

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


Факультет: Инженерно – Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. зав. кафедрой

 В.В. Соловьев


«17» 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Расчет НДС ТУА при подъеме и опускании РКН

Исполнитель


студент группы 717-об

 14.06.2021
(подпись, дата)

В.Д. Витько

Руководитель


канд. тех. наук, доцент

 17.06.2021
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант по БЖД


канд. физ. – мат. наук

 14.06.2021
(подпись, дата)

В.Н. Аверьянов

Нормоконтроль


ассистент кафедры СиТРК

 14.06.2021
(подпись, дата)

М.А. Аревков

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

культет: Инженерно-Физический
факультета: Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ
Зам. зав. кафедрой
 В.В. Соловьев
« 26 » 04 2021 г.

ЗАДАНИЕ

выпускной квалификационной работе студента Витько Владислав Дмитриевич

Тема выпускной квалификационной работы: Расчет НДС ТУА при подъёме и
испытании РКН

(утверждена приказом от 05.04.2021 № 658-уч)

Срок сдачи студентом законченной работы: 15 июня 2021 года

Исходные данные к выпускной квалификационной работе: комплект чертежей
транспортно – установочного агрегата, руководство по эксплуатации.

Содержание выпускной квалификационной работы: определение эксплуатаци-
онных нагрузок и расчет критических точек максимальных нагрузок, анализ соб-
ственных частот колебаний конструкции при различных дефектах в сварных
швах, расчет экономических затрат на проведение модального анализа.

Перечень материалов приложения: тема ВКР, цели и задачи, результаты прове-
дения модального исследования в критических точках №1 и №2, заключение.

Консультанты по выпускной квалификационной работе: Аверьянов В.А.

Дата выдачи задания: 26.04.2021 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев Владислав Вик-
торович, доцент, канд. тех. наук.

Задание принял к исполнению (дата) 26.04.2021

РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 63 с., 8 таблиц, 38 рисунков, 11 источников

НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, ТРАНСПОРТНО – УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, СОБСТВЕННАЯ ЧАСТОТА, СВАРНОЙ ШОВ, МОДАЛЬНОЕ ИСПЫТАНИЕ, РАКЕТА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Транспортно – установочный агрегат – это система, которая используется для транспортировки РКН в горизонтальном положении из монтажно – испытательного корпуса ракеты – носителя на пусковое устройство стартового комплекса. Также ТУА обеспечивает подъем РКН на пусковом устройстве до окончательной подготовки к пуску или опускание РКН при несостоявшемся пуске.

Цель работы – исследование влияния сварных соединений на спектр собственных частот.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	5
Введение	6
1 Общие сведения	8
1.1 Устройство транспортно-установочного агрегата	8
1.2 Динамические испытания	12
1.3 Дефекты сварных швов	16
1.4 Технологические особенности процесса сварки металлоконструкций	21
2 Определение экспериментальных нагрузок и расчет критических точек максимальных нагрузок	24
3 Анализ собственных частот колебаний конструкции при различных де- фектах в сварных соединениях	38
4 Техника безопасности при проведении ТО	52
4.1 Объем работ при еженедельном ТО	54
4.2 Объем работ при ежемесячном ТО	54
4.3 Объем работ по ТО перед работой с изделием	55
4.4 Объем работ при ежегодном ТО	56
5 Расчет экономических затрат на проведение модального анализа	58
Заключение	61
Библиографический список	62

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ЗИП – запасные инструменты и принадлежности;

КЭ – конечные элементы;

МИК – монтажно – испытательный комплекс;

МКЭ – метод конечных элементов;

НДС – напряженно – деформированное состояние;

РКН – ракета космического назначения;

РЭ – руководство по эксплуатации;

РН – ракета – носитель;

САПР – система автоматизированного проектирования;

СК – стартовый комплекс;

ТБ – техника безопасности;

ТЗ – техническое задание;

ТО – техническое обслуживание;

ТУА – транспортно – установочный агрегат;

ЭД – эксплуатационная документация.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из главных моментов, которые конкретно оказывают влияние на твердость сварных металлоконструкций при схожей геометрии, являются характеристики материала и качество сварных соединений.

Сварное соединение – это неразъемное соединение двух или трех элементов конструкции или участков изделия, выполненное различными видами сварки. Так же данные свариваемые детали могут иметь как одинаковые свойства материала, так и разные, в зависимости от рода металлов и их сплавов.

В частности, модель транспортно – установочного агрегата состоит из большого количества свариваемых деталей, которые, в свою очередь, имеют большое количество разных конфигураций сварных швов. Это влечет к многообразию связей «твердость системы – структура сварного соединения». Возникновение данных связей не дает совершенно точно найти причину изменения твердости, основанной на общем анализе поведения металлической конструкции.

Следовательно, единственным вариантом решения при нахождении причины изменений твердости металлической конструкции является модальный анализ, основанный на определении спектра резонансных (собственных) частот в критических точках конструкции.

Транспортно – установочный агрегат (ТУА) – сложная крупногабаритная конструкция, которая совмещает функции транспортного и подъемно – установочного агрегата для РКН. При работе транспортно – установочный агрегат подвергается различным механическим нагрузкам, связанным с особенностью транспортировки, подъема и опускания РКН.

Целью данной работы является исследование влияния сварных соединений на спектр собственных частот.

Задачи:

- Определение критических точек конструкции ТУА с помощью расчета напряженно – деформированного состояния;

- Определение спектра собственных частот конструкции ТУА с различными дефектами в сварных соединениях;
- Анализ влияния дефектов сварных соединений на спектр собственных частот.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Транспортно-установочный агрегат (ТУА) 373УН34 может эксплуатироваться в любое время года и суток при любых метеорологических условиях, если средняя скорость ветра, замеренная штатным прибором метеослужбы, не превышает 17 м/сек, а температура окружающей среды находится в пределах от минус 40 °С до плюс 40 °С. Зачехленный ТУА разрешается хранить на открытой площадке при любых метеорологических условиях.

ТУА обеспечивает проведение без капитального ремонта в течение 15 лет не менее 300 циклов работы с РКН при условии эксплуатации его в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Во время проведения одиночного цикла работы транспортно – установочного агрегата с ракетой – носителем выполняются следующие операции:

1. Производится загрузка нижней части РН;
2. Производится соединение верхней и нижней частей РН;
3. Производится транспортирование ТУА с установленной на нем РКН с монтажно – испытательного корпуса на стартовый комплекс;
4. Производится установка РКН на пусковое устройство;
5. При неосуществившемся запуске, производится снятие РКН с пускового устройства, транспортирование обратно в МИК;
6. При транспортировании обратно в МИК производится разъединение верхней и нижней частей, а так же выгрузка нижней части РКН с ТУА.

1.1 Устройство транспортно – установочного агрегата

ТУА – это непростой крупноразмерный механизм на железнодорожном ходу, который совмещает функции транспортного и подъемно – установочного агрегата для РКН. ТУА снабжен: гидравлическим приводом, предназначенным для подъема в вертикальное положение; электрическим оборудованием, целью которого является приведение в действие всех без исключения исполнительных устройств и механизмов, а также контролирования их положений.

ТУА состоит из следующих основных узлов: платформы 4 на тележках (рисунок 1); стрелы 10 (рисунок 1) с откидной консолью 1 (рисунок 2); крыльев 17 (рисунок 3); нижней и средней опор 1 (рисунок 1); сменного оборудования 12; механизма подвески 7; двух механизмов доводки 13 (рисунок 1); гидравлического привода 8 (рисунок 1), состоящего из двух насосных установок 1 (рисунок 4); блока гидравлической аппаратуры 2 (рисунок 4); гидравлического цилиндра 3 (рисунок 4); и электрического оборудования 14 (рисунок 1).

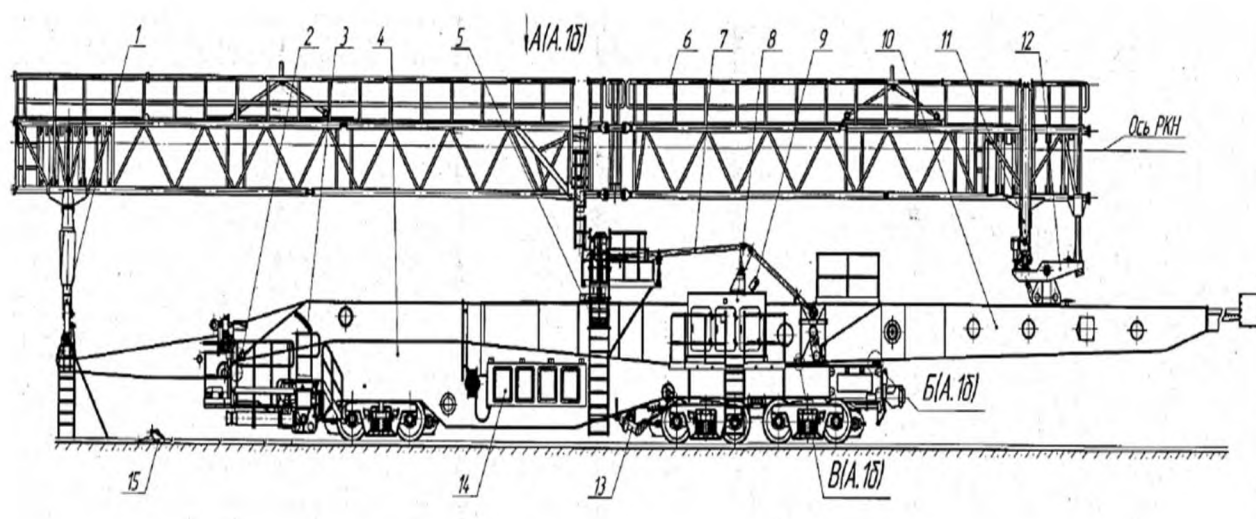


Рисунок 1 – Агрегат 373УН34

1 – нижняя и средняя опоры; 2 – указатель перпендикулярности; 3 – указатель крена; 4 – платформа; 5 – лестницы и площадки; 6 – грузовой макет, предназначенный для проведения испытаний; 7 – механизм подвески; 8 – гидравлический привод; 9 – устройства закрепления; 10 – стрела; 11 – захват в сборе; 12 – сменное оборудование; 13 – механизмы доводки; 14 – электрическое оборудование; 15 – оборудование площадки

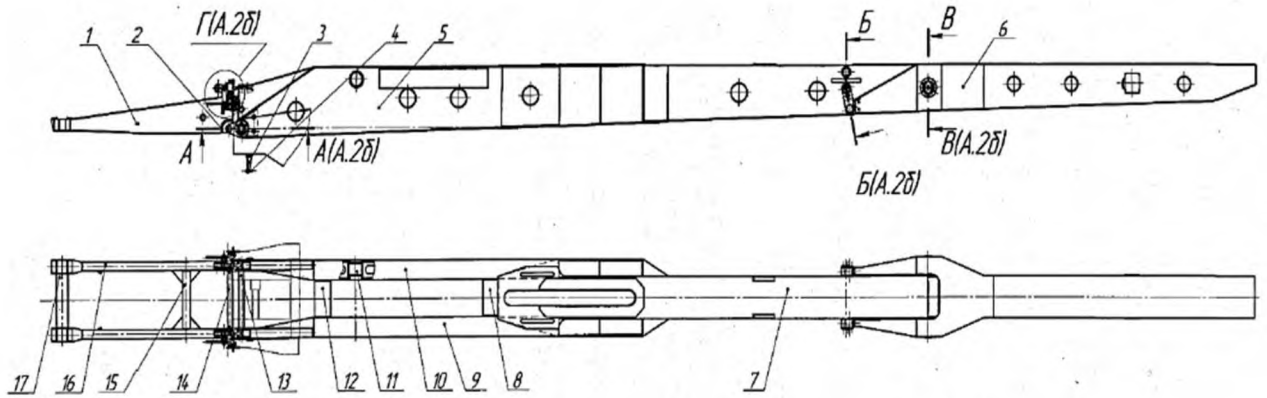


Рисунок 2 – Стрела

1 – консоль; 2 – опора; 3 – кронштейн; 4 – винт; 5 – основание стрелы; 6 – удлинитель; 7 – балка; 8 – поперечная балка; 9 – правая балка; 10 – левая балка; 11 – втулка гидравлического домкрата; 12 – поперечная балка; 13,14 – труба; 15, 16, 17 – балка

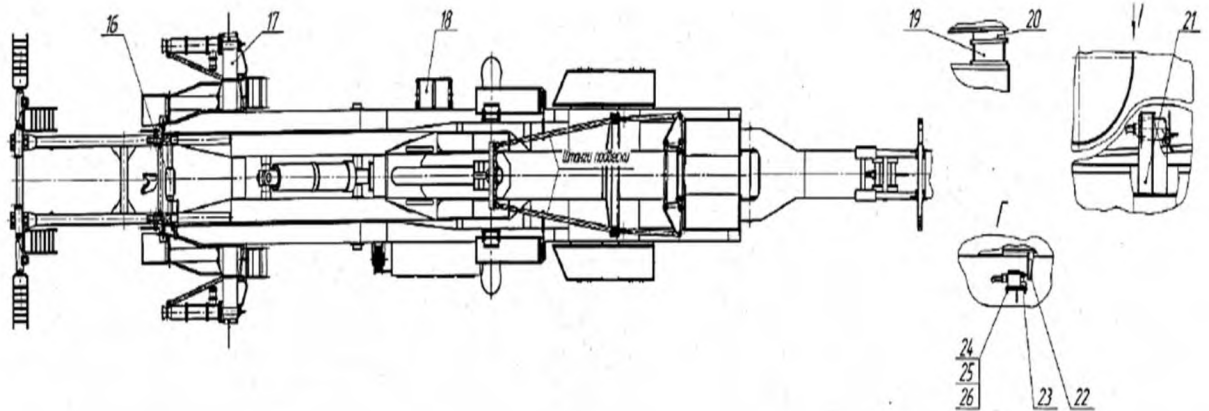


Рисунок 3 – Агрегат 373УНЗ4

16 – программный механизм; 17 – крылья; 18 – комплект ЗИП; 19 – упор; 20 – лист; 21, 22 – кронштейн; 23 – конечный выключатель; 24 – болт М6х25; 25 – гайка М6; 26 – шайба

На платформе ТУА размещаются гидравлический цилиндр, насосная установка и стрела, на которой непосредственно размещены нижняя, средняя и верхняя опоры, а так же механизм подвески, которые, в свою очередь, обеспе-

чивают наилучшее крепление РКН на стреле при транспортировании на стартовый комплекс и установке на пусковое устройство 373ПУ07.

Подъем стрелы в вертикальное положение выполняется при помощи гидравлического цилиндра, в который, с помощью насосных установок 1 (рисунок 4), производится подача рабочей жидкости по трубопроводам, которые располагаются на платформе и стреле ТУА. Расположенные на крыльях гидравлические опоры, гарантируют стабильное удержание стрелы ТУА в отвесном состоянии. При походном расположении ТУА гидравлические опоры закрепляются механизмами подъема этих гидравлических опор.

Механизмы доводки, при помощи которых возможно перемещение ТУА вдоль линии движения в пределах плюс – минус 50 мм, закрепляют платформу ТУА на стартовом комплексе прямо перед подъемом стрелы в отвесное состояние.

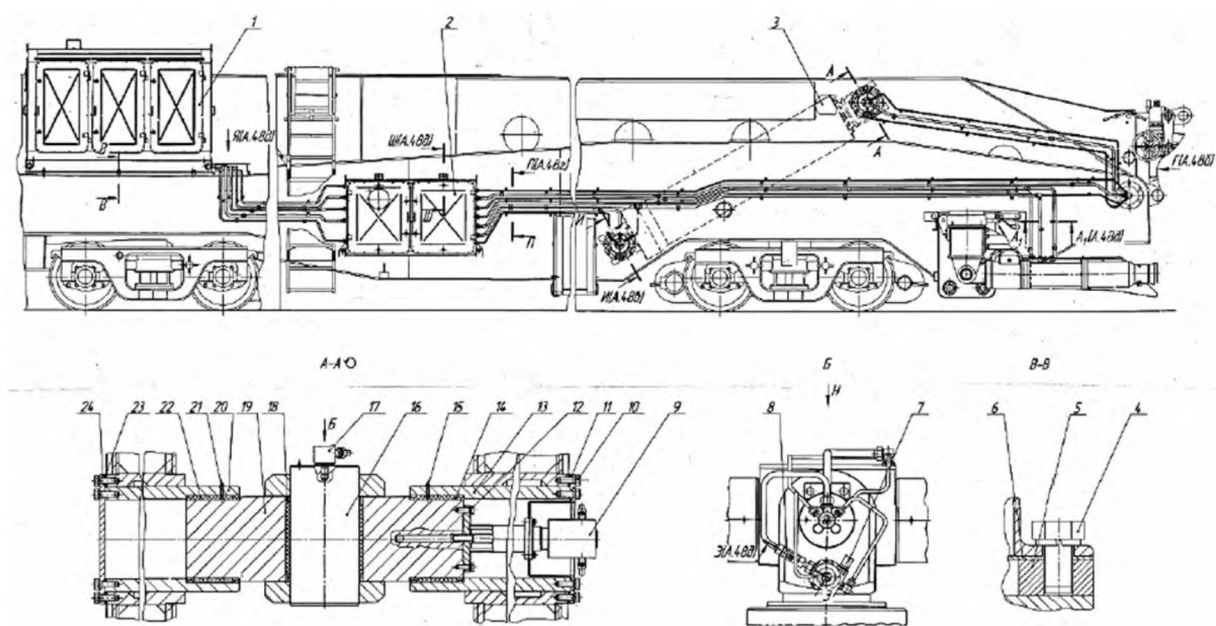


Рисунок 4 – Общий вид гидропривода

1 – насосная станция; 2 – блок гидроаппаратуры; 3 – гидроцилиндр; 4, 10, 12 – болт; 5 – пластик; 6 – лист; 7 – гидрозамок; 8 – односторонний дроссель; 9 – поворотный сальник; 11, 24 – крышка; 13, 20 – стакан; 14, 18, 22 – втулка; 15, 21 – масленка; 16 – ось; 17 поворотный сальник; 19 – траверса; 23 – набор прокладок

ДОК

Электрооборудование ТУА обеспечивает приведение в действие механизмов, контроль за их положением, освещение рабочих мест и заземление РКН при его транспортировке [3].

