездефектном образце, ультразвук доходит до нижней поверхности и генерирует эхо-сигнал с глубины 25,578 мм. На это указывает пик в правой части А-скана (на рисунке 2 слева).

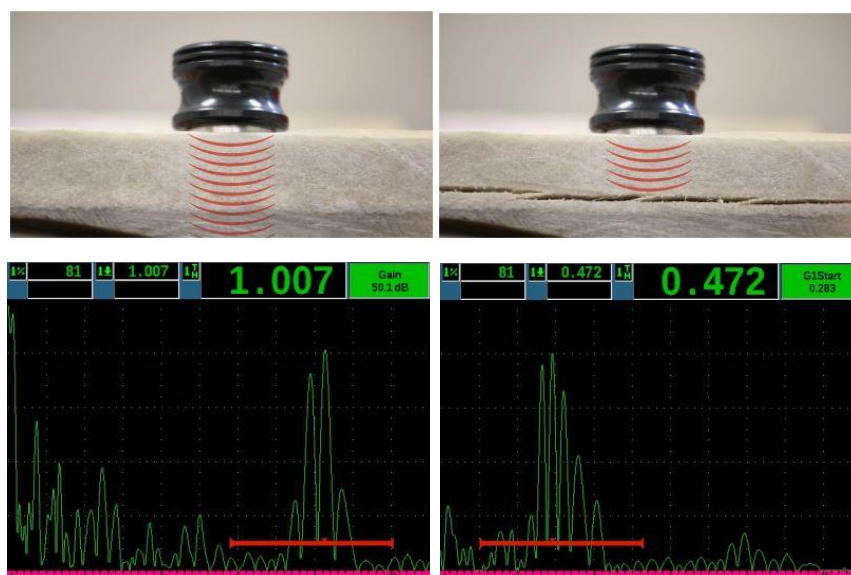


Рисунок 2 – Диагностика стеклопластика с помощью дефектоскопа EPOCH® 650 и преобразователя на 500 КГц

При наличии трещины, ультразвук отражается от дефекта и создает пик в пределах зоны экрана, отмеченной красным стробом, которая представляет середину объекта контроля. Сильный эхо-сигнал в данной зоне указывает на наличие крупной несплошности в детали. Контроль занимает всего несколько секунд в каждой точке замера [3].



Таким образом, ультразвуковой контроль изделий из стеклопластика проводится для того, чтобы вовремя выявить микротрещины в изделии и предотвратить его аварийные ситуации. Для этой цели используются дефектоскопы и преобразователи различных видов.

Исходя из выше написанного, было определено, что стеклопластик относится к композитным материалам, которые состоят из наполнителя на основе стекловолокна и связующего полимера. Его отличает от других материалов соотношение прочности и упругости к массе. Он легкий, но при этом стойкий к воздействию на излом, растяжению, давлению. В связи с этими качествами стеклопластик широко используется в таких отраслях, как кораблестроение, самолетостроение, химическая промышленность, строительство.

## 2 ПРОВЕДЕНИЕ УЗК ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1 Выбор оборудования для УЗК композиционных материалов

#### 2.1.1 Дефектоскоп А1212 Мастер

##### 2.1.1.1 Назначение и область применения

Дефектоскоп принадлежит к ручным ультразвуковым приборам общего назначения портативного исполнения.



Рисунок 3 – Дефектоскоп А1212 Мастер

Дефектоскопический прибор нужен для нахождения, мониторинга размеров различных дефектов и нарушений сплошностей в конструкциях из металлов и пластмасс.

Дефектоскопический прибор позволяет сохранять в памяти нужную информацию, формировать и регистрировать сигналы. Дисплей позволяет отображать ультразвуковые сигналы в формате А–Скана. Дефектоскопический прибор совмещает в себе ручное и автоматическое измерение сигналов.

### 2.1.1.2 Условия эксплуатации

Прибор может использоваться в таких условиях:

- температура воздуха от -30 до +55 °С;
- относительная влажность воздуха до 95% при максимальной температуре +35 °С.

### 2.1.1.3 Параметры дефектоскопического прибора

Таблица 3– Параметры дефектоскопического прибора

Характеристика	Значение
Диапазон устанавливаемых скоростей ультразвука, м/с	от 500 до 14 999
Диапазон устанавливаемых рабочих частот, МГц	от 0,5 до 15,0
Диапазон перестройки усиления приемника, дБ	от 0 до 100
Отклонение установки усиления, дБ	±1,0
Диапазон измерений временных интервалов на частоте 2,5 МГц, мкс	от 0 до 1 900
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений временных интервалов мкс, где $T_{изм}$ – измеренное значение временного интервала	$\pm(0,1+0,0001 \cdot T_{изм})$
Диапазон измерений глубины залегания дефекта прямыми преобразователями, мм: – преобразователь S3568 2.5A0D10CL – преобразователь D1771 4.0A0D12CL	от 7 до 6 000 от 2 до 3 000
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений глубины залегания дефекта прямыми преобразователями, мм, где Н – измеряемая глубина залегания дефекта в мм	$\pm(0,02 \cdot Н + 1,00)$
Пределы допускаемых абсолютных погрешностей измерений координат дефекта наклонными преобразователями, мм: – глубины, где Н – измеряемая глубина залегания дефекта в мм – дальности по поверхности, где L – измеряемая дальность по поверхности до дефекта в мм	$\pm(0,03 \cdot Н + 1,00)$ $\pm(0,03 \cdot L + 1,00)$

### 2.1.1.4 Устройство прибора

Данный дефектоскоп включает электронный блок, к которому подключается ПЭП.

Электронный блок для возбуждения ПЭП осуществляет формирование электрических импульсов, усиление которых получают от пьезоэлектрических

сигналов, их обработку и представление в виде результатов измерения. Так же данные сохраняются в памяти и могут передаваться на компьютер.

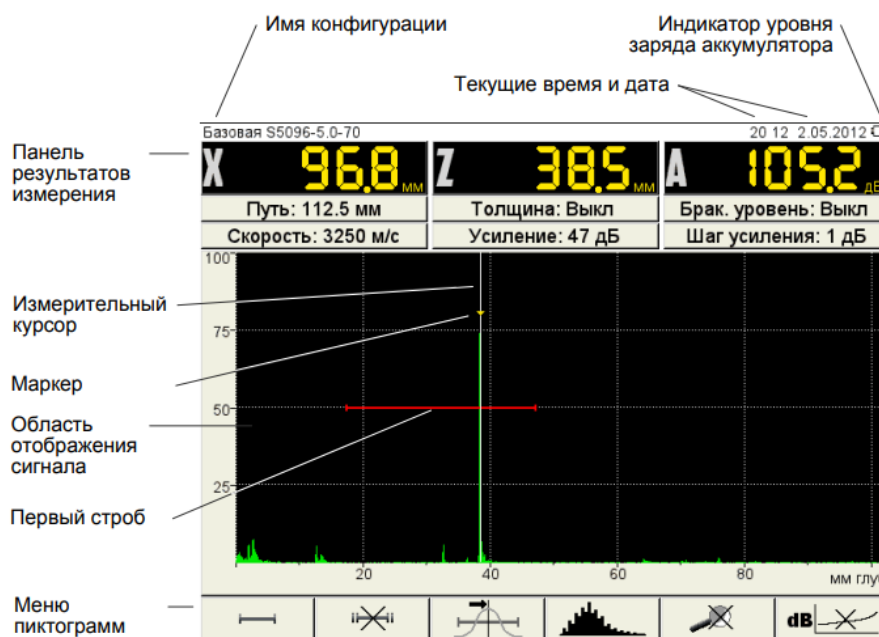


Рисунок 4 – Внешний вид экрана в рабочем режиме

Управление прибором осуществляется с помощью клавиатуры. Все данные отображаются на дисплее, такие как результаты измерения, состояние прибора и др.

Зарядка дефектоскопа производится с помощью аккумуляторного блока или от адаптера питания.

#### 2.1.1.5 Режимы работы прибора

К главным рабочим режимам относятся ДЕФЕКТОСКОП, СТОП, НАСТРОЙКА.

В рабочем режиме осуществляется настройка зондирующего импульса, выполняются измерения и производится усиление принимающих эхо-сигналов.

Рабочий режим СТОП осуществляет остановку сигналов, происходит запись и сохранение в память дефектоскопа.

Рабочий режим НАСТРОЙКА предназначен для выбора и настройки параметров прибора.

### 2.1.1.6 Клавиатура



Рисунок 5 – Вид клавиатуры дефектоскопа

### 2.1.2 Датчики ПЭП

ПЭП используются в УЗ контроле, который выступает в качестве излучателя и приемника УЗ импульса, обрабатываемого УЗ дефектоскопом. Работа ПЭП основана на пьезоэлектрическом эффекте – возникновение электрической поляризации под действием механических напряжений. Требования к ПЭП представлены в ГОСТ Р 55725–2013 – Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические.

Преобразователи по углу ввода делятся на:

– Прямые (по нормали к поверхности объекта контроля вводят, принимают колебания);

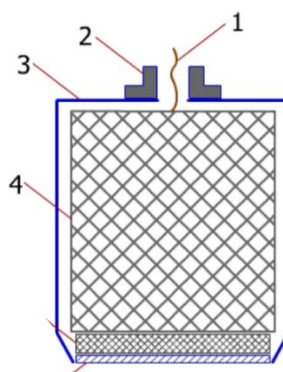


Рисунок 6 – Прямой ПЭП

1 – электрические выводы, для соединения дефектоскопа с ПЭП; 2 – разъем для соединения провода; 3 – корпус ПЭП; 4 – демпфер, гасит свободные колебания.

– Наклонные (вводят и принимают колебания в направлениях отличных от нормали в поверхности объекта контроля).

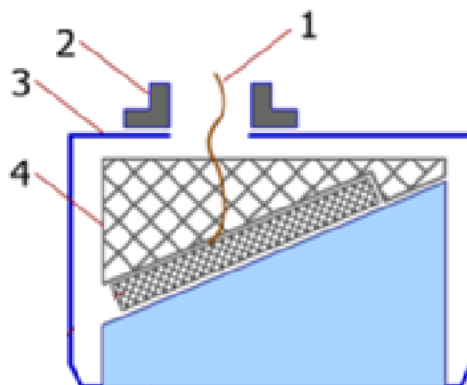


Рисунок 7 – Наклонный ПЭП

1 – электрические выводы, для соединения дефектоскопа с ПЭП; 2 – разъем для соединения провода; 3 – корпус; 4 – демпфер, гасит свободные колебания.

По способу размещения функций излучения и приема УЗ сигнала делятся на:

- совмещенные (работает в режиме приема и излучения);
- раздельно–совмещенные (имеют два и более элемента).

По частоте колебаний:

- высокочастотные (4–5 МГц);
- среднечастотные (1,8–2,5 МГц);
- низкочастотные (0,5–1,8 МГц).

### 2.1.3 Датчик ПЭП СП–15 импедансный

Для того что бы провести диагностику дефектов в корпусе будем использовать датчик ПЭП СП–15 импедансный.

СП–15 – это современный преобразователь второго поколения, имеющий предназначение для УЗК композиционных материалов. ПЭП относится к классу совмещенных и широкополосных.



Рисунок 8 – Датчик СП–15 импедансный

Пьезоэлектрические преобразователи производят поиск растрескиваний и непроклеев в композиционных материалах и сотовых материалах.

Данный ПЭП имеет отличительную конструкцию, это связано со строением внутреннего модуля. Этот датчик обладает маленькими размерами, имеет обширный выбор рабочих частот.

Делая вывод, ПЭП СП–15 оказался универсальным в поиске дефектов большинства КМ, которые имеют разное строение и обладают различными механическими свойствами.

