

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

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Специальность 24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет
и ракетно-космических комплексов
Специализация – Эксплуатация стартовых и технических комплексов и систем
жизнеобеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой


В.В. Соловьев

« _____ » _____ 20__ г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

на тему: Разработка комбинированной стрелы транспортно-установочного агрегата из полимерно-композиционного материала.

Исполнитель
студентка группы 9111-ос



(подпись, дата)

А.Р. Голых

Руководитель
доцент, канд.техн.наук.



(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант по БЖД
доцент, канд. техн. наук



(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
старш. препод. каф. СиТРК



(подпись, дата)

М.А. Артеков

Рецензент



(подпись, дата)

А.В. Исаев

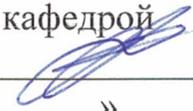
Благовещенск 2025

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

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой


_____ В.В. Соловьев
« _____ » _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

к выпускной квалификационной работе студента Голых Анастасии Руслановны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка комбинированной стрелы транспортно-установочного агрегата из полимерно-композиционного материала

(утверждена приказом от 02.12.2024 № 3236-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 07.02. 2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: электронные ресурсы, ГОСТы, справочная литература.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: виды транспортно-установочных агрегатов и материалы, используемые при их изготовлении; моделирование конструкции стрелы транспортно-установочного агрегата с использованием САПР SolidWorks; анализ прочностных и динамических характеристик комбинированной стрелы ТУА; экономическая часть; безопасность и экологичность производства.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, стрела, пресс-форма для вакуумной инфузии, консоль, торцевой упор, средняя опора, нижняя опора, ферма, удлинитель, верхняя опора, внутренний диагональный стержень, перпендикулярный стержень, диагональный стержень, заключение.

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания: 20.01.2025 г.

Руководитель выпускного квалификационного проекта: Соловьев В.В.
доцент, канд. тех. наук.

Задание принял к исполнению (дата):



РЕФЕРАТ

Дипломная работа содержит 87 страниц, 43 рисунка, 15 таблиц, 37 источников.

ТРАНСПОРНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, СТРЕЛА, КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, УГЛЕВОЛОКНО, ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА, ФЕРМА, ВАКУУМНАЯ ИНФУЗИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работе представлены выбор материала и способы его формования, разработка облегченной стрелы транспортно-установочного агрегата и результаты проведенного моделирования на напряженно-деформированное состояние полученной комбинированной конструкции.

Цель работы: снижение весовых характеристик стрелы транспортно-установочного агрегата при использовании полимерно-композиционных материалов.

Задачи:

- анализ возможных решений по снижению массы и габаритов;
- разработать вариант реализации комбинированной ферменной конструкции стрелы транспортно-установочного агрегата (ТУА);
- оценить напряженно-деформированное состояние, а также динамические характеристики комбинированной ферменной конструкции;
- провести оценку экономической целесообразности использования стрелы ТУА из полимерно-композиционного материала (ПКМ);
- определить вероятные опасности при работе с конструкциями, выполненными из полимерно-композиционных материалов.

В основной части описаны методы формовки ПКМ, составляющие их материалы, а также проведен анализ выбора конструкции стрелы. В проектной части проведено проектирование и моделирование предполагаемой конструкции. В экономической части были рассчитаны затраты на материалы,

временные и стоимостные затраты на сборку в целом. В разделе безопасности и экологичности рассмотрены общие требования, а также требования при работе с вредными веществами и способы защиты.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	9
Введение	10
1 Обзор существующего транспортно-установочного агрегата и метод производства композитной стрелы с учетом различных конструкций и материалов	12
1.1. Устройство ТУА	12
1.1.1. Основные характеристики транспортно-установочного агрегата	13
1.2. Разновидности стрел	13
1.2.1. Телескопическая стрела	14
1.2.2. Башенная стрела	16
1.2.3. Решетчатая стрела	17
1.3. Полимерно-композиционные материалы	19
1.3.1. Армирующие наполнители	20
1.3.1.1. Стекланные волокна	20
1.3.1.2. Углеродные волокна	21
1.3.1.3. Борные волокна	22
1.3.1.4. Органические волокна	23
1.3.2. Связующие матрицы	24
1.4. Методы формования	28
1.4.1. Метод горячего прессования	28
1.4.2. Автоклавное формование	29
1.4.3. Вакуумная инфузия	30
1.4.4. Пропитка пленочным связующим	31
1.4.5. Метод контактного формования	32
1.5. Постановка технического задания	33
2 Моделирование конструкции стрелы транспортно-установочного агрегата с использованием САПР SolidWorks	36
2.1. Анализ существующих материалов и конструкций для проектирования	

стрелы	36
2.2.Проектирование элементов стрелы	39
2.3.Выбор материала в САПР SolidWorks	48
2.4.Вакуумная инфузия как метод формования композитного стержня	50
2.4.1. Проектирование пресс-формы для формования методом вакуумной инфузии	51
2.4.2. Технология получения полимерно-композитного стержня методом вакуумной инфузии	54
2.5.Технологический процесс сборки комбинированной стрелы для транспортно-установочного агрегата	54
3 Анализ прочностных и динамических характеристик комбинированной стрелы ТУА	57
3.1.Статический расчет прочностных характеристик	57
3.2.Динамический анализ частотных характеристик стрелы	63
4 Экономическая часть	68
4.1.Расчет затрат на материалы и комплектующие для изготовления комбинированной стрелы ТУА	68
4.2.Временные затраты на изготовление металлоконструкций	69
4.3.Временные затраты на изготовление композитных стержней	72
4.4.Общее время сборки и себестоимость производства комбинированной стрелы	73
5 Безопасность и экологичность производства	74
5.1.Техника безопасности при работе с полимерно-композиционными материалами	74
5.1.1. Общепринятые нормы техники безопасности на производственных предприятиях	74
5.1.2. Основные положения техники безопасности перед изготовлением изделий из композитных материалов	75
5.1.3. Требования техники безопасности при механической обработке и склеивании композитных материалов	76

5.2. Опасность химических соединений при производстве и обработке ПКМ	77
5.3. Способы защиты от нежелательных воздействий	78
Заключение	82
Библиографический список	84

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- ВВ – вредные вещества;
- ЗИП – запасные части, инструменты, принадлежности;
- КМ – композиционный материал;
- ЛА – летательный аппарат;
- МВВ – местная вытяжная вентиляция;
- НТД – нормативно-техническая документация;
- ПК – полимерный композит;
- ПКМ – полимерно-композиционный материал;
- ПО – поверхность оборудования;
- РДТТ – твердотопливный ракетный двигатель;
- РКН – ракета космического назначения;
- РН – ракета-носитель;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- СЗ – средства защиты;
- СИЗ – средства индивидуальной защиты;
- СК – стартовый комплекс;
- СКЗ – коллективные средства защиты;
- ТП – технологический процесс;
- ТУА – транспортно-установочный агрегат.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ведутся разработки новых ракет-носителей (РН) и ракет космического назначения (РКН), как в Российской Федерации, так и за рубежом, масса которых может превышать массу их аналогов, использующихся на данный момент. Исходя из этого, возникает необходимость проектировать оборудование для эксплуатации РН и РКН с некоторым запасом прочности (например, относительно максимальной массы ракеты, транспортируемой на ТУА).

Транспортно-установочный агрегат представляет собой подъемно-транспортный агрегат на железнодорожном ходу, который оборудован гидроприводом для подъема стрелы в вертикальное положение и вывешивания агрегата на гидроопорах. Так же ТУА оснащён электрооборудованием для приведения в действие исполнительных механизмов и контроля за их положением. Масса ТУА составляет около 216 т, с учётом установленной на него (РКН), например, Союз-2.1б (масса которого около 40 т в не заправленном виде) она может достигать 256 т, вследствие чего нагрузка на ось составляет примерно 42 т, что почти в 2 раза больше в сравнении с осевой нагрузкой максимально заполненных грузовых ж/д вагонов (которая составляет примерно 23,5 т). Так как для транспортировки используются стандартные железнодорожные рельсы, масса транспортно-установочного агрегата может привести к повреждению или разрушению железнодорожных путей при его перегрузке.

Одним из вариантов облегчения конструкции является применение полимерно-композиционных материалов. Сейчас ПКМ находят всё большее применение в аэрокосмической отрасли. Полимерные композиты – это материалы, состоящие из двух или более компонентов на основе полимерной матрицы (обычно это пластики или смолы) и армирующих волокон, например, стекло- или углеволокон. Плотность композитных материалов в среднем в 5-6 раз меньше, чем у часто используемых в производстве металлов. При своей небольшой массе такие материалы отличаются высокими физическими и

механическими свойствами. Самыми прочными из них являются углепластики.

Для того, чтобы спроектировать модернизированный транспортно-установочный агрегат возможно использовать различные системы автоматизированного проектирования (САПР). Одной из наиболее оптимальных является САПР SolidWorks, которая предоставляет возможность не только проектирования, но и моделирования различных механических воздействий.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА И МЕТОД ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТНОЙ СТРЕЛЫ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ

1.1. Устройство ТУА

Транспортно-установочный агрегат – это сложное техническое изделие, которое включает в себя специализированную железнодорожную платформу, непосредственно, на которой установлено оборудование, позволяющее вертикализировать РКН. Для осуществления этого в состав оборудования ТУА входят: стрела, надежно фиксирующая РКН и ее гидроцилиндры, позволяющие изменить угол ориентации стрелы вплоть до 90° (или более/менее, в зависимости от требуемого угла) [1].

Для снижения вероятности опрокидывания транспортно-установочного агрегата с РКН, установленной в вертикальном положении, применяются две гидроопоры, размещенные на крыльях, которые, в свою очередь, жестко закреплены на платформе [1].

Вертикализация стрелы с РКН осуществляется на стартовом комплексе, двумя механизмами доводки платформа крепится к кронштейнам, благодаря чему транспортно-установочный агрегат, вывешенный на гидроопорах, возможно перемещать в продольном направлении (± 50 мм) [1].

Благодаря электрооборудованию, установленному на ТУА и расположенному в аппаратном шкафу, в первую очередь, происходит контроль за положением гидроприводов стрелы и гидроопор, установленных на крыльях, а также обеспечивается работа различных механизмов и освещение рабочих мест. В свою очередь, контроль за электрооборудованием и его работа производится с помощью пульта управления, установленного на платформе ТУА или переносного пульта [1].

Помимо вышеописанного в ТУА входят: грузовой макет; комплект ЗИП, для которого имеется инструментальный шкаф, установленный на боковой

балке платформы; полный комплект документации [1].

1.1.1. Основные характеристики транспортно-установочного агрегата

Транспортно-установочный агрегат 373УН34 возможно использовать при любых погодных условиях в любое время суток и года, при соблюдении следующих требований:

- средняя скорость ветра не превышает 17 м/сек;
- температура воздуха находится в диапазоне от -40°С до +40°С [1].

ТУА разрешается хранить на открытой площадке при любых метеорологических условиях [1].

Транспортно-установочный агрегат взаимодействует с РКН следующим образом: в первую очередь нижняя часть ракеты закрепляется на ТУА, после чего происходит стыковка верхней части РКН к нижней; следующим этапом является перемещение транспортно-установочного агрегата с РКН от места завершающей сборки и проверки до стартового комплекса (СК); окончательным этапом является установка ракеты космического назначения на агрегат 3731У07 [1].

В случае возникновения неисправностей технических или механических систем РКН его транспортируют в обратном порядке до места сборки [1].

Таблица 1 – Основные технические данные ТУА [1]

Габариты ТУА:	
– длина	45 875 мм
– ширина (по крыльям)	6 520 мм
– высота при горизонтальном положении стрелы	7 165 мм
– высота при вертикальном положении стрелы	37 500 мм
Вес ТУА	216 000 кг
Скорость транспортирования ТУА:	
– тепловозом	не более 10 км/ч
– самоходными тележками	4,0/1,8 м/мин
Максимальная нагрузка на ось тележки	40 000 кг
Гидропривод:	
– максимальная нагрузка на одну гидроопору	124 240 кг

1.2. Разновидности стрел

Стрела – это первостепенный грузоподъемный механизм транспортно-установочного агрегата. От особенностей конструкции стрелы напрямую зависят

эксплуатационные характеристики транспортно-погрузочных машин. Далее будут рассмотрены различные виды стрел, относящиеся к крановому оборудованию, так как их конструкции схожи со стрелой, установленной на ТУА [2].

Можно выделить следующие виды стреловых устройств:

– с не выдвижным видом устройства, чаще всего к ним относятся решетчатые стрелы (они состоят из частей и элементов, легко монтирующихся/фиксирующихся между собой). Свое применение такие стрелы находят в подъёмно-перегрузочных работах [2].

– с выдвижным видом устройства, к ним можно отнести телескопические стрелы, они обычно состоят из одной или нескольких выдвижающихся секций, которые позволяют изменять длину самой стрелы, для того чтобы эксплуатировать в более труднодоступных условиях [2].

Также некоторой разновидностью конструкции стрелового устройства является башенно-стреловое оборудование, оно в основном находит все применение в строительстве (перемещение тяжелых бетонных плит, кирпичей и т.д.) [2].

Далее рассмотрим более детально виды грузоподъемных стрел и выберем наиболее подходящую конструкцию.

1.2.1. Телескопическая стрела

Телескопическая стрела грузоподъемного устройства состоит из основной и нескольких выдвижающихся секций, благодаря которым возможно изменение ее длины. Она может раздвигаться на необходимое расстояние, а также подниматься на заданную высоту. Благодаря такой универсальности конструкции возможно перемещать имеющие большой вес и габариты грузы в малодоступных местах.



Рисунок 1 – Изображение телескопической стрелы

В настоящее время грузоподъемное оборудование предназначено для грузов, имеющих различные массовые и габаритные характеристики, так, например, для грузов до 60 т чаще всего применяются стрелы с тремя выдвижными секциями, от 60 т – с четырьмя, пятью и более. Такое автокрановое устройство отличается наличием различных блоков управления, таких как полиспасты и гидроцилиндры, которые способствуют большей грузоподъемности, а использование в конструкции плит скольжения свидетельствует о более плавном выдвижении секций, вследствие чего отсутствуют рывки и риски ударов [3].

Основным преимуществом грузоподъемного устройства с телескопической стрелой является его мобильность [4].

Отличительная особенность такой конструкции заключается в вылете стрелы, который обратно пропорционален весу поднимаемого груза – для этого существуют соответствующие расчетные таблицы, позволяющие его определить [4].

Несмотря на все преимущества и отличительные особенности данной конструкции, она не подходит для выполнения ее наиболее нагруженных частей

из полимерно-композитного материала, так как это повлечет за собой большие финансовые вложения. А также в случае стрелы для транспортно-установочного агрегата нет необходимости выполнять ее с изменяющейся длиной стрелы.

1.2.2 Башенная стрела

Стрела башенного крана представляет собой механизм с изменяющимся углом наклона, благодаря которому возможно достать до необходимого груза [2].



Рисунок 2 – Изображение башенного крана

Существуют следующие виды стрел башенных кранов: подъемные(а), балочные(б) и комбинированные(в). Они представлены на рисунке 3 [5].

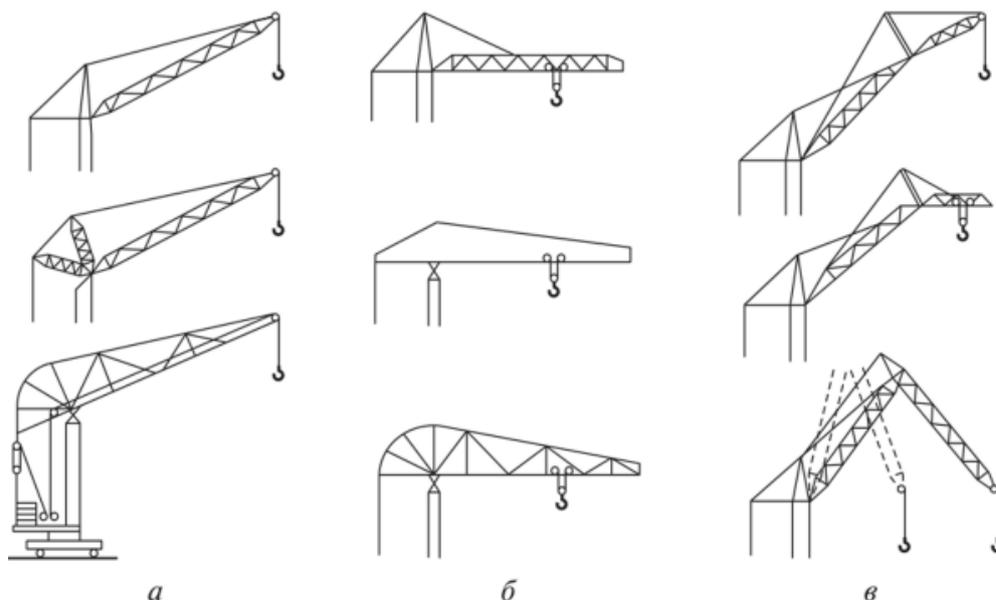


Рисунок 3 – Изображение видов стрел башенных кранов

К достоинствам подъемных стрел можно отнести следующие: преимущественно малые размер и масса, отсюда же следует второе преимущество – это удобство монтажа и транспортировки за счет своих габаритных показателей [6].

Недостатком таких стрел является невозможность горизонтального перемещения груза [6].

Существует два вида балочных стрел: подвесные и молотовидные, первые из которых получили широкое распространение в строительстве. Это двутавровая балка, по нижней части которой перемещаются катки грузовой тележки – они используются для сцепки и перемещения груза [6].

Шарнирно-сочлененные стрелы состоят из двух частей: основная часть и головная – она называется гуськом. Шарнирно-сочлененные стрелы являются комбинированными. Краны, в которых используются стрелы с такими конструкциями имеют две крюковые подвески. Такие стрелы применяются вследствие необходимости увеличения высоты и подъема крана, а также вылета крюка [6].

1.2.3. Решетчатая стрела

Решетчатая стрела – это стрела грузоподъемного устройства нераздвижного типа, обычно она оформлена в виде решетки с секциями, которая сопровождается приводным механическим устройством подъема. При использовании такого типа конструкций гарантированы прочность и устойчивость при подъеме. Существуют различные модели решетчатых стрел, в некоторых из них установлен ножничный механизм стыковки секций, благодаря чему обеспечивается удобство транспортировки и развертывания. На рисунке 2 показано изображение конструкции такого типа [7].

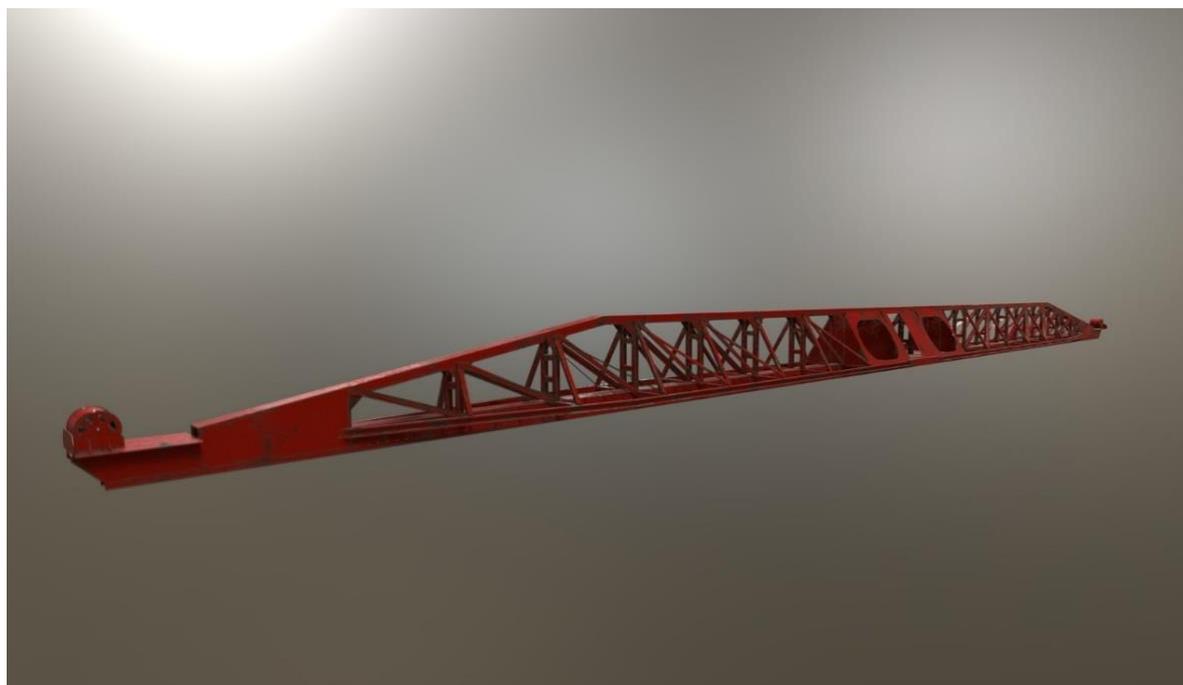


Рисунок 4 – Изображение решетчатой стрелы

В качестве преимуществ решетчатых стрел, можно отметить следующие: малые показатели парусности, что свидетельствует о меньшей вероятности опрокидывания подъемно-перегрузочного оборудования при эксплуатации в условия большого скопления воздушных масс; так как конструкция стрелы выполнена из отдельных небольших элементов, она имеет преимущественной низкий вес и стоимость по сравнению с телескопической стрелой, выполненной из металлических труб и листов; удобство транспортирования не только за счет низкого веса, но из-за особенностей конструкции, способной разбираться на множество элементов [8].

Такой вид стрелы является наиболее предпочтительным (в контексте проектирования транспортно-установочного агрегата), так как данная конструкция отлично подходит для облегчения устройства, также она не уступает в обеспечении прочности и устойчивости.

1.3. Полимерно-композиционные материалы

Полимерно-композиционные материалы (или композиты) обычно состоят из одного или нескольких компонентов, одни из которых являются – связующими (полимерными) матрицами (металлической, углеродной и др.), а другие – армирующими наполнителями представляющие собой волокна, нитевидные кристаллы и т.д. [9-10].