Основные технические данные ТУА приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические данные ТУА

1. Габариты ТУА	
- длина	45,875 м
- ширина	6,520 м
- высота в продольном состоянии стрелы	7,165 м
- высота в отвесном состоянии стрелы	37,500 м
2. Вес ТУА	216000 кг
3. Скорость транспортирования ТУА:	
- локомотивом	не более 10 км/ч
- самоходными тележками	от 1,8 до 4,0 м/мин
4. Максимальная нагрузка на ось тележки	40000 кг
5. Платформа:	
- база	12,250 м
- колея	1,520 м
- количество тележек	2 шт
- тип головной тележки	самодвижущаяся тележка, двуосная с двумя электрическими приводами
- тип задней тележки	четырёхосная тележка с двумя электрическими приводами

1.2 Динамические испытания

Динамические испытания заключаются в приложении к объекту нестационарных нагрузок. Учитывая сложный характер динамических воздействий, зависящий от формы изменения нагрузки, частоты изменений, от характера пере-

дачи этих нагрузок на объект, а также от реакции самого объекта, существует большое количество разновидностей этих испытаний.

Различают частотные испытания, испытания на вибропрочность при подаче ударных воздействий и синусоидальных вибраций, транспортные испытания, усталостные и циклические испытания, испытания на воздействие пульсаций давлений, акустические испытания.

Частотные испытания проводятся с целью определения резонансных частот и форм собственных колебаний объекта в целом и его составных частей. Это важные свойства конструкции, влияющие на работоспособность, как отдельных узлов, так и изделия РКТ в целом.

Кроме этого, знание собственных частот позволяет адекватно провести испытания на вибропрочность. При частотных испытаниях определяются также коэффициенты демпфирования элементов конструкции.

Знание динамических характеристик конструкции позволяет верифицировать динамическую модель изделия, используемую для определения нагрузок, действующих на изделие, а также используемую для исследования управляемости и устойчивости РН в полёте.

Методы определения резонансных частот, форм собственных колебаний и коэффициентов демпфирования основаны на возбуждении гармонических колебаний объекта.

Возбуждение колебаний в простейшем случае производится одной силой, а искомые величины определяются путём анализа измеренных частотных характеристик в различных точках объекта. Собственные частоты и коэффициенты демпфирования определяются по осциллограмме процесса затухания свободных колебаний.

Испытания на вибропрочность проводятся путём приложения к изделию динамических воздействий, соответствующих эксплуатационным. Целью вибропрочностных испытаний является проверка прочности крепления навесного оборудования, то есть вторичных структур, а также проверка ресурсных характеристик объекта. Вибропрочностные испытания проводятся на нормированные

нагрузки. Для имитации динамических нагружений используется гармоническая вибрация, при которой частота меняется плавно по времени, а амплитуды - в соответствии с заданными нормами.

При подходе к резонансным частотам делаются вырезки в частотном диапазоне, чтобы не перегрузить конструкцию. В специальных случаях могут задаваться нормы на отдельные частоты.

Для испытаний используются вибростенды, различающиеся по мощности и спектру воспроизводимых частот, рассчитанных на различные массы испытываемых объектов.

Учитывая, что полностью смоделировать спектр частот и амплитуд реального воздействия на изделие невозможно, испытания на вибропрочность разбиваются на этапы.

Транспортные испытания направлены на подтверждение усталостной прочности изделия при длительном действии повторяющихся нагрузок, возникающих при транспортировании изделия. Самое простое решение – погрузить модель изделия на транспортное средство, автомобиль или поезд, и возить необходимое время. Однако в ряде случаев это невозможно осуществить, и в этом случае транспортные нагрузки моделируются на вибростенде.

Для моделирования динамических нагрузок при транспортировании используются нагружения случайными вибрациями до частот 50 Гц. При испытаниях задаётся время действия нагрузки и спектральная плотность в зависимости от частоты её реализации в заданный период времени.

Испытания на ударные нагрузки. Ударные нагрузки возникают при коротечных (менее 0,1 сек) изменениях деформации изделия, вызывающих внутреннюю ударную волну. Подобные процессы происходят при срабатывании пиростерв или при механическом разрыве связей, а также при упругом торможении быстро двигающихся деталей в механизмах. При этом возникает ударная волна с перегрузкой до 5000 g, затухающая в зависимости от демпфирующих свойств конструкции. Наиболее чувствительны к ударным нагрузкам электронные бортовые приборы. [1]

При проведении динамических испытаний ТУА делают следующее[4]:

- загружают фермы грузового пакета грузами по третьему варианту (рисунок 5);
 - транспортируют ТУА с помощью локомотива со скоростью, не превышающей 10 км/ч, при этом проводят не больше трех торможений состава;
 - передвигают ТУА на большой скорости вперед и назад на расстояние, равное 20 м в каждую сторону, при этом проводят не менее трех таких операций;
 - передвигают ТУА на малой скорости вперед и назад на расстояние, равное 1 м в каждую сторону, при этом проводят не менее трех таких операций;
 - вывинчивают штыри из нижней опоры грузового макета;
 - подъезжают самоходом к пусковому устройству;
 - установку ТУА на гидравлических опорах выполняют при помощи механизмов доводки;
 - проводят поднятие стрелы в вертикальное положение, а затем опускают стрелу в горизонтальное положение, при этом проводят не менее трех таких операций. Так же при подъеме и опускании стрелы проводят несколько остановок в переходных состояниях;
 - проводят поднятие стрелы в вертикальное положение;
 - опускают ТУА на левой гидравлической опоре до автоматической остановки, затем проводят данное действие для правой гидравлической опоры;
 - поднимают ТУА на левой гидравлической опоре до автоматической остановки, затем проводят данное действие для правой гидравлической опоры;
- При этом проводят не менее трех таких операций по подъему и опусканию ТУА на гидравлических опорах. Так же в данном процессе производят не менее трех остановок в промежуточных положениях.
- опускают стрелу в горизонтальное положение и убирают гидравлические опоры;
 - отъезжают самоходом от стартового стола;

- осматривают гидравлический цилиндр, гидравлические опоры, верхнюю, среднюю и нижнюю опоры ТУА, стрелу, платформу с тележками, крылья, механизм подвески.

После испытаний не должно быть выявлено никаких дефектов.

Для исключения перегрева масла в гидроприводе, необходимо после каждого цикла подъема-опускания стрелы делать перерыв 1 ч, а после циклов подъема – опускания на гидравлических опорах делать перерыв 0,5 ч.

После проведения испытаний делают следующее:

- устанавливают лестницы к нижней опоре;
- производят подачу ТУА на технологическую площадку, а так же включают напряжение;
- снимают грузовой макет испытаний, при этом руководствуются эксплуатационной документацией;
- укладывают фермы грузового макета на подставки, затем проводят консервацию грузового макета;

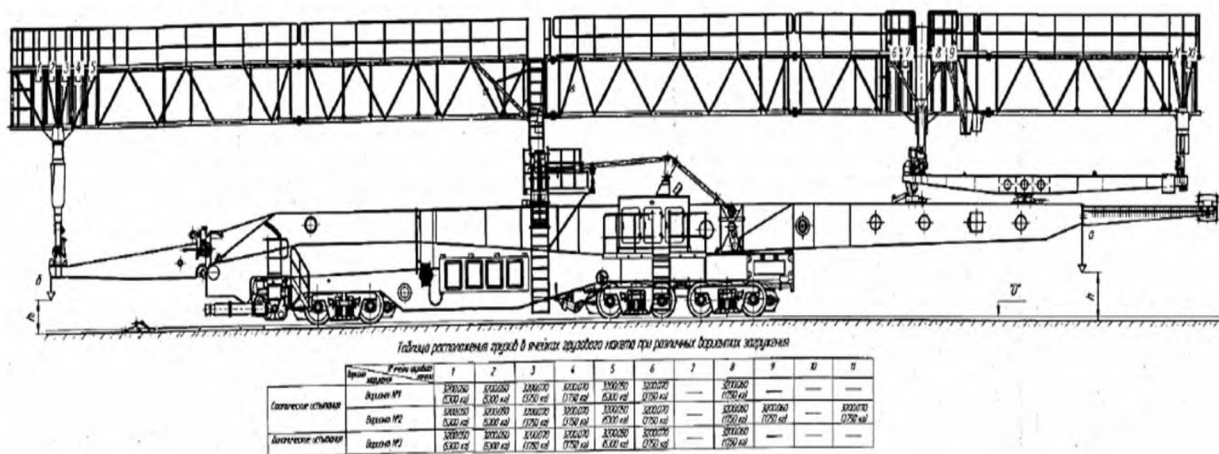


Рисунок 5 – Схема испытаний агрегата под РН «Союз 2-1а, 1б»

Таблица расположения грузового макета при различных вариантах нагружения

1.3 Дефекты сварных швов

Дефектом называется любое отклонение от заданных нормативными документами характеристик и свойств сварного соединения, которые образуются при нарушениях требований к сварочным материалам, подготовке и сварке со-

единяемых элементов, а также в последующих механической и термической обработках сварных металлических конструкций [2].

В силу разных обстоятельств, сварные швы могут иметь повреждения, влияющие на их прочные характеристики. Согласно ГОСТ 7512-82 все виды дефектов сварных швов разделяются на три основные группы: наружные, внутренние и сквозные дефекты. К наружным дефектам относятся: неравномерность формы стыкового соединения, наплывы, трещины, прожоги металла, подрезы шва, кратеры и другие изъяны, возникающие на поверхности. К внутренним дефектам относятся: некачественное сплавление металла, пористость, трещины, а также сторонние включения (оксидные, шлаковые и неметаллические), находящиеся внутри шовного соединения, а к сквозным дефектам относятся: трещины, подрезы, прожоги и другие повреждения, которые проходят сквозь шовное соединение на внешнюю поверхность.

В зависимости от причин образования дефекты подразделяются на две группы:

1. Дефекты, которые образуются при формировании и кристаллизации сварочной ванны и остывании сварного соединения, также как кристаллизационные и холодные трещины, поры, неметаллические включения и несплавления;

2. Дефекты, появление которых обусловлено нарушением технологии сварки, то есть непровары, подрезы, прожоги.

Дефекты сварных соединений представлены на рисунке 6.

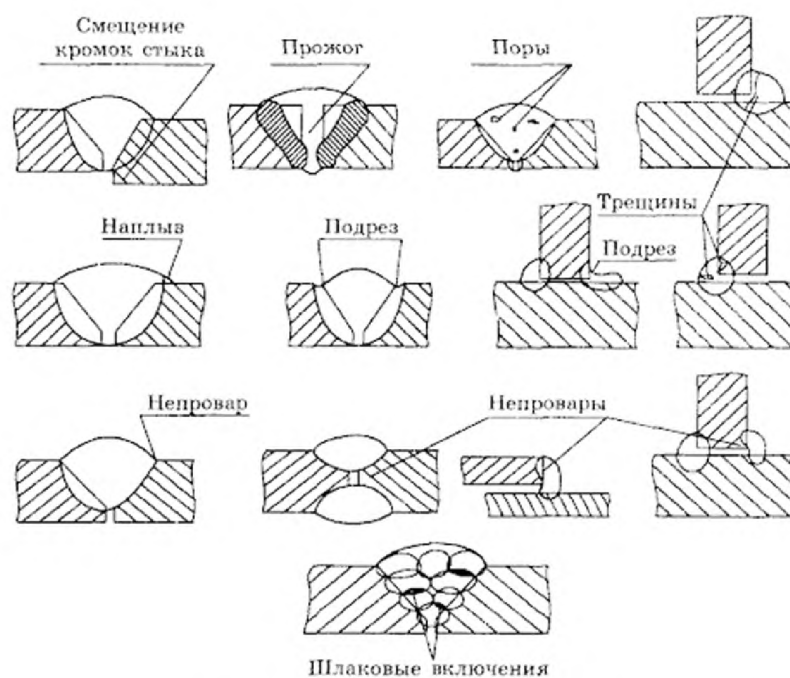


Рисунок 6 – Дефекты сварных соединений

Трещины в сварном шве – дефекты в виде несплошности, то есть нарушения однородности металла, образованные локальным разрушением сварочного шва при его охлаждении или под действием нагрузок, является недопустимым дефектом, а также источником напряжений и главной причиной разрушения шва.

Продольные трещины расположены вдоль сварного шва и находятся на металле шва, границе сплавления или области в объеме основного металла, который при сварке не был доведен до плавления. Также являются недопустимым дефектом, причиной концентрации напряжений и развития разрушений. Появление продольных трещин обусловлено наличием высокой температуры при растяжении и сжатии металла (горячие) или его очень медлительного разрушения (холодные).

Холодные трещины - это хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием остаточных сварочных напряжений. Холодные трещины в сварном шве, а также в промежуточной зоне расположены под каким - либо углом к шву и их габариты соизмеримы с размерами зон сварного соединения. Имеют яркие либо бледноватые расцветки в своих изломах.

Горячие трещины – хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и области в объеме основного металла, который при сварке не был доведен до плавления, появляющиеся в твёрдо – жидком состоянии при завершении за- твердевания, а также в твёрдом состоянии при больших температурах на этапе преимущественного развития деформации. Они имеют сложный и запутанный путь и темный подозрительный цвет, подвергаются большому окислению.

Пора – это дефект сварного соединения в виде полости округлой формы, которая в свою очередь заполнена газом. Пора является очень маленьким де- фектом, ее размеры составляют не более 2 мм. Единственная причина возник- новения пор – это наличие газов, которые не успели выделиться из охлаждаю- щегося металла, а также образованных из – за химических реакций в расплав- ленном металле.

Поверхностная пора – дефект, нарушающий сплошность поверхности сварного шва видимый невооруженным глазом или через лупу небольшого уве- личения при визуальном контроле. Причиной возникновения поверхностной поры является повышенная вязкость шлака, расположенного на поверхности жидкой сварочной ванны.

Равномерно распределенная пористость – это ряд газовых пор, распреде- ленных равномерно в металле шва. Сплошную пористость вызывает большое количество ржавчины и масла на кромках заготовок, а также при использова- нии влажного флюса.

Продолговатая полость представляет собой несплошность, которая рас- положена вдоль оси сварного соединения, при этом ее длина больше ее высоты в два раза. Данный дефект образуется при зарождении пузырька на границе твердого и жидкого металла, давление в котором ниже атмосферного. Пузырек не может всплыть и в результате образуется полость из нескольких объединен- ных пузырьков. Причиной возникновения продолговатой полости может быть наличие на поверхности металла отдельных мест, которые насыщены газами, остатки ржавчины на поверхности свариваемых кромок, а также высокая вяз- кость металла сварочной ванны.

Свищ представляет собой трубчатую полость в металле сварного шва, образовавшуюся из – за выделений газа в процессе сварки. Размеры и расположение свища зависят от режима затвердевания и вида сварного газа. Причины образования свищей: огромная амплитуда колебаний электрода, повышенное содержание влаги в покрытии электрода и перегрев в процессе сварки основного металла.

Твердое включение – это частица другого вещества (металла или не металла) в сварном шве.

Шлаковое включение – это дефект сварного шва, в виде остатков шлака в металле сварного шва, оставшегося после кристаллизации металла. При обычных критериях проведения сварки различают шлаковые включения: линейные, разобщенные и прочие. В процессе сварки протекают металлургические реакции раскисления, в результате которых образуются оксиды. Эти оксиды являются элементами шлака. Во время сварки шлак всплывает на поверхность жидкого металла. Медленное всплытие шлака приводит к его застыванию в шве до момента полного всплытия.

Металлическое включение – это частицы инородных металлов (вольфрама, меди, алюминия) в металле сварного соединения.

Неполный провар – это дефект сварного соединения в виде неполного сплавления вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков сварного шва. Неполный провар металла при сварке – это наружный дефект, который можно разглядеть визуально. Чаще всего неполным проваром называют такой дефект при сварке, когда сварочный шов не проникает на всю толщину металла и вследствие этого нарушаются прочностные характеристики сварного соединения. Неполные провары образуются в угловых швах и в корне шва.

Подрез зоны сплавления – это дефект, который характеризуется образованием продолговатого углубления (канавки) остроугольной формы в зоне сплавления сварного шва и основного металла или металла сварного шва предыдущего слоя. Причиной образования подреза при сварке является выпол-

нение сварки либо на повышенных режимах или с большой скоростью. Также, результатом возникновения может служить выбор неправильного угла наклона к более тонкому краю детали, что в свою очередь вызывает ее перегрев.

Прожег сварного шва – дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся вследствие вытекания части жидкого металла сварочной ванны в процессе выполнения сварки, коробления кромок и отставания их от подкладки при сварке. Основными причинами прожога в металле являются: неправильно подобранный диаметр и электроды для сварки; выставлены не те значения сварочного тока на инверторе; неправильно подобран режим сварки; металл не успевает охлаждаться в процессе сварки; осуществление ручной дуговой сварки над слишком тонким металлом.

1.4 Технологические особенности процесса сварки металлоконструкций

В данном транспортно – установочном агрегате свариваются металлические конструкции, состоящие из стали 10ХСНД. Сталь 10ХСНД – это сталь конструкционная низколегированная для сварных металлических конструкций, которая используется для изготовления деталей, подверженных большой коррозии и большим прочностным нагрузкам. Виды поставки из такого материала: сортовой и фасонный прокат, в соответствии с ГОСТ 2590–2006, ГОСТ 8240–97; поковки и кованные заготовки, в соответствии с ГОСТ1133–71.