Таблица 4 – Технические характеристики

Тип акустического контакта	Сухой точечный	
Режимы возбуждения	Непрерывный, импульсный	
Частотный интервал в режиме непрерывного возбуждения	кГц	от 4 до 40
Частотный интервал в режиме импульсного возбуждения	кГц	от 13 до 32
Собственная частота	кГц	$15,0 \pm 2,0$
Полоса пропускания в режиме непрерывного возбуждения	кГц	$36,0 \pm 4,0$
Полоса пропускания в режиме импульсного возбуждения	кГц	$19,0 \pm 2,0$
Емкость возбуждающего пьезоэлемента	пФ	$4000 \pm 500$
Емкость приемного пьезоэлемента	пФ	$650 \pm 150$

Встроенный индикатор дефекта	присутствует	
Разъем	ODU G11L0C	
Габаритные размеры	мм	$\text{Ø}30 \times 50 \pm 1$
Масса	г	$51 \pm 5$
Диапазон рабочих температур	°C	-20...+60
Средняя наработка на отказ	ч	не менее 1000

#### 2.1.4 Стандартные образцы

При настройке глубиномерного устройства и чувствительности дефектоскопа используют стандартные образцы предприятия. В качестве СОП используют отрезок трубы (рисунок 9), который выполняется из такого же материала, такого же размера и который имеет такое же качество поверхности, что и контрольный образец. Возможно отклонение размеров СОП (диаметр, толщина) от размера контрольного образца не более чем на  $\pm 10\%$ . На наружную и внутреннюю поверхность наносят дефекты типа прямоугольных рисок по ГОСТ 17410. Данный СОП предназначен для определения размера известного дефекта, находившегося на известной глубине и известном слое.

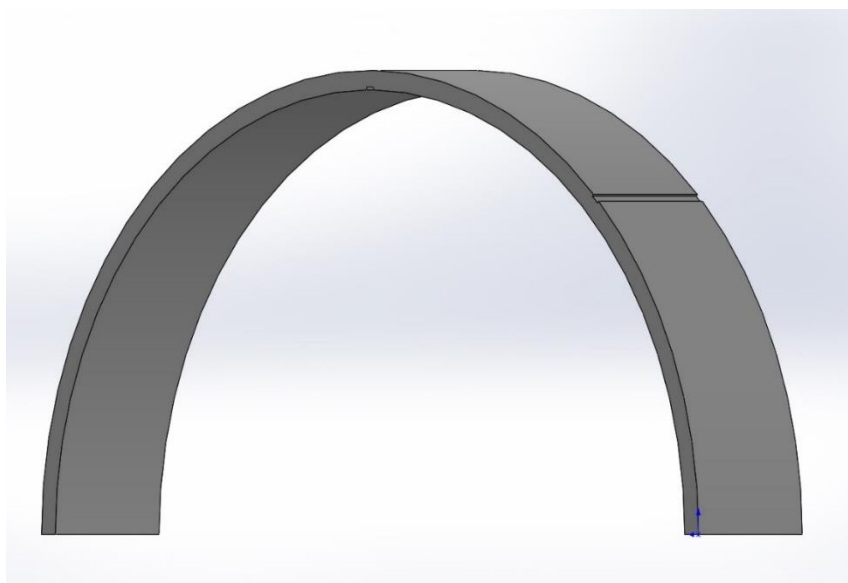


Рисунок 9 – Стандартный образец предприятия



СОП предназначенные для настройки толщиномера и чувствительности дефектоскопа с РС преобразователем делают в виде ступенек из отрезка трубы (рисунок 10). Данный СОП предназначен для обнаружения непроклеев и расслоений. В СОП делают плоскодонное отверстие заданного размера.

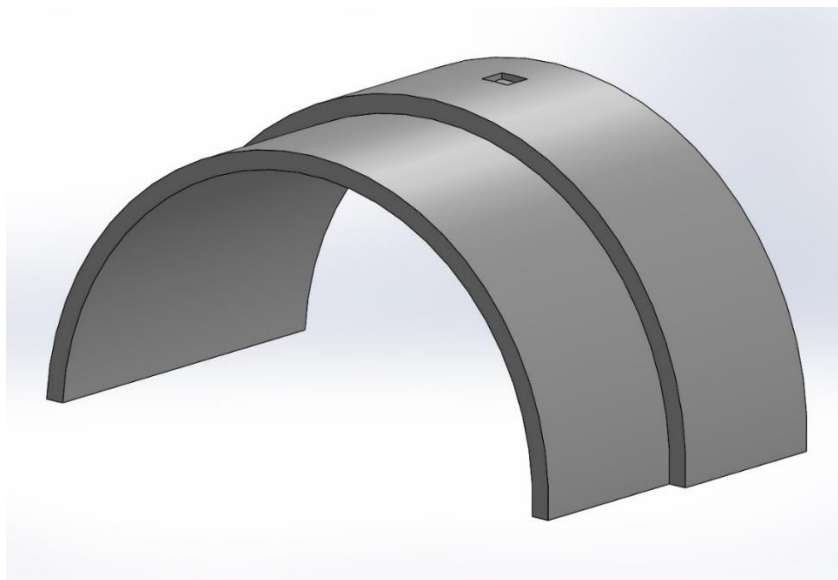


Рисунок 10 – Стандартный образец в виде ступенек

Настраиваем дефектоскоп на такую чувствительность, что бы амплитуда эхо–сигнала имела различие не более чем в 3 дБ от наружной и внутренней риски, в зоне контроля.

#### 2.1.5 Настройка оборудования

Дефектоскоп настраивают при помощи СОП. На экране дефектоскопа производится установка сигнала и донного сигнала от верхней поверхности. Установка ПЭП производится над специально сделанным дефектом, который имеет меньший недопускающий размер, имеющий расположение ближе к глубине, которая контролируется. Если контроль объекта производится по всей глубине, тогда ПЭП ставят над специально сделанным дефектом, который находится рядом с донной поверхностью.

Дефектоскоп необходимо настраивать так, чтобы полученный сигнал от специально сделанного дефекта не менее 80 процентов от высоты дефектоскопического экрана.

Преобразователь на контрольном образце устанавливается на место, где дефект отсутствует. Затем анализируют донный сигнал, который был получен с места без дефекта контрольного образца и детали, которая контролируется. Если будет необходимо, то производится коррекция по донному сигналу.

Когда контрольный образец подвергается сканированию с помощью автоматизированной системы, фиксируются изображения и полученные амплитуды сигналов от специально сделанных дефектов, при контроле, который был произведен в ручную, необходимо фиксировать только показатели амплитуды сигнала.

## 2.2 Технологическая карта на обнаружение дефектов в композиционных материалах

Таблица 5 – Технологическая карта

Объект контроля	Модель корпуса ракеты		
Маркировка, основные размеры	l=577 мм, d=95 мм, s=2 мм		
Наименование материала	Стеклопластик (стеклоткань ЭЗ/1_200, эпоксидная смола ЭД_20)		
Метод изготовления	Метод намотки		
Тип укладки	Намотка		
Количество контрольных образцов, их маркировку и основные размеры	Один контрольный образец		
Метод контроля	А		
Схема контроля			
<b>2 Нормативная документация</b>			
ГОСТ Р 56814_2015			
<b>3 Средства контроля и необходимые принадлежности</b>			
<b>Наименование</b>	<b>МО</b>	<b>Наименование</b>	<b>МО</b>
Ультразвуковой дефектоскоп А1212 Мастер	+	Линейка металлическая 0_150 мм	+

Наименование	МО	Наименование	МО
Преобразователь 2,5-65°	+	Контактная жидкость	-
Государственные стандартные образцы	+	Маркер	-
Стандартные образцы предприятия	+	Ветошь	-
<b>4 Подготовка к контролю</b>			
1. Проверка под-готовки объекта контроля	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Безопасный подход к объекту контроля.</li> <li>2. Контроль проводим при температуре -30° до +50° С.</li> <li>3. Объект контроля должен быть зачищен от грязи и др. загрязнений.</li> <li>4. Отметить начало и направление контроля.</li> </ol>		
2. Проверка средств контроля и настройка параметров контроля	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Произвести проверку пригодности всех средств контроля и метрологическое обеспечение средств измерений.</li> <li>2. С помощью государственных стандартных образцов из такого же материала, как и сам объект контроля, проверяем параметры преобразователя.</li> <li>3. С помощью СОП настраиваем глубиномер дефектоскопа.</li> <li>4. С помощью СОП настраиваем ВРЧ и АРД.</li> <li>5. Скорость развертки настраиваем согласно схемы в пункте 3.</li> </ol>		
3. Схема настройки дефектоскопа			

<b>5. Параметры контроля</b>
<p>Скол – размер не более 3,0 мм;</p> <p>Трещина – не допускается;</p> <p>Расслаивание краев – размер не более 3,0 мм;</p> <p>Внутреннее расслаивание – не допускается;</p> <p>Сухое место – диаметр не более 9,5 мм;</p> <p>Растрескивание – размер не более 21 мм;</p> <p>Пузырь (пустота) – диаметр не более 1,5 мм;</p> <p>Вздутие – диаметр не более 3,0 мм;</p> <p>Бугристость – не допускается;</p> <p>Пористая поверхность – не более 25 пор;</p> <p>Впадина – диаметр не более 9,5 мм, глубиной не более 0,25;</p> <p>Царапина – длина не более 25 мм, глубиной не более 0,125 мм</p>
<b>6. Порядок проведения контроля и измерения характеристик несплошностей</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Контроль производим поперечно продольным сканированием, со скоростью не более 100 мм/с, с вращением преобразователя вокруг своей оси на 10–15 градусов.</li> <li>2. При появлении амплитуды сигнала в зоне контроля определяем его максимальную амплитуду, если амплитуда сигнала выше уровня фиксации, фиксируем его глубину залегания и амплитуду в месте максимальной амплитуды.</li> <li>3. Условная протяженность определяется продольно поперечным сканированием на уровне фиксации.</li> <li>4. Определяем место положения дефекта и учитываем количество дефектов на оценочном участке.</li> </ol>
<b>7. Оформление результатов контроля</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Указывается регистрационный номер, дата проведения контроля.</li> <li>2. Наименование объекта контроля.</li> <li>3. Указать используемую нормативную документацию.</li> <li>4. Указать перечень средств контроля.</li> <li>5. Результаты контроля с описанием каждого дефекта.</li> <li>6. Общее заключение по объекту контроля.</li> <li>7. Подпись проводившего контроль с указанием номера квалификационного удостоверения.</li> <li>8. Подпись руководителя работ по контролю.</li> </ol>

## 2.3 Эксперимент на сжатие стеклопластикового корпуса

### 2.3.1 Тензометрические датчики

Тензометрический датчик, это приспособление, которое обращает измеренную величину деформации в электрический сигнал (рисунок 11). Это преобразование осуществляется за счет изменения сопротивления датчика при меняющихся размерах при сжатии.

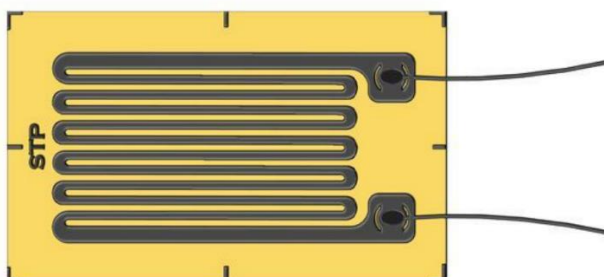


Рисунок 11 – Тензодатчик

Главным является тензодатчик, который был установлен по середине оси стеклопластикового корпуса.

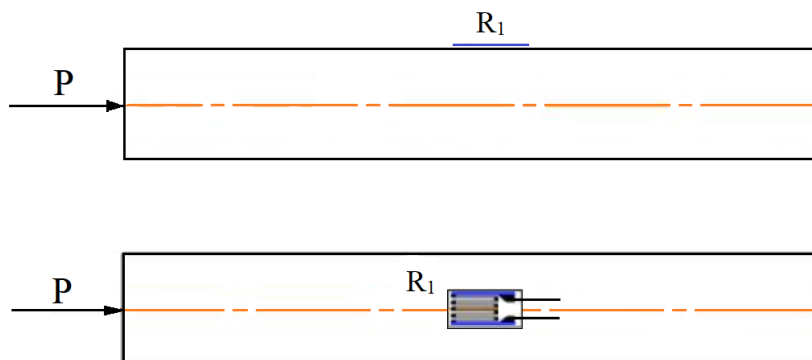


Рисунок 12 – Расположение тензодатчика

Тензодатчик подключается к модулю датчика изгиба, показанный на рисунке 13. Технические характеристики модуля датчика изгиба представлены в таблице 6.