При правильном подборе по основным характеристикам, свойствам и соотношениям наполнитель и матрицу, можно получить материалы, отвечающие необходимым эксплуатационным и технологическим свойствам. Их характерной особенностью является то, что при использовании одного полимера можно воспроизвести различное количество композиционных материалов (КМ) за счет применения разных наполнителей и добавок [9-10].

Основные характеристики часто используемых ПКМ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные характеристики полимерно-композитных материалов [11]

Наименование ПКМ	Плотность, кг/м ²	Модуль упругости, ГПа	Теплопроводность при 20°С, Вт/м *°С	Рабочая (предельная) Т, °С	Предел прочности МПа		
					При растяжении	При сжатии	При изгибе
Стеклопластик	1800-2000	50-70	0.75	-50...+180	1700	410-1180	690-1240
Углепластик	1450-1600	350	1.0	до +250	2000-3000	940-1290	1670-2000
Боропластик	2100	250-270	0.6	до +200	1300	1150	1700
Органопластик	1300	95-180	1.2-2.0	-60...+180	670-880	150-213	460-520

Далее будут рассматриваться армирующие наполнители и связующие матрицы указанных выше в таблице полимерно-композиционных материалов.

1.3.1. Армирующие наполнители

1.3.1.1. Стекланные волокна

В настоящее время в производстве неметаллических конструкционных композитов применяются различные волокна, одними из самых распространенных являются стекловолокна, они применяются для изготовления стеклопластиков. Имея небольшую плотность, они отвечают требованиям прочности, устойчивы к химическим и температурным воздействиям [12].

Существует два вида стекланных волокон: отличительной особенностью первого вида (непрерывного волокна) является его непрерывность (волокно имеет очень большую длину, при этом его толщина в десятки раз меньше); характеристики второго волокна противоположны первому (величина его длина соотносится с шириной) [12].

Характеристики стекланных волокон чаще всего определяются их составом. В зависимости от того, для чего предназначены волокна, они могут иметь значительно отличающиеся прочностные характеристики, такие как: твердость, упругость и т.д. Также при добавлении специальных компонентов возможно получить различные химические свойства, например, стойкость к кислотам или щелочам. Помимо этого, существуют такие компоненты композитных материалов, позволяющие использовать их при воздействии факторов космического пространства (например, получение терморационно стойких композитов) [12].

Основные характеристики стекланных волокон, используемых в России представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики стеклянных волокон [12]

Марка волокна	Плотность - 10^3 , кг/м ³	Модуль упругости при растяже- нии E_1^G , МПа при 22 °С	Предел прочности при растя- жении $\dots \cdot 1^G$, МПа при 22 °С	Рабочая (предель- ная) темпера- тура T °С	Влагостой- кость
МАС (маг- нийалюмосиликат- ные)	2480	85,5	4585	до +700- 800	средняя
АБС (алюмоборо- стойкие)	2540	72,4	3448	до +650- 700	средняя
КС (кислостойкие)	2490	69,0	3033	до +200- 400	высокая

В настоящее время наиболее распространенными являются изделия, выполненные из стеклопластиков, вследствие экономически выгодного их производства в сравнении с другими ПКМ. Так, например, в авиастроении большинство элементов, выполненных из композитов, являются стеклонаполненными [12].

1.3.1.2. Углеродные волокна

Углеродные волокна отличаются от других наполнителей своими высокими механическими свойствами. Кроме того, углеволокна плохо пропускают радиосигналы (что может являться как плюсом, так и минусом, в зависимости от технического задания). При использовании таких волокон в качестве наполнителя в ПКМ необходимо корректировать режимы их обработки, так как данный наполнитель выдерживает высокие тепловые нагрузки (обработка лазером тяжело реализуема) [12].

Основные характеристики углеродных волокон представлены в таблице 4.

Все углеродные волокна можно разделить на:

- карбонизированные (содержание углерода на уровне 85%);
- графитизированные, с содержанием углерода более 99% [12].

Сырьем таких волокон является вискоза в форме волокна. При этом наиболее часто применяют гидратцеллюлозу, также в виде волокна.

Производство углеродной нити из гидрата целлюлозы заключается в вытягивании углеродного волокна из сырья при высокой температуре, благодаря чему материал получается особо прочным [12].

В таблице 4 представлены основные характеристики углеволокон.

Таблица 4 – Основные характеристики углеволокон [12]

Страна, марка волокна	Плотность - 10^3 , кг/м ³	Диаметр d, мкм	Модуль упругости E_1^G , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм ... $\cdot 10^1$, ГПа	Пределная деформация, %	Рабочая (пределная) температура T °C	Влагостойкость
Россия							
ВМН-3	1,71	7,0	250	1,43	0,6	-60 ... +400	высокая
ВМН-4	1,71	6,0	270	2,21	0,8	-60 ... +400	высокая
ВЭН-210	-	9,9	343	1,47	0,4	до +200	высокая
Кулон	1,90	-	400-600	2,0	0,4	-	высокая
ЛУ-2	1,70	-	230	2,0-2,5	1,0	до +200	высокая
ЛУ-3	1,70	-	250	2,5-3,0	1,1	до +300	средняя
ЛУ-4	1,70	-	250	3,0-3,5	1,3	-60 ... +120-150	средняя
Урал-15	1,5-1,6	-	70-80	1,5-1,7	1,3	-60 ... +180	средняя
Урал-24	1,7-1,8	-	150-200	1,7-2,0	1,1	до +300	средняя
Элур	1,6	-	150	2,0	1,3	до +300	высокая
УКН-5000	1,75	-	180-230	3,0-3,5	0,9	до +300	средняя

Все вышеописанные наполнители возможно применять при положительных и отрицательных температурах, кроме того, они устойчивы к повышенной влажности, а также воздействию ультрафиолета и давлению (повышенному/пониженному) [12].

Наибольшее распространение углеволокна получили благодаря своему низкому весу, это особенно заметно в ракетно-космической промышленности и автомобилестроении. Важно отметить, что углеволокна часто применяются при декорировании различных поверхностей, за счет уникального внешнего вида [12].

1.3.1.3. Борные волокна

Борные волокна, применяемые в композитных материалах, обладают

специфическими свойствами, позволяющими увеличить предел усталости ПКМ. Это дает возможность применять их в гибких механизмах, либо в элементах, испытывающих переменную деформацию (например, лопасти ветрогенераторов). Кроме того, наряду с высоким пределом усталости, борные волокна имеют относительно высокий модуль упругости, а также модуль сдвига. При необходимости увеличения теплостойкости данного материала, его обычно покрывают карбидом кремния, что позволяет сохранить структуру ПКМ при воздействии на него относительно высокой температуры [12].

Основные характеристики борных волокон представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные характеристики борных волокон [12]

Страна, марка волокна	Плотность - 10^3 , кг/м ³	Диаметр d, мкм	Модуль упругости E_1^G , ГПа	Средняя прочность на базе 10 мм $\dots \dot{G}_1$, ГПа	Предельная деформация, %	Рабочая (предельная) Температура T, °C	Влагостойкость
Россия (В/В)	2,5	95±3	394	2,95-3,5	0,75-0,9	-60 ... +200	высокая

Также как и углеволокна, борные волокна устойчивы к высокой/низкой влажности, давлению и температуре [12].

Данные волокна применяют для производства стержней, предназначенных для различных сложных технических устройств, в которых требуется возможность смещения оси вращения стержня [12].

1.3.1.4. Органические волокна

Данные волокна выполнены на основе ароматических полиамидов (арамидов), благодаря чему они обладают исключительными механическими свойствами, так, например, по модулю упругости они уступают только борному и углеродному волокнам. Также наряду с вышеупомянутыми волокнами обладают высокой теплостойкостью. Отличительной особенностью таких волокон является их невысокая плотность (в сравнении с углеволокном) [12].

Несмотря на технологичность органических волокон их наиболее явным недостатком является плохая смешиваемость со связующим [12].

В таблице 6 представлены основные характеристики органических волокон.

Таблица 6 – Основные характеристики органических волокон [12]

Страна, марка волокна	Плотность - $10^3, \text{кг/м}^3$	Модуль упругости $E_1^G, \text{ГПа}$	Средняя прочность при растяжении $\dots_1^G, \text{МПа}$	Удлинение при разрыве, %	Рабочая (предельная) температура $T, \text{°C}$	Влагостойкость
Россия						
Армос	1450	140-142	5000-5500	3,5-4,5	до +300-350	средняя
СВМ	1430	120-135	3800-4200	4,0-4,5	-30 ... +70	средняя
Терлон	1430	100-150	3100	2-3,5	-40 ... +60	средняя

Исходя из таблицы 6, можно сделать вывод, что значительным недостатком арамидов является недостаточная влагостойкость, так, например, при нахождении арамидного композита во влажном месте его механические свойства постепенно деградируют.

Одним из направлений техники, в которых арамиды нашли свое применение является производство РДТТ [12].

Проанализировав различные виды армирующих волокон, можно прийти к выводу, что наиболее удачными для использования на транспортно-установочном агрегате будут угле- и стекловолокниты, так как они обладают необходимыми характеристиками для эксплуатации в открытом воздухе, такими как: высокая влагостойкость, способность работы в экстремальных температурах, низкая масса и др.

1.3.2. Связующие матрицы

Обычно в качестве связующих матриц полимерных композитов (ПК) применяют различные самоотверждающиеся или термопластичные полимеры. В зависимости от состава матрица, получаемый композитный материал может обладать различными механическими свойствами. Полимерное связующее изменяет механические свойства используемого волокна, образуя симбиотическую связь с ним, так, например, углеродные волокна сами по себе являются хрупкими, но прочными. При использовании полимерного

связующего, предел упругости волокон увеличивается, а также увеличивается значение предела прочности полимерного материала [9].

Среди связующих для ПКМ наибольшее распространение получили сетчатые матрицы благодаря тому, что в их состав входят компоненты, обеспечивающие низкую вязкость, за счет чего процесс соединения волокон с полимером происходит наиболее оптимально (наличие дефектов при использовании такого полимера в толщи и на поверхности материала минимально) [9].

В контексте связующих, наиболее распространенными для стекловолоконитов являются полиэфирные смолы, а для других волокон возможно использовать следующие связующие материалы: эпоксидные и фенолформальдегидные смолы [9].

В таблице 7 приведены механические свойства отвержденных полимерных матриц.

Таблица 7 – Механические свойства отвержденных полимерных матриц [9]

Показатели свойств	Тип связующих			
	Полиэфирные	Фенолформальдегидные	Полиамидные	Эпоксидные
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	25-45	40-70	90-95	50-140
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	50-130	100-125	250-280	100-180
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	30-110	70-110	80-140	60-150
Относительное удлинение при разрыве, %	0,5-1,2	0,4-0,8	1,0-2,5	2-10
Ударная вязкость, кДж/м ²	2-8	2-10	4-12	7-20
Рабочая температура длительной эксплуатации, °С	+55...+70	+140...+180	-58...+107	+70...+200

Наиболее явным преимуществом полиэфирных связующих является возможность регулирования температуры и скорости реакции отверждения путем уменьшения или увеличения количества отвердителя. При этом данные смолы невозможно использовать при температурах выше 117°С, так как их

механические свойства начинают деградировать [9].

В таких случаях (высокие температуры) используют фенолформальдегидные связующие, которые не только не деградируют при температурах выше 117°C , но и образуют новые полимерные связи (эксплуатация таких связующих реализуется при температурах до 227°C . Данные связующие нашли широкое распространения в элементах технических устройств, которые необходимо теплоизолировать или изолировать от воздействия электричества [9].

При использовании полимерно-композиционных материалов в температурных режимах свыше 227°C описанные ранее связующие не подходят, поэтому применяют полиамидные связующие, которые способны выдерживать температуры до 327°C . Как следует из свойств полиамидов, свое применение они нашли в химической промышленности, взаимодействуя с кипящими агрессивными средами. Их наиболее явным недостатком является температура отверждения, которая находится в диапазоне от 227°C до 377°C [9].

Одними из наиболее доступных (применяемых на малых предприятиях и/или частными лицами) при изготовлении карбо-, боро-, стекловолоконитов являются эпоксидные смолы, которые отверждаются за счет отвердителей на основе кислот, например, амидов. Еще одним фактором распространенности таких смол является их универсальность, так, например, в зависимости от марки смолы, ее вязкость может отличаться на порядок, а также в зависимости от марки световая проницаемость сильно варьируется. Такие смолы применяют при изготовлении любых технически сложных моделей реальных конструкций и самих конструкций [9].

Говоря в общем, про все вышеописанные связующие, их диэлектрическая проницаемость напрямую зависит от чистоты этого материала, так, например, при наличии остатков растворителей, катализаторов и прочих примесей, его диэлектрическая проницаемость снижается [9].

В зависимости от материала влияние внешней среды различно, некоторые связующие могут поглощать влагу вследствие чего они размягчаются после

расширяются и разрушаются. При этом все вышеописанные материалы обладают относительно высокими химическими и атмосфероустойчивыми свойствами [9].

Изучив и проанализировав виды полимерных матриц, можно сделать вывод, что эпоксидные связующие являются наиболее оптимальными и подходящими под поставленную техническую задачу, обусловленную изготовлением комбинированной стрелы ТУА, так как они имеют требуемый промежуток отверждения для закладки углеродного волокна и не выделяют большого количества тепла в процессе полимеризации, что также положительно сказывается на качестве изготавливаемых ПКМ.

Поэтому далее в таблице 8 рассмотрены эксплуатационные характеристики эпоксидных связующих, нашедших наибольшее применение в РФ.

Таблица 8 – Эксплуатационные характеристики эпоксидных связующих [13-14]

Тип связующего	Влагостойкость	Устойчивость к УФ-излучению	Рабочая (предельная) температура °С
ЭДТ-10	высокая	высокая	-50...+120
ЭДТ-69Н	высокая	средняя	-50...+120
ЭТФ	высокая	средняя	-40...+120
ЭП	высокая	средняя	-40...+120
5-211-Б	высокая	средняя	-40...+120
УП-2130	высокая	средняя	-40...+120
ЭНФБ	высокая	средняя	до + 120-150
ЭХВ	средняя	средняя	-40...+120
УП-2227	средняя	средняя	-40...+100
ВС-2526	средняя	средняя	-40...+100
ЭД-22	средняя	средняя	-40...+80
ЭД-20	высокая	высокая	-40...+60
ЭД-16	средняя	средняя	-40...+60
ЭД-14	средняя	средняя	-40...+60

Исходя их показателей, полученных в таблице 8, можно заключить, что многие эпоксидные смолы проявляют хорошие температурные и влажностные характеристики при эксплуатации в открытом воздухе, а некоторые из них являются устойчивыми к УФ-излучению, но основная масса более подвержена

разрушению под действием УФ-излучения. Для того чтобы этого избежать можно использовать защищающие лакокрасочные покрытия.

1.4. Методы формования

Существует множество методов формования, некоторые из которых представлены ниже:

- препреговые (прессование, автоклавное формование);
- безпрепреговые (инфузия, пропитка пленочным связующим);
- другие (например, метод контактного формования) [15].

Далее кратко рассмотрим вышеописанные методы формовки изделий из полимерно-композиционных материалов.

1.4.1. Метод горячего прессования

Метод горячего прессования является одним из первых методов, придуманных человеком для массового воспроизведения одинаковых изделий. Так как этот метод наиболее старый, он является очень простым и не требует сложных технических устройств для его реализации. Его суть заключается в раскройке заготовленного препрега под размеры формуемого образца. Подготовленный материал закладывают в ложемент (оснастку) и устройство прессования (пуансон) оказывает давление на находящийся в оснастке материал, в следствие чего препрег приобретает форму и размеры ложемента. После процесса прессования ложемент с спрессованным материалом нагревают для активации процесса полимеризации [15].

Наибольшую популярность данный технический процесс получил в авиастроительной и автомобильной промышленности, так как на таких производства являются конвейерными и требуют изготовления одинаковых деталей, например в автомобилестроении горячее прессование применяется для изготовления, капота, крыши, багажника, крыльев и т.д. А в авиационной техники наиболее часто прессованием изготавливаются элементы фюзеляжа летательных аппаратов [15].

На рисунке 5 представлено изображение пресса, используемого для формовки образцов из полимерно-композиционных материалов в ФГУП «ВИАМ».



Рисунок 5 – Изображение гидравлического пресса, используемого для формовки образцов из полимерно-композиционного материала

Как говорилось ранее, данный метод не требует дорогостоящих сложных технических устройств поэтому его объективным достоинством является экономически низкая стоимость реализации (в сравнении с другими методами формования) [15].

К недостаткам можно отнести невысокую эффективность работы и невозможность изготовления образцов сложных конфигураций, также к недостаткам относятся дефекты, возникающие в толщине и на поверхности формируемого изделия [15].

1.4.2. Автоклавное формование

Метод автоклавного формования представляет собой укладку заранее вырезанного препрега в форму, которую далее помещают в вакуумный мешок (это необходимо для получения низкой пористости готового продукта) и происходит откачка воздуха. Затем мешок помещается в автоклав. На рисунке 6 приведено

изображение автоклава.



Рисунок 6 – Изображение автоклава для формования изделий из ПКМ

Явным преимуществом метода автоклавного формования является возможность подавать высокое равномерное давление на всю площадь изготавливаемого изделия, благодаря чему происходит равномерное распределение связующего материала по всей толщине изготавливаемого ПКМ [15].

К недостаткам можно отнести дорогостоящее оснащение, оборудование и эксплуатационные материалы, а также большие затраты на электроэнергию и расходные материалы [15].

1.4.3. Вакуумная инфузия

Вакуумная инфузия представляет собой процесс замещения воздуха в толщине на поверхности изготавливаемого композитного материала связующим благодаря откачке воздуха с помощью вакуумного насоса. Данный процесс происходит в изолированной среде, изоляция достигается обычно путем использования вакуумного мешка и герметизирующей ленты, а также двух трубок: подающей и откачивающей. Помимо этого, для безопасности работы насоса в магистраль откачки включают сепаратор связующего. Подача связующего возможна из любой ёмкости, в которую устанавливается подающая трубка [15].

На рисунке 7 изображена схема процесса получения изделий из полимерно-композиционного материала методом вакуумной инфузии.

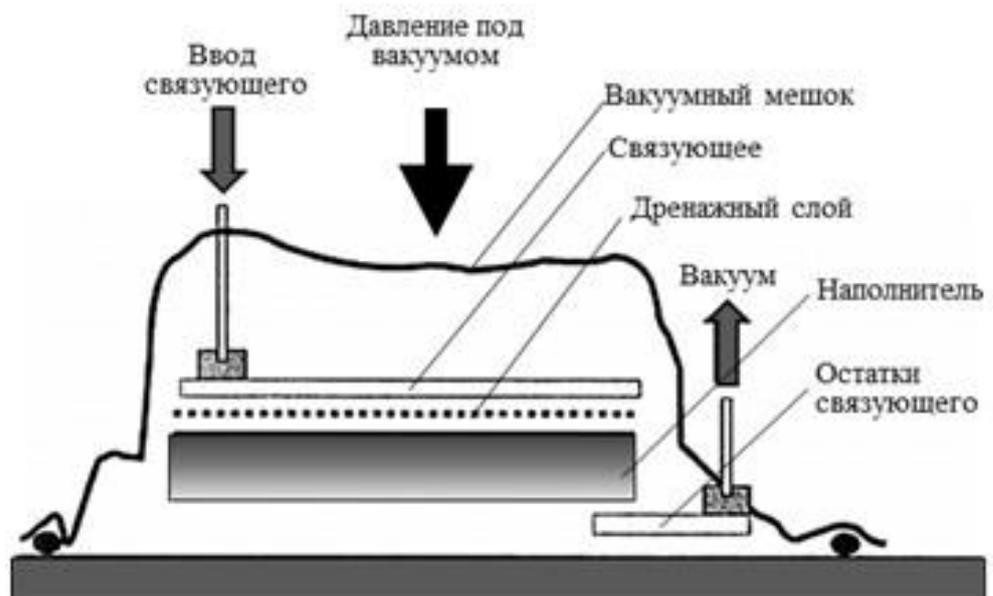


Рисунок 7 – Изображение схемы процесса изготовления изделий методом вакуумной инфузии

Преимуществом метода вакуумной инфузии являются технические средства, которые проще устроены и стоят на порядок дешевле чем автоклавное оборудование, а также используемые расходники и оснащение отличаются своей ценовой доступностью [15].

Недостатком этого метода является сравнительно низкое качество поверхностей тел сложной формы, а также относительно большое количество дефектов (относительно автоклавного метода формования) внутри них [15].

1.4.4. Пропитка пленочным связующим

Метод пропитки пленочным связующим схож с методом вакуумной инфузии, так как он осуществляется в вакуумном мешке с использованием вакуумного насоса или под давлением. Отличия заключаются в способе подачи замещающего связующего, которое устанавливается непосредственно на армирующий материал до начала откачки воздуха или подачи давления. После чего происходит замещение воздуха в толще и на поверхности материала пленочным связующим. Данный метод, как и метод горячего прессования нашел широкое применение в авиа- и автомобилестроении [15].

На рисунке 8 изображена схема процесса получения изделий методом пропитки плёночным связующим.



Рисунок 8 – Изображение схемы процесса получения изделий методом пропитки плёночным связующим

Достоинством данного метода изготовления полимерных изделий является возможность точно рассчитывать количество связующего материала, что позволяет приблизить механические свойства изготовленного образца к теоретической модели (например, математической) [15].

Наиболее значительным недостатком данного метода является низкая глубина проникновения пленочного связующего в толщу материала изготавливаемого изделия [15].

1.4.5. Метод контактного формования

Наравне с методом горячего формования метод контактного формования, он же метод ручной выкладки является самым простым. Он не требует технологического оборудования и больших материальных затрат [15].

Суть метода заключается в укладывании волокна, пропитанного полимерным связующим в форму, с помощью технологии ручной выкладки [15].

На рисунке 9 изображена схема процесса метода контактного формования.