Так как сталь является низколегированной, то из этого следует, что она хорошо поддается сварке. Однако наличие легирующих элементов обуславливает возможность появления закалочных структур в объеме основного металла, который при сварке не был доведен до плавления. Так же неблагоприятные факторы могут привести к уменьшению стойкости стали по отношению к холодным трещинам и снизить сопротивляемость швов горячим трещинам. Наибольшие проблемы при сварке данных сталей связаны с получением требуемой ударной вязкости металла шва.

Химический состав стали приведен в таблице 2.

Механические свойства стали приведены в таблице 3. [11]

Таблица 2 – Химический состав стали 10ХСНД в процентах

С (углерод)	Si (кремний)	Mn (марганец)	Ni (никель)	S (сера)	P (фосфор)	Cr (хром)	N (азот)	Cu (медь)	As (мышьяк)
≤ 0,12	0,8-1,1	0,5-0,8	0,5-0,8	≤ 0,04	≤ 0,035	0,6-0,9	≤ 0,008	0,4-0,6	≤ 0,08

Таблица 3 – Механические свойства стали 10ХСНД

Толщина, мм	Механические свойства при растяжении		
	Временное сопротивление, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ² , не менее	Относительное удлинение, %, не менее
8-15	530-685	390	19
16-32	530-670	390	19
33-40	510-670	390	19

При применении электрошлакового способа сварки на шов оказываются очищающие действия. Так же очищающее действие при дуговой сварке оказывает сварной шов по оксидным включениям. Общее количество сульфидов и фосфидов при таком способе сварки невелико.

Электрошлаковая сварка – это один из видов соединения металлических конструкций, при котором соединение металлов, имеющих большие геометрические характеристики, может осуществляться при достаточно высоких температурах, которые были вызваны прохождением электрического тока через расплавленный флюс (рисунок 7).

То есть, электрод 1 и свариваемый металл 2 соединены электрически посредством их соединения со шлаковой ванной 3. Теплота, которая выделяется в шлаковой ванне, нагревает электрод до температуры большей, чем температура плавления свариваемого и электродного металла. В итоге края свариваемого металла оплавляются и вследствие большой плотности этого металла стекают на дно расплава, при этом создавая металлическую ванну 4.

При прохождении сквозь жидкий шлак, капли электродного металла взаимодействуют с ним, при этом полностью меняя свой состав. Так же расплавленный металл защищен от окисления воздухом из-за нахождения под шлаковой ванной.

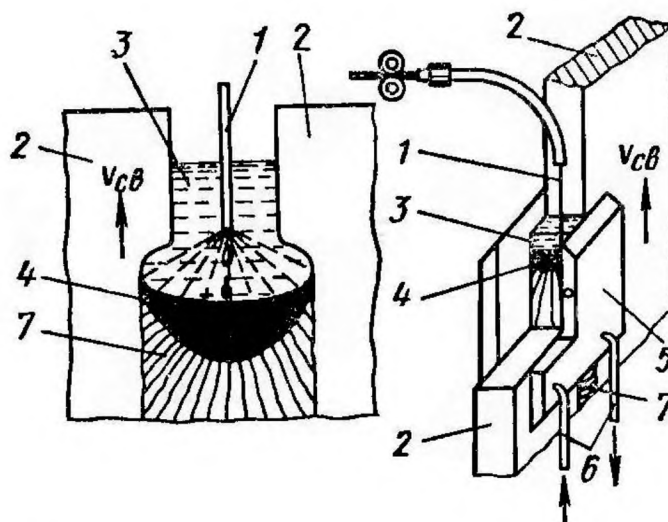


Рисунок 7 – Процесс проведения электрошлаковой сварки

Для предотвращения вытекания свариваемого металла, шлаковой и металлической ванн пользуются специальными поддерживающими устройствами – медными ползунами 5, которые охлаждаются водой 6.

В результате в нижней части металлической ванны образуется сварной шов 7.[10]

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАГРУЗОК И РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК МАКСИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОК

Расчет агрегатов и их составных частей определяет соответствие их конструкций нагружениям, которые возникают при эксплуатации, а также допустимость этих нагружений.

Расчет выполняется по критериям работоспособности для определяющих (наиболее опасных) расчетных случаев, устанавливаемых в соответствии с требованиями стандарта, ТЗ, РЭ и опыта эксплуатации агрегатов-аналогов.

Устанавливают следующие критерии работоспособности:

- устойчивость положения;
- прочность;
- деформативность;
- воздействие агрегата на ракету или ее составные части.

Для расчета используют методы допускаемых нагружений с соблюдением запасов, регламентированных в настоящем стандарте, или вероятностные методы с учетом требований настоящего стандарта и требований надежности, установленных в ТЗ [6].

При расчете методом допускаемых нагружений должны быть выполнено условие, приведенное в формулах 1 и 2:

$$R \leq [R] = \frac{R_n}{[n_i]}, \quad (1)$$

$$n = \frac{R_n}{R} \geq [n_i], \quad (2)$$

где $[n_i]$ – суммарный минимально допустимый коэффициент запаса, вычисляемый по формуле (3).

$$[n_i] = n_0 n_i, \quad (3)$$

где n_0 – коэффициент неучтенных факторов общий для всех критериев работоспособности и равный:

1,10 – в общем случае;

1,05 – если суммарное влияние не учтенных в расчете нагрузок не превышает 5% допускаемых усилий (или других прямо связанных с ними производных факторов), а также при разовом воздействии предельных нагрузок;

1,00 – при учете 100% нагрузок с их возможными отклонениями в неблагоприятную сторону;

n_i – частный коэффициент запаса, устанавливаемый для каждого критерия работоспособности.

При расчете вероятностными методами для каждого критерия работоспособности должно быть соблюдено условие:

$$P_\sigma \geq [P_\sigma]. \quad (4)$$

Если расчет выполнен методом допускаемых нагружений и вероятностным методом, за основу следует принимать результаты метода, который дает наибольшие допускаемые нагружения.

Нагрузки, которые возникают при эксплуатации агрегата, как при выполнении требований ЭД, так и при их нарушении в результате преднамеренных или непреднамеренных (ошибочных) действий обслуживающего персонала, делят на расчетные и нерасчетные [5].

Расчетные нагрузки подразделяются на рабочие, предельные и аварийные. Все исходные данные для расчета нагрузок берутся из ТЗ на агрегат. При отсутствии нормативов на расчетные нагрузки допускается их значения определять по методикам, основанным на экспериментальных и статистических данных.

Для нерасчетных нагрузок критерии работоспособности не устанавливаются и сами нагрузки в дальнейшем не рассматриваются.

К рабочим относятся нагрузки, возникающие в период проведения рабочего цикла при нормальных условиях работы агрегата:

- ветровые нагрузки;
- инерционные нагрузки;
- газодинамические и тепловые нагрузки от воздействия газового потока;
- нагрузки от сопрягаемых смежных конструкций;
- силы трения;
- другие нагрузки, которые могут действовать на агрегат или его составные части при проведении рабочего цикла.

К предельным относятся максимальные нагрузки случайного характера, которые могут возникнуть:

- в период выполнения рабочего цикла – при наличии отклонений от нормальных условий работы агрегата, вызванных появлением неисправностей или ошибочными действиями обслуживающего персонала;

- в нерабочем состоянии – в результате воздействия природных сил (ветер, сейсмическое воздействие), уровень которых устанавливается в ТЗ, например:

- нагрузки, вызванные несрабатыванием одного из предохранительных или ограничительных устройств, срабатывание которых должно происходить в период проведения рабочего цикла при нормальных условиях работы агрегата;

- нагрузки, соответствующие максимальной настройке предохранительных или ограничительных устройств, срабатывание которых не должно происходить в период проведения рабочего цикла при нормальных условиях работы агрегата;

- ветровые нагрузки, соответствующие предельной скорости ветра;
- случайные нагрузки, прикладываемые к рукояткам, штурвалам, вороткам, рычагам и другим деталям механизмов и органов управления с ручным приводом при их заклинивании;

- рабочие нагрузки, вероятность появления которых за весь срок эксплуатации агрегата составляет менее 0,003 (если в ТЗ не задана другая вероятность);

- монтажные нагрузки;

- другие нагрузки, отвечающие признакам предельных нагрузок.

При действии рабочих и предельных нагрузок должны обеспечиваться критерии работоспособности. Допускаются ограничения в работе механизмов или перевод агрегата в нерабочее положение.

К аварийным относятся максимальные нагрузки случайного характера, возникающие в аварийных ситуациях, оговоренных в ТЗ. Критерии работоспособности для этих ситуаций устанавливаются в ТЗ, исходя из достижения двух целей:

- сохранение жизни обслуживающего персонала;

- минимизация материального и экологического ущерба и времени восстановления агрегатов и их составных частей.

Анализ напряженно – деформированного состояния проводится при помощи метода конечных элементов пакета прикладных программ SolidWorks Simulation.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений, который был создан для решения сложных уравнений теории упругости и строительной механики в таких областях техники как ракетостроение, самолетостроение, машиностроение и строительство.

В настоящее время МКЭ имеет глубокое теоретическое обоснование и получил широкое распространение для решения значительного круга прикладных задач, например:

- задачи распределение тепла и электрического поля;

- задачи диффузии и гидродинамики, в том числе течение жидкости в пористых средах;

- задачи механики и прочности деформируемого твердого тела.

Основная идея МКЭ состоит в следующем:

1. Любую непрерывную в некоторой области величину (например, температуру, внутреннее усилие, перемещение) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая создается из множества кусочно – непрерывных функций, определенных в конечном числе подобластей (элементов);

2. Кусочно – непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек (в узлах) рассматриваемой области. Обычно такими функциями являются полиномы - линейные, квадратичные, кубические. Следовательно, чтобы определить известную непрерывную величину, первоначально нужно определить её значения в узлах.

При построении конечной модели постоянной величины действуют следующим образом:

1) В рассматриваемой области фиксируется окончательное количество точек;

2) Значение непрерывной величины, в каждой узловой точке, считается переменной, которая должна быть определена;

3) Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число элементов, имеющих общие узловые точки, и в общей сложности аппроксимируют форму области;

4) Постоянная величина аппроксимируется на каждом элементе многочленом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой многочлен, но его показатели подбираются так, чтобы сохранялась постоянство величины вдоль границ элемента.

Если неизвестная непрерывная величина φ определена в двух- или трехмерной области, аппроксимирующими являются функции от x и y или от x , y и z соответственно. Двумерная область разбивается обычно на элементы в форме треугольника или четырехугольника, трехмерная область – на элементы в форме тетраэдра или параллелепипеда. Аппроксимирующие функции изображаются в таком случае плоскими (рисунок 8,а) или криволинейными (рисунок 8,б) поверхностями.

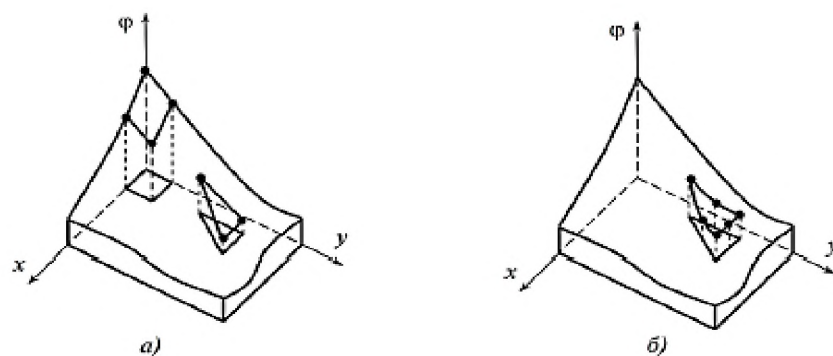


Рисунок 8 – Аппроксимирующие функции:

а – плоская поверхность; б – криволинейная поверхность

Преимущества метода конечных элементов:

1. Главным преимуществом метода является возможность разбиения на конечные элементы области любой формы и, таким образом, возможность расчета полей напряжений и деформаций в реальных деталях с учетом всех их конструктивных особенностей;

2. Исследование модели тела и его конструктивных особенностей, которые были спроектированы из нескольких материалов и при этом характеристики свойств материалов соседствующих элементов могут быть разными;

3. Учет различных граничных условий и критериев.

Программное обеспечение SolidWorks Simulation использует метод конечных элементов (МКЭ), как численный способ анализа технических конструкций. МКЭ принят в качестве стандартного способа анализа, так как он является универсальным и подходящим для работы на персональных компьютерах. МКЭ делит исходную модель (рисунок 9) на большое множество малых частей простых форм (треугольники, прямоугольники, ромбы), называемых элементами (рисунок 10). Данные элементы результативно заменяют сложную задачу несколькими простыми, которые решаются совместно. [7]



Рисунок 9 – Модель

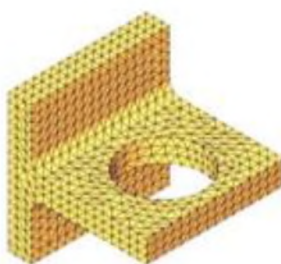


Рисунок 10 – Деление модели на малые части (элементы)

Малые части (элементы) имеют общие точки, называемые узлами. Процесс деления модели на малые части называется созданием сетки.

Поведение каждого элемента заранее хорошо известно, так как известны все возможные сценарии опор и нагрузок. Так же здесь используются различные формы элементов.

Вычисление реакций в любой точке элемента происходит из – за расположения реакции узлов в этом элементе, при этом от проведения анализа и использования этого узла так же зависят различные параметры, которые описывают каждый используемый узел. Например, при термическом исследовании температура узла дает полное описание его реакций. Для расчетов конструкции реакция узла представляется, в целом, тремя перемещениями и тремя вращениями, называемыми степенями свободы. Такой анализ, с использованием МКЭ, называется анализом конечных элементов АКЭ.

Система автоматизированного проектирования SolidWorks при помощи управления поведением каждого элемента, а также, учитывая его соединения с

другими элементами, разрабатывает уравнения, связывающие все реакции с уже известными характеристиками материала и граничными условиями.

Затем проводится нахождение всех неизвестных элементов, при помощи упорядочивания уравнений в большую совместную систему алгебраических уравнений.

Система автоматизированного проектирования SolidWorks Simulation использует следующие типы исследований:

- Статические исследования (или исследования напряжения). Статические исследования вычисляют перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределение запаса прочности. Материал разрушается там, где нагрузки превысили определенный уровень. Вычисление запаса прочности базируется на одном из четырех критериев разрушения;

- Частотные исследования. Тело, выведенное из состояния покоя, начинает колебаться на определенных частотах, так называемых собственных или резонансных частотах. Самая низкая собственная частота называется основной частотой. При каждой собственной частоте тело принимает определенную форму, которая называется формой колебаний. При частотном анализе рассчитываются собственные частоты и ассоциированные формы колебаний;

- Исследования потери устойчивости. Потеря устойчивости связана с мгновенными большими перемещениями, вызванными осевыми нагрузками. Тонкие конструкции, подверженные воздействию осевых нагрузок, могут выйти из строя в результате потери устойчивости на уровнях нагрузки меньших, чем требуемые для возникновения разрушения материала. Потеря устойчивости может появиться при разных режимах под воздействием различных уровней нагрузки;

- Термические исследования. Термические исследования подсчитывают температуры, градиент температуры и тепловой поток на основе тепловыделения, теплопроводности, конвекции и условий излучения. Термические исследования могут помочь избежать нежелательных термических условий допустимых, как перегрев и плавление;

- Исследования на ударную нагрузку. Исследование на ударную нагрузку оценивает влияние падения детали или сборки на жесткую или упругую поверхность. Можно использовать исследования на ударную нагрузку, чтобы смоделировать удар модели о жесткую или упругую плоскую поверхность;

- Исследования усталости. Исследования усталости вычисляют срок службы объекта, основанный на событиях усталости материалов. Повторяющиеся операции нагрузки и ее ослабления со временем приводят к ослаблению объектов, даже если любые напряжения намного меньше, чем допустимые ограничения нагрузки. Настоящее явление называется усталостью материалов. Линейные и нелинейные исследования конструкций не прогнозируют разрушение от усталости.

Проведение расчета и общая логика построения конечно – элементной (КЭ) модели выглядит следующим образом:

1. Построение геометрии детали в программе SolidWorks;
2. Выбор типа проводимого исследования с применением вкладки Simulation Standard/Professional;
3. Назначение механических параметров материала для используемой детали. Если проводимый анализ используется для большого количества деталей, создающих сборку, тогда материал задается для всех деталей по – отдельности (в том случае, если производится анализ сборки, то материал задается для каждой детали в этой сборке);
4. Назначение краевых условий. Если проводимый анализ используется для сборки, то задаются критерии глобальных контактов;
5. Создание сетки КЭ;
6. Запуск проводимого исследования;
7. После получения всех результатов, проводится анализ зон с максимальными напряжениями, определение максимальных напряжений в местах с концентраторами напряжений;
8. Расчет коэффициента запаса прочности детали.