Рисунок 13 – Модуль датчика изгиба

Таблица 6 – Технические характеристики модуля датчика изгиба

Рабочее напряжение	5V
Аналоговый выход	0 ~ 3.5V
Размер	32 мм X 17 мм
Вес модуля	5 грамм

Тензодатчик был подключен к плате Arduino Uno, электрическая схема представлена ниже, листинг программа в приложении А.

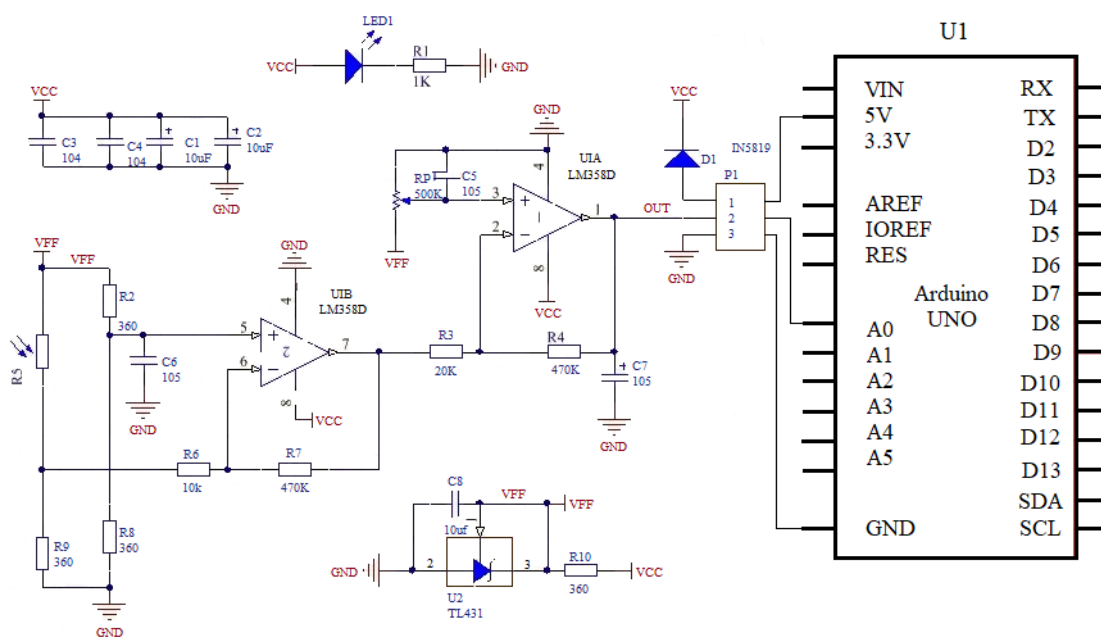


Рисунок 14 – Электрическая схема

### 2.3.2 Пресс установка

Испытание стеклопластикового корпуса на сжатие проводилось на пресс установке, чертеж которой представлен на рисунке 15.

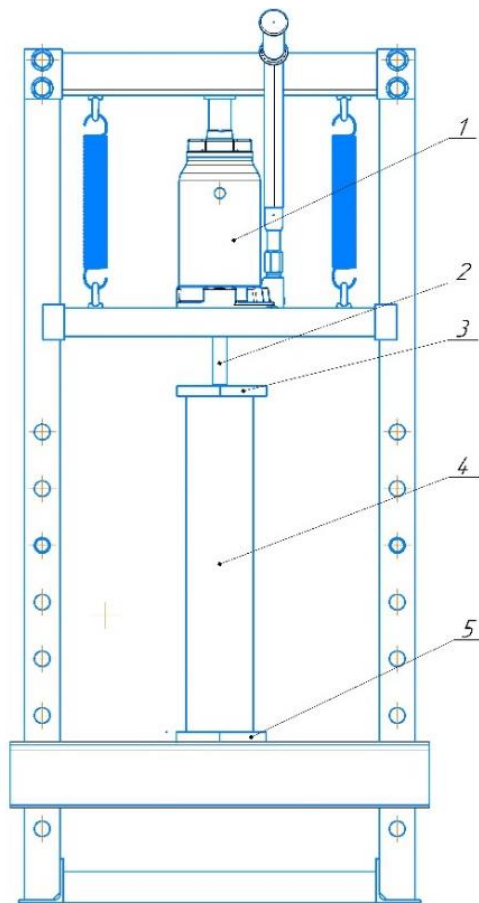


Рисунок 15 – Установка для испытания на сжатие

1 – поршень; 2 – ползун; 3,5 – опорные плиты; 4 – стеклопластиковая труба

Стеклопластиковый корпус был установлен в пресс–установку, зажатый с двух сторон опорными плитами. После установки, на корпус подавали нагрузку. Испытание на сжатие было проведено со скоростью 1 мм/мин. После чего снимались показания с тензодатчиков, затем продолжали подавать нагрузку с увеличением на 500 кг.

Опыт продолжался до момента пока корпус не разрушился.

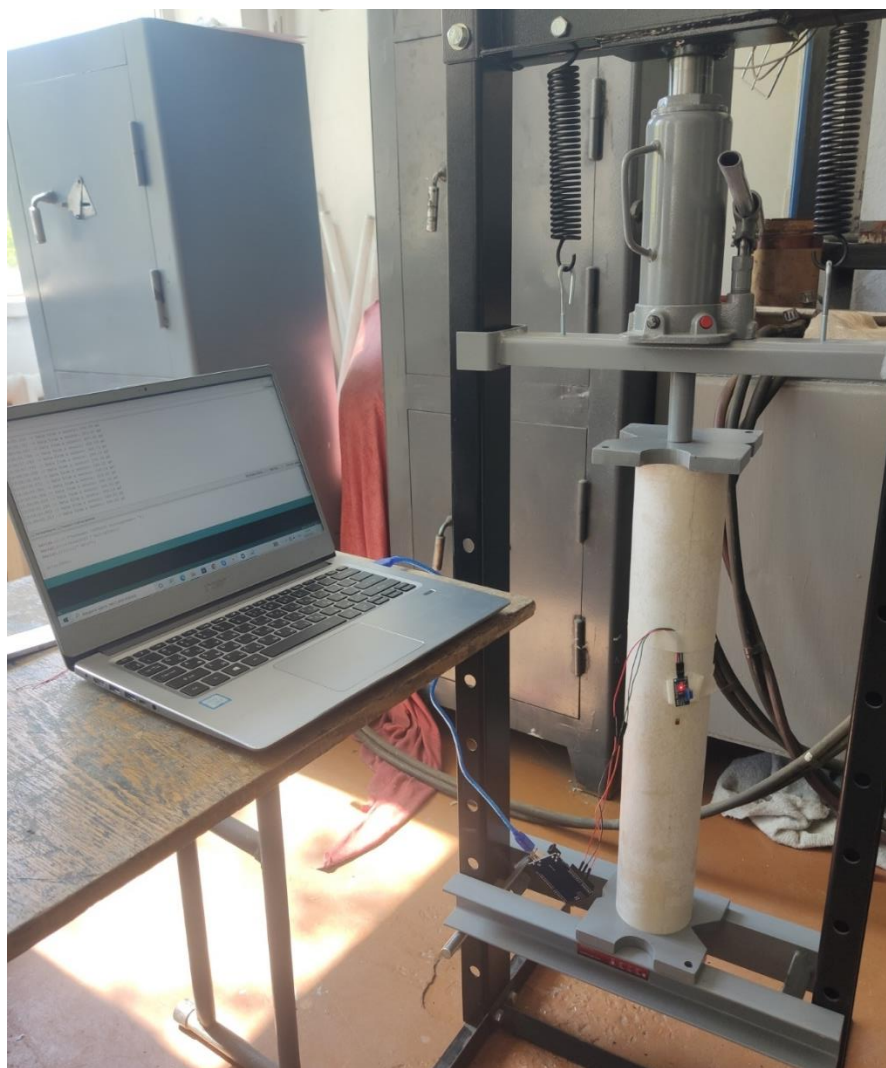


Рисунок 16 – Корпус, закрепленный в пресс установке для  
испытания на сжатие

Итог разрушения корпуса при сжатии, который обусловлен разрушением материала, а следовательно растрескивание и расслоение слоев стеклопластика, представлен на рисунке 17.





Рисунок 17 – Корпус после испытания на пресс установке

В результаты испытания были определены такие показатели как: предел прочности при сжатии, модуль упругости при сжатии, коэффициент Пуассона. Полученные результаты представлены в таблице 7. Статическая обработка проводилась по формулам, представленным в ГОСТ 25.602–80 «Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах».

Предел прочности при сжатии  $\sigma_B^c$ , МПа

$$\sigma_B^c = \frac{F_c}{S}, \quad (1)$$

$F^c$  – нагрузка, приложенная на образец, Н;

$S$  – площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>.

Модуль упругости при сжатии  $E^c$ , МПа

$$E^c = \frac{\Delta F^c}{S} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\Delta F^c}{S} \cdot \frac{l}{\Delta \varepsilon_{II}^c}, \quad (2)$$

$F^c$  – приращение нагрузки, Н;

$l$  – база тензометрического датчика, мм;

$\Delta l$  – изменение базы тензометрического датчика, мм;

$\Delta \varepsilon_{II}^c$  – изменение деформации образца, при изменении нагрузки.

Коэффициент Пуассона  $\nu^c$

$$\Delta \nu^c = \frac{\Delta \varepsilon_I^c}{\Delta \varepsilon_{II}^c}, \quad (3)$$

$\Delta \varepsilon_I^c$  – изменение поперечной относительной деформации образца при изменении нагрузки.

Таблица 7 – Результаты испытания на сжатие

Нагрузка при сжатии $P_{\max}$ , кН	Показания тензодатчиков, мВ	Предел прочности при сжатии $\sigma_B^c$ , МПа	Модуль упругости при сжатии $E^c$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu^c$
4,90	87,7	16,60	16,60	0,164
9,80	1010,7	33,20	33,33	0,163
14,70	2738,7	49,80	50,10	0,162
19,60	3212,7	66,41	66,87	0,162
24,50	3217,7	83,01	83,76	0,161
29,42	3217,7	99,68	100,79	0,161

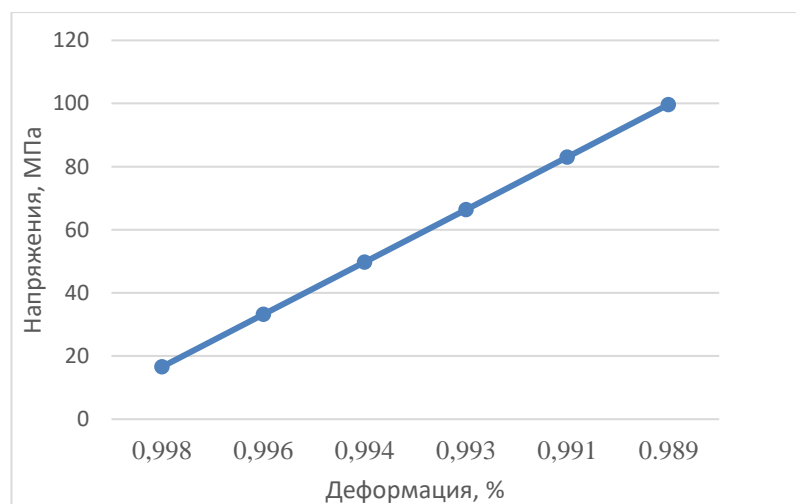


Рисунок 18 – Диаграмма зависимости напряжения от деформации при сжатии стеклопластикового корпуса