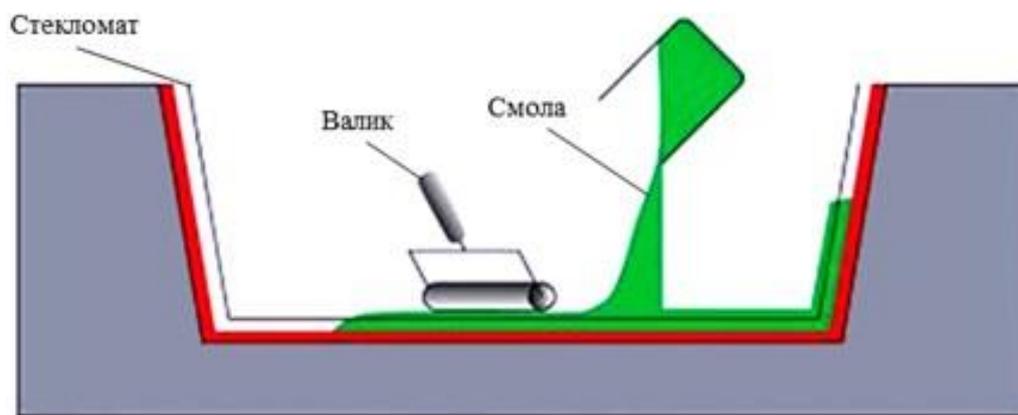


Рисунок 9 – Изображение схемы процесса метода контактного формования

Преимуществом метода ручной выкладки является возможность изготовления сложных тел, а также отсутствие множества дорогостоящего оборудования и оснасток, необходимых для формования другими методами [15].

К недостаткам относят продолжительный технологический процесс и невозможность контроля за физико-механическими свойствами полученного изделия из-за неравномерности распределения связующего и открытой формы [15].

1.5. Постановка технического задания

На этапе постановки технического задания необходимо определить основные показатели эксплуатации транспортно-установочного агрегата.

ТУА возможно использовать при любых погодных условиях в любое время суток и года, если: средняя скорость ветра не превышает 17 м/сек; температура воздуха находится в диапазоне от -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$ [1].

Также транспортно-установочный агрегат способен выдерживать нагрузки до 45 т.

Проанализировав различные вид стрел, можно заключить, что наиболее подходящей будет решетчатая стрела, она лучше всего отвечает требованиям эксплуатации на ТУА. Она имеет небольшой вес конструкции, что позволяет снизить нагрузку на железнодорожные пути и предотвратить их возможное разрушение. Такая конструкция имеет большое сопротивление к воздушным массам и предотвращает опрокидывание агрегата. Кроме того, такая

конструкция отличается более низкой стоимостью по сравнению со стрелами, в которых используется сплошной лист металла. Удобство транспортировки такой стрелы заключается в возможности ее разборки на небольшие фрагменты [8].

Основываясь проведенном анализе, в качестве армирующего наполнителя, предполагается использовать углеродные волокна, так как они обладают требуемыми характеристиками для эксплуатации на открытом воздухе. Такие углеволокна, как ВМН-3, ВМН-4, ВЭН-210, ЛУ-2 и Элур имеют высокие показатели влагостойкости и способны выдерживать перепады температур от -60°С до +400°С. Вышеописанные характеристики материала наиболее оптимальны для использования его в конструкции ТУА с учетом запасов прочности [9, 12].

Изучив и проанализировав виды полимерных матриц, было определено, что эпоксидные связующие также как и углеродное волокно имеют требуемые характеристики, с учетом различных запасов прочности. Кроме того, данная матрица широко распространена на территории РФ, что является немаловажным фактором при изготовлении стрелы, так как для её производства требуется большой объём связующего [9].

Важно отметить, что некоторые из эпоксидных смол являются устойчивыми к УФ-излучению, что позволяет эксплуатировать их в условиях открытого воздуха. Для лучшей защиты от УФ-излучения можно использовать защищающие лакокрасочные покрытия. Благодаря использованию полимерных матриц можно увеличить показатели прочности, влагостойкости и других свойств армирующих волокон [9].

В качестве способа формовки стержней из полимерно-композиционного материала был выбран метод вакуумной инфузии, так как он позволяет воспроизводить большое количество элементов в относительно короткие сроки, при этом, качество полученных элементов остается на высоком уровне [15].

Конструкцию стрелы предполагается выполнять из металлических балок, которые соединяются стержнями из полимерно-композиционного материала. В качестве соединений элементов из КМ и металлической рамы стрелы будут

выступать клепаные соединения (т.к. они позволяют нивелировать температурные и динамические деформации), для того чтобы избежать повреждения полимерных композитов необходимо предусмотреть использование специальных вставок или шайб.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТРЕЛЫ ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САПР SolidWorks

В дипломной работе представлена задача – проектирование комбинированной стрелы ТУА из полимерно-композиционного материала. Для того чтобы спроектировать такую конструкцию, необходимо сначала провести анализ труб разного сечения и подобрать наиболее подходящий для них материал.

2.1. Анализ существующих материалов и конструкций для проектирования стрелы

В качестве сравнения, для разработки облегченной стрелы транспортно-установочного агрегата, наиболее подходящими оказались трубы квадратного и круглого сечений. Для наглядности, в таблицах 9 и 10, приведем диапазон сечений от 80 до 100 мм для квадратных и круглых труб соответственно.

Таблица 9 – Основные параметры труб квадратного сечения [16]

	Сечение трубы, мм					
	80x80			100x100		
Толщина стенки s, мм	3	4	5	3	4	5
Масса 1 м трубы m, кг	7,07	9,22	11,27	8,96	11,73	14,41

Таблица 10 – Основные параметры труб круглого сечения [17]

	Сечение трубы, мм					
	83			102		
Толщина стенки s, мм	3	4	5	3	4	5
Масса 1 м трубы m, кг	5,92	7,79	9,62	7,32	9,67	11,96

Исходя из данных, приведенных в таблицах 9 и 10, можно сделать вывод, что 1 м трубы круглого сечения в среднем на 1-2 кг легче, чем 1 м квадратной трубы, при этом они выдерживают аналогичные нагрузки. Отсюда был сделан выбор в пользу труб круглого сечения.

К достоинствам круглых труб можно отнести:

- применение в различных областях;
- высокая устойчивость к изгибу при механических нагрузках;
- разнообразие соединения между собой и легкость монтажа;
- равномерное распределение нагрузок [18].

Так как стрелу планируется выполнять комбинированно из металла и ПКМ, в качестве материалов, наиболее подходящих для конструкции, будут рассмотрены такие стали как 09Г2С и 10ХСНД вследствие того, что такие марки сталей, наиболее часто применяются в конструкциях описываемого типа.

Рассмотрим низколегированную сталь 09Г2С, она состоит из:

- 96-97% железа;
- 2% марганца;
- 0,9% углерода;
- 1% кремния;
- 0,4% никеля;
- 0,03% серы [19].

Помимо этого, в ее составе в незначительном количестве могут присутствовать: хром, фосфор, азот, мышьяк и медь. Наибольшее распространение данная сталь получила при изготовлении металлопрокатных элементов, а также при производстве труб различных профилей. Помимо этого, она применяется при изготовлении автомобилей, плавательных средств и др. [19].

Наиболее явным преимуществом данного материала является неизменность её физико-механических свойств в процессе сваривания, а также механической обработки, что наиболее актуально в машинах, имеющих сварные элементы и работающих с высокой точностью. Например, в сварных емкостях внутри которых установлены насосные агрегаты., так как в случае изменения геометрии сварной емкости возникает риск повреждения, установленного в неё насосного оборудования [19].

Немаловажно отметить, что данная марка стали способна сохранять свои механические и химические свойства в диапазоне температур от -40 до +450 °С [19].

В свою очередь, при высоких температурах могут наблюдаться

нежелательные эффекты, такие как изменение пластичности, твердости и других механических характеристик материала, что, как известно из общетехнического уровня, негативно влияет на работоспособность конструкции, изготовленной из данной марки стали [19].

Кроме того, при отсутствии защитного покрытия наблюдается ее значительное корродирование, что также является недостатком данного материала [19].

Также основываясь на литературном обзоре, рассмотрим низколегированную конструкционную сталь 10ХСНД, которая подходит для производства труб. В отличие от вышеописанной стали процентное соотношение ее компонентов отличается, так, например, медь составляет 0,6%, никель – 0,8%, кремний – 1,1%, а хром - 0,9% [20].

Благодаря вышеописанным компонентам данная марка стали относительно устойчива к коррозии, при этом, при использовании она должна быть дополнительно защищена покрытием. Исходя из этого, ее наиболее явным преимуществом является стойкость к внешним температурно-влажностным, а также химическим воздействиям. Кроме того, благодаря ее высокой пластичности упрощается процесс механической обработки. Также как и предыдущая марка стали она легко свариваема. Данная сталь широко распространена на территории Российской Федерации и ее производство относительно не затратно. Температурный диапазон, при котором сталь способна сохранять свои механические характеристики находится в пределах от -70 до +450 °С [20].

Механические характеристики данной марки стали сильно зависят от ее чистоты, так, например, при наличии мышьяка (нежелательный компонент) значительно снижается ударная вязкость, при этом хрупкость материала увеличивается [20].

Чаще всего такую сталь применяют для строительного производства, производства кранов, мостов, строительных машин и сооружений [20].

Таким образом, исходя из литературного обзора компонентов применимых

для изготовления комбинированной стрелы, наиболее оптимальным материалом для изготовления ферменных пролетов является сталь 10ХСНД, так как она отвечает высоким требованиям коррозионной стойкости, способна сохранять механические свойства при перепадах температур.

В качестве материала для стержней конструкции, исходя из анализа в 1 главе, будет выступать высокопрочный композитный материал, состоящий из углеволокна ВМН-4, пропитанного эпоксидной смолой ЭДТ-10 (отвердитель ТЭТА). Такой полимерно-композиционный материал способен обеспечивать: высокие прочностные показатели, небольшой вес, устойчивость к влаге и коррозии, хорошую жесткость [9, 12].

2.2. Проектирование элементов стрелы

Конструкцию стрелы предполагается выполнять в виде комбинированной фермы, состоящей из металлических балок и элементов, а также композитных стержней. Основываясь на литературном обзоре, в качестве ферменных пролетов выбраны круглые металлические трубы с сечением 150 мм и толщиной 10 мм (ГОСТ 10704-91), изображение такой трубы представлено на рисунке 10.

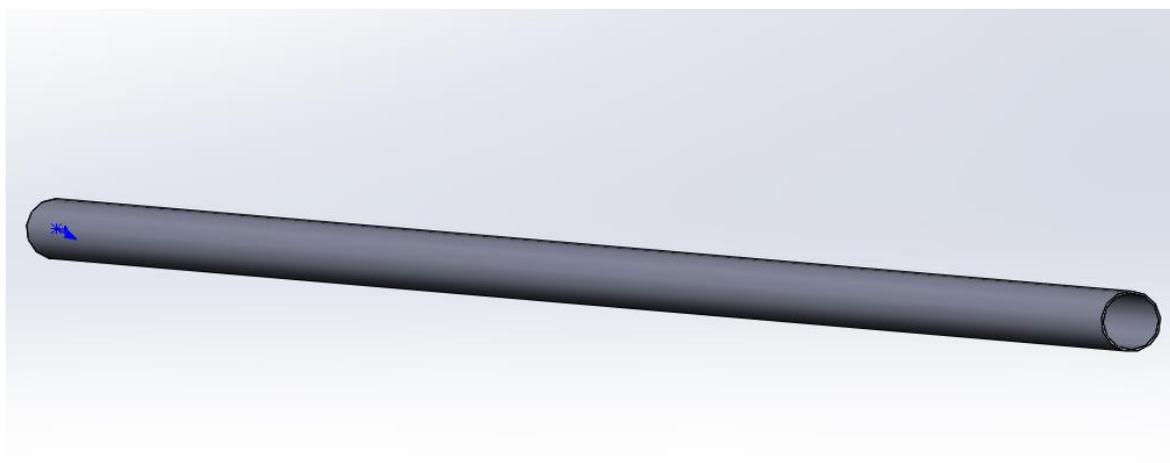


Рисунок 10 – Изображение ферменного пролета

Одна ферменная часть стрелы состоит из четырех ферменных пролетов. На каждом пролете располагаются металлические проушины, соединенные с ними с помощью сварки, представленные на рисунке 11.



Рисунок 11 – Изображение ферменного пролета с проушинами

Такие проушины предполагается использовать для закрепления на них стержней. Для этого будут применяться перпендикулярные и диагональные стержни с соответствующими диаметрами отверстий, выполненные из полимерно-композиционного материала, они представлены на рисунках 12 и 13 соответственно.



Рисунок 12 – Изображение перпендикулярного стержня

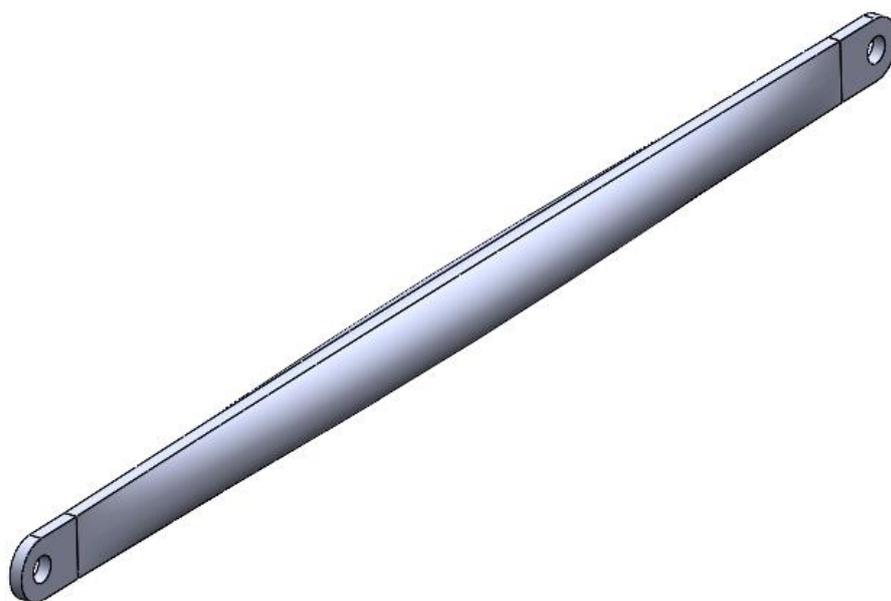


Рисунок 13 – Изображение диагонального стржня

Такие стержни будут устанавливаться соосно отверстиям проушин. Также на трубах имеются внутренние проушины для внутренних диагональных композитных стержней, один из которых представлен на рисунке 14.

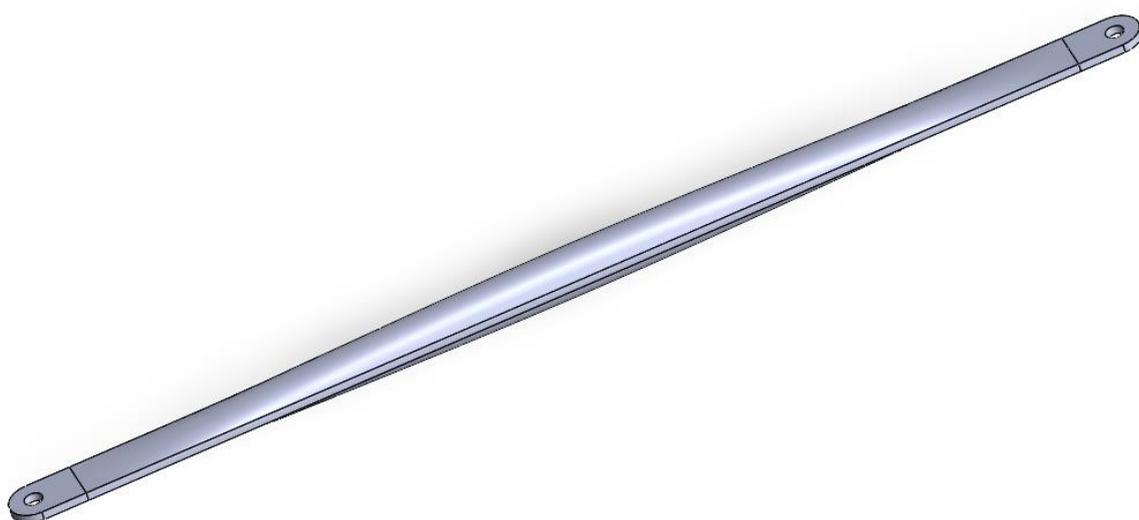


Рисунок 14 – Изображение внутреннего диагонального стержня

На каждый композитный стержень устанавливается металлическая

накладка (рисунок 15) для того, чтобы снизить вероятность его разрушения в процессе фиксации на проушины, путем отведения на себя тепла при заклепывании (окончательным этапом изготовления металлических накладок является их закалка).

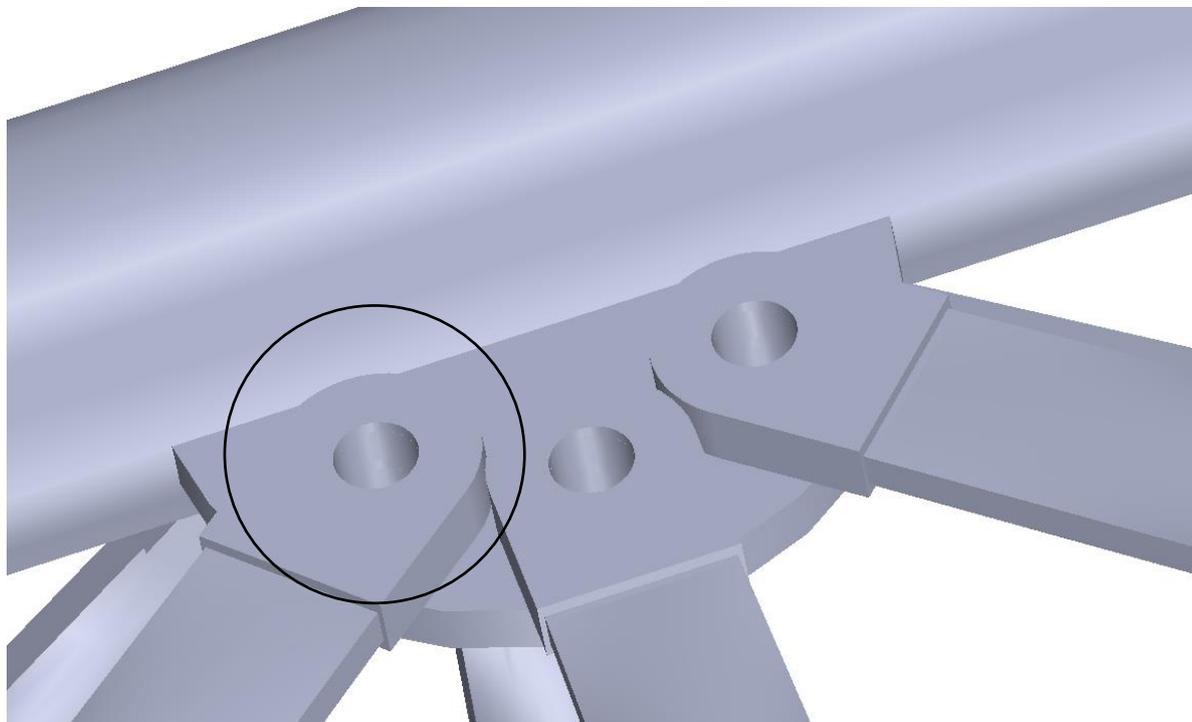


Рисунок 15 – Изображение металлических накладок, установленных на стержнях

На рисунке 16 приведено изображение собранной части ферменной конструкции стрелы, состоящая из: 1 – ферменного пролета; 2 – накладки на стержень; 3 – проушины; 4 – перпендикулярного стержня; 5 – диагонального стержня; 6 – внутреннего диагонального стержня.

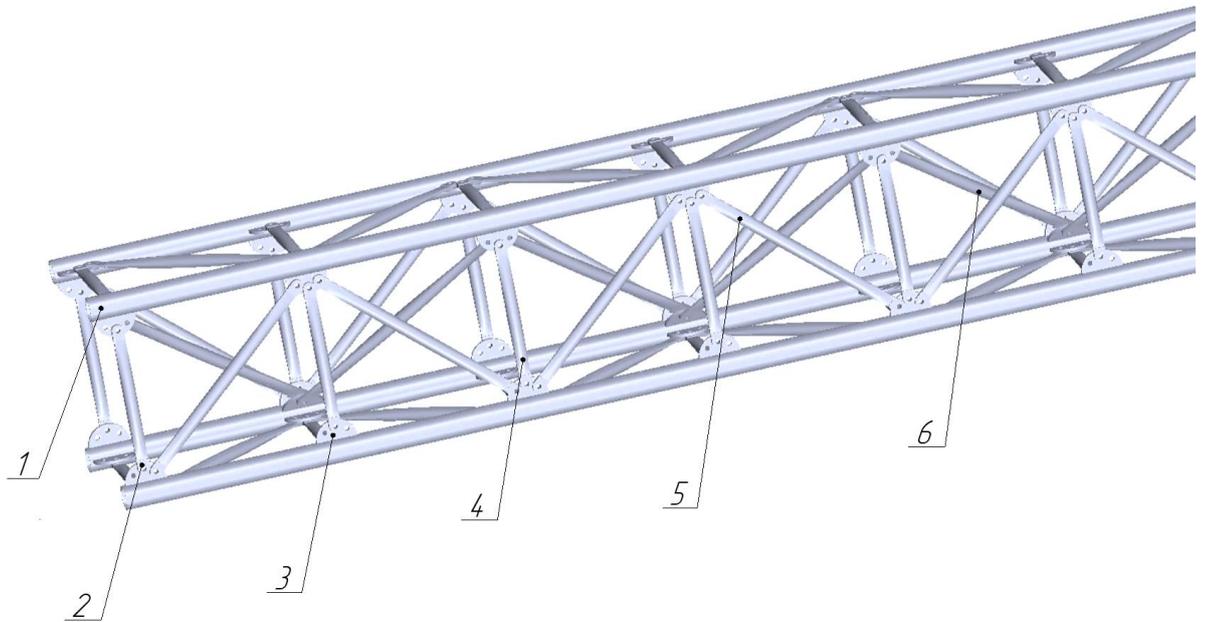


Рисунок 16 – Изображение собранной части ферменной конструкции стрелы

Соединять между собой части ферменных конструкций стрелы предполагается с помощью фланцев, один из которых изображен на рисунке 17.