Для определения эксплуатационных нагрузок стрелы ТУА выполняем следующие действия:

- 1) Задаем материал и его свойства – сталь 10ХСНД;
- 2) Задаем максимальное нагружение – 475936 Н или 48 т;
- 3) Создаем сетку стрелы ТУА(рисунки 11 и 12);

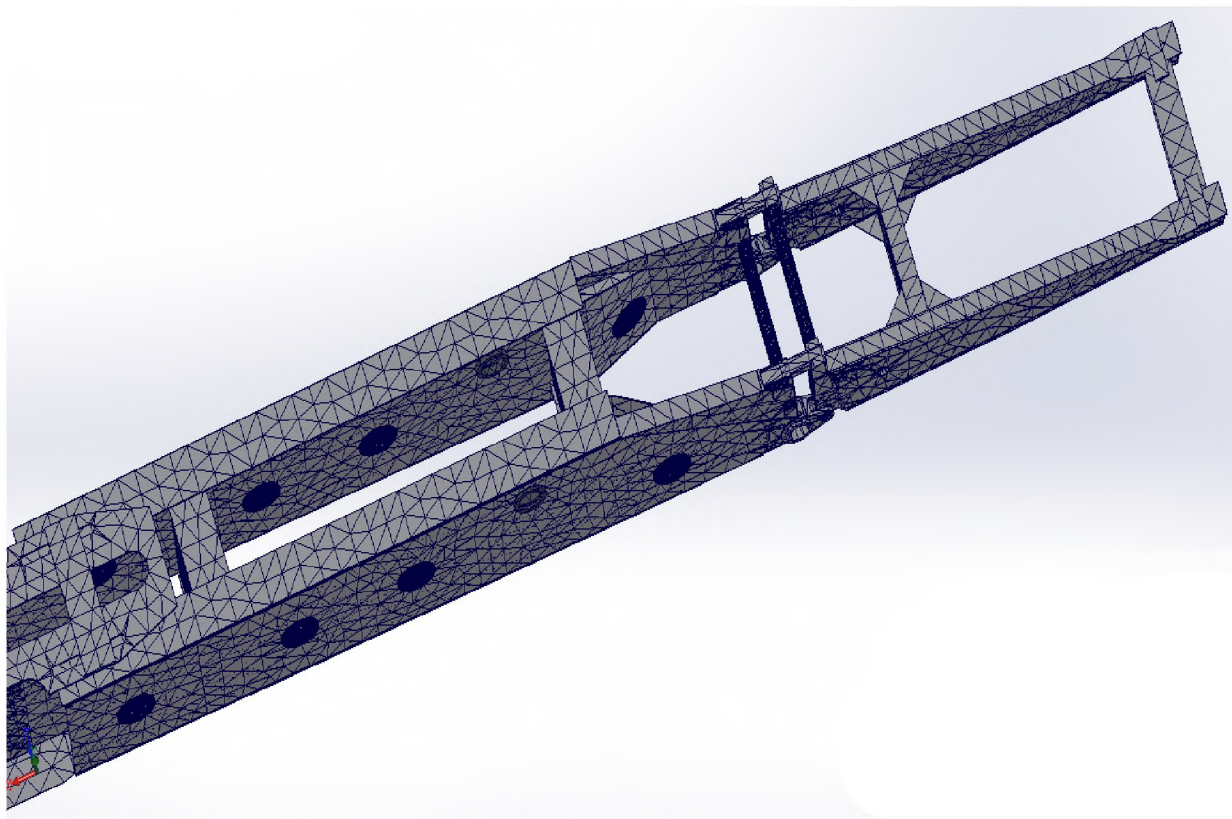


Рисунок 11 – Создание сетки стрелы ТУА

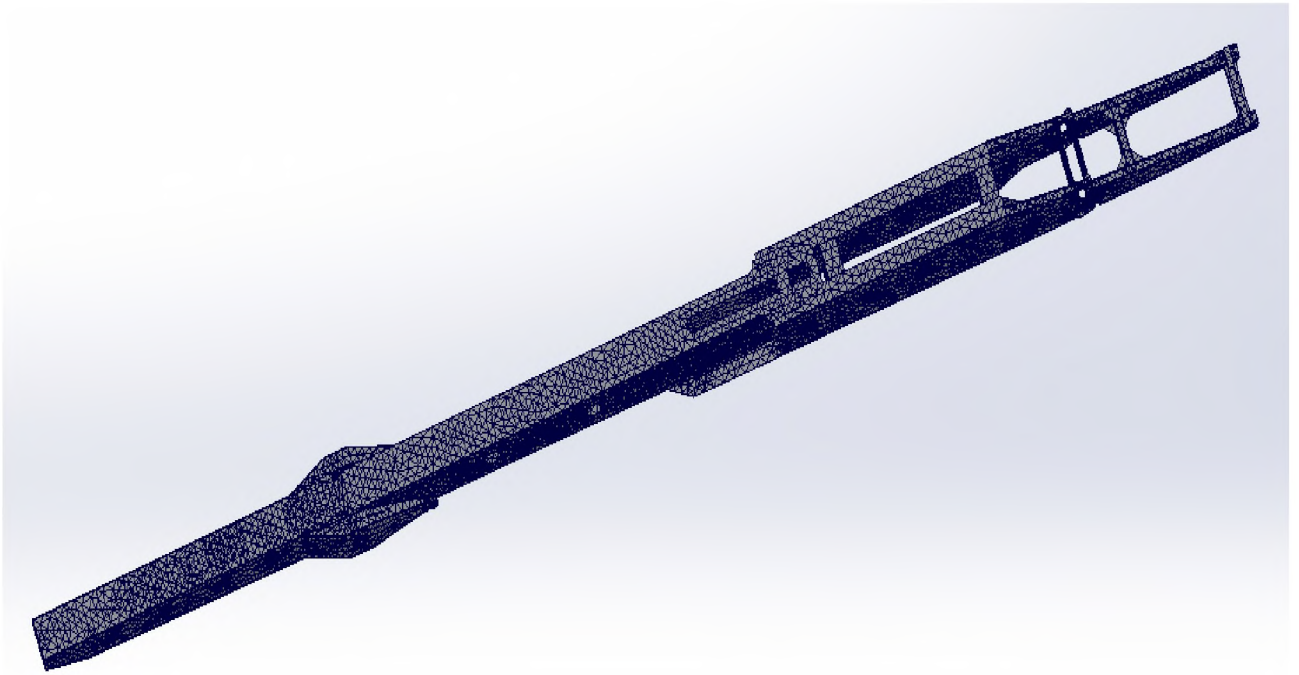


Рисунок 12 – Создание сетки стрелы ТУА

4) Выбираем тип исследования и проводим его: статический анализ, для определения напряжений, перемещений, силы реакций, деформаций и нагрузок (рисунки 13, 14, 15);

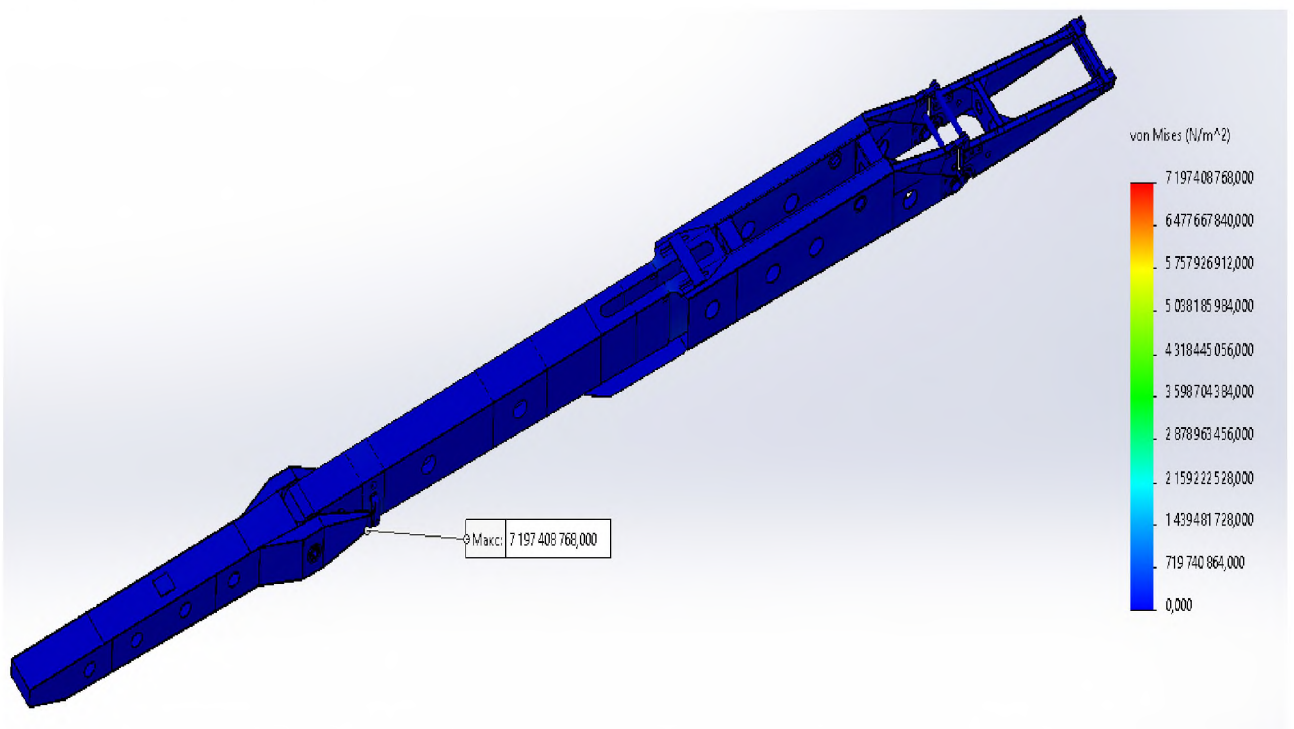


Рисунок 13 – Исследование напряжений стрелы ТУА

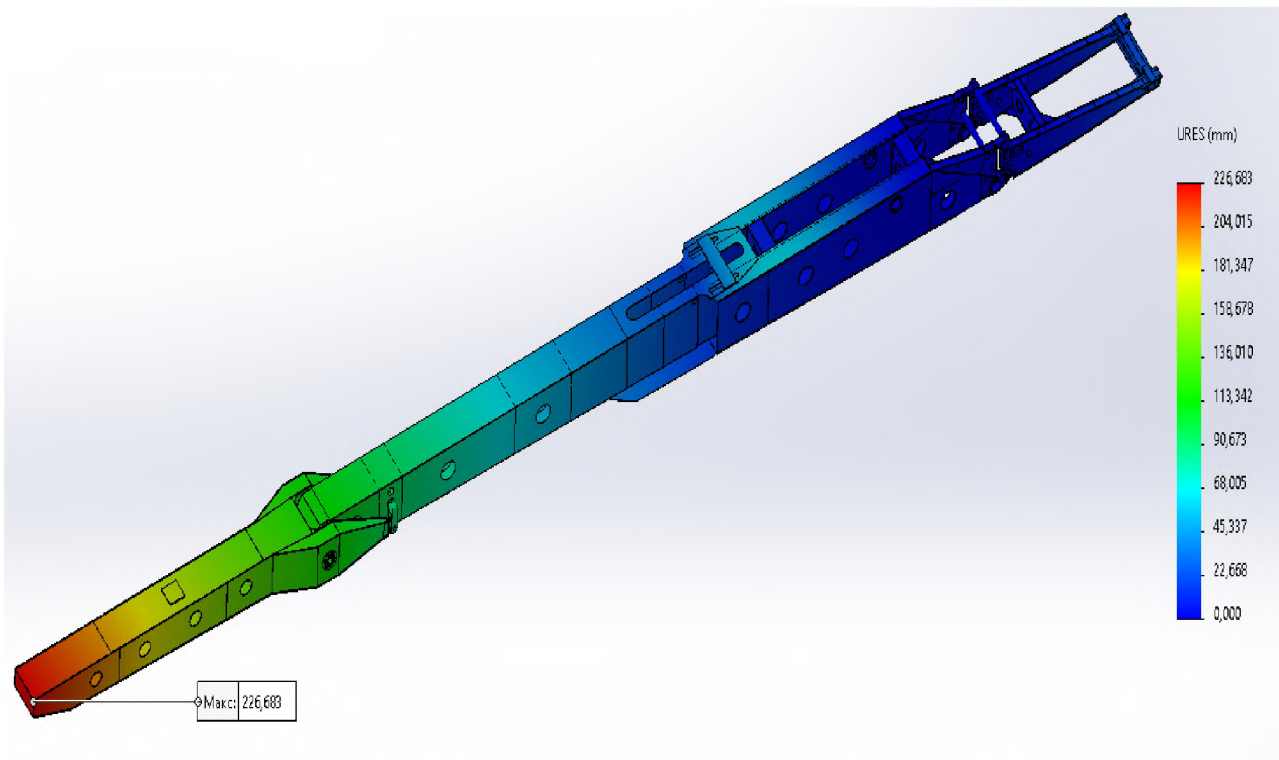


Рисунок 14 – Исследование перемещений стрелы ТУА

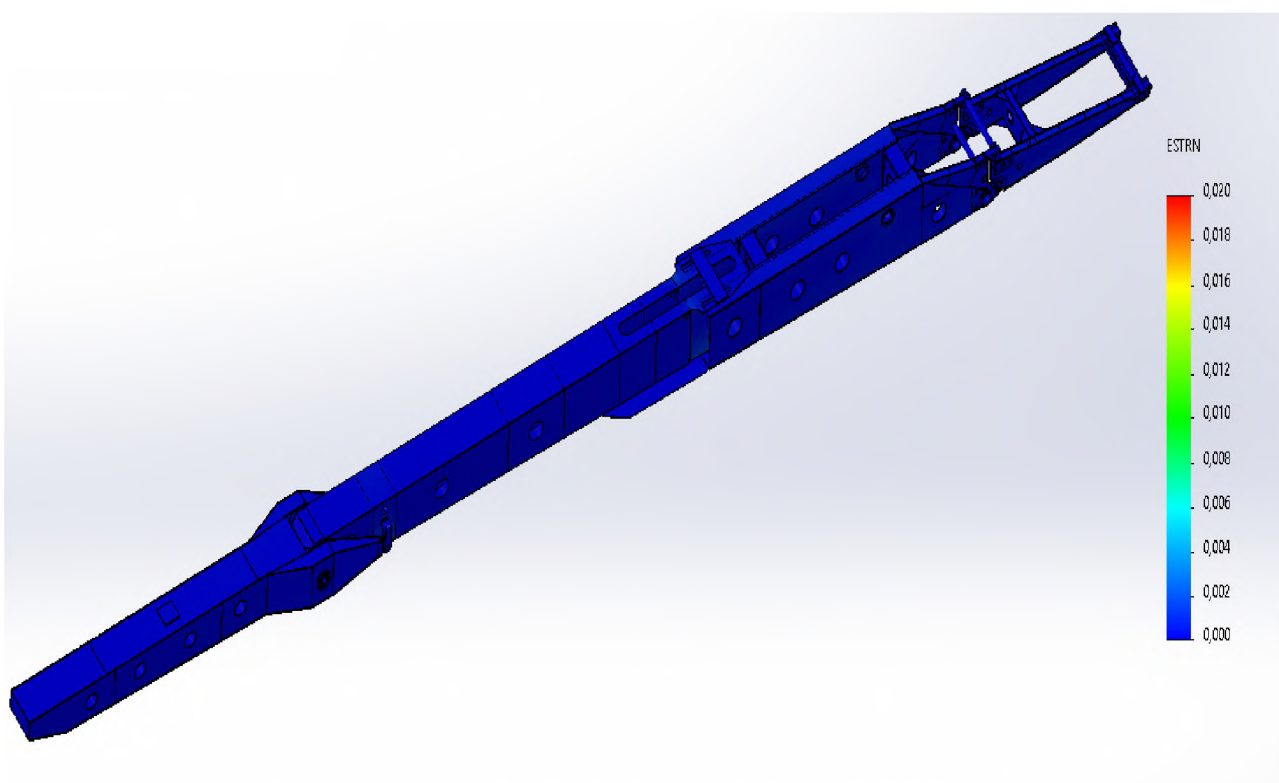


Рисунок 15 – Исследование деформаций стрелы ТУА

Отчет по исследованию представлен в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Итоги исследования стрелы ТУА

Имя	Минимальное значение	Максимальное значение
Напряжение	0,000 Н/м ² или 0,000 Па Узел: 422210	7197408768,000 Н/м ² или 7,197 МПа Узел: 428504
Перемещение	0,000 мм Узел: 131362	226,683 мм Узел: 353204
Деформация	0,000 Узел: 206646	0,020 Узел: 209627

Таблица 5 – Силы реакции

Выбранный набор	Единицы измерения	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
Вся модель	Н	-3279,6	5,454x10 ⁵	1,049x10 ⁵	5,554 x10 ⁵

Стрела ТУА при наложении всех максимальных нагрузок выдерживает их. Критические точки были найдены в узлах 428504 и 353204, они приведены на рисунках 16 и 17 соответственно. При анализе на деформацию критические точки обнаружены не были.