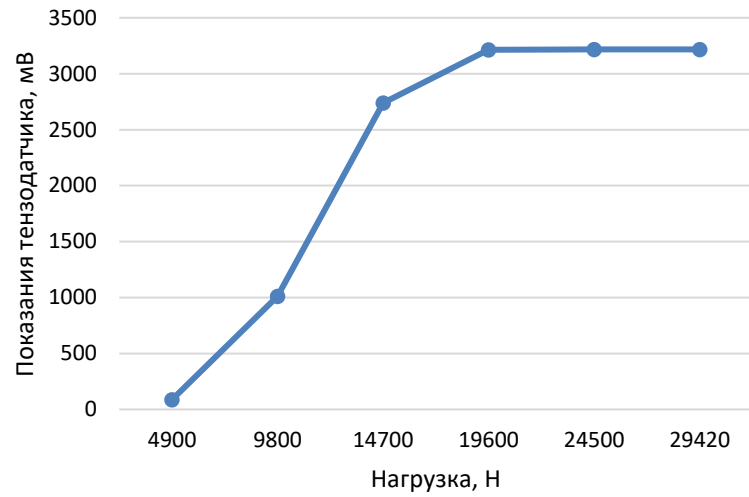


Рисунок 19 – Диаграмма зависимости показаний тензодатчика от нагрузки при сжатии стеклопластикового корпуса

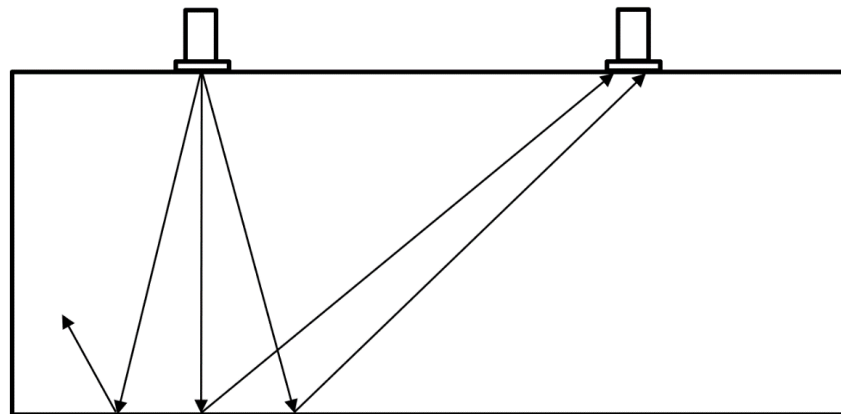


Рисунок 20 – Схема ультразвукового прозвучивания эмо-методом при отсутствии дефекта

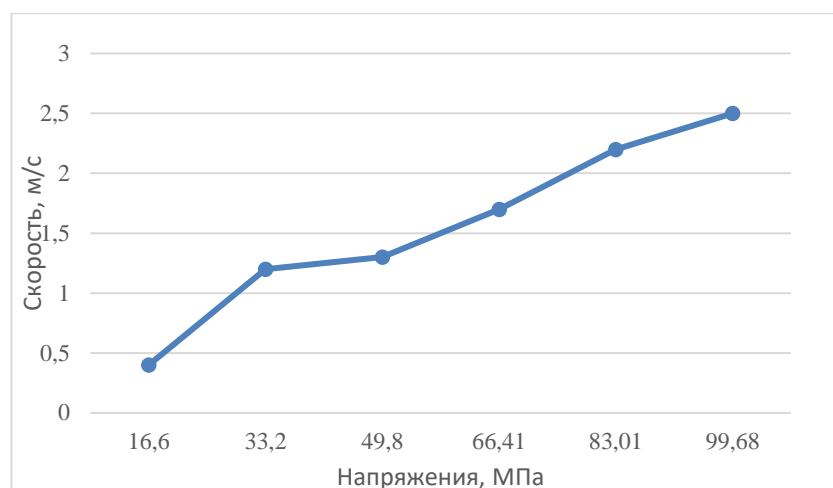


Рисунок 21 – График зависимости скорости поперечных волн от напряжения

При проведении экспериментальных исследований на сжатие, было достигнуто разрушение стеклопластикового корпуса при нагрузке равной 29,4 кН. Так же в результате эксперимента были получены значения напряжений с тензодатчиков. Из полученных значений были найдены такие составляющие, как предел прочности при сжатии, который составил 99,68 МПа, модуль упругости при сжатии, равный 100,79 МПа, коэффициент Пуассона, равный 0,161. Была составлена технологическая карта УЗК, выбран дефектоскоп для ультразвукового контроля композиционных материалов и выбран пьезоэлектрический преобразователь.

## 3 РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТРУБЫ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

### 3.1 Методика расчета

ANSYS — универсальная программная система метода конечных элементов. ANSYS был квалифицирован в ГОСАТОМНАДЗОРЕ России (Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ №490 от 10.09.2002); (Регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002), и так же имеет свидетельство РААСН о верификации ANSYS № 02/ANSYS/2009.

Расчеты, которые проводятся с помощью программы ANSYS, могут проводиться и для стандартных инженерных расчетов. При помощи численных методов, такие расчеты могут принимать вид матрицы, которые наибольшим образом подходят для МКЭ.

Суммарно элементы, связанные между собой узлами, и могут принимать вид математической модели, по итогу которую необходимо анализировать. Главной неизвестной приходится степень свободы узлов конечно-элементной модели. К таким степеням принадлежат: давление, температура, магнитные и электрические потенциалы полей, повороты, скорости, перемещения. Для конкретного элемента, учитывая степень свободы, составляется матрица сопротивления, жесткости, масс. Такие матрицы преобразуют к совместным уравнениям, которые преобразуются “решателями”.

Материалы, которые связаны линейными свойствами напряжения могут быть взаимосвязаны с деформациями соотношением:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\}, \quad (4)$$

где  $\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \sigma_{xy} & \sigma_{yz} & \sigma_{xz} \end{bmatrix} / T$  – вектор напряжений (как выходная величина помечается меткой S);

$[D]$  – матрица упругости (описывается уравнениями (17) – (22), обратная матрица записывается в виде (9) и (10).

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{th}\} - \text{выходной массив}; \quad (5)$$

$$\{\varepsilon\} = \left[ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{yz} \right]^T - \text{вектор полной деформации}; \quad (6)$$

$\{\varepsilon^{th}\}$  – вектор температурной деформации (находится выражением (8)).

Компоненты вектора напряжений показаны на рисунке 22. Напряжения и деформации для программы ANSYS будут принимать следующие знаки: значения, принадлежащие растяжению – положительные, сжатию – отрицательные, сдвиг – положительные.

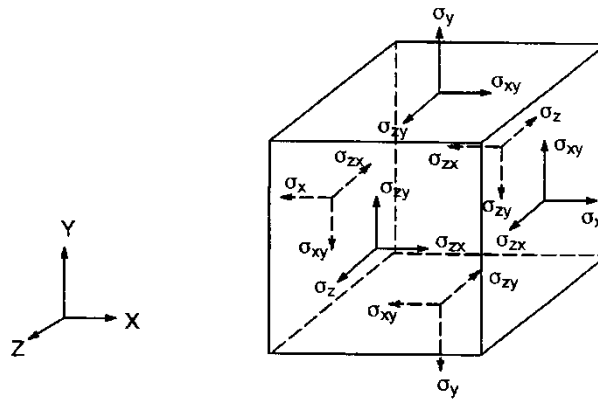


Рисунок 22 – Компоненты вектора напряжений

Выражение (4) можно записать в следующем виде:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\}. \quad (7)$$

Для трехмерного случая вектор температурных деформаций имеет вид

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T \left[ \alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T, \quad (8)$$

где  $\alpha_x$  – коэффициент температурного расширения в направлении оси x.

Матрица  $[D]^{-1}$ , нормализованная по столбцам:

$$[D]^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_z} \end{vmatrix} \quad (9)$$

При нормализации по строкам, матрица запишется в следующем виде:

$$[D]^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu^*_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu^*_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu^*_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu^*_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu^*_{zx}}{E_x} & -\frac{\nu^*_{zy}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{vmatrix} \quad (10)$$

где  $E_x$  – модуль Юнга по оси x;

$\nu_{xy}$  – минимальный коэффициент Пуассона;

$\nu^*_{xy}$  – максимальный коэффициент Пуассона;

$G_{xy}$  – модуль сдвига в плоскости x–y.

Необходимо что бы матрица  $[D]^{-1}$  была положительно определенной, симметричной, следовательно для ортотропных материалов осуществляется наличие соотношений:

$$\frac{\nu_{yx}^*}{E_x} = \frac{\nu_{xy}^*}{E_y}; \quad (11)$$

$$\frac{\nu_{zx}^*}{E_x} = \frac{\nu_{xz}^*}{E_z}; \quad (12)$$

$$\frac{\nu_{zy}}{E_y} = \frac{\nu_{yz}}{E_z}; \quad (13)$$

ИЛИ

$$\frac{\nu_{yx}^*}{E_y} = \frac{\nu_{xy}^*}{E_x}; \quad (14)$$

$$\frac{\nu_{yx}^*}{E_y} = \frac{\nu_{xz}^*}{E_x}; \quad (15)$$

$$\frac{\nu_{zy}^*}{E_z} = \frac{\nu_{yz}^*}{E_y}. \quad (16)$$

Согласно (11) – (16), значения  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{zy}$ ,  $\nu_{zx}$ ,  $\nu_{yx}^*$ ,  $\nu_{zy}^*$  и  $\nu_{zx}^*$  не вводятся при задании исходных данных, потому что являются зависимыми.

Из выражения (7) в раскрытом виде, используя выражения (8), (9), а также (11) – (13), получаем шесть выражений:



$$\varepsilon_x = a_x \cdot \Delta T + \frac{\sigma_{xy}}{E_y} - \frac{\nu_{xy} \cdot \sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{xz} \cdot \sigma_z}{E_z}; \quad (17)$$

$$\varepsilon_y = a_y \cdot \Delta T + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_{xy} \cdot \sigma_x}{E_y} - \frac{\nu_{yz} \cdot \sigma_z}{E_z}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_z = a_z \cdot \Delta T + \frac{\sigma_z}{E_z} - \frac{\nu_{xz} \cdot \sigma_x}{E_z} - \frac{\nu_{yz} \cdot \sigma_y}{E_z}; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G_{xy}}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G_{yz}}; \quad (21)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\sigma_{xz}}{G_{xz}}, \quad (22)$$

где  $\varepsilon_x$  – деформация по оси x;

$\varepsilon_{xy}$  – деформация сдвига в плоскости x – y;

$\sigma_x$  – напряжения по оси x;

$\sigma_{xy}$  – напряжения сдвига в плоскости x – y.

Уравнение (4) можно написать в раскрытом виде, учитывая обратную матрицу (9), что в совокупности с (8), (11) – (13) дает шесть выражений для  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} \sigma_x = & \frac{E_x}{h} \cdot [1 - (\nu_{yz})^2 \cdot \frac{E_y}{E_z}] \cdot (\varepsilon_x - \alpha_x \cdot \Delta T) + \frac{E_x}{h} \cdot [\nu_{xy} + \nu_{xz} \cdot \nu_{yz} \cdot \frac{E_y}{E_z}] \cdot (\varepsilon_y - \alpha_y \cdot \Delta T) + \\ & + \frac{E_x}{h} \cdot [\nu_{xz} + \nu_{yz} \cdot \nu_{xy}] \cdot (\varepsilon_z - \alpha_z \cdot \Delta T); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\sigma_y = \frac{E_x}{h} \cdot [v_{xy} + v_{xz} \cdot v_{yz} \cdot \frac{E_x}{E_z}] \cdot (\varepsilon_x - \alpha_x \cdot \Delta T) + \frac{E_y}{h} \cdot [1 - (v_{xz})^2 \cdot \frac{E_x}{E_z}] \cdot (\varepsilon_y - \alpha_y \cdot \Delta T) + \frac{E_y}{h} \cdot [v_{yz} + v_{xz} \cdot v_{xy} \cdot \frac{E_x}{E_y}] \cdot (\varepsilon_z - \alpha_z \cdot \Delta T); \quad (24)$$

$$\sigma_z = \frac{E_x}{h} \cdot [v_{xz} + v_{yz} \cdot v_{xy}] \cdot (\varepsilon_x - \alpha_x \cdot \Delta T) + \frac{E_y}{h} \cdot [v_{yz} + v_{xz} \cdot v_{xy} \cdot \frac{E_x}{E_y}] \cdot (\varepsilon_y - \alpha_y \cdot \Delta T) + \frac{E_z}{h} \cdot [1 - (v_{xy})^2 \cdot \frac{E_x}{E_y}] \cdot (\varepsilon_z - \alpha_z \cdot \Delta T); \quad (25)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \in xy; \quad (26)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \in yz; \quad (27)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz} \in xz, \quad (28)$$

$$h = 1 - (v_{xy})^2 \cdot \frac{E_x}{E_y} - (v_{yz})^2 \cdot \frac{E_y}{E_z} - (v_{xz})^2 \cdot \frac{E_x}{E_z} - 2 \cdot v_{xy} \cdot v_{yz} \cdot v_{xz} \cdot \frac{E_x}{E_z}. \quad (29)$$

Если модули сдвига  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$  не были введены при задании значений, то они находятся по данным выражениям:

$$G_{xy} = \frac{E_x \cdot E_y}{E_x + E_y + 2 \cdot v_{xy} \cdot E_x}; \quad (30)$$

$$G_{yz} = G_{xy}; \quad (31)$$

$$G_{xz} = G_{xy}. \quad (32)$$

### 3.2 Создание 3D модели трубы

Строим модель в виде сборки слой за слоем в программе SolidWorks, чтобы при импортировании в ANSYS каждый слой был отдельным телом, которому можно будет задать свои параметры. Внутри сборки создаем каждый слой отдельно.