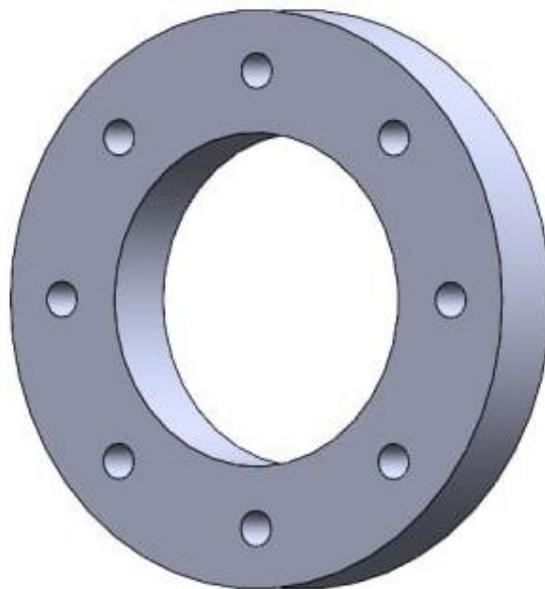


Рисунок 17 – Изображение соединительного фланца

Также для увеличения жесткости основной ферменной конструкции в

месте ее соединения предполагается использовать дополнительную ферменную конструкцию, которая представляет собой металлический ферменный пролет с проушинами, представленный на рисунке 18.

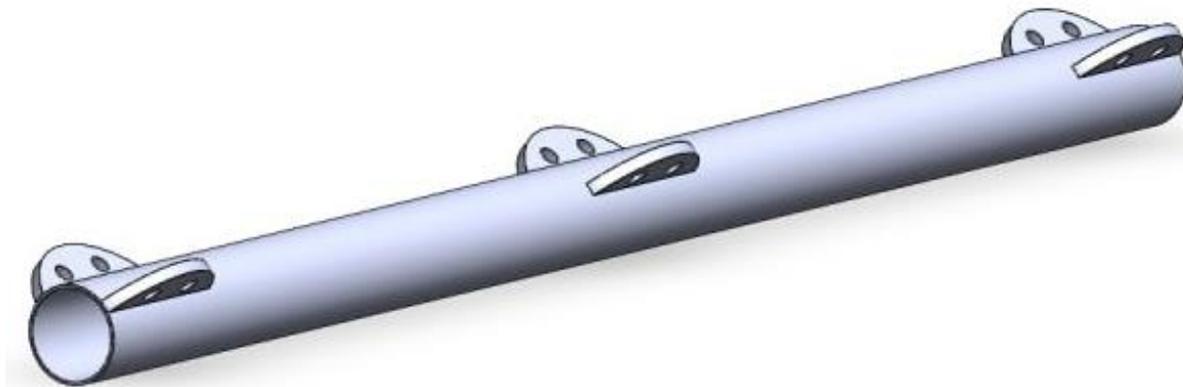


Рисунок 18 – Изображение поддерживающего ферменного пролета в месте соединения двух ферм

На рисунке 19 изображена поддерживающая конструкции, которая проушиной 1 крепится к ферменному пролету основной части стрелы, состоящая из: проушины 2, которая приваривается к ферменному пролету 3 поддерживающего устройства и композитного стержня 5 (рисунок 12). Фланцевое соединение 4 позволяет соединить две ферменных части стрелы.

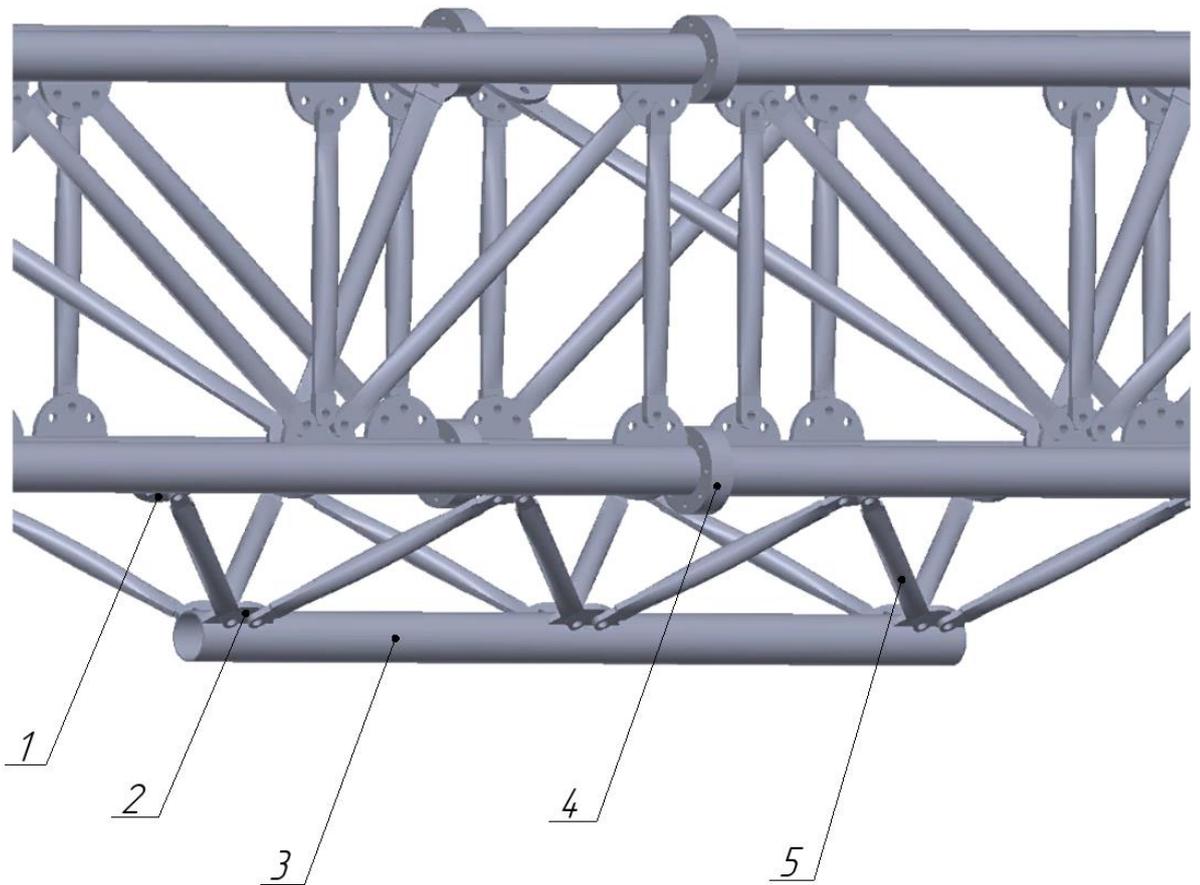


Рисунок 19 – Изображение дополнительной ферменной конструкции, закрепленной в месте соединения фланцев

На рисунке 20 изображен торцевой упор, он располагается в верхней части стрелы, соединение упора с ферменными пролетами осуществляется с помощью полуавтоматической сварки (она является наиболее оптимальной при таком объеме работ). Вид соединенной конструкции представлен на рисунке 21.

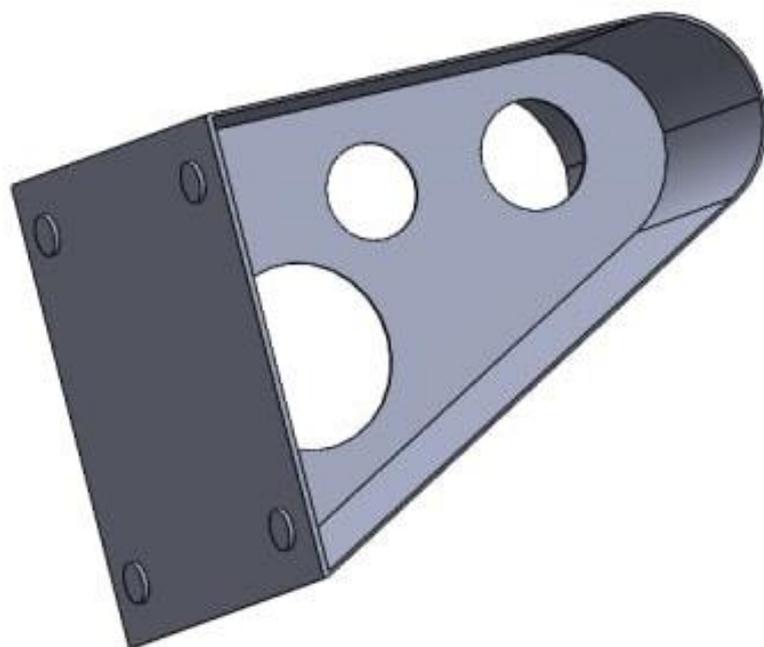


Рисунок 20 – Изображение торцевого упора верхней части стрелы

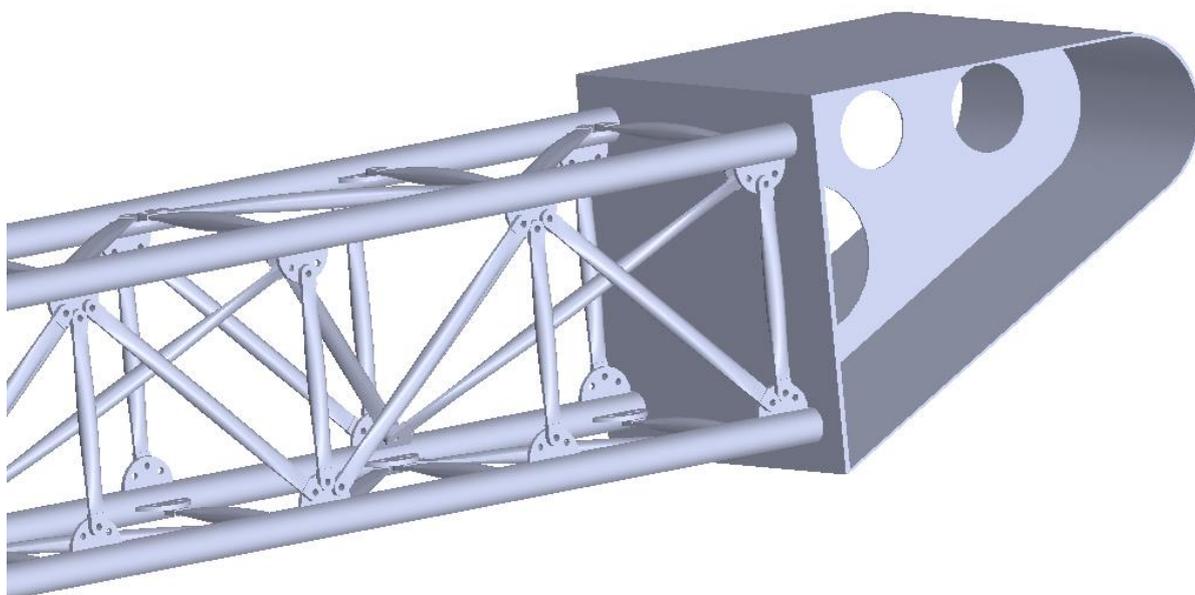


Рисунок 21 – Изображение части ферменной конструкции соединенной с торцевым упором методом сварки

На рисунке 22 представлен вид спроектированной полой (рисунок 23) хвостовой части стрелы с элементами крепления гидроцилиндра 2 и осью вращения стрелы 1, она состоит из консоли и удлинителя, сваренных между собой. Соединение хвостовой части с основной частью стрелы осуществляется с

помощью сварки (данные элементы выполнены из листового металла).

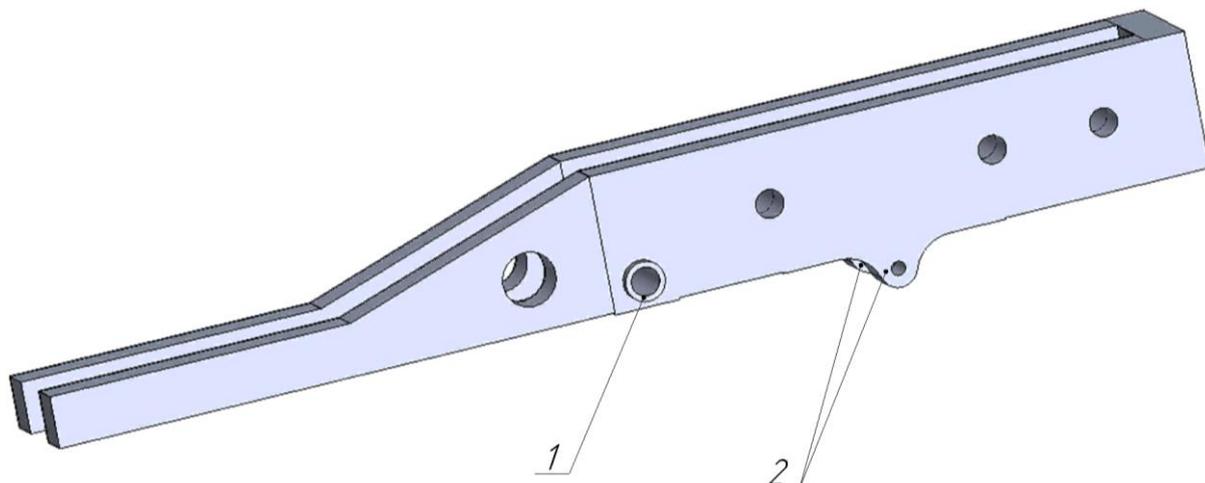


Рисунок 22 – Изображение хвостовой части стрелы

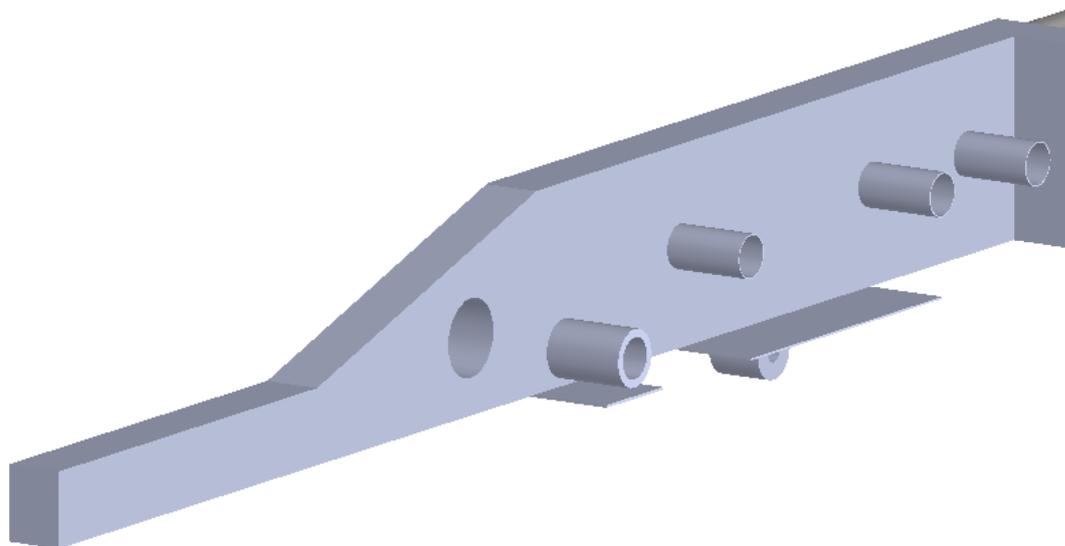


Рисунок 23 – Изображение хвостовой части в разрезе

На рисунке 24 представлены изображения верхней, средней и нижней опор, благодаря которым возможно установить РНК на ТУА.

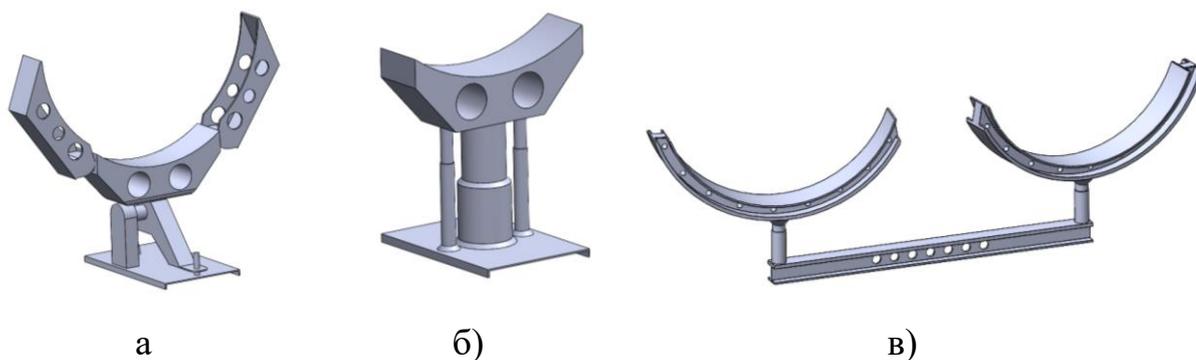


Рисунок 24 – Изображения опор: верхней (а); средней (б); нижней (в)

Общий вид собранной стрелы ТУА представлен на рисунке 25.

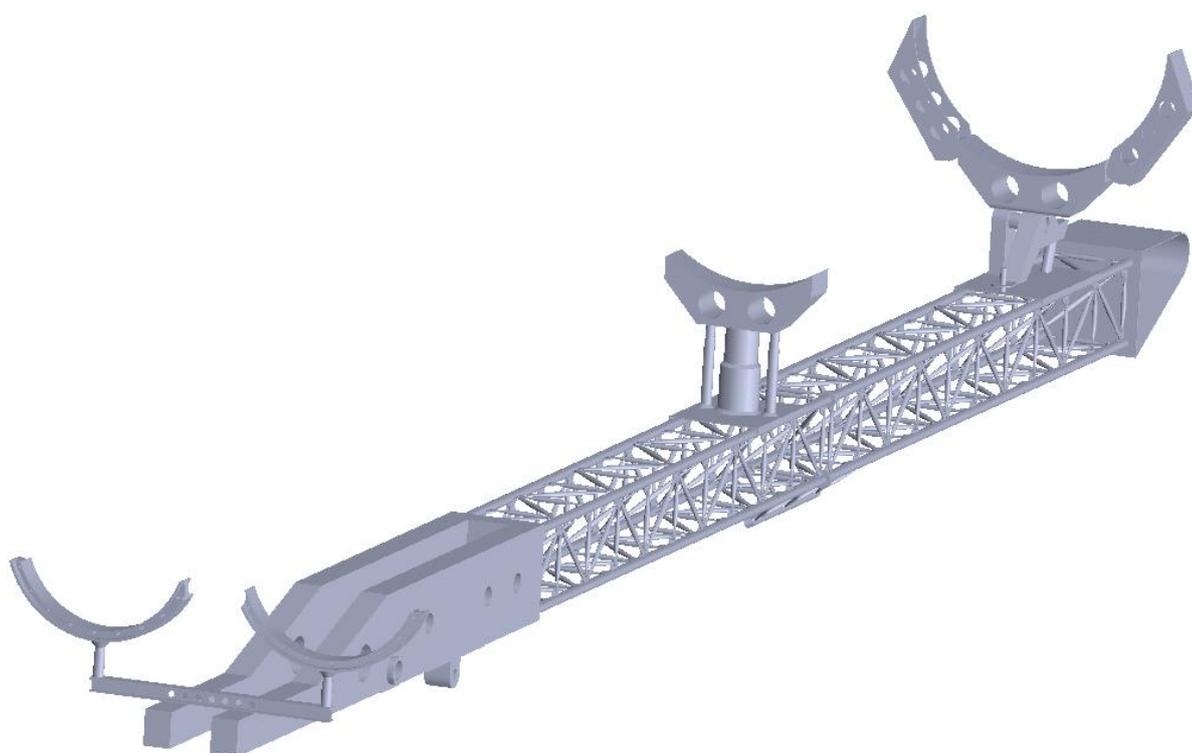


Рисунок 25 – Изображение стрелы транспортно-установочного агрегата

2.3. Выбор материала в САПР SolidWorks

Для того чтобы выбрать материалы, необходимо сначала создать их в библиотеке и ввести основные свойства. Основные характеристики материалов стали 10ХСНД и углепластика на основе углеволокна ВМН-4, пропитанного эпоксидной смолой ЭДТ-10 представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Основные характеристики используемых материалов [13, 20]

Основные свойства	Материал	
	Сталь 10ХСНД	Углепластик (ВМН-4+ЭДТ-10+ТЭТА)
Модуль упругости, МПа	200000	125000
Коэффициент Пуассона	0,3	0,25
Модуль сдвига, МПа	200000	8000
Массовая плотность, кг/м ³	7850	1500
Предел прочности при растяжении, МПа	530	1500
Предел прочности при сжатии, МПа	600	300
Предел текучести, МПа	390	150

Такой материал как сталь 10ХСНД выбран для следующих элементов конструкции: ферменный пролет; проушины; накладки на стержни; соединительный фланец; поддерживающий ферменный пролет; торцевой упор; хвостовая часть (консоль и удлинитель); верхняя, средняя и нижняя опоры. Углепластик на основе углеродного волокна ВМН-4, пропитанного эпоксидной смолой ЭДТ-10 (с отвердителем ТЭТА) выбран для таких элементов как: перпендикулярный стержень; диагональный стержень, внутренний диагональный стержень. Изображения ферменной части стрелы и общего вида стрелы с верхними, средними и нижними опорами, с выбранными материалами, приведены на рисунках 26 и 27 соответственно.