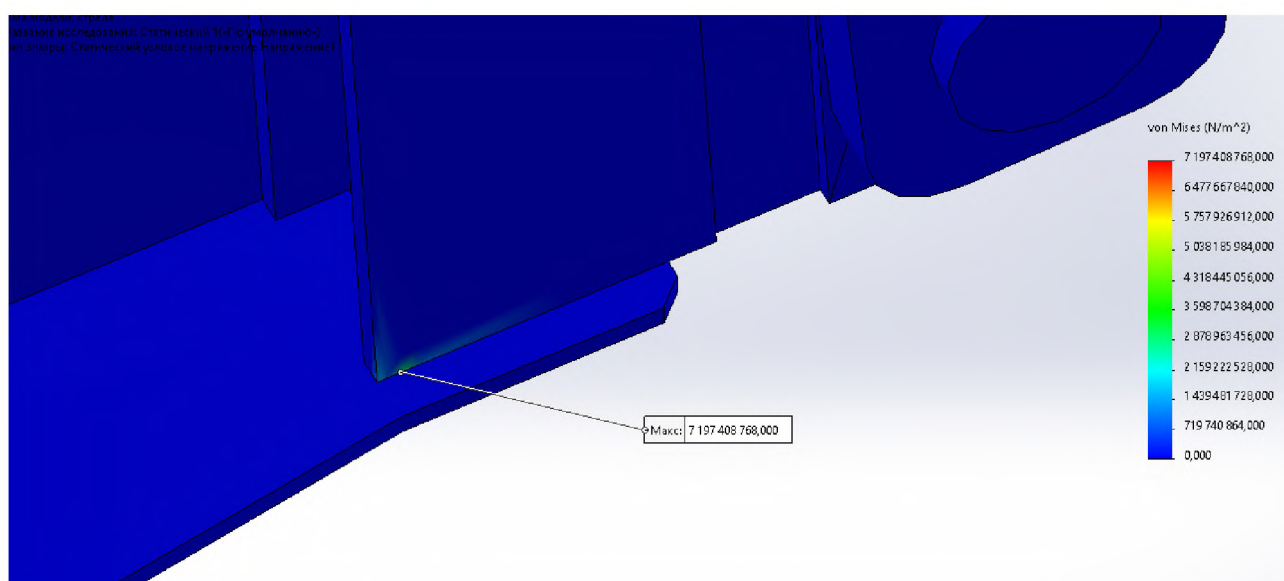


Рисунок 16 – Критическая точка при анализе напряжений

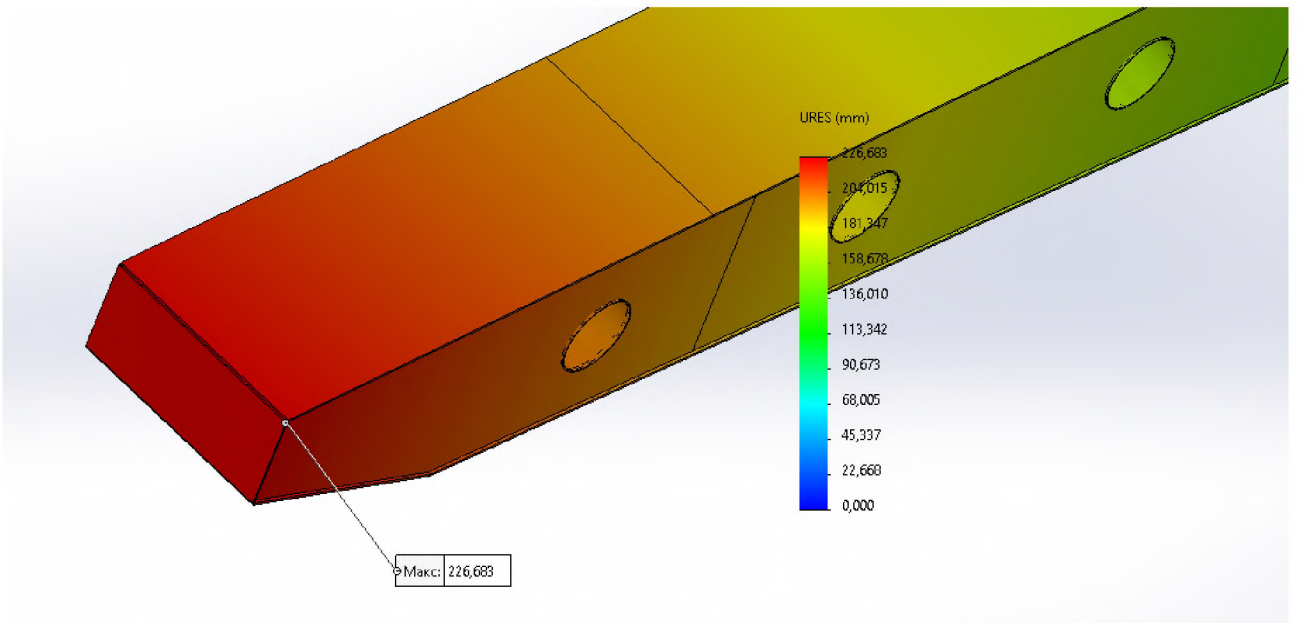


Рисунок 17 – Критическая точка при исследовании перемещений

3 АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТАХ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Дефекты сварных металлических конструкций, а именно трещины, непровары, полости, подрезы, и прожоги являются большими сосредоточениями напряжений, приводящими при эксплуатации к увеличению уровней напряжений в зонах дефектов сварных соединений в несколько раз, относительно номинальных значений напряжений при этой же эксплуатации. Дефекты часто становятся причиной разрушения конструкции при относительно низких уровнях рабочих нагрузок [8]. Для недопущения возникновения и развития аварийных ситуаций, на практике часто проводят модальные испытания конструкций.

Модальные испытания (модальный анализ) представляют собой процесс экспериментального определения основных динамических характеристик: частот собственных колебаний и форм колебаний. Суть модального анализа состоит в том, что сигналы вибрационного возбуждения и измеренные сигналы отклика сложной конструкции, трудные для непосредственного восприятия, преобразуются в набор легко прогнозируемых модальных параметров. Проведение модального анализа возможно с применением современного пакета прикладных программ SolidWorks Simulation. В основе этого программного комплекса лежит МКЭ. Для расчета собственных частот и колебаний конструкции строят ее твердотельную конечно – элементную модель, в которой содержится вся информация о геометрии модели и граничных условиях.

Модальный анализ проводился над сварными соединениями в критических точках №1 и №2 в узлах, расположенных на удлинителе стрелы ТУА (рисунк 18).

Дуговая сварка в углекислом газе и его смесях с кислородом проводилась для металлических конструкций, при помощи плавящегося электрода, в соответствии с ГОСТ14771–76. Выделяемая сварочная смесь газов соответствует требованиям ТУ 212–002–02015259–97.

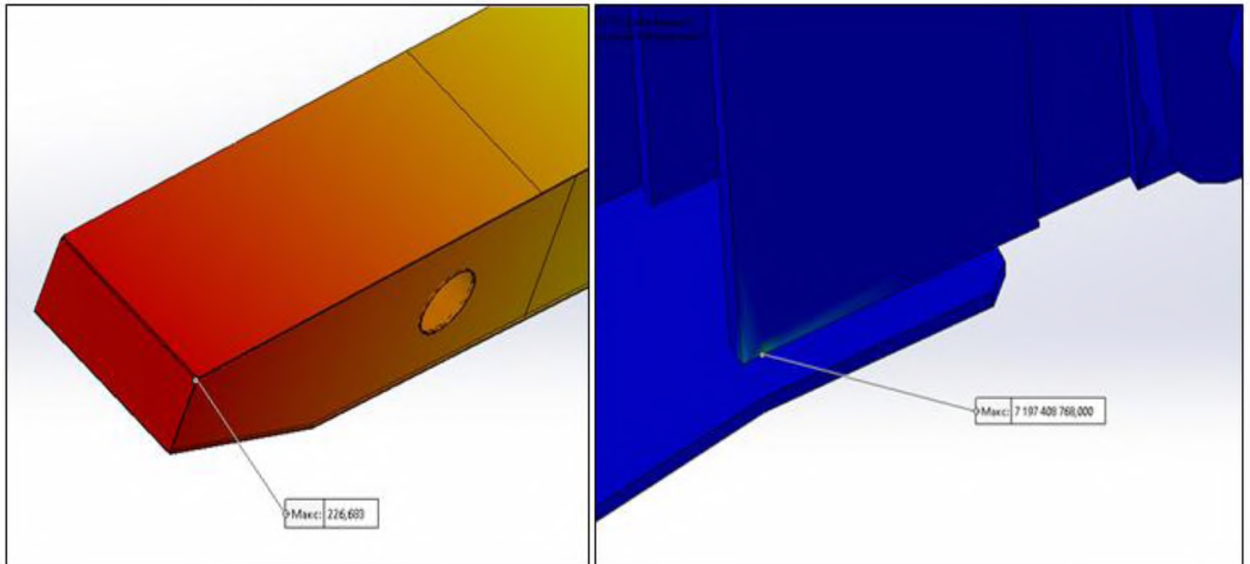


Рисунок 18 – Исследуемые критические точки: №1 – слева, №2 – справа

Рассмотрим влияние дефектов сварных швов на собственные частоты колебаний в критической точке №1:

- Выбираем и вычерчиваем из сборки удлинителя стрелы отдельно нужные элементы (рисунок 19);

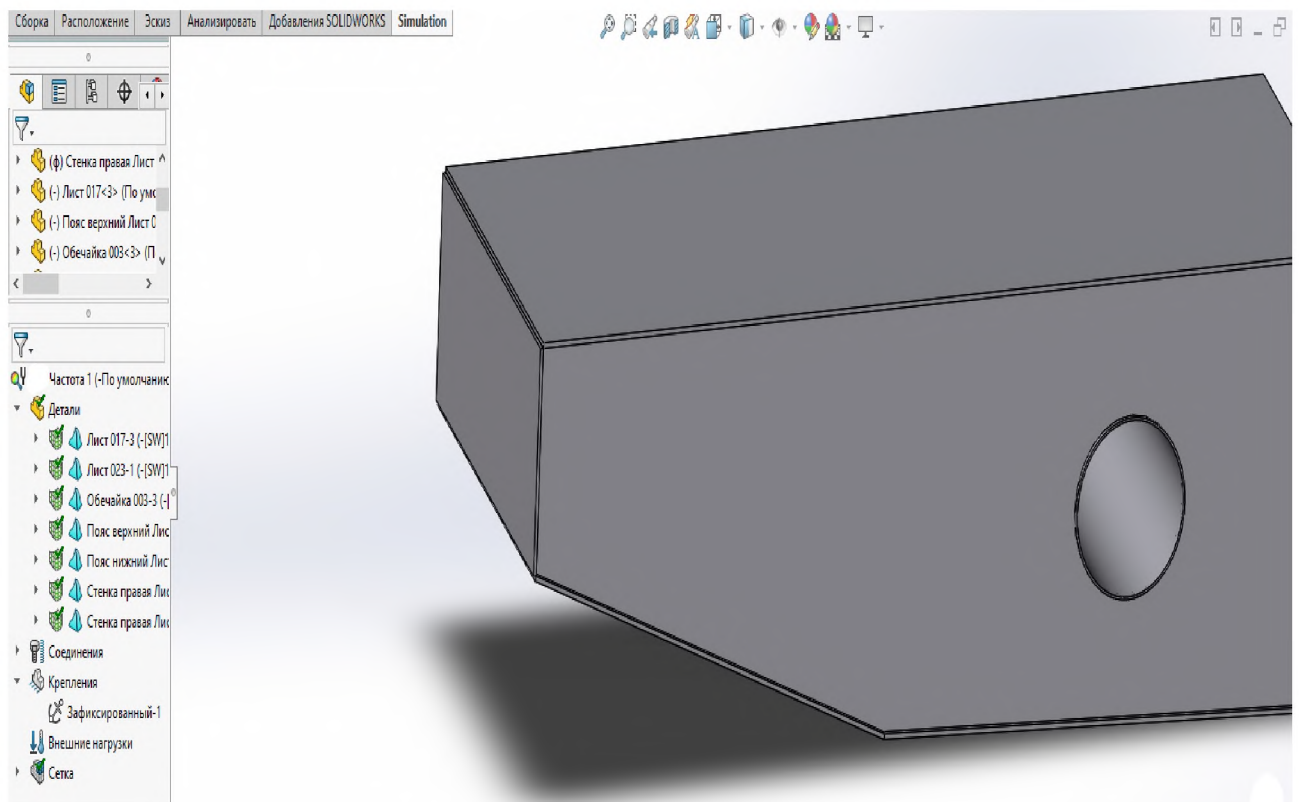


Рисунок 19 – Выбранные элементы

- Прикладываем сварное соединение (рисунок 20);

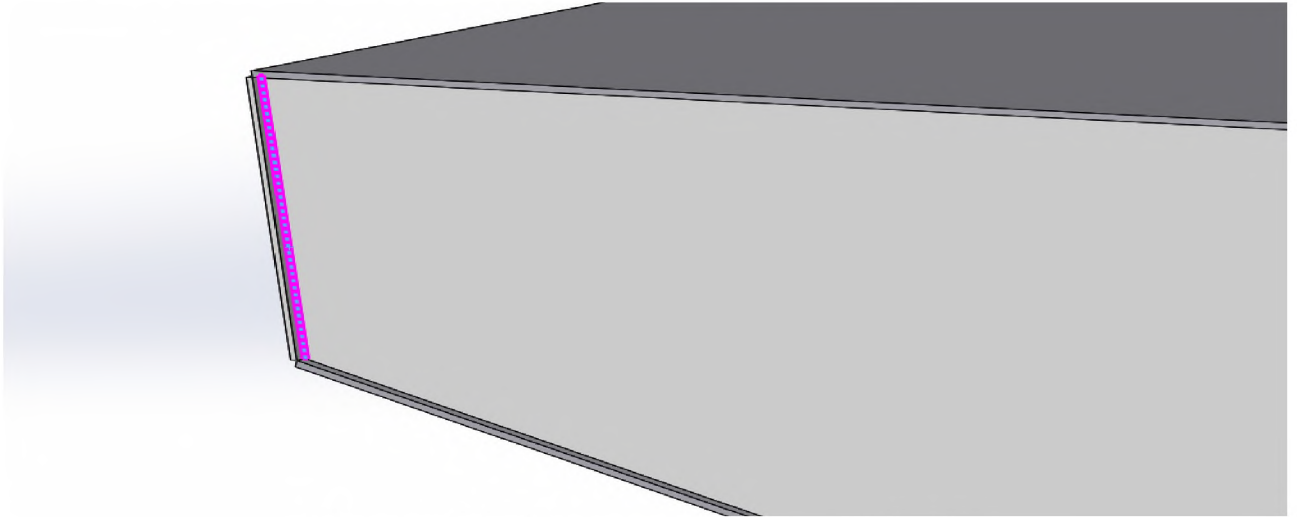


Рисунок 20 – Приложенный сварной шов

- Выбираем материал детали;
- Строим сетку;
- Прикладываем граничные условия, в данном случае это закрепления;
- Проводим модальное исследование (рисунок 21 и 22).

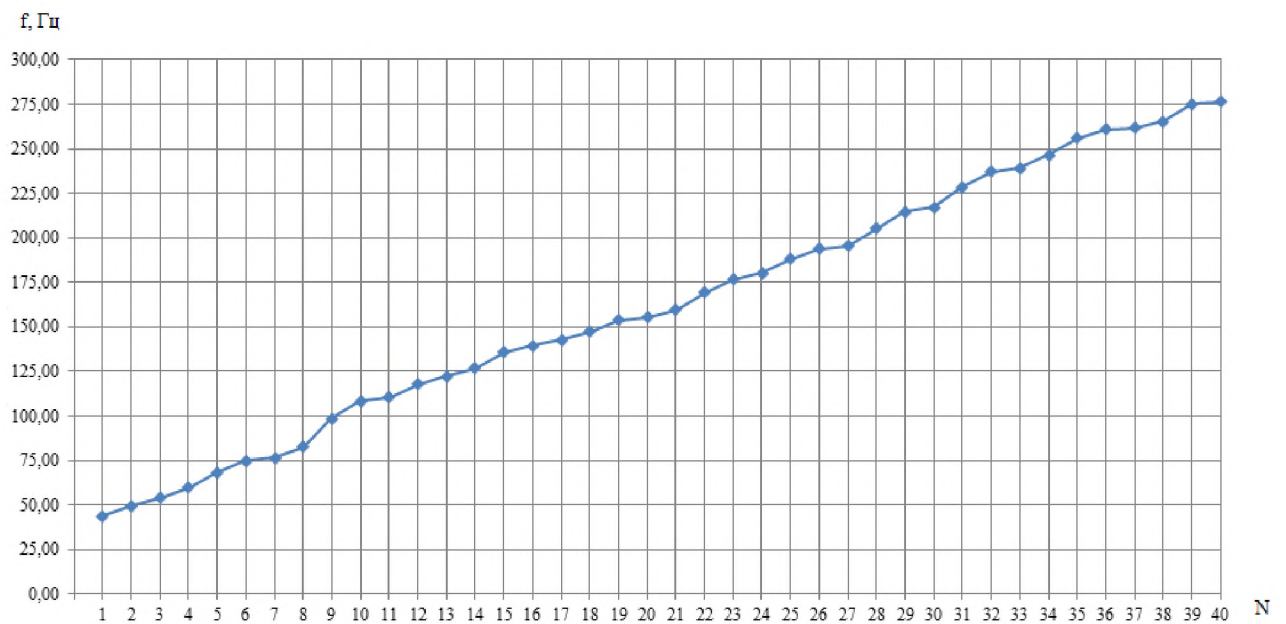


Рисунок 21 – Результаты модального исследования (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

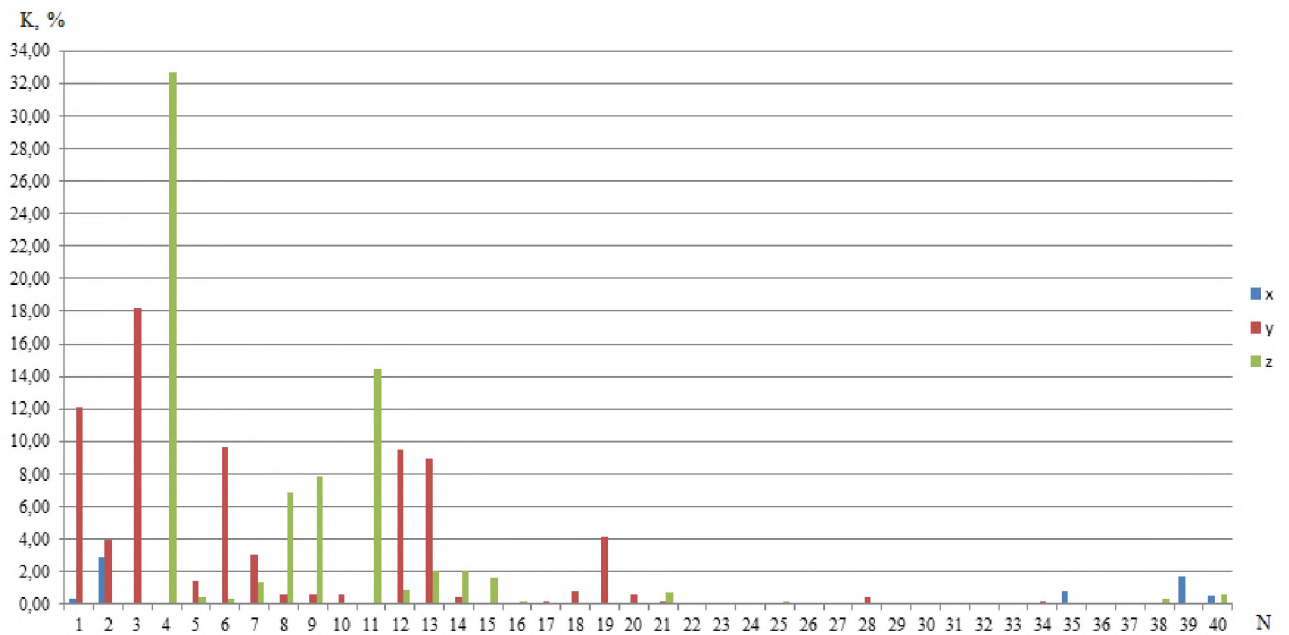


Рисунок 22 – Результаты модального исследования (график зависимости коэффициента массового участия K от номера режима N)

На следующем этапе отображаем дефекты, которые возможны в данный момент: трещина (рисунок 23) и полость (рисунок 24).