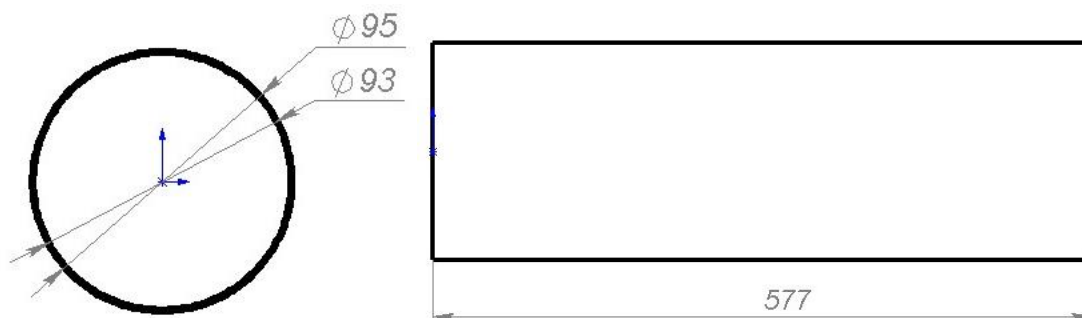


Рисунок 23 – Размеры трубы

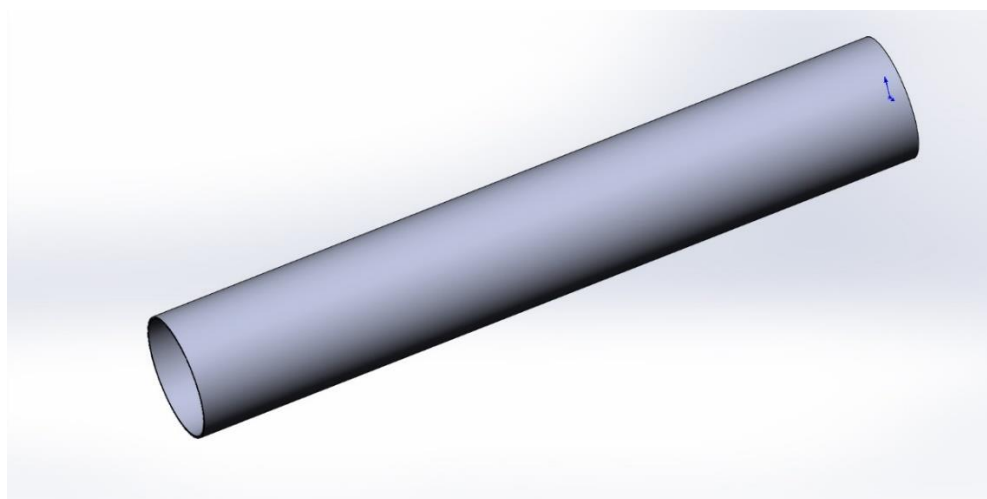


Рисунок 24 – Общий вид изделия

Получив нужную модель, нужно сохранить ее в формате, который сможет прочитать ANSYS, называется Parasolid(.x\_t). Модель подготовлена, запускаем ANSYS Workbench.

### 3.3 Создание проекта в ANSYS Workbench и задание свойств материалов

При запуске ANSYS Workbench открывается рабочая область, первым делом необходимо сохранить проект. В левой области идет список так называе-

мых подсистем, каждая нужна для определенных расчетов, для статического расчета на прочность выбираем Static Structural.

Проект создан, переходим к заданию свойств материалам. Для этого переходим в Engineering Data. По стандарту материал сталь всегда, сначала создадим ее дубликат, так как нам нужны будут 2 материала. Далее для каждого материала ниже в списке задаем все требуемые параметры.

1	Property	Value	
2	Density	2	g cm <sup>-3</sup>
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young...	
8	Young's Modulus	176,52	MPa
9	Poisson's Ratio	0,161	

Рисунок 25 – Свойства стеклоткани

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1,3	g cm <sup>-3</sup>
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Mo...	
8	Young's Modulus	176,52	MPa
9	Poisson's Ratio	0,161	

Рисунок 26 – Свойства смолы

Переходим в геометрию, двойным кликом на вкладку Geometry. Далее нужно будет импортировать модель в формате .x\_t. И нажимаем на изображение молнии, это кнопка запуска. После этого работа с геометрией завершена.

### 3.4 Расчет на прочность

Заходим во вкладку Model, настраиваем сетку для модели. Выбрав все 5 слоёв, присваиваем размер ячеек 5 мм. В результате получается сетка конечных элементов.

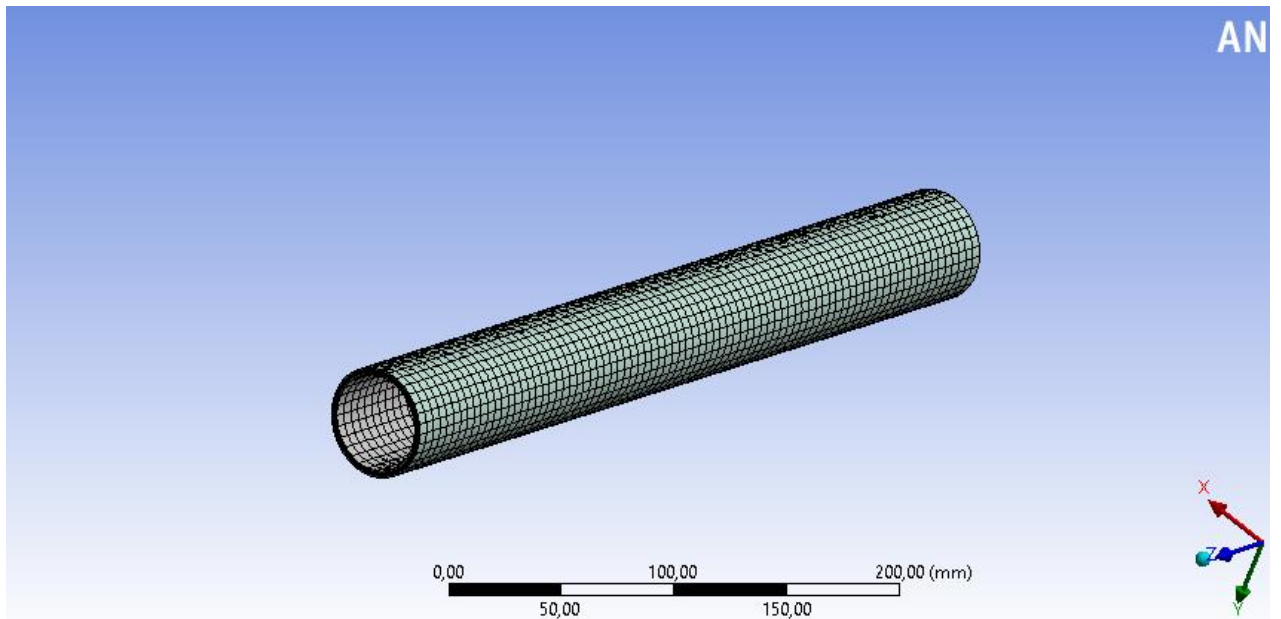


Рисунок 27 – Конечно–элементная модель изделия

Переходим к заданию граничных условий.

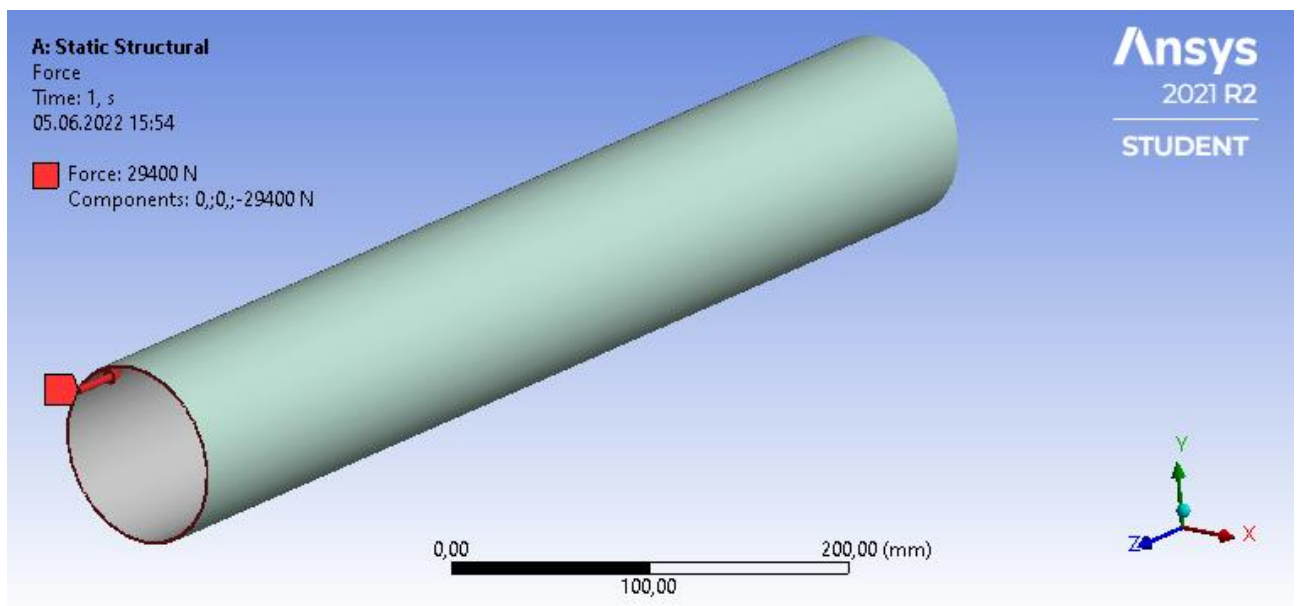


Рисунок 28 – Начальные условия при рассредоточенной нагрузке на поверхность торца корпуса

Выбрав все 5 плоскостей, назначаем к ним приложенную силу нужной величины.

В расчете на сжатие с рассредоточенной силой будем использовать модель корпуса ракеты с консольным закреплением с одной стороны, а с противо-

плотной грани будет приложена сила ко всей поверхности торца, равная 29,4 кН.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	5 Faces
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	4,2079e-005 m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	9,4672e-019 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0,577 m
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
Type	Remote Force
Define By	Vector
<input type="checkbox"/> Magnitude	29400 N (ramped)
Direction	Click to Change
Suppressed	No
Behavior	Deformable
<b>Advanced</b>	

Рисунок 29 – Прикладываем силу ко всей поверхности торца, 29,4 кН

Выбираем 5 плоскостей на другой стороне корпуса и назначаем им жесткое закрепление.