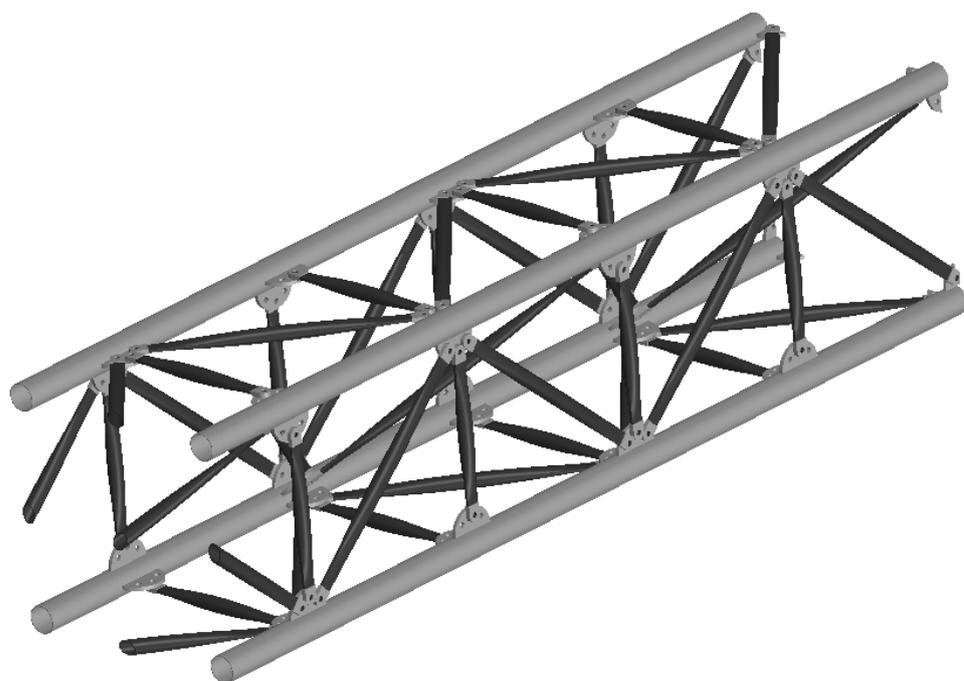


Рисунок 26 – Изображение ферменной части стрелы

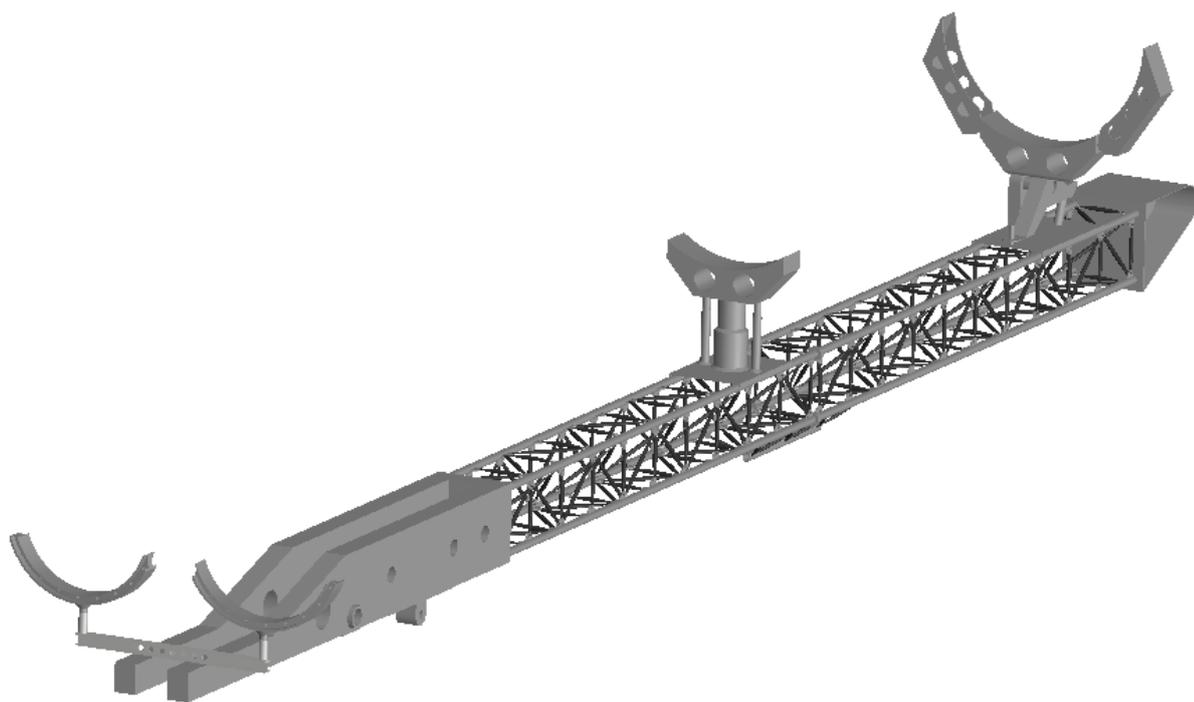


Рисунок 27 – Изображение стрелы в сборе с опорами

2.4. Вакуумная инфузия как метод формования композитного стержня

Основываясь на литературном обзоре, проведенном в главе 1, в качестве метода формовки для изготовления композитного стержня был выбран метод вакуумной инфузии.

На рисунке 28 технический процесс укладки слоев в вакуумном мешке при методе инфузии.

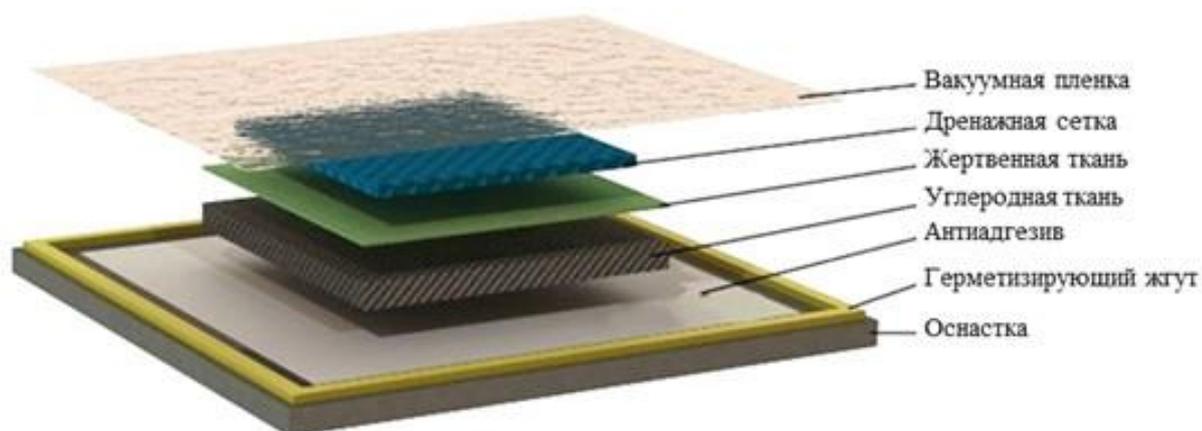


Рисунок 28 – Изображение технологического процесса выкладки при формировании методом инфузии

2.4.1. Проектирование пресс-формы для формирования методом вакуумной инфузии

В САПР SolidWorks была спроектирована пресс-форма, представленная на рисунке 29. В качестве материала, наиболее подходящего для формирующего устройства, был выбран алюминий АМгЗМ, основными легирующими составляющими в котором являются магний и марганец. За счет этого сплав обладает высокими прочностью, коррозионной стойкостью и свариваемостью, а также способен выдерживать экстремальные температуры [21].

Сплав АМгЗМ обычно применяется в авиа-, машино- и ракетостроении, строительстве и кораблестроении [21].

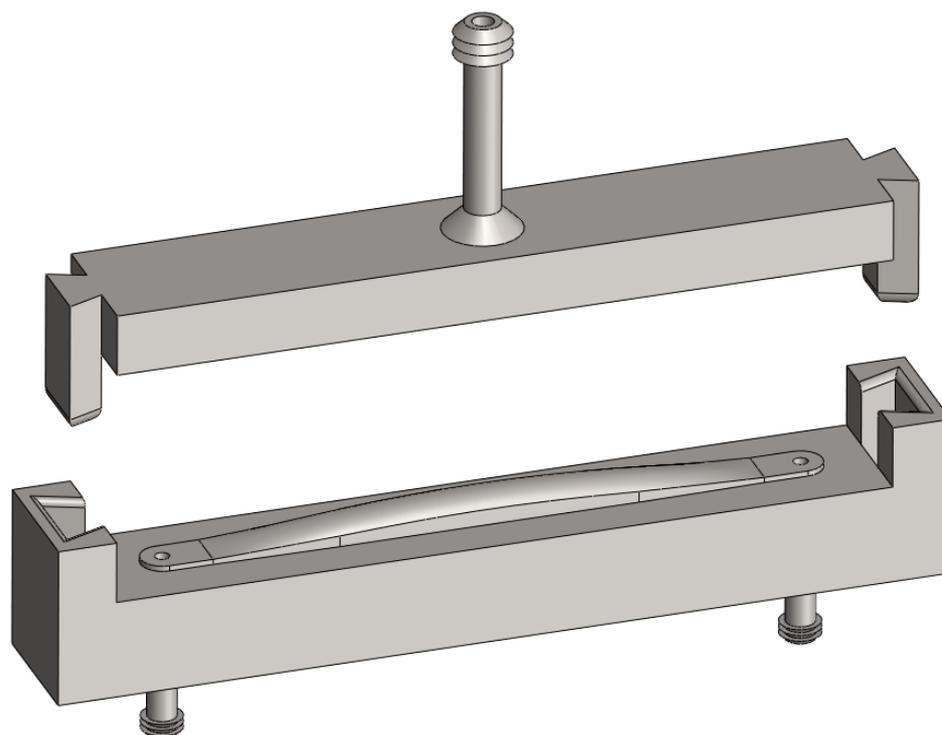


Рисунок 29 – Изображение пресс-формы для изготовления композитного стержня в разомкнутом виде

Рассмотрим основные элементы устройства формовки инфузией. На рисунке 30 представлено изображение оснастки, где:

- 1, 2 – верхняя и нижняя половины оснастки;
- 3 – штуцеры для подачи полимерного связующего;
- 4 – штуцер для подключения вакуумного насоса.

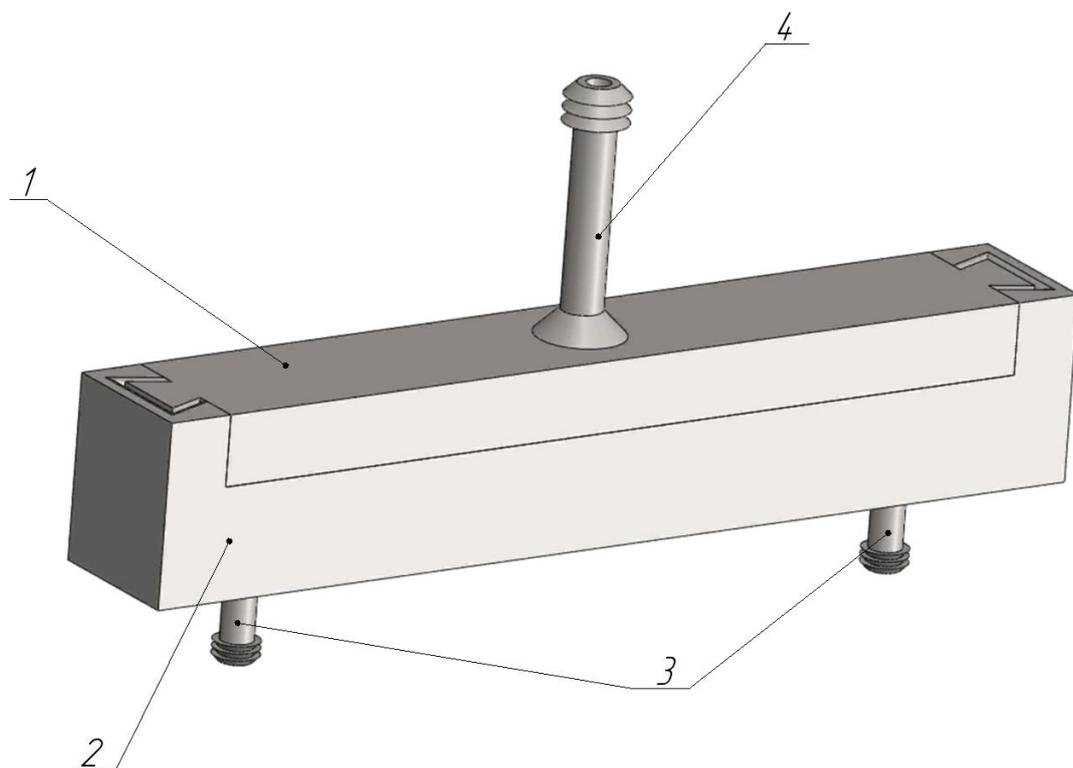


Рисунок 30 – Изображение пресс-формы для изготовления стержня

На рисунке 31 представлено изображение формующей оснастки в разрезе, где можно наблюдать, что внутренние поверхности верхней и нижней половин повторяют геометрию половины стержня в сомкнутом виде и имеют соответствующий зазор для выкладки материала.

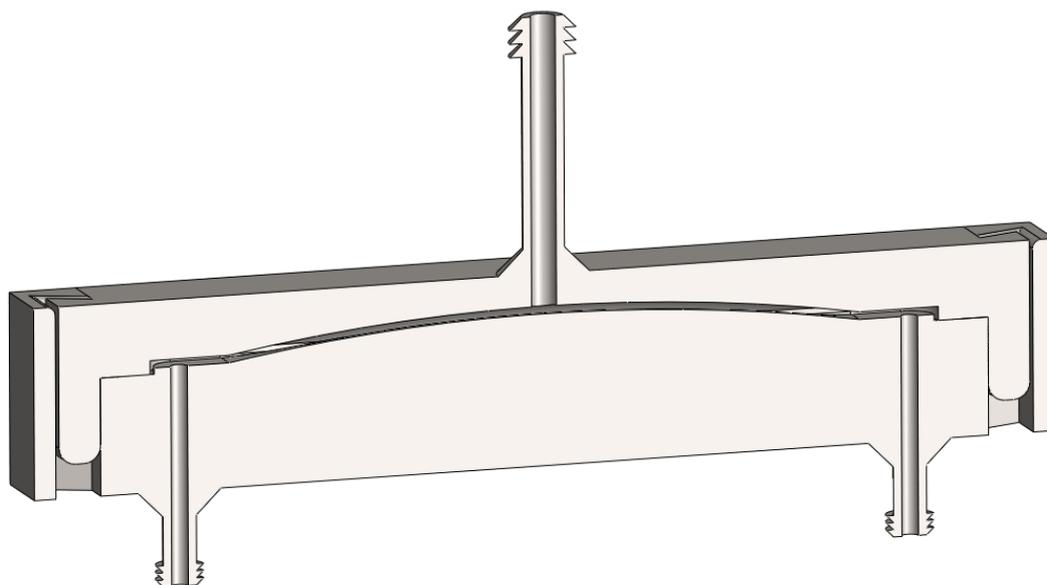


Рисунок 31 – Изображение пресс-формы для изготовления композитного стержня в разрезе

2.4.2. Технология получения полимерно-композитного стержня методом вакуумной инфузии

Таблица 12 – Технология получения одной половины композитного стержня

№ операции	Наименование операции	Используемое оборудование
001	Установка одной половины формующей оснастки	Верстак
002	Обработка поверхности разделительной смазкой	
003	Выкладка материала	
004	Обработка поверхности разделительной смазкой второй половины формующей оснастки	
005	Герметизация двух половин оснастки в местах соприкосновения с последующей вставкой одной в другую, посредством направляющих, выполненных в виде пазовых соединений "ласточкин хвост"	Верстак, струбцины
006	Организация подачи связующего от резервуара к нижним штуцерам с помощью патрубков, закрепляемых на ленточные стяжки	Верстак, стреппинговый инструмент
007	Присоединение вакуумного насоса к верхнему штуцеру посредством патрубка и ленточных стяжек	Верстак, стреппинговый инструмент
008	Проверка герметичности	Вакуумный насос
009	Инфузия (откачка воздуха и подача связующего)	
010	Отключение насоса и выдержка до полной полимеризации	Верстак, струбцины
011	Расфиксация оснастки	
012	Механическая обработка получившейся половины стержня	Фрезер, шлифовальная машина

Затем проводим те же операции для второй части композитного стержня. Далее, полученные половины склеиваются связующим и проходят механическую обработку.

2.5. Технологический процесс сборки комбинированной стрелы для транспортно-установочного агрегата

Таблица 13 – Технологический процесс сборки стрелы

Сборка комбинированной стрелы ТУА		
№ операции	Наименование операции	Используемое оборудование
Для первой части конструкции стрелы		
001	Закрепление 1 ферменного пролета	Верстак, струбцины
002	Закрепление 2 ферменного пролета	
003	Закрепление 3 ферменного пролета	
004	Закрепление 4 ферменного пролета	
005	Установка перпендикулярных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	Заклепочник
006	Установка диагональных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	
007	Установка внутренних диагональных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	
008	Соединение левой части ферменной конструкции с хвостовой частью	Полуавтоматический сварочный аппарат
009	Соединение правой части ферменной конструкции с фланцами	
Для второй части конструкции стрелы		
001	Закрепление 1 ферменного пролета	Верстак, струбцины
002	Закрепление 2 ферменного пролета	
003	Закрепление 3 ферменного пролета	
004	Закрепление 4 ферменного пролета	
005	Установка перпендикулярных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	Заклепочник
006	Установка диагональных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	
007	Установка внутренних диагональных стержней к проушинам на ферменных пролетах с помощью заклепок	
008	Соединение левой части ферменной конструкции с фланцами	Полуавтоматический сварочный аппарат
009	Соединение правой части ферменной конструкции с торцевым упором	
Для двух частей стрелы		
001	Стыковка двух частей стрелы болтовым фланцевым соединением	Гидравлический гайковерт, динамометрический ключ
002	Закрепление ферменного пролета поддерживающего устройства	Верстак, струбцины

003	Установка стержней к проушинам на ферменных пролетах под фланцевым соединением с помощью заклепок и проушина на ферменном пролете поддерживающего устройства	Заклепочник
-----	--	-------------

Таким образом, была спроектирована комбинированная стрела ТУА, для пролетов которой был подобран наиболее оптимальный материал – сталь 10ХСНД, а для стержней – углепластик на основе углеволокна ВМН-4, пропитанного эпоксидной смолой ЭДТ-10 с отвердителем ТЭТА. Так как данные стержни будут выполнены из другого материала, для них, была спроектирована пресс-форма, позволяющая изготавливать их с помощью метода вакуумной инфузии. Для спроектированных элементов, не являющихся элементами ферменной конструкции, также были подобраны материалы. Помимо этого, в главе рассмотрен технологический процесс сборки всей конструкции комбинированной стрелы.

3 АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ СТРЕЛЫ ТУА

Так как стрела транспортно-установочного агрегата устанавливается на ж/д платформу, которая в процессе работы испытывает вибрационные нагрузки, в САПР SolidWorks проводился вибродинамический анализ на соответствующих частотах. Помимо этого, при установке РКН стрела испытывает статические нагрузки, анализ которых также был выполнен в данном САПР.

3.1. Статический расчет прочностных характеристик

Для того чтобы провести моделирование были заданы материалы (согласно п.2.3). На рисунке 32 приведено изображение спроектированной стрелы с опорами, которые не будут участвовать в модельных исследованиях. Для этого скрывались верхняя, средняя и нижняя опоры и вместо всех, кроме нижней, устанавливались пластины (рисунок 33), к которым в дальнейшем будут прикладываться нагрузки.

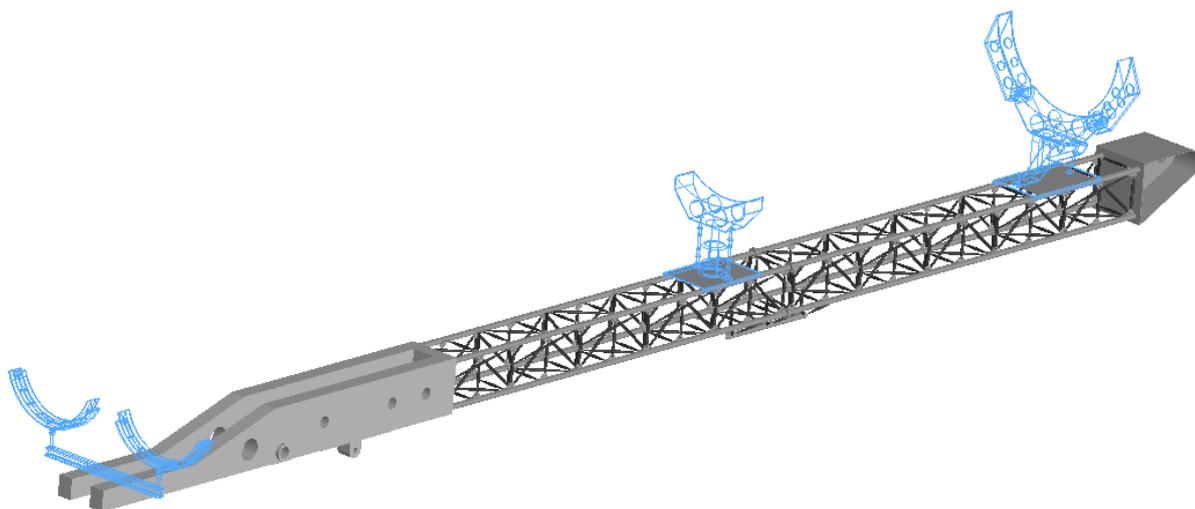


Рисунок 32 – Изображение спроектированной стрелы

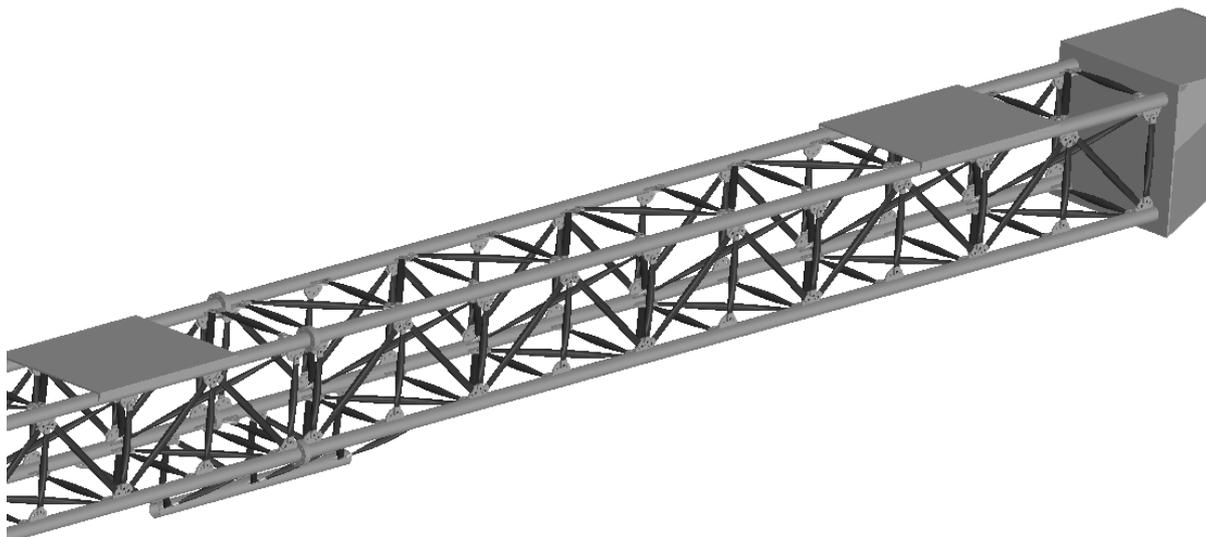


Рисунок 33 – Изображение стрелы с использованием стальных пластин для приложения нагрузок

Установленные пластины соответствуют размерам пластин опор, которые были скрыты.