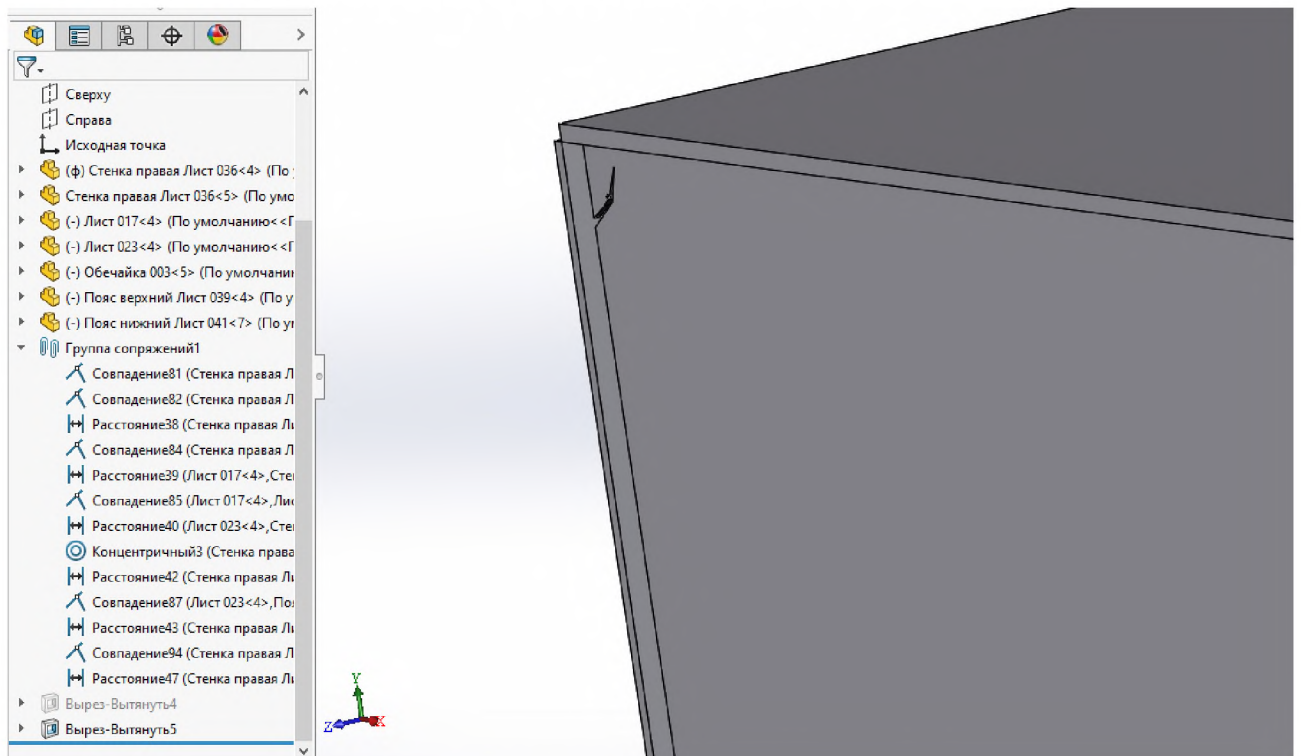


Рисунок 23 – Дефект в виде трещины

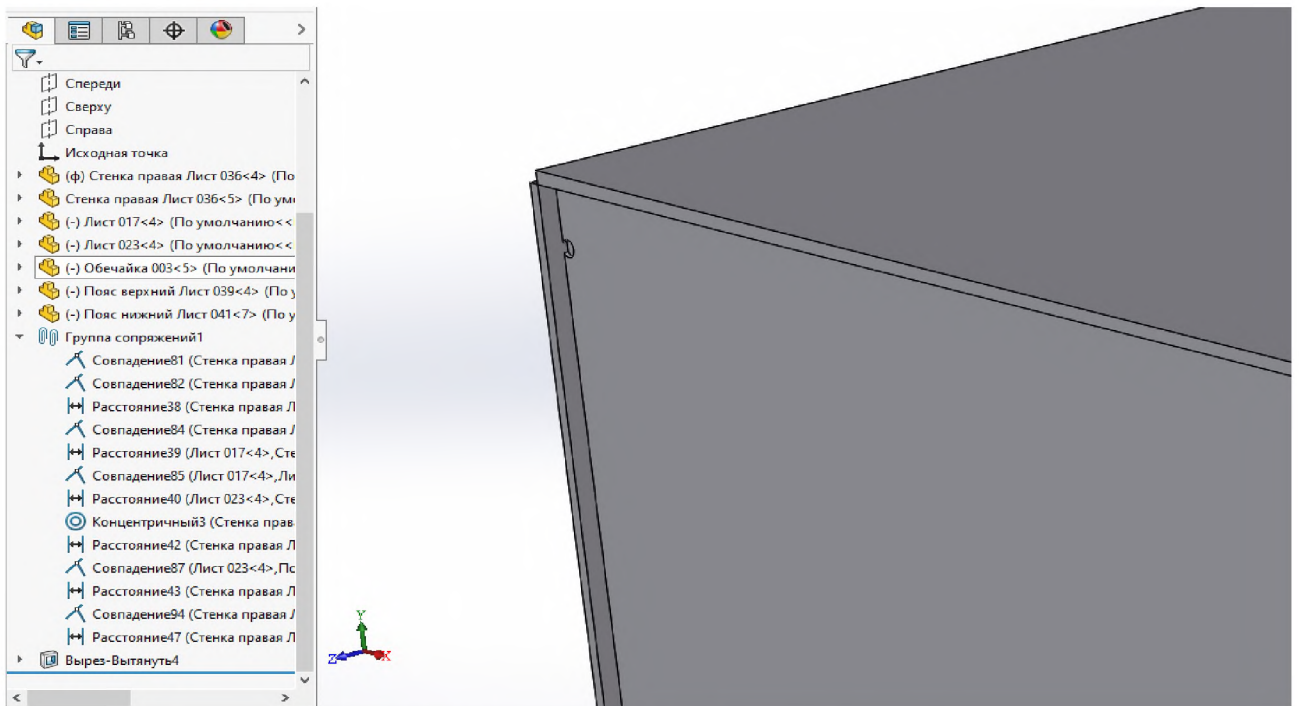


Рисунок 24 – Дефект в виде полости

При проведении модального исследования требуемой детали в критической точке №1 с каждым из возможных дефектов получим результаты, которые представлены на рисунках с 25 по 28 и таблицы 6.

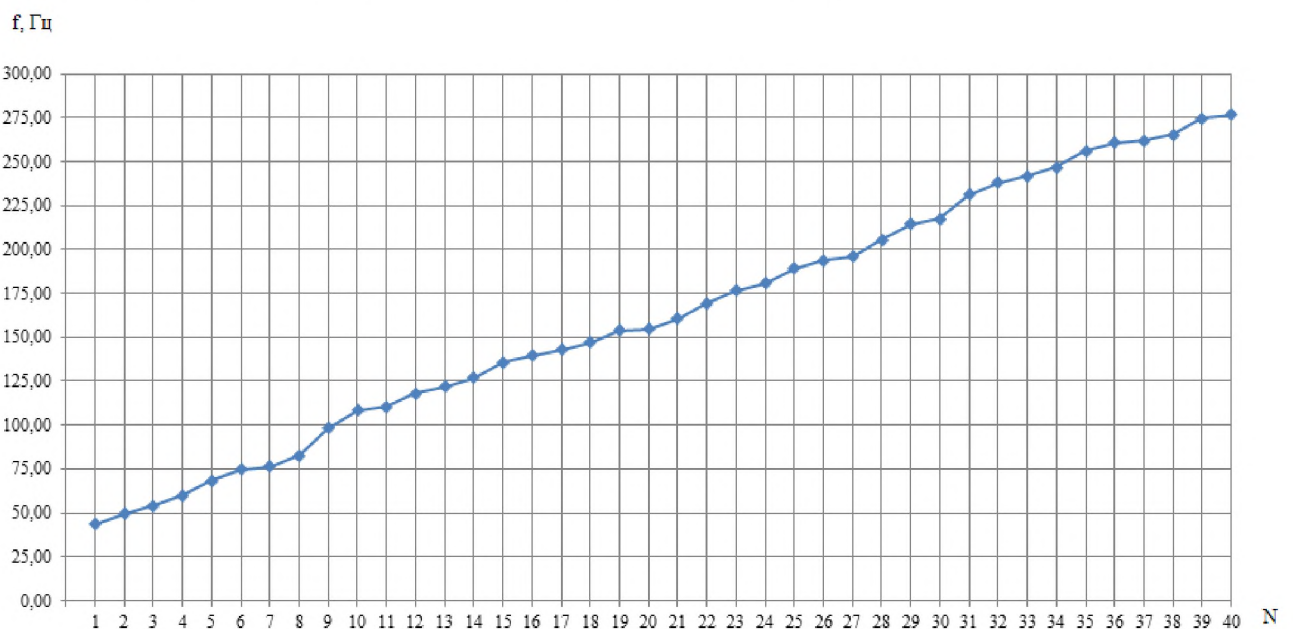


Рисунок 25 – Результаты модального исследования с дефектом в виде трещины (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

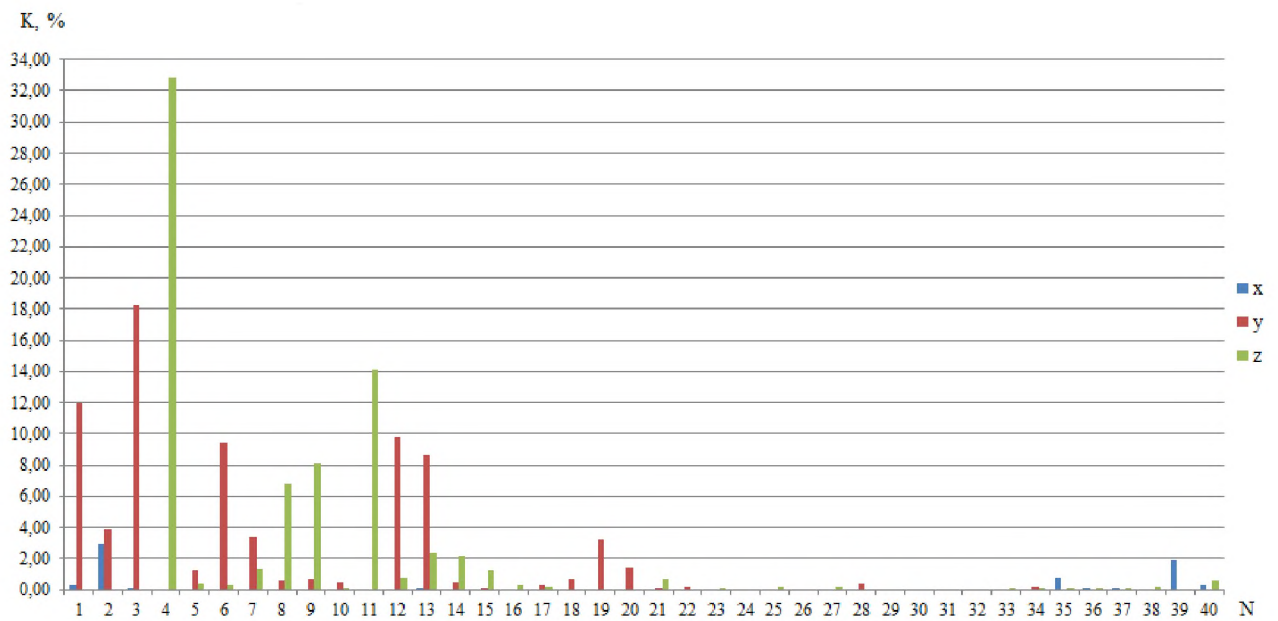


Рисунок 26 – Результаты модального исследования с дефектом в виде трещины (график зависимости коэффициента массового участия K от номера режима N)

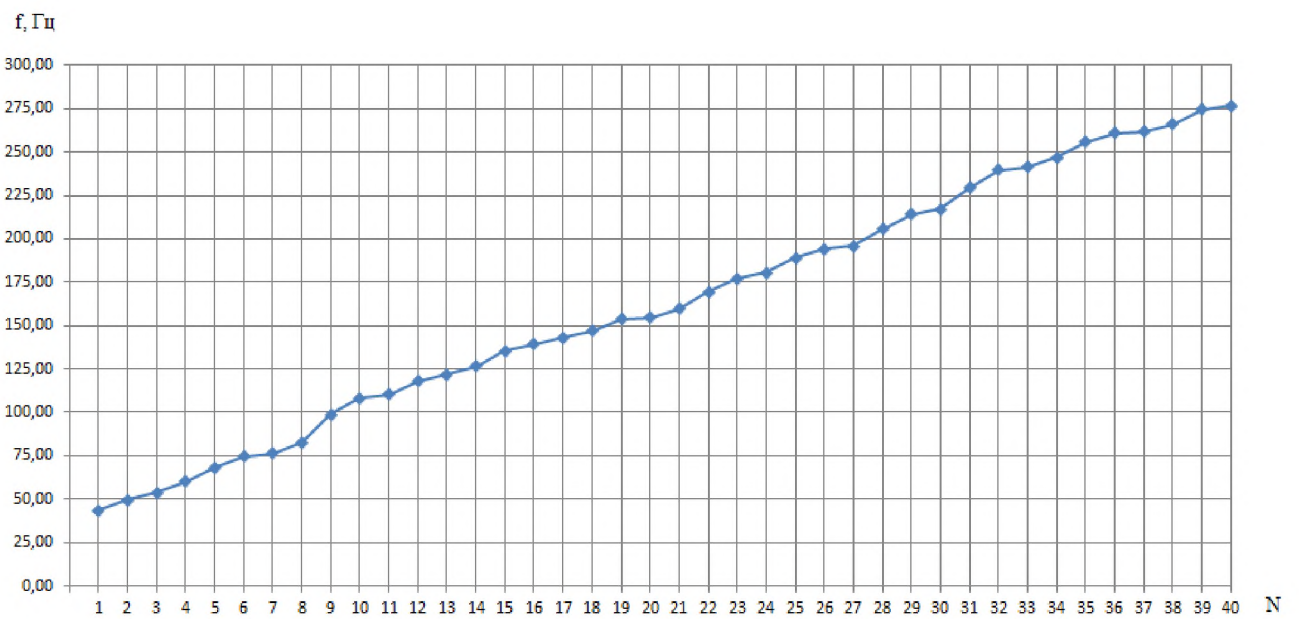


Рисунок 27 – Результаты модального исследования с дефектом в виде полости (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

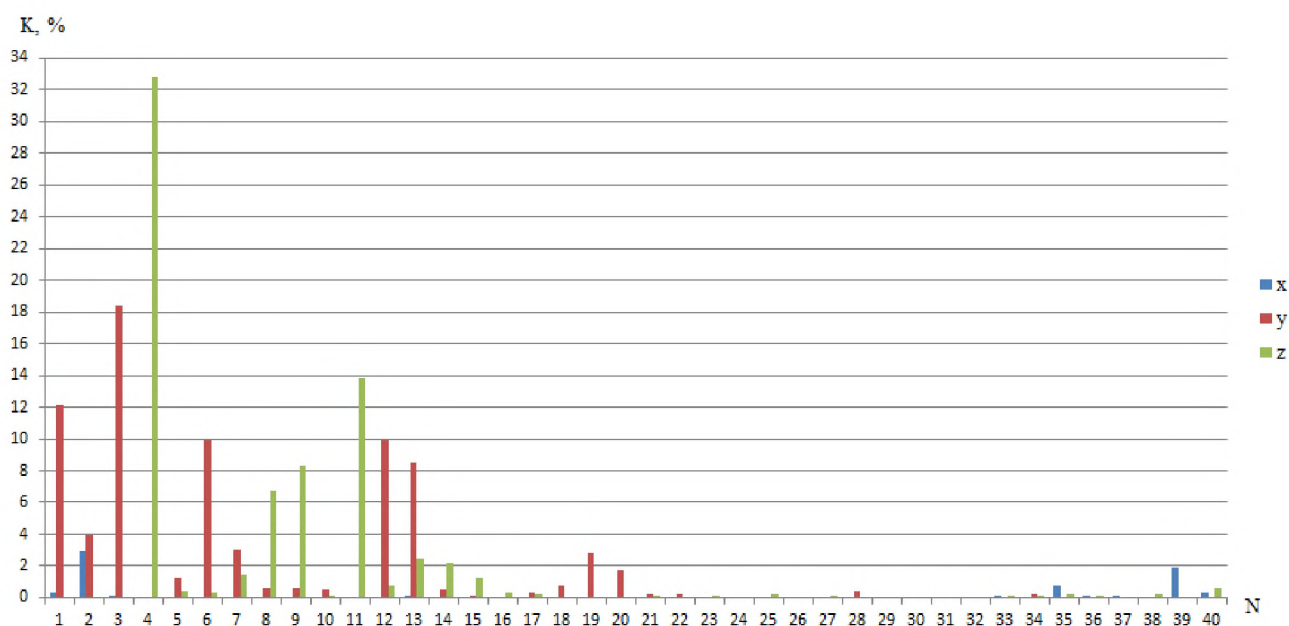


Рисунок 28 – Результаты модального исследования с дефектом в виде полости (график зависимости коэффициента массового участия К от номера режима N)