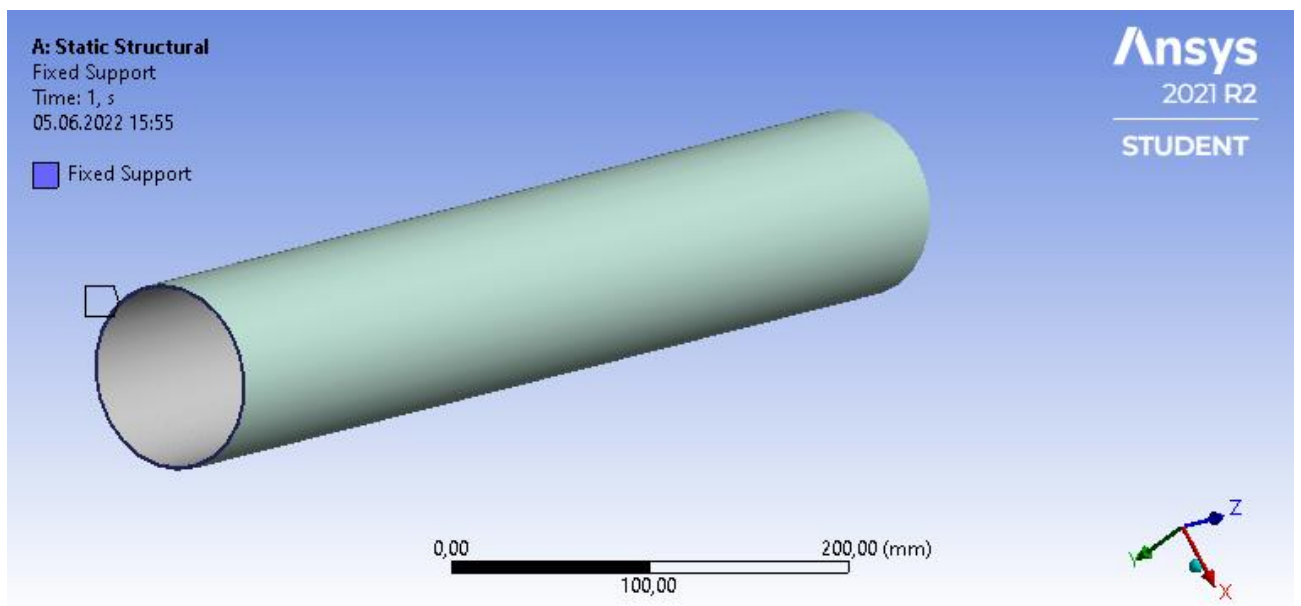


Рисунок 30 – Начальные условия при рассредоточенной нагрузке на поверхность торца корпуса

Теперь надо выбрать те параметры, которые нужно просчитать.

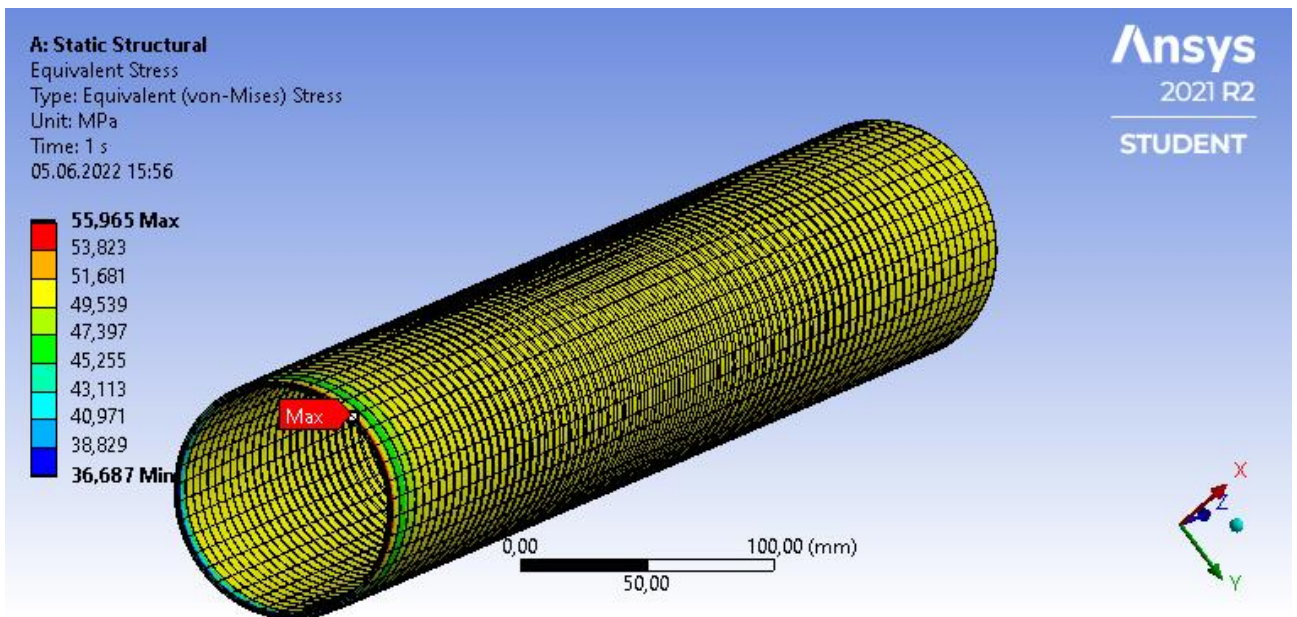


Рисунок 31 – Эквивалентные напряжения при рассредоточенной нагрузке на поверхность торца корпуса, МПа

Максимальное напряжение при рассредоточенной нагрузке равно 55,96 МПа.

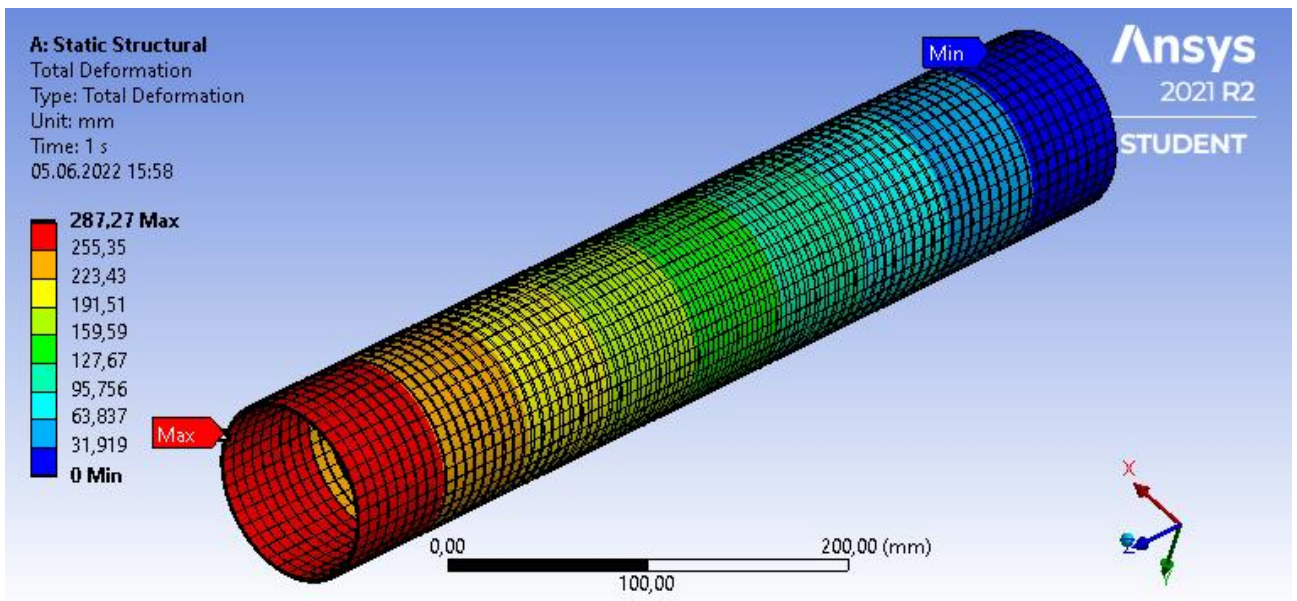


Рисунок 32 – Деформации при рассредоточенной нагрузке на поверхность торца корпуса, мм

Максимальная деформация при рассредоточенной нагрузке равна 287,27 мм.



В расчете на сжатие с сосредоточенной силой будем использовать модель корпуса ракеты с консольным закреплением с одной стороны, а с противоположной грани будет приложена сила ко всей поверхности торца, равная 0,4 кН.

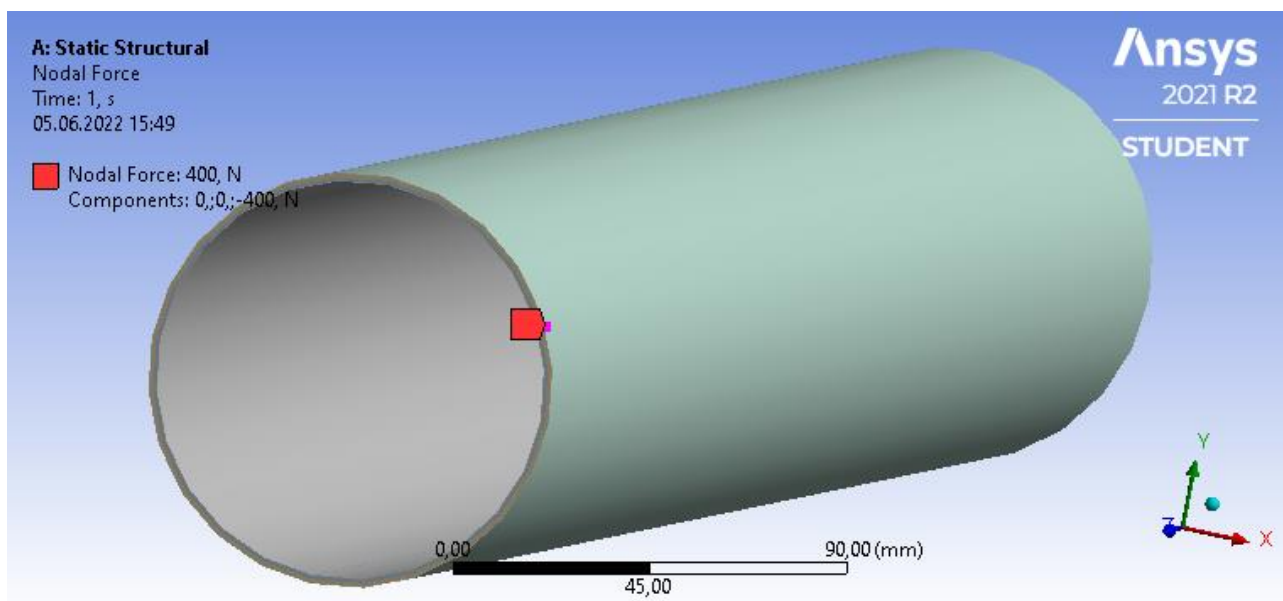


Рисунок 33 – Начальные условия при сосредоточенной нагрузке на торце

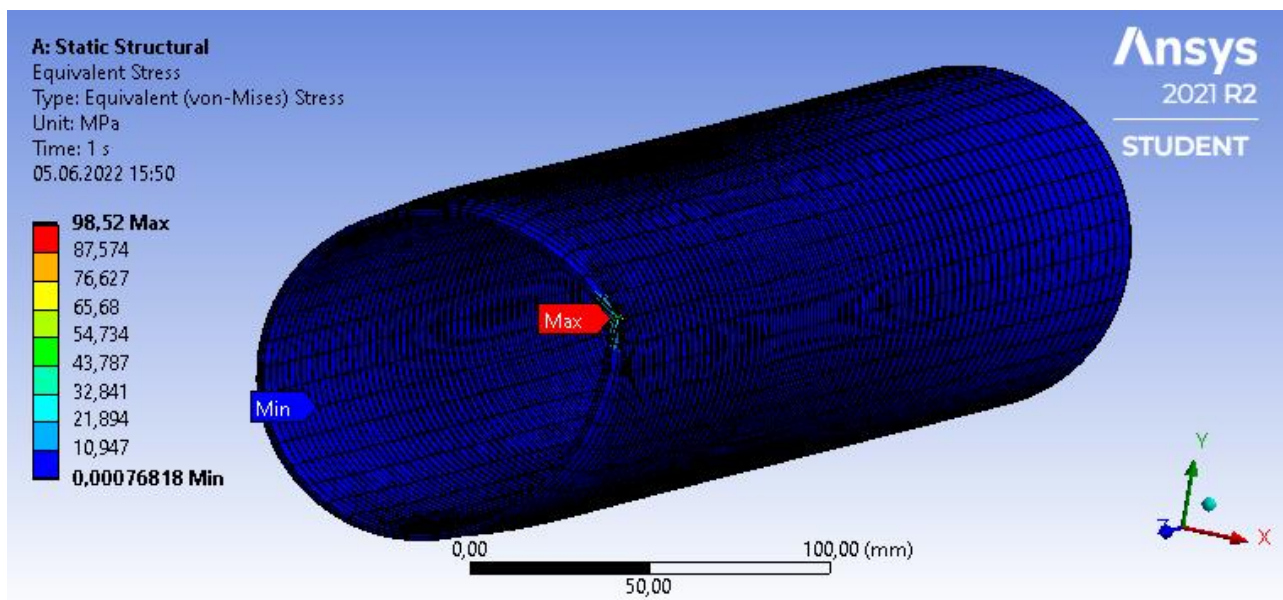


Рисунок 34 – Эквивалентные напряжения при сосредоточенной нагрузке на торце, МПа

Максимальное напряжение при сосредоточенной силе равно 98,52 МПа.