Далее были выбраны области фиксации стрелы, что показано на рисунке 34. В качестве областей фиксации определены: ось вращения стрелы и ось вращения гидроцилиндра.

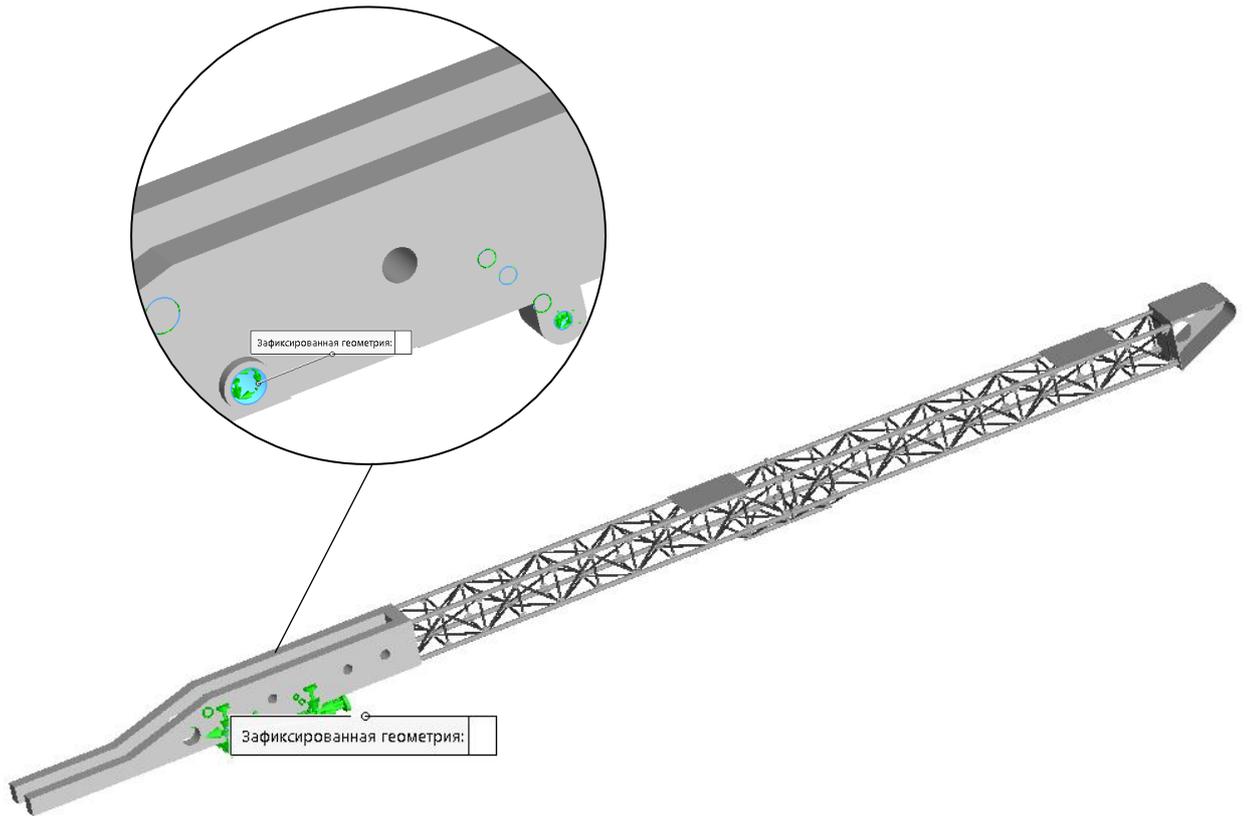


Рисунок 34 – Отображение зафиксированной геометрии

На следующем этапе было задано давление, распределенное по площади, в местах крепления ракеты к стреле. Вес РКН и вес скрытых опор, который тоже должен учитываться, составляют примерно 40 000 кг и 5 000 кг соответственно. Для того чтобы определить давление применяют формулу (1) [22]

$$p = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где F – сила давления, Н;

S – площадь поверхности, м².

Площадь поверхности спроектированной стрелы равна 5 575,6 м²

Для определения силы тяжести используют формулу (2)

$$F = P = m \cdot g, \quad (2)$$

где P – вес, кг;

m – масса, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Подставив формулу (2) в (1) была получена формула (3), с помощью которой определялось значение давления

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S}, \quad (3)$$

$$p = \frac{45000 \cdot 9,81}{5575,6} = 79,2 \left(\frac{H}{M^2} \right).$$

Далее полученное значение давления вводилось в расчетную программу, а также по площади распределялись нагрузки (рисунок 35).

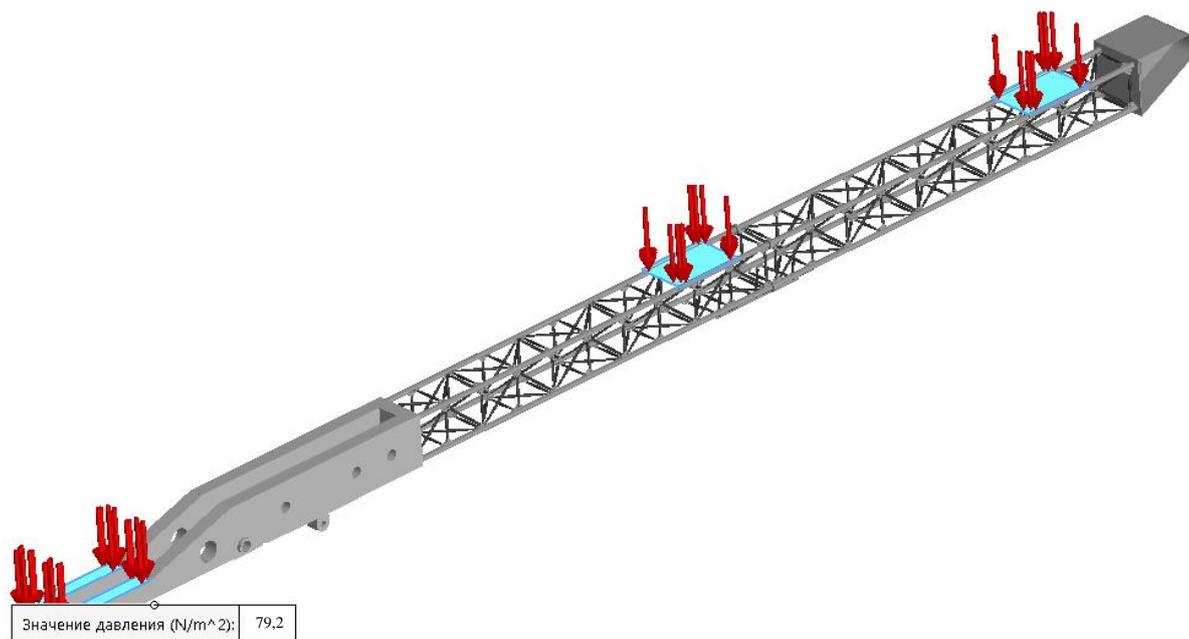


Рисунок 35 – Изображение приложения нагрузок

После этого была создана сетка (рисунок 36) на основании смешанной кривизны, в следствии того, что конструкция состоит как из больших, так и из маленьких элементов.

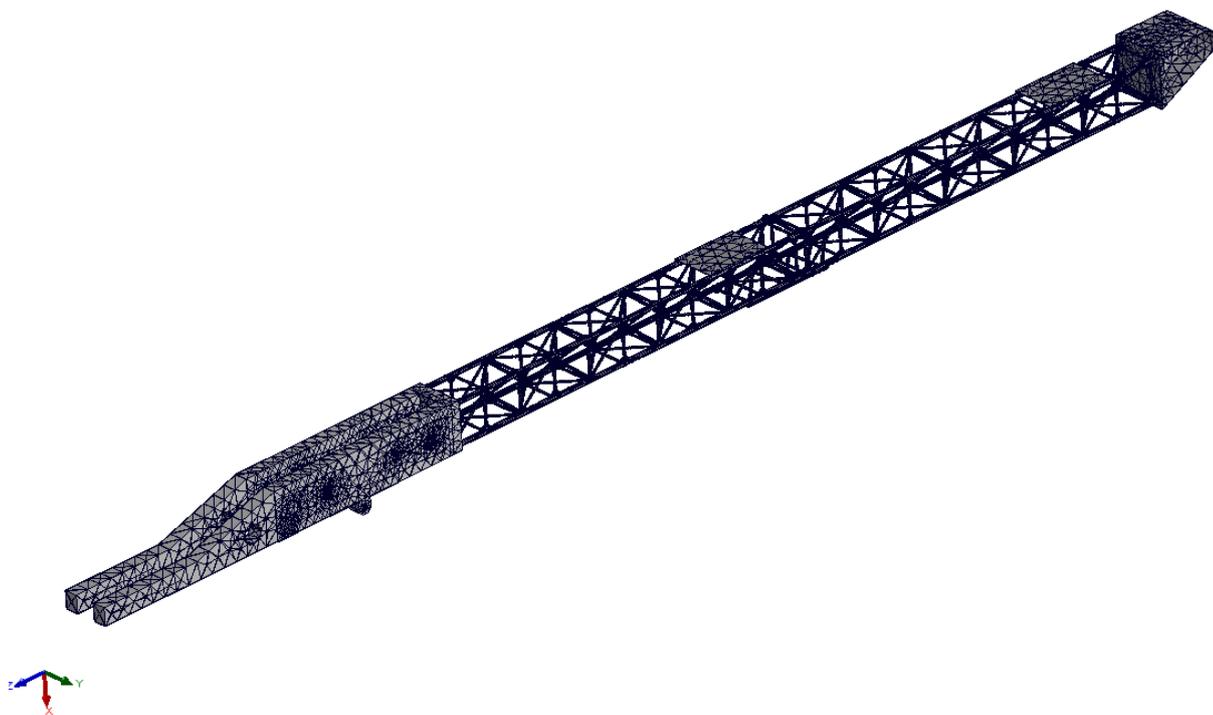


Рисунок 36 – Изображение создания сетки

Затем был проведен анализ сетки, в результате которого определено, что коэффициент Якобиана меньше девяти, что говорит о высоком качестве сетки (рисунок 37) [23].

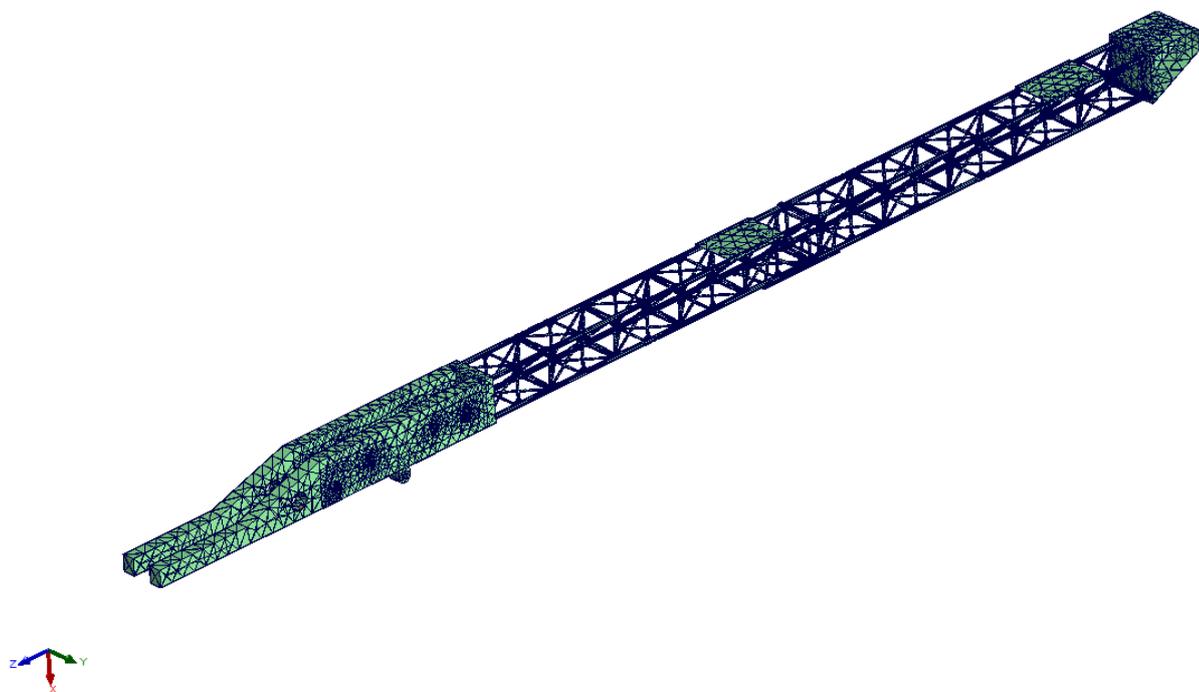


Рисунок 37 – Анализ качества сетки

После чего проводилось статическое исследование (рисунок 38).

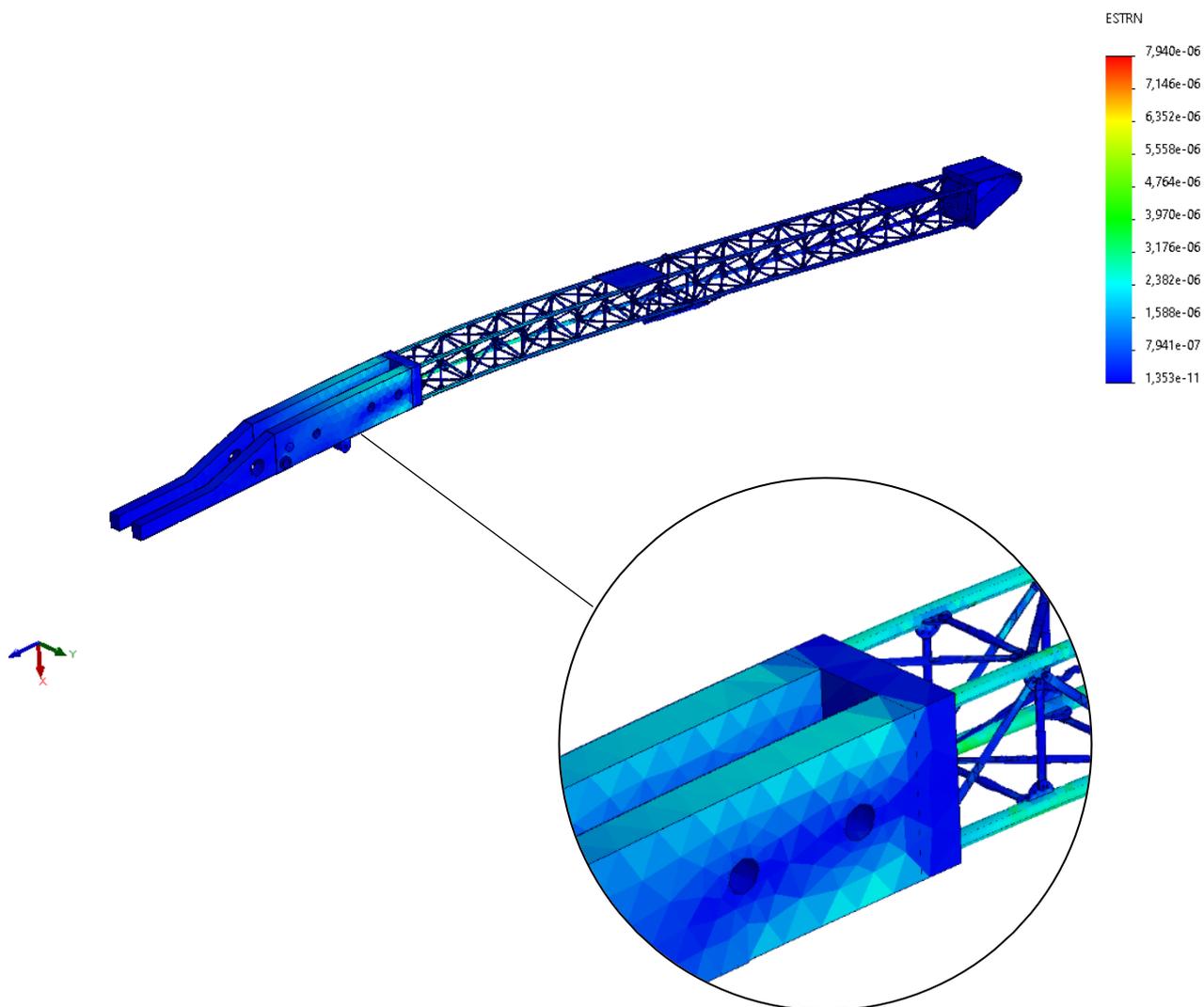


Рисунок 38 – Вид модели после испытания на статическую деформацию (распределение деформаций)

В результате было определено, что деформации распределяются нормально по всей конструкции (не обнаружено областей с высокой концентрацией деформаций). Максимальная деформация составила $7,49 \times 10^{-6}$.

Также была получена модель распределения перемещений (рисунок 39)

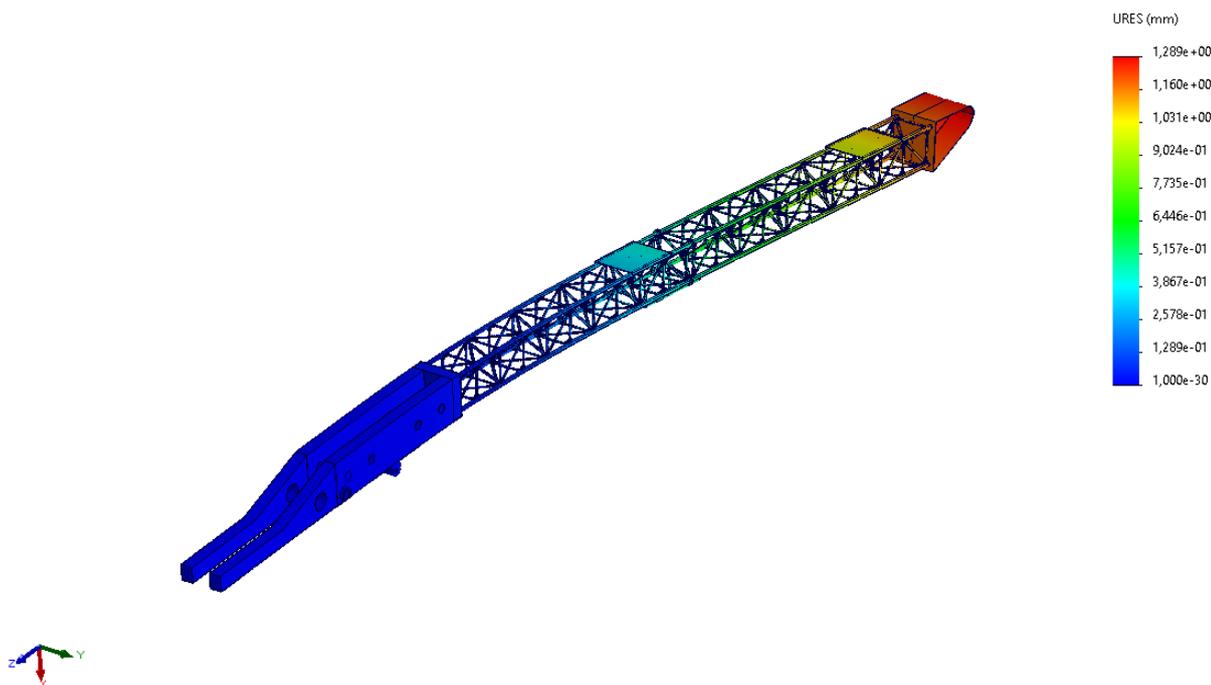


Рисунок 39 – Вид модели после испытания на статическую деформацию (распределение перемещений)

В результате было определено, что максимальные значения перемещений не превысили 1,29 мм. Также, установлено, что перемещения не превысили 1 % относительно максимального габаритного размера (длина) конструкции, это говорит о высоком запасе прочности.

3.2. Динамический анализ частотных характеристик стрелы

В первую очередь, для проведения динамического анализа были заданы параметры исследования, такие как: области фиксации (аналогично рисунку 34), внешние нагрузки (учитывая вес РКН) и диапазон частот (который соответствовал от 0 до 70 Гц), а также была создана сетка [24].

В результате был получен ряд зависимостей, так, на рисунке 40 представлена зависимость частоты от режима испытаний (собственная частота).