Таблица 6 – Сводные результаты исследований в критической точке №1

№	Значение собственных частот без дефекта, Гц	Значение собственных частот с дефектом в виде трещины, Гц	Значение собственных частот с дефектом в виде полости, Гц	$\delta_{\text{ТРЕЩИНА}}, \%$	$\delta_{\text{ПОЛОСТЬ}}, \%$
1	43,68	43,54	43,55	0,32	0,29
2	49,58	49,39	49,34	0,37	0,50
3	53,89	53,90	53,93	0,03	0,08
4	59,89	59,99	60,03	0,18	0,23
5	68,43	68,26	68,37	0,26	0,09
6	74,84	74,76	74,81	0,09	0,04
7	76,36	76,36	76,45	0,00	0,11
8	82,71	82,70	82,73	0,01	0,02
9	98,36	98,44	98,67	0,11	0,31
10	108,43	108,37	108,40	0,06	0,03
11	110,31	110,30	110,37	0,01	0,05
12	117,80	117,94	118,03	0,12	0,19
13	122,11	121,97	122,00	0,12	0,09
14	126,91	126,74	126,73	0,13	0,14
15	135,72	135,62	135,52	0,07	0,15
16	139,61	139,45	139,45	0,12	0,12
17	142,78	143,03	143,03	0,18	0,18
18	147,12	147,15	146,98	0,02	0,09

19	153,81	153,96	153,87	0,09	0,04
20	155,37	154,79	154,59	0,37	0,50
21	159,64	160,73	159,87	0,68	0,14
22	169,45	169,43	169,53	0,01	0,05
23	176,59	176,61	177,27	0,01	0,39
24	180,25	180,63	180,75	0,21	0,28
25	187,95	189,09	189,03	0,61	0,58
26	193,90	193,94	194,05	0,02	0,08
27	195,66	195,91	195,89	0,13	0,12
28	205,42	205,61	205,57	0,09	0,07
29	214,59	214,31	214,30	0,13	0,14
30	217,20	217,29	217,31	0,04	0,05
31	228,76	231,35	229,48	1,13	0,32
32	237,38	238,06	239,91	0,29	1,07
33	239,29	241,70	241,34	1,01	0,86
34	246,47	246,94	246,74	0,02	0,11
35	256,01	255,99	256,07	0,01	0,02
36	261,09	260,83	260,93	0,10	0,06
37	261,70	261,80	261,92	0,04	0,08
38	265,22	265,56	265,93	0,13	0,27
39	275,27	274,70	274,58	0,21	0,25
40	276,60	276,66	276,66	0,02	0,02

Проведем подобное исследование для детали в критической точке №2:

- Выбираем и вычерчиваем из сборки удлинителя стрелы отдельно нужные элементы (рисунок 29);

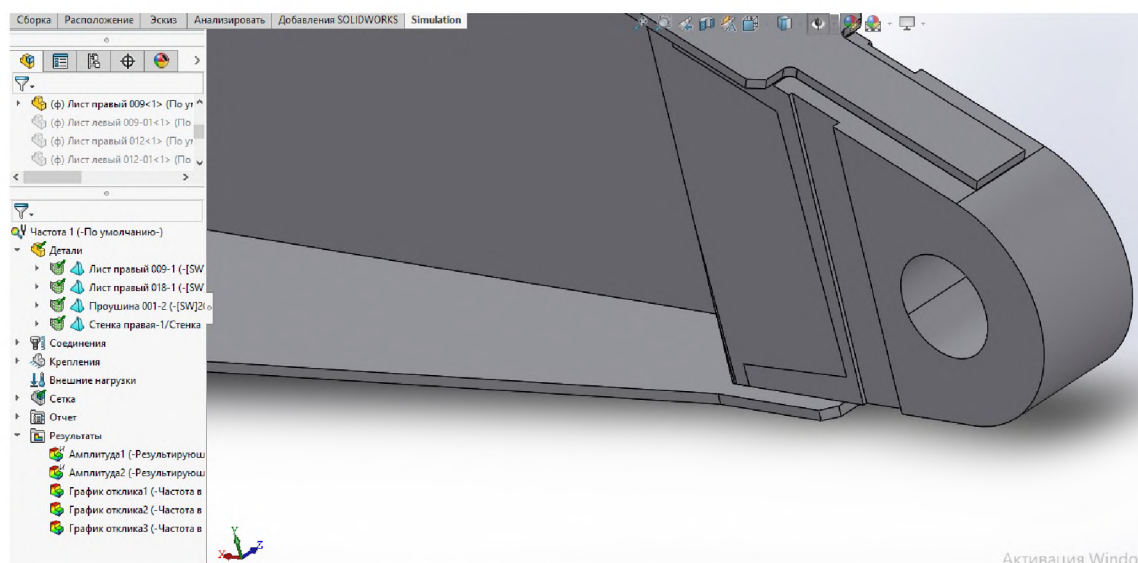


Рисунок 29 – Выбранные элементы

- Прикладываем сварное соединение (рисунок 30);

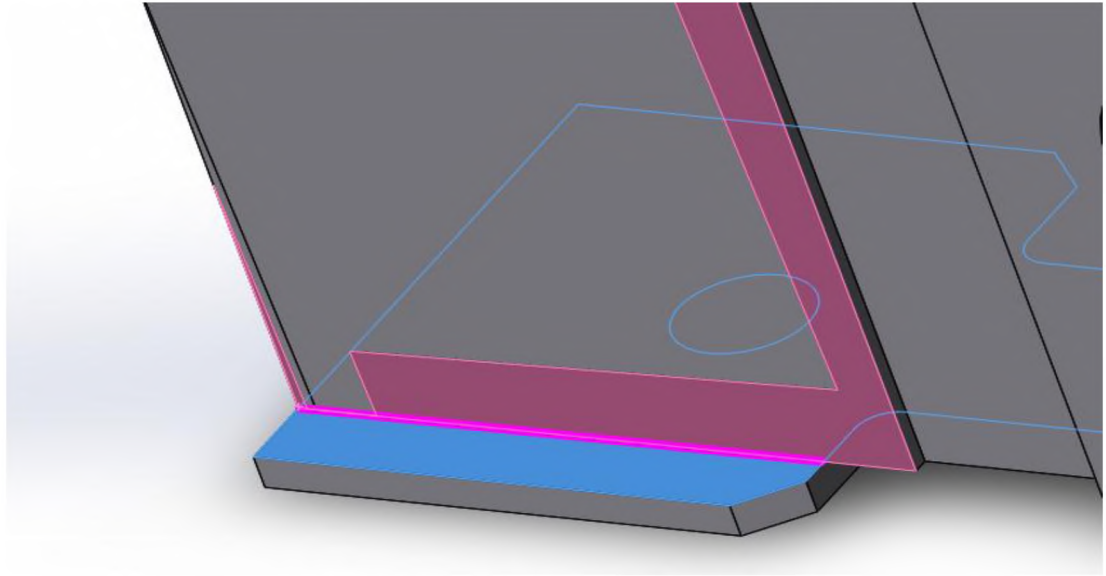


Рисунок 30 – Сварное соединение

- Выбираем материал детали;
- Строим стеку;
- Прикладываем требуемые граничные условия, в данном случае это закреплениа;
- Проводим модальное исследование (рисунки 31 и 32);

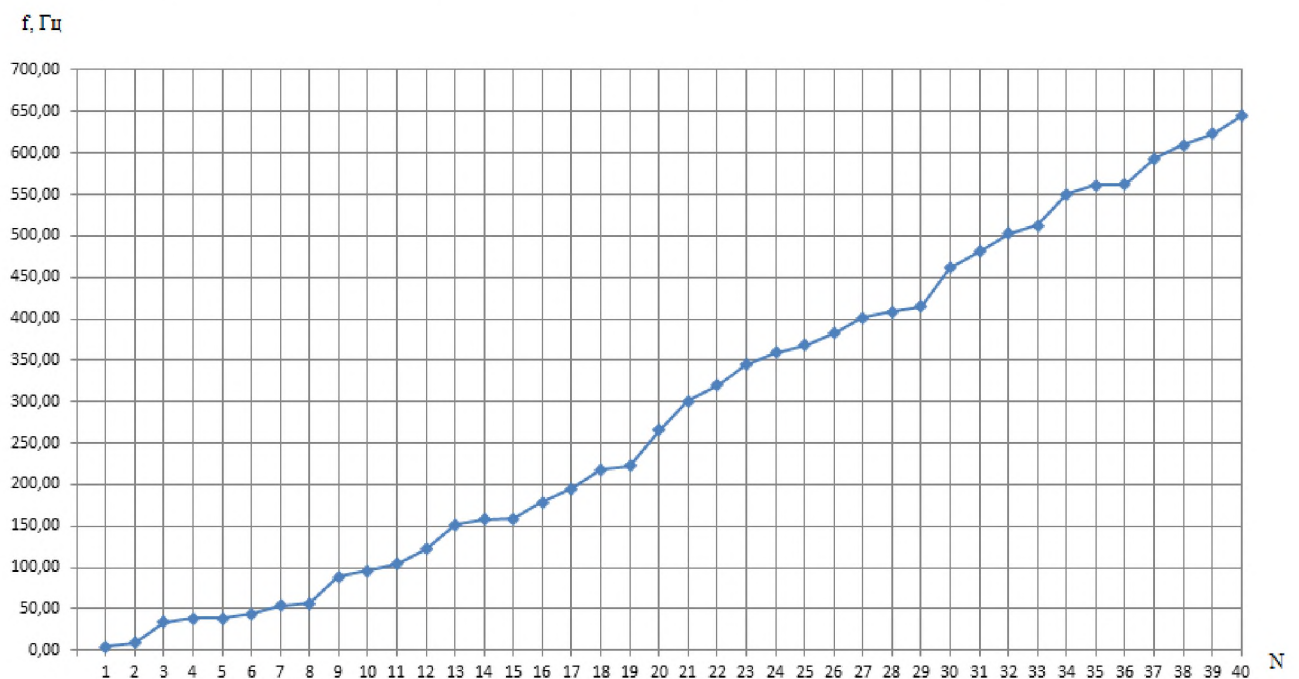


Рисунок 31 – Результаты модального исследования (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

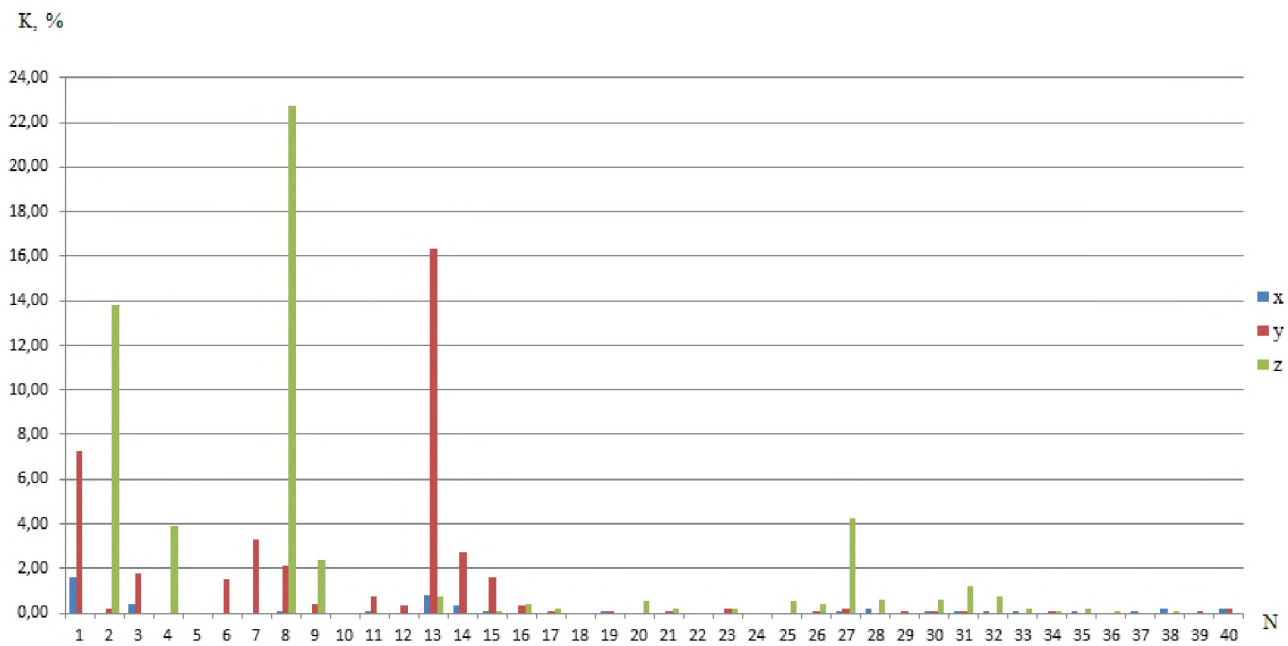


Рисунок 32 – Результаты модального исследования (график зависимости коэффициента массового участия K от номера режима N)

- Отображаем дефекты, которые возможны: трещину и полость (рисунки 33 и 34);

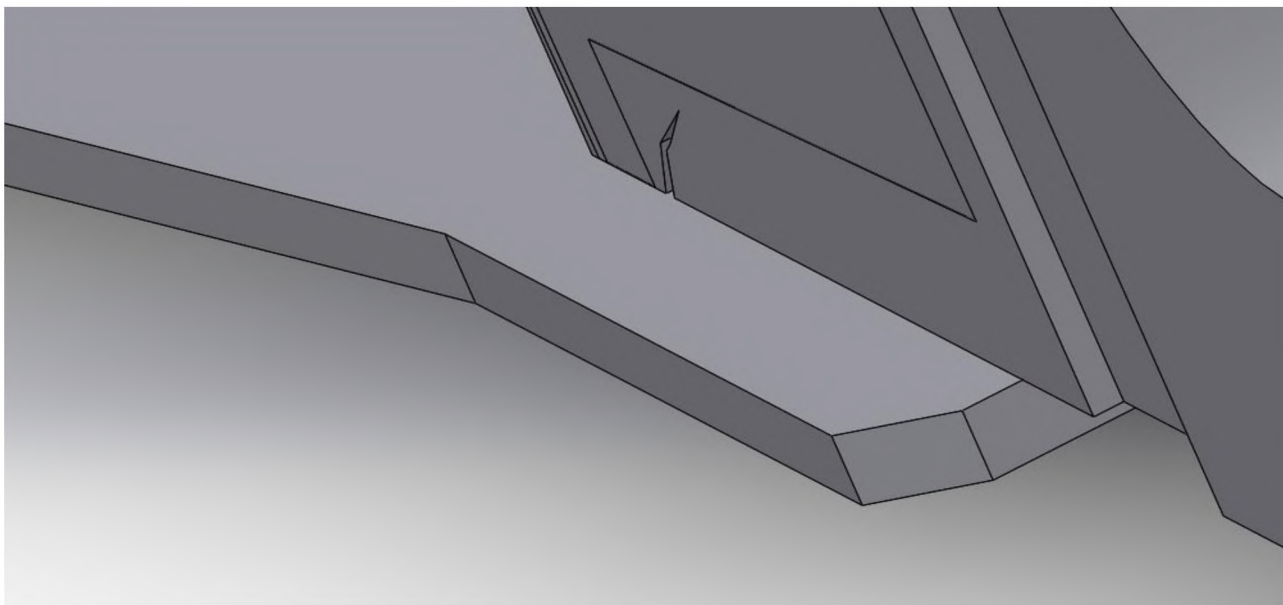


Рисунок 33 – Дефект в виде трещины

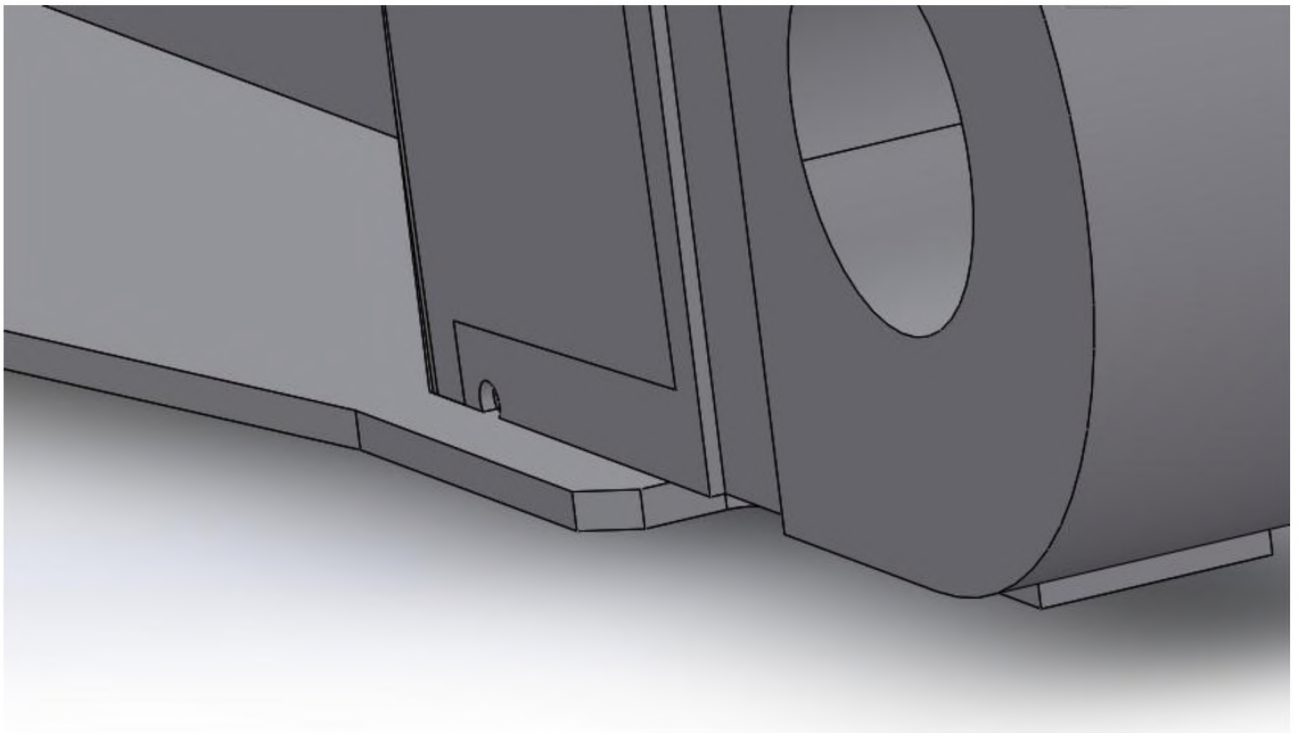


Рисунок 34 – Дефект в виде полости

- При проведении модального исследования требуемой детали в критической точке №2 с каждым из возможных дефектов получим результаты, которые представлены на рисунках с 35 по 38 и таблицы 7.