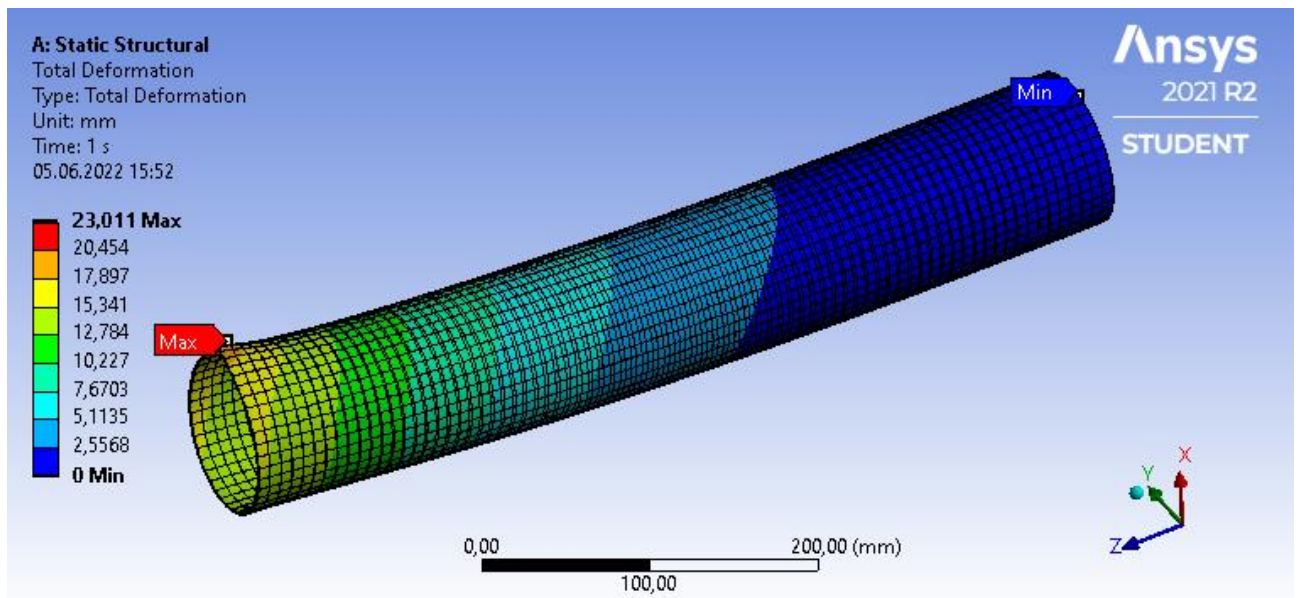


Рисунок 35 – Деформации при сосредоточенном давлении на торце, мм

Максимальная деформация при сосредоточенной силе равна 23,01 мм.

Был произведен расчет на статическую прочность модели корпуса из стеклопластикового материала в программе ANSYS Workbench. На основании экспериментальных значений, и рассчитанных значений, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона, можем сделать вывод, что корпус выдерживает нагрузки на сжатие по всей поверхности торца при рассредоточенной силе равной 29,4 кН, так как эквивалентное напряжение для корпуса получилось равным  $\sigma_{\text{эКВ}}=55,96$  МПа, что является меньше допускаемого напряжения  $[\sigma]=99,68$  МПа. Так же, определили эквивалентное напряжение при сосредоточенной нагрузке на торце 0,4 кН, равное  $\sigma_{\text{эКВ}}=98,52$  МПа, что также оказалось меньше допускаемого напряжения.

## 4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

### 4.1 Негативное воздействие стеклопластика на человека и окружающую среду

При производстве и механической обработке стеклопластика в воздух выделяются вредные вещества опасные для человека и окружающей среды. Поэтому требуется строгое соблюдение требований безопасности, которые представлены в ГОСТ 17.2.4.02-81 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ» и ГОСТ 17.2.3.02-78 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями».

При механической обработке стеклопластика в воздушной зоне производственного помещения выделяются стеклянная пыль и пыль от веществ, например от стеклоткани, стекломатов и смолы. Количество веществ, которые содержатся в воздухе рабочей зоны, напрямую связаны с рецептурой используемых связующих и отвердителей.

В воздушную зону производственного помещения возможно выделение пыли стекломатов, уже изготовленных стеклопластиков, красителей, стирол, или перекись метилэтилкетона, фталевый и малеиновый ангидриды, метакриловая кислота. При изготовлении материала на основе фенолформальдегидных смол осуществляется выделение следующих составных, как фенол, формальдегид, анилин. Производство стеклопластика на основе эпоксидной смолы, приводит к выделению эпихлоргидрина, бутилового спирта, толуола.

Все эти вещества являются достаточно агрессивными, и могут наносить вред здоровью. Следует обратить внимание на предельно допустимые концентрации (ПДК) в воздухе производственных помещений и рабочей зоны. Данные представленные в таблице 8 взяты согласно ГОСТ 12.1.005–88 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

Выделяющиеся в атмосферу при производстве и механической обработке паро-, газообразные вещества и пыль не должны превышать норм ПДК, установленных гигиеническими нормативами ГН 1.2.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».

Таблица 8 – Предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м	Преимущественное агрегатное состояние в условиях производства	Класс опасности	Особенности действия на организм
Азота диоксид	2	п	3	О
Азота оксиды (в пересчете на NO <sub>2</sub> )	5	п	3	О
Акриламид	0,2	п	2	
Анилин	0,1	п	2	
Ангидрид фталевый	1	п+а	2	
Ангидрид малеиновый	1	п+а	2	А
Стирол	30–10	п	3	
Металлилхлорид	0,3	п	2	
Фенол	0,3	п	2	
Формальдегид	0,5	п	2	О, А
Эпихлоргидрин	1	п	2	А
Бутиловый эфир 2,4–дихлорфеноксиуксусной кислоты (бутиловый эфир 2,4–Д)	0,5	п+а	2	
Бутиловый эфир 5–хлорметил–2–фуранкарбоновой кислоты	0,5	а	2	
Ванадий и его соединения:		а	1	
а) дым оксида ванадия (V)	0,1		2	
б) пыль оксида ванадия (III)	0,5		2	
в) пыль оксида ванадия (V)	0,5			
Возгоны каменноугольных смол и пеков при среднем содержании в них бенз(а)пирена:	Менее 0,075 0,75–0,15 0,15–0,3	0,2 0,1 0,05	п п п	2 1 1

Обозначения:

п – пары/газы;

а – аэрозоль;

п+а – смесь паров и аэрозоля;

О – вещества с остронаправленным механизмом действия, за содержанием в воздухе которых необходимо следить;

А – вещества, которые могут вызвать аллергию при производстве.

## **4.2 Требования техники безопасности**

Техника безопасности – это мероприятия и средства, которые внедряют в производство для того, чтобы создать безопасные и здоровые условия труда работников предприятия. Техника безопасности включает в себя правила, которые обеспечивают нужный уровень безопасных условий на предприятии, различных помещений, используемого оборудования. Не соблюдение техники безопасности влечет за собой серьезные последствия.

Согласно ГОСТ 12.0.004-90 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда» необходимо чтобы выполнялись правила техники безопасности при работе со стеклопластиком.

До работы на предприятие допускаются лица, которые достигли 18 лет. Необходимым требованием служит обучение, прохождение инструктажа, знания охраны труда. До работы возможно допущение лиц, которые усвоили безопасные методы при работе, безопасное обращение при работе со стеклопластиком и механическими веществами.

Если при работе возникают какие-то вопросы, которые связаны с качественным и безопасным выполнением, сотрудникам необходимо обратиться к своему непосредственному или вышестоящему руководителю.

Новый сотрудник, которого приняли на работу, связанную со стеклопластиком, обязан пройти вводный и первичный инструктаж по охране труда на рабочем месте, и расписаться в специальном журнале. Последующие инструктажи должны проводиться один раз в три месяца.

Сотрудник, занимающийся производством и переработкой стеклопластика, должен:

- следовать инструкциям по охране труда, правилам внутреннего распорядка, указаниям руководителя, работникам охраны труда и противопожарной безопасности;

- использовать средства индивидуальной защиты именно по назначению, сообщать руководству о потребности производить стирку, сушку, ремонт спецодежды;

- не допускается допускать посторонних лиц к своему рабочему месту.

Если случится несчастный случай, сотрудник немедленно должен остановить работу, доложить своему руководству, и обратиться за помощью медицинских работников.

Перед тем как приступить к работе, сотрудник должен:

- получить инструкцию по охране труда у руководителя перед тем, как начать новую работу;

- провести осмотр рабочего места, привести его в порядок;

- надеть спецодежду, осмотреть, привести в порядок и надеть средства индивидуальной защиты;

- используемые инструменты, материалы необходимо чтобы находились в безопасном месте;

- обязательно должна быть проверена и включена вентиляция;

- проверить наличие и исправность: ограждений и предохранительных приспособлений для всех вращающихся и подвижных деталей; токоведущих частей электрической аппаратуры, заземляющих устройств, предохранительных устройств для защиты от образующейся пыли из стеклопластиков, защитных блокировок; средств пожаротушения.

Сотрудники несут ответственность за нарушения требований инструкций в соответствии с действующим законом.

### 4.3 Средства индивидуальной защиты работника

Средствами индивидуальной защиты работника являются такие технические средства, которые используются для избежания или снижения влияния вредных веществ и опаснейших производственных факторов на человека. Необходимо использовать, когда невозможно обеспечить безопасность конструкциями оборудования, архитектурными способами. Не правильное использование или не применение средств индивидуальной защиты может повлечь за собой ухудшение здоровья.

Необходимо чтобы средства индивидуальной защиты при работе со стеклопластиком отвечали требованиям ГОСТ 12.4.011–89 «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих» [28].

Сотрудникам должно выдаваться средство индивидуальной защиты и спецодежда на основании с «Типовыми отраслевыми нормами бесплатной выдачи рабочим и служащим спецодежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты», утвержденными «Постановлением Министерства труда и социального развития Российской Федерации» от 22.07.99 г. № 26 (пункт 439).

При защите органов дыхания от стекловолокна, пыли, базальта применяются респираторы Р–2, Ф–62, РПГ–67, которые изготавливаются по нормативной документации.

Для защиты глаз сотрудник должен быть обеспечен очками.

Так же сотрудник в обязательном порядке должен быть обеспечен хлопчатобумажным полукombineзоном или хлопчатобумажным комбинезоном Л–1 (Т–15), Л–1 (780).

Для защиты рук необходимо использовать хлопчатобумажные рукавицы, латексные перчатки Л–1.