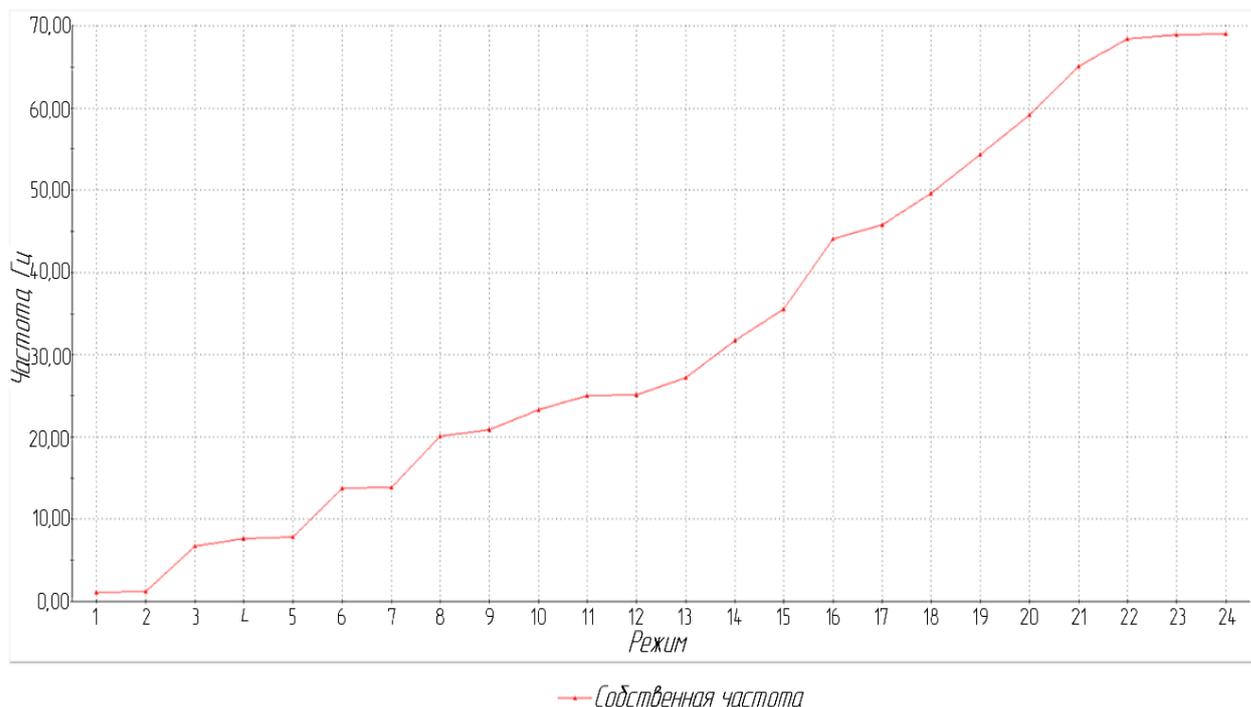


Рисунок 40 – Зависимость частоты от режима испытаний (собственная частота)

Анализируя полученную зависимость, можно заключить, что изменение собственной частоты происходит линейно с учетом погрешностей (например, разрешение сетки), а на режиме №22 изменение собственной частоты прекращается, что указывает на стабилизацию системы.

Также была определена зависимость действительного коэффициента массового участия от режима испытаний (рисунок 41).

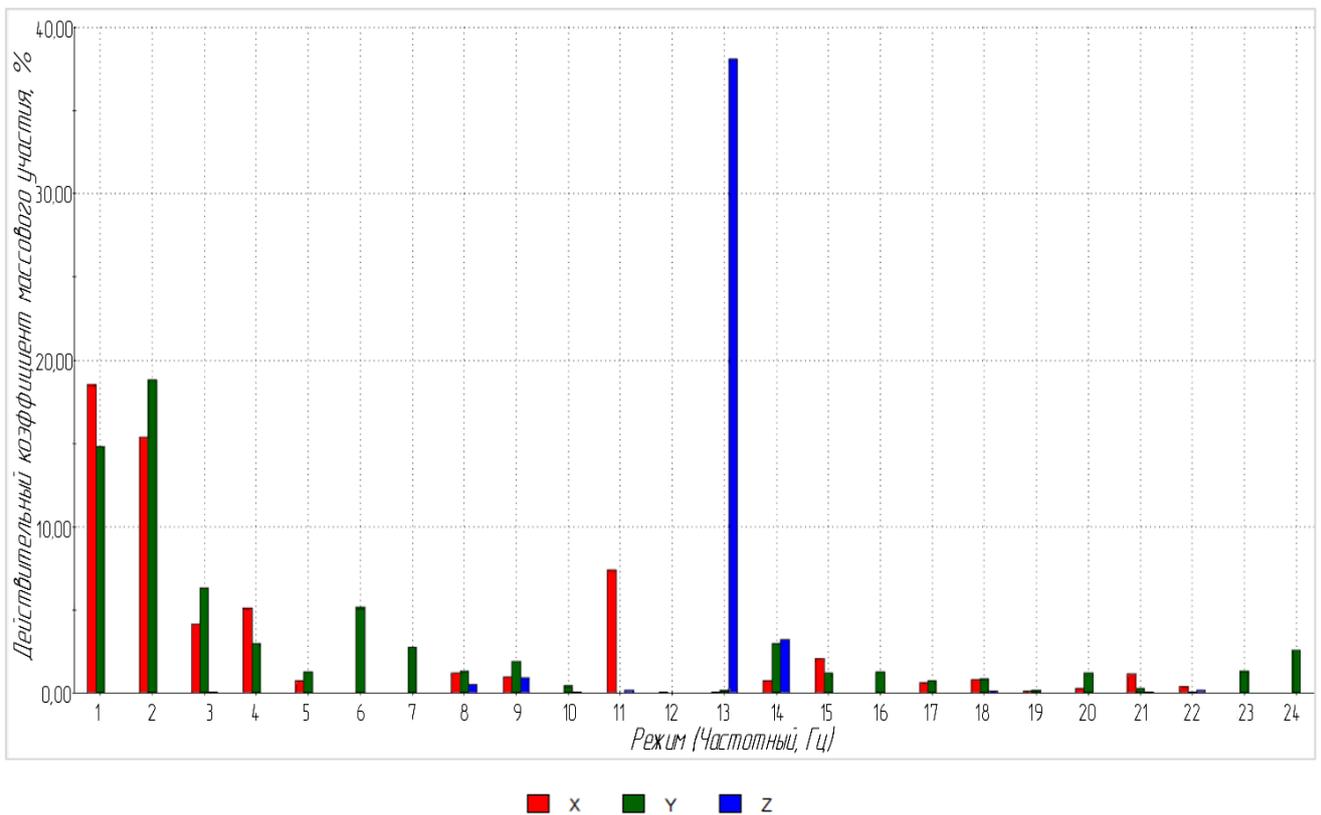


Рисунок 41 – Зависимость действительного коэффициента массового участия от режима испытаний

Анализируя зависимость, представленную на рисунке 41 видно, что после режима №13 не наблюдается значительного увеличения действительного коэффициента массового участия, что говорит о достаточном количестве частот для оценки спроектированной конструкции.

Также было получено распределение действительного коэффициента массового участия по трем взаимно-ортогональным плоскостям, оно представлено на рисунке 42.

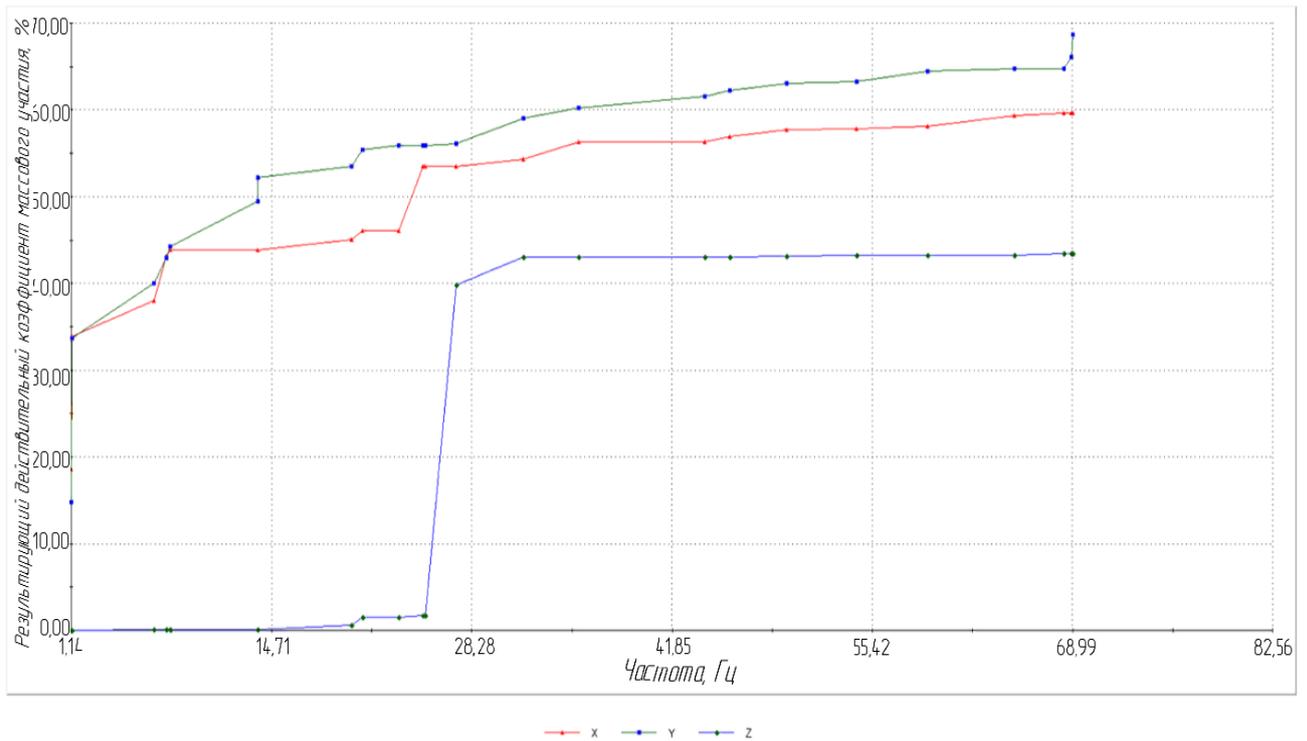


Рисунок 42 – Зависимость результирующего действительного коэффициента массового участия от частоты

Из рисунка 42 видно, что наибольший результирующий действительный коэффициент массового участия определяется в плоскости y на частоте 69,015 Гц со значением около 69%. Исходя из этого, данный режим является наиболее нагруженным, так как описанный коэффициент отражает процентное количество массы всех элементов системы, колеблющихся на этой частоте.

При этом наибольшая деформация определяется на частоте 1,183 Гц со значением 265,8 (рисунок 43).

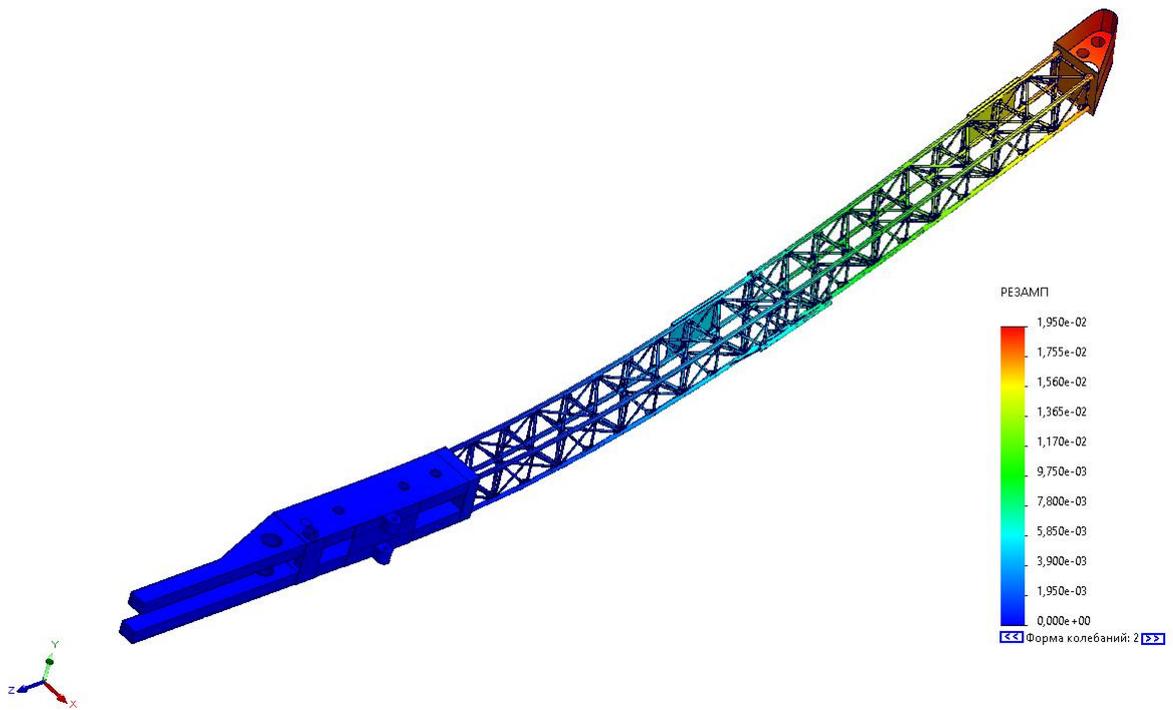


Рисунок 43 – Результат динамического анализа

Таким образом, в результате динамического исследования было установлено, что на режиме №22 изменение собственной частоты прекращается, что указывает на стабилизацию системы. При этом после режима №13 не наблюдается значительное увеличение действительного коэффициента массового участия, что говорит о достаточном количестве частот для оценки спроектированной конструкции. Кроме того, исходя из зависимости результирующего действительного коэффициента массового участия от частоты конструкция является наиболее нагруженной на частоте со значением 69,015 Гц, а наибольшая деформация наблюдается на частоте 1,183 Гц (значение деформации составляет 265,8).

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе будут проведены расчеты себестоимости материалов, затрат времени на производство и сборку комбинированной стрелы ТУА, а также стоимость сборки и приобретение крепежных элементов для завершающих этапов работ. Все ценовые и расчетные значения представлены в у.е.

4.1. Расчет затрат на материалы и комплектующие для изготовления комбинированной стрелы ТУА

В этот пункт включены затраты на приобретение материалов, комплектующих и услуги по созданию стрелы ТУА. Результат расчета затрат на материалы и комплектующие приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Затраты на материалы и комплектующие

№	Наименование товара	Количество	Сумма, у.е.
1	Труба 150×10 мм	112 м	678 344
2	Стальной лист 25×1500×6000 мм	3 м ²	71 712
3	Стальной лист 20×1500×6000 мм	12 м ²	229 476
4	Стальной лист 40×1500×6000 мм	1 м ²	39 188
5	Стальной лист 10×1500×6000 мм	192 м ²	1 728 768
6	Стальной лист 12×1500×6000 мм	9 м ²	99 792
7	Труба 320×10 мм	2 м	163 320
8	Труба 588×20 мм	1 м	28 000
9	Эпоксидная смола ЭДТ-10 с отвердителем ТЭТА	202 кг	101 000
10	Углеродное волокно ВМН-4	247 кг	1 605 153
11	Заклепка 16×50 мм	400 шт	3 850
12	Болт М16×100 мм	32 шт	4 800
13	Гайка М16	32 шт	960
Итого			4 754 363

Исходя из описанных выше показателей затрат общая себестоимость материалов для производства комбинированной стрелы ТУА составила 4 754 363 у.е.

4.2 Временные затраты на изготовление металлоконструкций

1. Для начала вычислялись временные затраты на резание металлических листов для следующих металлоконструкций: хвостовая часть, торцевой упор, проушины и фланцы.

Как известно из общедоступных источников, площадь одного стального листа составляет 9 м². Используя данные из таблицы 14, формулу (4) можно определить суммарную площадь применяемых материалов

$$\sum S = S_1 + S_2 + \dots + S_n, \quad (4)$$

где S_1, S_2, S_n – площади необходимого количества материала, м².

Отсюда, общее количество используемого материала составило

$$\sum S = 3 + 12 + 1 + 192 + 9 = 217 (\text{м}^2).$$

В качестве инструмента резания предполагается применение плазменного станка с ЧПУ. В среднем за 1 ч работы плазморежущего станка возможно качественно обработать один лист металла. Отсюда определяется количество металлических листов (5)

$$K_{\text{лист}} = \frac{\sum S}{S_{\text{лист}}}, \quad (5)$$

где $\sum S$ – суммарная площадь обрабатываемого материала, м²;

$S_{\text{лист}}$ – площадь металлического листа, м².

$$K_{\text{лист}} = \frac{217}{9} \approx 25 (\text{лист}).$$

Зная количество металлических листов и время, за которое станок

обрабатывает 1 лист, по формуле (6) можно определить время, затраченное на резку листового металла

$$T_{рез} = K_{лист} \cdot t_{раб}, \quad (6)$$

где $K_{лист}$ – количество листов;

$t_{раб}$ – время резки одного листа, ч.

$$T_{рез} = 25 \cdot 1 = 25(ч).$$

Из полученного расчета видно, что временные затраты на качественную обработку стальных листов резанием с использованием плазменного станка с ЧПУ составили 25 ч. Также, на данном этапе вычисляют стоимость резки. Из общедоступных источников известно, что себестоимость резки 1 м $C_{рез}$ составляет 300 у.е., по формуле (7) находят общую стоимость резки

$$C_{рез}^{общ} = \sqrt{\sum S} \cdot C_{рез}, \quad (7)$$

где $\sqrt{\sum S}$ – длина резки, м;

$C_{рез}$ – себестоимость одного метра резки, у.е.

$$C_{рез}^{общ} = \sqrt{217} \cdot 300 = 4420(у.е.).$$

2. Далее идет расчет временных затрат на обработку труб разного диаметра (150 мм, 320 мм и 588 мм). В качестве режущего инструмента была выбрана циркулярная пила. По формуле (8) находят количество резов для всех труб

$$K_{рез} = 2 \cdot (K_{м.н.}^{150} + K_{м.н.}^{320} + K_{м.н.}^{588}) - 6, \quad (8)$$

где $K_{м.н.}^{150}, K_{м.н.}^{320}, K_{м.н.}^{588}$ – количество торцевых поверхностей труб (диаметром

150 мм, 320 мм и 588 мм).

$$K_{рез} = 2 \cdot (8 + 4 + 1) - 6 = 20,$$

Для того чтобы найти общее время резки труб пользуются общей формулой определения длины окружности (9)

$$L_{окр}^{общ} = \pi \cdot (d_1 + d_2 + d_3), \quad (9)$$

где d_1, d_2, d_3 – диаметры окружностей, мм.

$$L_{окр}^{общ} = 3,14 \cdot (150 + 320 + 588) = 3322 (\text{мм}) = 332,2 (\text{см}).$$

Отсюда, если известна средняя скорость резки (примерно 15 см/мин), можно найти затраты на время при обработке циркулярной пилой по формуле (10)

$$T_{рез}^{тр} = \frac{L_{окр}^{общ}}{v}, \quad (10)$$

где $L_{окр}^{общ}$ – общая длина окружности, м;

v – средняя скорость резки, см/мин.

$$T_{рез}^{тр} = \frac{332,2}{15} = 22 (\text{мин}) = 0,36 (\text{ч}).$$

Также, зная время резки можно определить ее стоимость. Из общедоступных материалов известно, что себестоимость резки за 1 ч $C_{рез.тр}$ составляет 1000 у.е., по формуле (11) находят общую стоимость резки

$$C_{рез.тр}^{общ} = T_{рез}^{тр} \cdot C_{рез.тр}, \quad (11)$$

где $T_{рез}^{тр}$ – время резки циркулярной пилой, мин;

$C_{рез.тр}$ – себестоимость резки за 1 час, у.е.

$$C_{рез.тр}^{общ} = 0,36 \cdot 1000 = 360 (\text{у.е.}).$$

3. Зная среднее время сваривания 1 м материала полуавтоматической сваркой (10 мин) и необходимую длину шва (251 м по данным САПР SolidWorks), можно определить общее время сваривания всех металлических конструкций (12)

$$T_{свар}^{общ} = T_{свар} \cdot L_{шва}^{общ}, \quad (12)$$

где $T_{свар}$ – среднее время сваривания одного метра материала, мин;

$L_{шва}^{общ}$ – общая длина шва, м.

$$T_{свар}^{общ} = 10 \cdot 251 = 2510 (\text{мин}) = 41,8 (\text{ч}).$$

После этого определяют общую стоимость сварки полуавтоматическим аппаратом, если известна себестоимость часа $C_{свар} = 1000 \text{ у.е.}$ (13)

$$C_{свар}^{общ} = T_{свар}^{общ} \cdot C_{свар}, \quad (13)$$

где $T_{свар}^{общ}$ – общее время сварки, ч;

$C_{свар}$ – себестоимость часа, у.е.

$$C_{свар}^{общ} = 41,8 \cdot 1000 = 41800 (\text{у.е.}).$$

4.3. Временные затраты на изготовление композитных стержней

В среднем на производство одного композитного стержня уходит 1 ч работы, отсюда можно определить общее время изготовления полимерно-композитных стержней по формуле (14)

$$T_{ПКМ}^{общ} = T_{ПКМ} \cdot K_{ст}, \quad (14)$$

где $T_{ПКМ}$ – время изготовления одного стержня, ч;

$K_{ст}$ – количество стержней.

После чего получено общее время, затраченное на производство всех композитных стержней

$$T_{ПКМ}^{общ} = 1 \cdot 200 = 200 (\text{ч}).$$

4.4. Общее время сборки и себестоимость производства комбинированной стрелы

Сначала находят общее время сборки всей конструкции, для этого используют формулу (15)

$$T_{сбор}^{общ} = T_{рез} + T_{рез}^{тр} + T_{свар}^{общ} + T_{ПКМ}^{общ}, \quad (15)$$

где $T_{ПКМ}^{общ}$ – общее время изготовления композитных стержней, ч.

$$T_{сбор}^{общ} = 25 + 0,36 + 41,8 + 200 = 267,2 (\text{ч}).$$

Далее по формуле (16) определяют стоимость сборки

$$C_{сбор} = C_{мат} + C_{рез}^{общ} + C_{рез.тр}^{общ} + C_{свар}^{общ}, \quad (16)$$

где $C_{рез}^{общ}$ – стоимость резки металлических листов, у.е.;

$C_{рез.тр}^{общ}$ – общая стоимость резки трубы, у.е.;

$C_{свар}^{общ}$ – общая стоимость сварного шва.

Отсюда получают

$$C_{сбор} = 4754363 + 4420 + 360 + 41800 = 4800943 (\text{у.е.}).$$

Проведя расчет можно заключить, что время сборки стрелы составляет 267,2 ч. Если учесть, что рабочий день составляет 8 ч, то в среднем для сборки комбинированной стрелы ТУА понадобится 34 рабочих дня.

Себестоимость стрелы, без учета оплаты труда, составляет 4 800 943 у.е., что является оптимальной стоимостью сборки стрелы по сравнению с другими подъёмно-перегрузочными агрегатами.

5 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Промышленные производства, связанные с изготовлением и обработкой композитных материалов обязаны учитывать их токсичность и не допускать незащищенного человека к работе с ними.

Наиболее распространенными травмами, которые может получить незащищенный человек при работе с КМ, это повреждение дыхательных путей, кожных покровов, а также глаз. Для того чтобы избежать негативных последствий необходимо использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ).

5.1. Техника безопасности при работе с полимерно-композиционными материалами

В данном разделе будут рассмотрены как общие требования техники безопасности, так и требования, касающиеся метода формовки ПКМ. В качестве нормативно-технической документации (НТД) использовались «Требования техники безопасности к оборудованию и техпроцессам при работе с полимерными композиционными материалами. Методические указания к выполнению дипломного проекта по разделу «Безопасность жизнедеятельности»» [25-27].

5.1.1. Общепринятые нормы техники безопасности на производственных предприятиях

Все техпроцессы изготовления деталей с помощью композитных материалов необходимо производить в соответствии с НТД. При этом необходимо учитывать, что технологические процессы (ТП) должны соответствовать следующим требованиям:

- использование автоматизированного труда;
- максимизация использования машин в работе;
- замена ручного труда машинным в незначительном количестве для выделенных операций, при которых существует риск здоровью работающего;
- для работы оборудования на заявленных характеристиках техпроцесса, необходимо провести заземление;

– необходимо обеспечить обесточивание электрооборудования и соблюдать технику безопасности в экстренных ситуациях перед проверкой и обработкой поверхностей оборудования (ПО);

– перед проверкой и обработкой поверхностей оборудования изнутри необходимо провести качественное продувание воздухом;

– во избежание возможного возгорания очистку поверхностей от остатков полимерно-композиционных материалов требуется производить с применением искробезопасных инструментов;

– если необходимо провести очистку в местах, недоступных для рук человека, следует применять соответствующие инструменты и респираторы;

– если работы предполагается выполнять вблизи токсичных веществ, а также существует риск воспламенения, то в обязательном порядке в помещении должны быть установлены функционирующие центральная и локальная системы вентиляции;

– после использования связующего и волокна, емкости и оснастку требуется отмыть. Это осуществляется нетоксичными негорючими чистящими составами в специально отведенных и оборудованных для этого местах, предполагающих использование перчаток и полотенец;

– в процессе изготовления и механообработки деталей, имеющих большой вес и размеры, для безопасной транспортировки и монтажа предполагается использование подъемно-перегрузочного оборудования;

– необходимо использование персоналом на своих рабочих местах специальных антистатических устройств для снижения вероятности возникновения пожара [25-27].

5.1.2. Основные положения техники безопасности перед изготовлением изделий из композитных материалов

Перед тем, как осуществить формование КМ, необходимо сначала проверить и настроить оборудование. После чего идет обработка ПО с помощью экстрагирования, разделительных жидкостей и высыхания в печи. Для осуществления перечисленных подготовительных операций предполагаются

специально отведенные места с функционирующей местной вытяжной вентиляцией (МВВ) [25-28].

При работе с пластмассовым оснащением важно соблюдать технику пожарной безопасности при обезжиривании их поверхностей, для этого следует использовать анти силиконовые растворители (они способны очищать следы предварительного использования и обладают антистатическим эффектом), а также при высыхании в печи, необходимо использование центральной системы вентиляции во избежание вреда здоровью работающего [25-28].

После термообработки, перед извлечением из печи, оснащение необходимо остудить до комнатной температуры (в редких случаях до 40-50°C). Подобные операции должны сопровождаться использованием респираторов и перчаток [25-28].

Как уже писалось ранее, техническое оборудование, которое используется для производства ПКМ различными методами формовки, должно быть оборудовано специальными отсасывающими устройствами (такие устройства оснащаются вакуумными системами, благодаря которым излишки материала не закупоривают патрубки) [25-28].

Также следует отметить, что при различных подготовительных работах (перед формованием композитов) требуется приостановить действие станочного оборудования во избежание травмирования. Если в помещении не предусмотрена локальная вентиляционная система, работникам необходимо воспользоваться респираторами [25-28].

Для реакторов связующего тоже предусмотрены требования ТБ. Они подразумевают под собой плотно запирающиеся крышки (в связи с токсичностью связующего), закрытый способ подачи и откачки полимера посредством патрубков, отсасывающих устройств и т.д. [25-28].

5.1.3. Требования техники безопасности при механической обработке и склеивании композитных материалов

Для механообработки полимерно-композиционных материалов на предприятиях предполагается использование производственного оборудования,

оно должно соответствовать требованиям техники безопасности и включать в себя следующие средства защиты (СЗ): защитные облицовки и экраны станков (для безопасного использования); местные вытяжные вентиляции; пыле- и стружко- улавливающие агрегаты, способные также очищать воздух от токсичных воздушных масс; заземляющие устройства и др. [25-28].

Если механообработку композитов предполагается выполнять посредством ручного оборудования, то его необходимо снабдить отсасывающими устройствами (если таковые не предусмотрены). На рабочих местах требуется установить отсасывающие и вентилирующие устройства, а также оборудовать их материалом способным легко очищаться от излишков КМ. В рабочих зонах строго запрещается принимать пищу, выпивать различные напитки (тем более спиртные) [25-28].

Для склейки композитов отведены специально оборудованные помещения, включающие в себя, вытяжные вентиляционные системы, оборудование для термообработки и оснастка для распределения клея, а также тары с обезжиривателями и полимерными матрицами. На рабочих местах строго запрещается проводить шлифовку, точение и другие технологические операции вблизи склеенных частей композитов, во избежание попадания частиц и вкраплений обрабатываемого материала. Неотъемлемой частью защиты работников при работе с полимерно-композитными материалами и их компонентами являются средства индивидуальной защиты [25-28].

5.2. Опасность химических соединений при производстве и обработке ПКМ

Пары композитных материалов являются едкими и токсичными, они способны влиять на кожные покровы, слизистые глаз и дыхательных путей. Человек, работающий в условиях полимерно-композитного производства обязан быть снабжен СИЗ и качественно оборудованным рабочим местом, для того чтобы защититься от таких технологических (к ним относятся химические, физические, биологические и др.) факторов, как:

– излишняя загрязненность воздуха на рабочих местах;

– высокий риск образования пожаров, за счет применения огнеопасных веществ и термопечей (необходимо использовать антистатические обезжириватели и качественную систему охлаждения);

– возможность получения производственных травм, за счет использования большого станочного оборудования;

– колебания и резонансы, возникающие в рабочих зонах из-за эксплуатации производственного оборудования, а также плохая подсветка рабочей зоны, могут привести к серьезным (возможно даже профессиональным) проблемам со здоровьем [25].

Рассмотрим химический фактор используемых при производстве деталей связующих и волокон.

Самым распространенным связующим является эпоксидная смола, одним из важных составляющих ее компонентов является эпоксидный мономер (своего рода химические связи природного происхождения с несколькими эпоксидными составляющими). Его формула имеет следующий вид: $R - CH_2 - O - CH_2 - R$, где R – органический радикал [29].

Так как уже было сказано ранее, пары эпоксидных смол способны не просто влиять на кожные покровы и слизистые оболочки, но даже вызывать отравления, аллергические реакции, болезни дыхательных путей, рак, дерматиты и другие заболевания [30-31].

Стекловолокна способны раздражать глаза, кожу и органы дыхания. При попадании волокон на кожу может появляться сыпь, а при их вдыхании раздражение горла и носовых пазух. При обработке углеволокон, пыль, образующаяся в воздухе также как и стекловолоконная оказывает влияние на органы дыхания и способна оседать в легких, что является следствием появления таких заболеваний (в том числе хронических), как: бронхит, фиброз и другие [32-33].

Для того чтобы защититься от вредного влияния паров и пыли, необходима качественная система вентиляции для подачи воздуха и откачки вредных паров, а также использование СИЗ, таких как очки, респираторы, халаты и перчатки [32-33].

5.3. Способы защиты от нежелательных воздействий

Способы защиты на производстве можно разделить на два вида: коллективные средства защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты. Далее более подробно рассмотрим каждый способ защиты, что они собой представляют и какие средства защиты под ними подразумеваются.

Коллективные средства защиты представляют собой масштабное технологическое оборудование, способное предотвращать или снижать неблагоприятное влияние (химических или физических факторов) на значительное количество работников, к таким средствам защиты относятся: датчики контроля атмосферного давления; системы подачи и откачки воздуха (и вредных примесей), холодоснабжения и поддержания заданных температур; системы программного регулирования (с автоматизированным управлением); системы защиты от статического напряжения, звуко- и влаго- изоляции и др. [34].

Под средствами индивидуальной защиты понимаются средства, которые в обязательном порядке должны быть выданы каждому работающему, это могут быть: резиновые сапоги, респираторы, перчатки, защитные очки, халаты и т.д. В зависимости от того, какие технологические операции будет выполнять работник и с какими производственными факторами ему придется столкнуться определяется выбор необходимых для него средств индивидуальной защиты [25, 35].

Как уже говорилось ранее, отвердители и смолы очень токсичны, поэтому работникам следует пользоваться специальными СЗ (также как и для работ с волокном) для защиты органов дыхания, кожных покровов и слизистых оболочек. После завершения операций со связующим, СИЗ необходимо убрать в места хранения подальше от личных вещей [25].

Также в обязательном порядке требуется быть защищенным при обработке уже изготовленных композитных частей резанием, точением, шлифованием и т.д. Для этого важно защитить слизистые глаз, органов дыхания и открытые части тела (руки) от угле- или стекловолоконной пыли [25].

В таблице 15 приведена классификация СИЗ (их применение и характеристики), используемых при изготовлении деталей из ПКМ.

Таблица 15 – Классификация средств индивидуальной защиты [36-37]

№	Название средств защиты	Основные свойства и области применения
1	Хлопчатобумажные рабочие комплекты и халаты	Способны защищать от: – попадания на кожу при работе со связующими, смолами и растворителями; – механических повреждений при обработке резанием, шлифованием и работе с волокном; – взаимодействия температурных изменений
2	Хлопчатобумажные головные уборы (платки, шапочки)	Для защиты от попадания на кожу и волосы при работе с полимерами, составляющими их компонентами, обезжиривателями и отвердителями
3	Фартуки и нарукавники: – из прорезиненной ткани; – бязи и диагонали; – асбестовые ткани	Выступают в качестве защиты от: – химических факторов (токсических веществ); – физических фактов; – температурных изменений
4	Обувь: – специальная кожаная; – специальные резиновые формовые сапоги; – антистатическая обувь	Для защиты от: – взаимодействия температурных изменений; – воды, масел, механического воздействия; – риска возникновения пожаров
5	Хлопчатобумажные, трикотажные и резиновые (медицинские) перчатки	При обработке со связующими, смолами, наполнителями, отвердителями и обезжиривателями
6	Фильтрующие респираторы: – универсальные; – противогазовые; – противопылевые	Респираторы необходимы для того, чтобы защититься от вдыхания вредных (токсических) веществ при взаимодействии с полимерами и их компонентами, а также для защиты от мелких частиц волоконной пыли
7	Противогаз промышленный, фильтрующий	При работе с большим количеством формальдегидных смол
8	Очки защитные, закрытые, герметичные	Для защиты слизистой оболочки глаз при работе с ВВ

Таким образом, любой сотрудник, взаимодействуя с КМ, прежде чем приступить к выполнению технического задания, обязан проходить аттестацию на рабочем месте, которая включает в себя: технику безопасности на рабочем месте; технику безопасности при работе с производственным оборудованием и другие ранее описанные требования. Немаловажно отметить, исходя из проанализированных материалов, что аттестация сотрудников должна проводиться не единоразово, а периодически, это

позволяет значительно снизить вероятность получения производственных травм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа литературных источников, было установлено, что наиболее подходящей будет решетчатая стрела, так как она лучше всего отвечает требованиям эксплуатации на ТУА. Она имеет небольшой вес конструкции (в сравнении с другими стрелами: телескопической, башенной и др.), что позволяет снизить нагрузку на железнодорожные пути и предотвратить их возможное разрушение. Такая конструкция имеет большое сопротивление к воздушным массам и снижает вероятность опрокидывание агрегата. Кроме того, решетчатое исполнение конструкции стрелы удобно в транспортировке из-за возможности ее разбора на небольшие фрагменты.

Исходя из условий эксплуатации стрелы, а также учитывая нагрузки, действующие на нее, наиболее оптимальными для изготовления композитных элементов стрелы были определены следующие материалы: в качестве армирующего наполнителя – углеволокно ВМН-4; в качестве полимерной матрицы – эпоксидная смола ЭДТ-10 с отвердителем ТЭТА. Для пролетов стрелы была подобрана сталь 10ХСНД.

В результате, в САПР SolidWorks была спроектирована комбинированная стрела, состоящая из четырех частей, две из которых выполнены в виде комбинированных (метал и ПКМ) ферменных конструкций. В качестве креплений стержней к пролетам было выбрано клепанное соединение. Ее габаритные размеры составляют: длина – 38 650 мм; ширина – 1 650 мм; высота – 1975 мм.

Для спроектированной конструкции был проведен статический анализ в САПР SolidWorks, по его результатам было установлено, что максимальные значения перемещений не превысили 1,29 мм. При этом деформации распределяются нормально по всей конструкции (не обнаружено областей с высокой концентрацией деформаций). Максимальная деформация составила $7,49 \times 10^{-6}$. Также был проведен динамический анализ, анализ данных которого показал, что на режиме №22 изменение собственной частоты прекращается, что

указывает на стабилизацию системы. При этом после режима №13 не наблюдается значительное увеличение действительного коэффициента массового участия, что говорит о достаточном количестве частот для оценки спроектированной конструкции (каждому режиму испытаний соответствует собственная частота конструкции). Кроме того, исходя из зависимости результирующего действительного коэффициента массового участия от частоты конструкция является наиболее нагруженной на частоте со значением 69,015 Гц, а наибольшая деформация наблюдается на частоте 1,183 Гц (значение деформации составляет 265,8). Полученные результаты моделирования свидетельствуют о высоком запасе прочности конструкции, так как зарегистрированные величины не превышают 1% от габаритных размеров стрелы.

Проведя экономический расчет можно заключить, что время сборки стрелы составляет 267,2 ч. Если учесть, что рабочий день составляет 8 ч, то в среднем для сборки комбинированной стрелы ТУА понадобится 34 рабочих дня. Себестоимость стрелы, без учета оплаты труда, составляет 4 800 943 у.е., что является оптимальной стоимостью сборки стрелы по сравнению с другими подъёмно-перегрузочными агрегатами.

Анализируя вероятные опасности при работе с конструкциями, выполненными из полимерно-композиционных материалов, любой сотрудник, обязан проходить аттестацию на рабочем месте, которая включает в себя: технику безопасности на рабочем месте; технику безопасности при работе с производственным оборудованием и другие ранее описанные требования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Транспортно-установочный агрегат. Техническое описание.
2. Грузоподъемные машины: моногр. / М.П. Александров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 400 с.
3. Устройство телескопической стрелы автокрана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alkarm.ru/articles/ustroistvo-teleskopicheskoi-strely-avtokrana?ysclid=m1m4ixnrcf196079196> – 12.09.2024.
4. Телескопическая стрела автокрана: разновидности, процесс телескопирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fuwa-kran.ru/kirov/headings/stati/teleskopicheskaya-strela-avtokrana-raznovidnosti-process-teleskopirovaniya/?ysclid=m1m4ieeki1801919980> – 12.09.2024.
5. Назначение и устройство основных узлов и механизмов башенных кранов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studref.com/642541/stroitelstvo/naznachenie_ustroystvo_osnovnyh_uzlov_mehanizmov_bashennyh_kranov – 20.09.2024.
6. Устройство башенного крана. Монтаж и демонтаж башенных кранов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://exkavator.ru/main/news/inf_news/123743_ustroystvo_bashennogo_krana_montag_i_demontag_bashennyh_kranov.html – 20.09.2024.
7. Особенности и конструкция стрелы крана: разбор терминов и принципов работы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rik78.ru/polza/dzen-avtokran-3/> – 20.09.2024.
8. Преимущества кранов с решетчатой стрелой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fuwa-kran.ru/headings/stati/preimushhestva-kranov-s-reshetchatoj-konstrukciej/> – 20.09.2024.
9. Тимофеева, М.Ю. Композиционные материалы и их применение в промышленности: учебное пособие / М.Ю. Тимофеева, М.Ю. Доломатов. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2007. – 61 с.
10. Чимчикова, М. К. К вопросу применения полимерных

композиционных материалов / М. К. Чимчикова, А. С. Иманкулова // Материаловедение. – 2022. – № 1(36). – С. 43-47.

11. Ющенко, Д. А. Перспективы применения полимерных композиционных материалов / Д. А. Ющенко, Е. М. Кузнецова // Механики XXI века. – 2015. – № 14. – С. 194-198.

12. Вашуков, А. Ю. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов: мультимедийный образовательный модуль/ А. Ю. Вашуков. – Самара: Самар, гос. аэрокосм, ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т), 2012 – 182 с.

13. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы/ Ю. А. Михайлин, – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2010. — 822 с.

14. Эпоксидная смола [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chemi.by/arhiv-novostej/stati/epoksidnaya-smola.-marki.-sostav.-poluchenie.svoystva.html?ysclid=mlnpw2y0pb370364486> – 30.09.2024.

15. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1485– 30.09.2024.

16. Таблица сортамента профильных труб: квадратных, прямоугольных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e-metall.ru/blog/sortament-profilnyh-trub/> – 03.10.2024.

17. ГОСТ 32528-2013. Издания. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.; введ. 2016-01-01 – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Стандартинформ, 2015. – 36 с.

18. Какая труба крепче: круглая или квадратная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metceh.com/tpost/btrfg7pn61-kakaya-truba-krepche-kruglaya-ili-kvadra> – 03.10.2024.

19. Сталь 09Г2С [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://areal-metal.ru/marki-stalej/09g2s> – 10.10.2024.

20. Сталь 10ХСНД – расшифровка и характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://areal-metal.ru/spravka/stal-10hsnd?ysclid=m34d8ueh90777999043> – 10.10.2024.

21. Сплав Амг3: характеристики, свойства, ГОСТы, области применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metalinnox.ru/marochnik-stali/alyuminiy-splav-alyuminiya/splav-amg3/?ysclid=m4y9suleid984419470> – 18.10.2024.

22. Давление в динамике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.calc.ru/Davleniye-V-Dinamike.html> – 09.10.2024.

23. Проверка качества сетки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2020/russian/SolidWorks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm – 21.11.2024.

24. Acceleration Frequency Characteristics of the Freight-Train-Induced Vibration of the Beijing-Harbin Railway Subgrade/ Yingying Zhao, Xianzhang Ling, Ziyu Wang, Weiming Gong, Guoyu Li. // Stability Analysis of Underground Spaces Suffering Dynamic Disturbance. 2020.

25. Кузнецов, И. А. Требования техники безопасности к оборудованию и техпроцессам при работе с полимерными композиционными материалами: Методические указания к выполнению дипломного проекта по разделу «Безопасность жизнедеятельности» / И.А. Кузнецов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ув-та, 2002. – 16 с.

26. ГОСТ 12.2.061-81. Издания. Общие требования безопасности к рабочим местам.; введ. 1982-07-01 Москва: Государственный комитет СССР по стандартам; М.: ИПК изд-во стандартов, 1981. – 4с.

27. ГОСТ 12.3.002-75. Издания. Общие требования безопасности.; введ. 1976-07-01 Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; М.: Изд-во стандартов, 1975. – 9 с.

28. ГОСТ 12.3.030-83. Переработка пластических масс.; введ. 1984-01-01 Москва: Министерство химической промышленности; М.: Изд-во стандартов, 1983. – 7 с.

29. Эпоксидная смола состав [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smola-eliqua.ru/himicheskij-sostav-ehpoksidnoj-smoly/> – 17.12.2024.
30. Томас, В. Влияние композиционных материалов, применяемых в аэрокосмической промышленности на организм человека/ В. Томас // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – Красноярск, 2016 – Том 1. – С. 941-943.
31. Безопасность эпоксидной смолы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jbizhu.ru/blog/bezopasnost-epoksidnoy-smoly/> – 17.12.2024.
32. Здоровье органов дыхания и кожи у работников производства стекловолна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-8-36> – 17.12.2024.
33. Угольная пыль в воздухе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://laboratoria.by/stati/ugolnaya-pyl-v-vozdukhe> – 17.12.2024.
34. Средства коллективной защиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prof-resurs.ru/news/ohrana-truda/tpost/amppmrs0a1-sredstva-kollektivnoi-zaschiti-skz-osnov> – 20.12.2024.
35. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421256/c65b9e9fd2d80d86aa020e4b133ca1da4749efc4/ – 20.12.2024.
36. ГОСТ 12.4.011-87. Издание. Средства защиты работающих. – Взамен ГОСТ 12.4.011-75; введ. 1988-07-01 Москва: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; М.: Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.
37. ГОСТ 12.4.011-75. Издание. Средства защиты работающих.; введ. 1976-01-01 Москва: Государственный комитет СССР по стандартам; М.: Изд-во стандартов, 1975. – 8 с.