Необходимо использовать для защиты ног ботинки или резиновые сапоги [28].

Были определены требования безопасности при работе со стеклопластиком, в итоге пришли к выводу о том, что производство и переработка стеклопластиков и их производных относятся к вредным. Вредными факторами производства являются распыление частиц пыли и химических веществ, а также другие вредные производственные факторы, другие производственные факторы: подвижные части механического оборудования, перемещаемое сырье, полуфабрикаты, тара, повышенная температура поверхностей оборудования, повышенная температура воздуха рабочей зоны, повышенная подвижность воздуха, повышенное напряжение электрической цепи, физические перегрузки.

В связи с этим при работе с этими материалами должны неукоснительно соблюдаться инструкции по охране труда.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе выпускной квалификационной работы производится расчет затрат на изготовление модели корпуса ракеты из стеклопластикового материала.

Составим смету затрат на изготовление корпуса.

Таблица 9 – Смета затрат

Наименование затрат	Стоимость, рублей
Полукомбинезон хлопчатобумажный	850
Комбинезон защитный Каспер 60 г/кв.м	230
Респиратор Spirotek VS2300V 1 шт.	87
Перчатки Ansell хайфлекс 11–724	740
Очки защитные многофункциональные прозрачные	330
Труба ВГП стальная Ду 50*3,5 (L= 3 м)	2 478
Стеклоткань ЭЗ/1–200 50 м	4 641
Эпоксидная смола ЭД–20 10 кг + Отвердитель ПЭПА 1 кг	15 990
Разделительный воск IZHWAХ 900	800
Наждачная бумага	51
Валик для прикатки	178
Итоговая стоимость всей закупки	26 375

Составим смету затрат на расчет прочности модели корпуса ракеты.

Таблица 10 – Смета затрат и краткое описание затрат

Наименование затрат	Стоимость, рублей	Описание
1 Ноутбук HP 15s–eq2099ur 5D647EA	54 999	Операционная система: Intel Core i5 Оперативная памяти: 16 Гбайт Объем SSD: 512 Гбайт Частота памяти: 3200 МГц
2 Лицензия SolidWorks 2021 Standart	471 240	Артикул: SWN0029N Тип поставки: Электронная (e-mail) Язык (версия): Английский Срок поставки лицензионной программы или ключа активации: 10 рабочих дней Тип лицензии: Постоянная Доступна оплата картой.



Наименование затрат	Стоимость, рублей	Описание
3 Лицензия Ansys Student (Ansys Workbench)	0	Ansys free student software downloads Язык (версия): Английский Тип лицензии: Возобновляемая двенадцати-месячная аренда.
4.1 Курсы обучения при работе с SOLIDWORKS: Simulation Standard + базовый курс	15 500	Курс длится 3 дня (21 астрономический час). Он включает в себя: основы моделирования деталей, знакомство с интерфейсами и настройками; твердотельными, оболочечными и балочными конечными элементами; настройки генераторов сетки; создание и решения линейных статистических исследований с различными граничными условиями; контактные задачи в сборках; исследования проектирования; термоупругость; численные результаты характеристик НДС; диаграммы; эпюры.
4.2 Курсы обучения при работе Ansys Workbench	32 490	Курс длится 5 дней (16 академических часов). В рамках учебного курса будет получены навыки решения задачи нелинейной прочности с учетом контактов, проводить диагностику и настройку нелинейного расчета, так же навыки прочностного анализа.
4.3 Самостоятельное обучение	0	Изучение различного материала, который находится в открытом доступе.
Итоговая стоимость (с учетом 4.1 и 4.2)	574 229	
Итоговая стоимость (без учета 4.1 и 4.2)	526 239	

Затраты на испытание стеклопластикового корпуса в пресс-установке с тензодатчиком для нахождения напряжений.

Таблица 11 – Смета затрат

Наименование затрат	Стоимость, рублей
Пресс-гидравлическая установка, 1230*500*510 мм	17 370
Тензодатчик Elecrow	550
Набор Arduino UNO	2 700
Клей 505	50
Итоговая стоимость	20 670

Был произведен расчет стоимости затрат для создания корпуса из стекло-

пластикового материала, который составил 26 375 рублей. Так же были рассчитаны затраты на создание компьютерной модели в программе SolidWorks, расчет прочностных характеристик в программе ANSYS Workbench, составили 526 239 рублей. Для проведения эксперимента на сжатие сумма затрат составит 20 670 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать ряд выводов.

При проведении экспериментальных исследований на сжатие, было достигнуто разрушение стеклопластикового корпуса при нагрузке равной 29,4 кН. Так же в результате эксперимента были получены значения напряжений с тензодатчиков. Из полученных значений были найдены такие составляющие, как предел прочности при сжатии, который составил 99,68 МПа, модуль упругости при сжатии, равный 100,79 МПа, коэффициент Пуассона, равный 0,161. Была составлена технологическая карта УЗК, выбран дефектоскоп для ультразвукового контроля композиционных материалов и выбран пьезоэлектрический преобразователь.

Был произведен расчет на статическую прочность модели корпуса из стеклопластикового материала в программе ANSYS Workbench. На основании экспериментальных значений, и рассчитанных значений, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона, можем сделать вывод, что корпус выдерживает нагрузки на сжатие по всей поверхности торца при рассредоточенной силе равной 29,4 кН, так как эквивалентное напряжение для корпуса получилось равным  $\sigma_{\text{ЭКВ}}=55,96$  МПа, что является меньше допускаемого напряжения  $[\sigma]=99,68$  МПа. Так же, определили эквивалентное напряжение при сосредоточенной нагрузке на торце, с приложенной силой 0,4 кН, равное  $\sigma_{\text{ЭКВ}}=98,52$  МПа, что тоже является меньше допускаемого напряжения.

Был произведен расчет затрат на создание стеклопластикового корпуса. Суммарная стоимость создания корпуса составила 26 375 рублей. Была рассчитана стоимость моделирования в программе SolidWorks и Ansys Workbench, которая составила 526 239 рублей. Так же подсчитаны затраты, требуемые на проведение эксперимента, которые равны 20 670 рублей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АО «Актюбинский завод неметаллических труб». Краткая техническая характеристика выпускаемой продукции. – Актобе, 2005. – 36 с.
2. Барынин, В.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов / В.А. Барынин, О.Н. Будадин, А.А. Кульков. – М. : Спектр, 2017. – 242 с.
3. Болотин, В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М. : Машиностроение, 2010. – 375 с.
4. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М. : Машиностроение, 2018. – 272 с.
5. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск : Наука, 2016. – 190 с.
6. Гузь, А.Н. Механика разрушения при сжатии композитных материалов // А.Н. Гузь. – К. : Наук. думка, 1990. – 630 с.
7. Елпатьевский, А.Н. Расчет цилиндрических оболочек из ориентированного стеклопластика с учетом внутренних трещин / А.Н. Елпатьевский, А.А. Дудченко. – М. : МАИ, 2011. – Вып. 180. – 234 с.
8. Зиновьев, П.А. К теории проектирования конструкций минимального веса / П.А. Зиновьев // Известия вузов. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 32-36.
9. Инструкция по охране труда при механической обработке стеклопластиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.trudohrana.ru/question/4294187656-instruktsiya-po-ohrane-truda-pri-mehanicheskoy-obrabotke-stekloplastikov> (Дата обращения 06.04.2022).
10. Караш, И.Т. Моделирование одностороннего контакта металлической и стеклопластиковой оболочек / И.Т. Караш, С.М. Верещака, А.В. Стрелец // Вісник СевНТУ. Серія «Механіка, енергетика, екологія»: збірник наукових праць. – Севастополь. – 2011. – Вип. 120. – С. 304-305.

11. Куршин, Л.М. Обзор работ по расчету трехслойных пластин и оболочек / Л.М. Куршин // Расчет пространственных конструкций. – М. : Гос. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строит. матер. – 2016. – Вып. 7. – С. 163-192.
12. Механика композитных материалов и элементов конструкций : в 3 т. // под ред. А.Н. Гузя. – К. : Наук. думка, 1983. – Т.2. – 464 с.
13. Мурашов, В.В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов / В.В. Мурашов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 16-23.
14. Стеклопластиковые трубы в России [ASTM]. Демонстрационная версия // Объединение независимых консультантов и экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. – 2018. № 4. – 18 с.
15. ТУ 2296-250-24046478-95. Трубы стеклопластиковые. Научно-производственная фирма «Новация». – 2000.
16. ТУ У 30037621.001-99. Трубы стеклопластиковые для нефтегазодобывающей промышленности. – Харьков : АО «Композит-нефть».
17. ТУ 2296-001-26757545-2005. Трубы стеклопластиковые. ООО РосПромТехСнаб (Россия). – 2005.
18. ТУ 2296-001-26757545-2005. ООО «НПП «Завод стеклопластиковых труб». Стандарты производства стеклопластиковых труб [ASTM 33517].
19. ГОСТ Р 56814-2015 Композиты полимерные. Ультразвуковой контроль материала внешних слоев и материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкций. – введ. 2015-11-27. – Мск: Техн. комитетом по стандартизации ; Изд-во Стандартиформ, 2016. – 15 с.
20. Дефектоскоп ультразвуковой А1212 Master. Руководство по эксплуатации. АПЯС.412231.012 РЭ, 2015. – 72 листа.
21. Бояркин, Е.В. Физические основы ультразвукового контроля / Е.В. Бояркин, А.С. Кочетков, С.А. Бехер // Учебное пособие – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2018. – 38 с.

22. Бехер, С.А. Основы ультразвукового контроля / С.А. Бехер, А.С. Кочетков. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. – 64 с.

23. ГОСТ Р 57861-2017 Композиты полимерные. Акустико-ультразвуковой контроль многослойных композитов и клеевых соединений. – введ. 2017-10-31. - Мск: Технл. Комитет по стандартизации ; Изд-во Стандартиформ, 2017. – 20 с.

24. Пат. 2760512 Российская Федерация, МПК G01N 29/00. Способ ультразвукового неразрушающего контроля изделий из стеклопластиков / А.В. Терехин, М.Ю. Русин, А.С. Хамицаев, М.Е. Типикин, Д.И. Чулков ; АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». - №2021113312; Заявл. 11.05.2021 ; Оpubл. 25.11.2021, Бюл. № 33.

25. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов. [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. - Выпуск №49. – 63 с. – Режим доступа: [https://mai.ru/upload/iblock/3c1/metody-nerazrushayushchego kontroly - primenyaemye-dlya-konstruktsiy-iz-perspektivnykh-kompozitsionnykh-materialov .pdf](https://mai.ru/upload/iblock/3c1/metody-nerazrushayushchego_kontroly_primenyaemye-dlya-konstruktsiy-iz-perspektivnykh-kompozitsionnykh-materialov.pdf) (Дата обращения 3.03.2022).

26. Пат. 2686488 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ ультразвукового контроля изделий из композиционных материалов / А.А. Дорогов, А.И. Маслов, С.В. Шалыга, А.В. Шишурич, В.Г. Бабашов, А.А. Болотских ; АО «ВПК «НПО машиностроения». - № 2018122931 ; Заявл. 25.06.2018 ; Оpubл. 29.04.2019, Бюл. № 13.

27. Потапов, А.И. Методы неразрушающего контроля и диагностики прочности изделий из полимерных композиционных материалов / А.И. Потапов, В.Е. Махов // Дефектоскопия № 3. - СПб, 2018. – С. 7-18.

28. ГОСТ 12.4.011-89 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. – введ. 1990-07-01. – Мск: Технл. Комитет по стандартизации ; Изд-во Стандартов, 2004. – 8 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Листинг программы «Измерение напряжения с использованием тензодатчика»

```
#define pinOut A0
```

```
float coeff = 0.00F;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    coeff = 5 / 1024.00F;
```

```
    pinMode (pinOut, INPUT);
```

```
    Serial.println(coeff, 4);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    Serial.print("Data from a sensor: ");
```

```
    Serial.print(analogRead(pinOut) * coeff * 1000);
```

```
    Serial.println(" mV");
```

```
    delay(500);
```