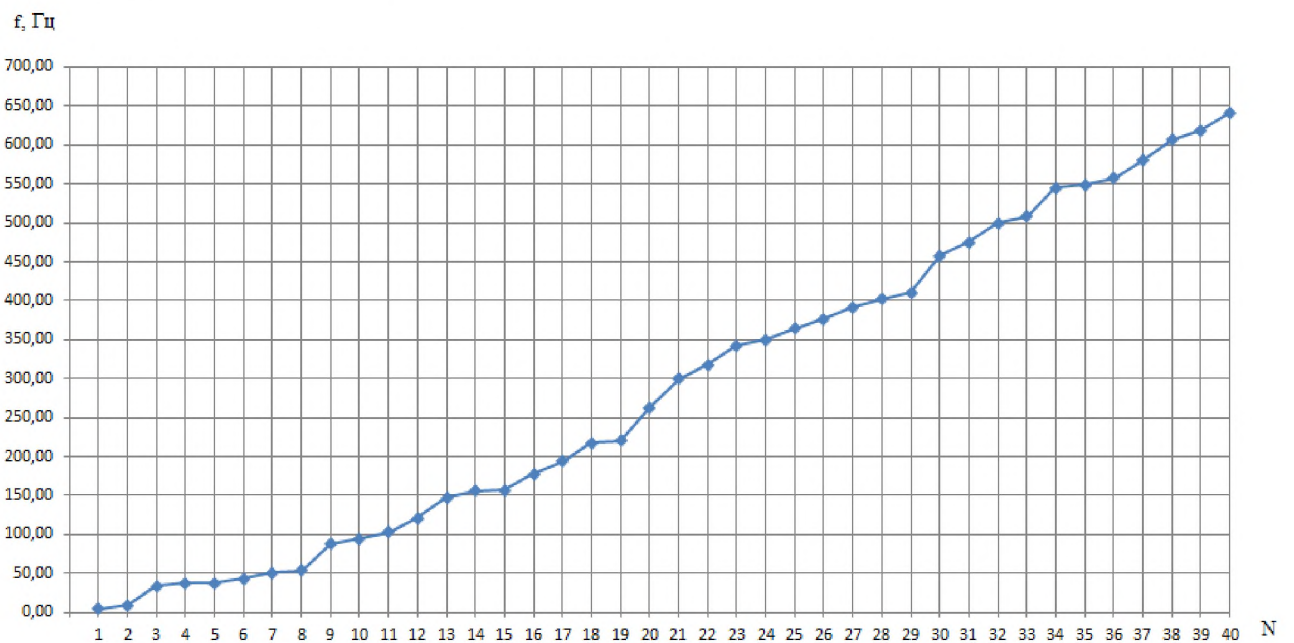


Рисунок 35 – Результаты модального исследования с дефектом в виде трещины (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

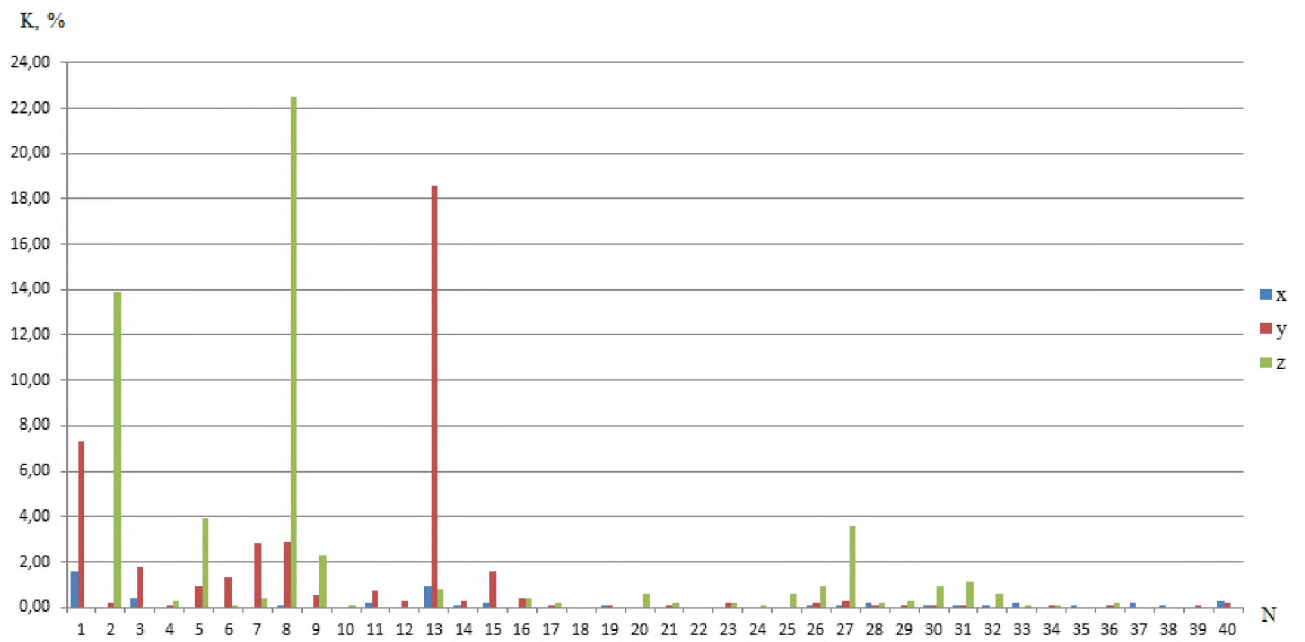


Рисунок 36 – Результаты модального исследования с дефектом в виде трещины (график зависимости коэффициента массового участия K от номера режима N)

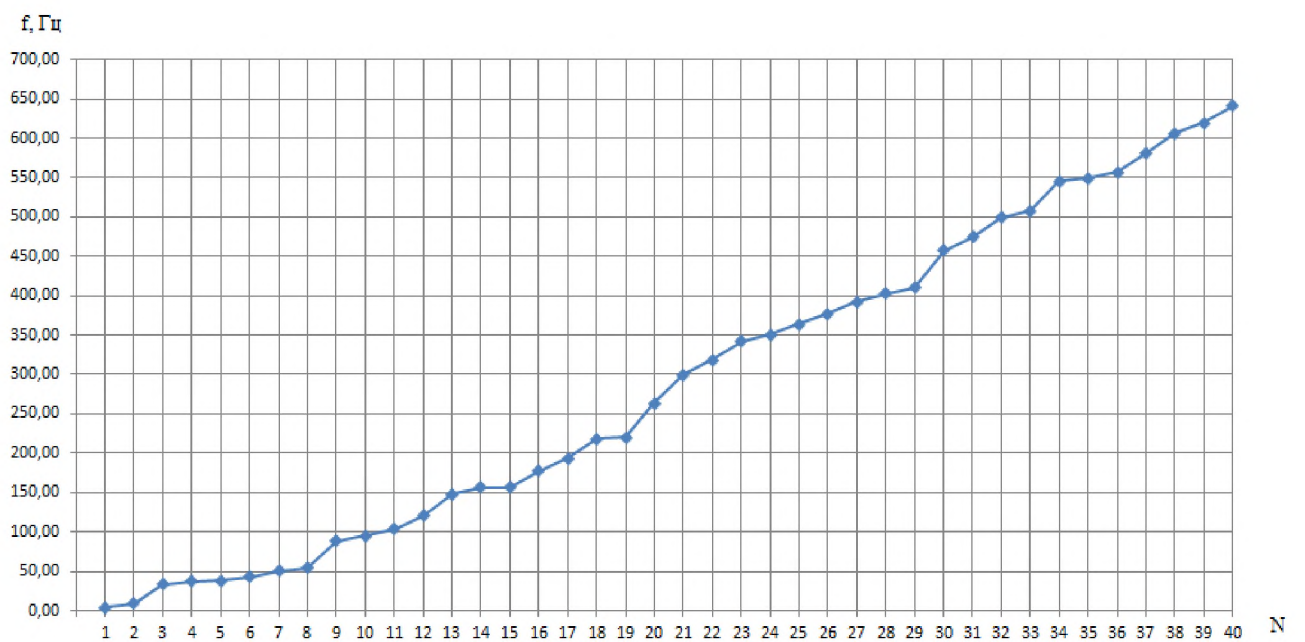


Рисунок 37 – Результаты модального исследования с дефектом в виде полости (график зависимости значений частоты f от номера режима N)

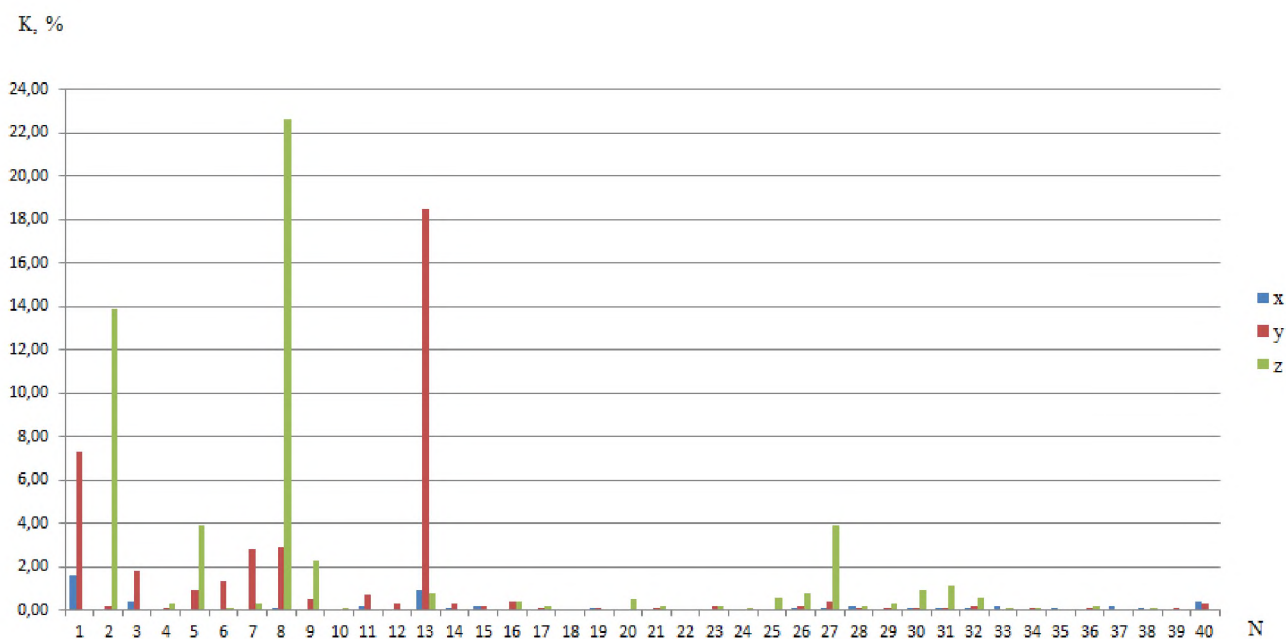


Рисунок 38 – Результаты модального исследования с дефектом в виде полости (график зависимости коэффициента массового участия К от номера режима N)

Таблица 7 – Сводные результаты модальных исследований в критической точке №2

№	Значение собственных частот без дефекта, Гц	Значение собственных частот с дефектом в виде трещины, Гц	Значение собственных частот с дефектом в виде полости, Гц	$\delta_{\text{ТРЕЩИНА}}, \%$	$\delta_{\text{ПОЛОСТЬ}}, \%$
1	4,57	4,52	4,52	1,09	1,09
2	9,14	9,07	9,07	0,77	0,77
3	34,06	33,81	33,81	0,73	0,73
4	38,31	37,54	37,56	2,01	1,96
5	38,64	38,10	38,10	1,39	1,39
6	43,69	43,51	43,51	0,41	0,41
7	53,55	50,72	50,75	5,29	5,23
8	56,25	54,20	54,23	3,64	3,59
9	88,93	88,07	88,08	0,97	0,96
10	95,67	95,01	95,03	0,69	0,67
11	104,35	103,43	103,45	0,88	0,86
12	121,71	121,09	121,10	0,51	0,50
13	151,58	147,77	147,83	2,51	2,47
14	157,91	156,20	156,22	1,08	1,07
15	159,09	156,82	156,86	1,43	1,40
16	178,55	177,38	177,40	0,66	0,64

17	194,68	193,80	193,81	0,45	0,45
18	218,53	217,68	217,73	0,39	0,37
19	222,76	220,08	220,13	1,20	1,18
20	265,71	263,41	263,26	0,87	0,92
21	301,05	299,97	300,00	0,36	0,35
22	319,87	317,97	318,08	0,59	0,56
23	344,86	342,42	342,46	0,71	0,69
24	358,87	350,32	350,51	2,38	2,33
25	368,21	364,16	364,14	1,10	1,11
26	382,18	376,91	376,83	0,38	1,40
27	401,63	392,06	392,28	2,38	2,33
28	408,45	402,13	402,28	1,55	1,51
29	414,55	410,16	410,15	1,06	1,06
30	461,26	457,56	457,76	0,80	0,76
31	481,25	474,81	474,85	1,34	1,33
32	502,84	499,55	499,54	0,65	0,66
33	513,05	508,06	507,85	0,97	1,01
34	550,09	545,10	545,06	0,91	0,91
35	561,48	549,22	549,46	2,18	2,14
36	562,30	557,24	557,13	0,90	0,92
37	593,54	580,04	580,30	2,27	2,23
38	610,00	606,04	606,04	0,65	0,65
39	622,86	618,94	618,87	0,63	0,64
40	644,98	641,19	641,23	0,59	0,58

Таким образом, определено, что наличие дефекта в сварном шве влияет на изменение собственной частоты исследуемой детали. В критической точке №1 значения собственных частот изменяются почти на 1,5%, а в критической точке №2 – почти на 3%.

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТО

Проведение работ по техническому обслуживанию гарантируют поддержание транспортно – установочного агрегата в полном техническом состоянии на протяжении всех циклов работы.

Замена отработанных элементов ТУА проводится на гарантийных условиях, по технологическим картам, из комплекта ЗИП. Если гарантийный срок данных элементов истекает, но при этом раньше они функционировали нормально, то, до проведения очередного частичного технического освидетельствования, разрешено использовать эти элементы в составе ТУА.

Соблюдение следующих указаний ТБ позволяет лицам, изучившим инструкцию по эксплуатации, проводить ТО ТУА:

- Обслуживание проводится на свободной площадке, оборудованной пожарными средствами тушения и освещенной по все площади;
- Осуществление работ по обслуживанию ТУА запрещено при установке и подъеме грузов;
- Без команды руководителя работ не производятся никакие работы с ТУА;
- При нахождении неисправностей, обнаруженных в ходе осмотра, немедленно докладывается руководителю работ, а так же подается команда «Стоп»;
- Команда «Стоп» должна быть выполнена всеми номерами расчета;
- Запрещено находиться на платформе ТУА, если при этом производится поднятие стрелы в отвесное состояние;
- Проведение всех работ осуществляется только исправным инструментом;
- Разрешается проводить работы по ТО электрического оборудования лицам в количестве двух человек;
- Запрещено осуществлять любые работы над электрическим оборудованием, если на нем присутствует напряжение;

- Разрешено подключение ТУА к колонке питания, если установлен заземляющий провод;
- Только при снятом напряжении разрешается проводить работы по регулировке узлов электрооборудования и осмотр токоведущих частей;
- При наличии давления в гидроприводе запрещено заменять или регулировать гидравлическую аппаратуру;
- При подтягивании резьбовых соединений запрещено использование удлинителей;
- Запрещено использование гидравлического привода, если существуют какие – либо неисправности в манометрах;
- При появлении течи в гидравлическом приводе нельзя его включать до замены узла;
- Подъемные средства, гарантийный срок которых не истек, используются только при монтаже и демонтаже узлов;
- Детали, вес которых больше 30 кг, запрещено поднимать и переносить одному человеку;
- Хранение обтирочных материалов на площадке проведения ТО ТУА запрещено;
- Хранение уже использованной ветоши осуществляют в специальных закрытых ящиках, хранение ветоши на открытом воздухе запрещено;
- Наличие на ТУА, каких – либо других предметов, обнаруженных после проведения ТО, запрещено;
- Если в гидравлическом приводе имеется давление, то запрещено подтягивать соединения;
- Если скорость ветра больше, чем 15 м/с, то запрещено поднимать стрелу с грузом или без него;
- Если у обслуживающего персонала присутствует одежда из синтетических тканей, а также изделия, аккумулирующие заряды статического электричества, то ношение такой одежды и изделий запрещено;
- Если у обслуживающего персонала присутствует обувь и одежда, вы-

зывающие искрообразование, то запрещено ношение такой одежды и обуви.

4.1 Объем работ при еженедельном ТО

При еженедельном ТО ТУА производят следующие действия:

- Очистка узлов и деталей ТУА от осадков, в зависимости от погодных условий;
- Проведение ремонта чехлов ТУА, если во время проверки были обнаружены нарушения их целостности;
- Осуществление проведения внешнего досмотра гидравлического привода, а также проверка технической жидкости в соединениях гидравлического привода;
- Если во время проведения внешнего досмотра гидравлического привода обнаружены неисправности, то их нужно устранить;
- Проверка и, если требуется, наладка технического состояния габаритных электрических светильников;
- Контроль и внешний осмотр прочности закрепления электрических кабелей, при этом не разрешается расслабление закреплений;
- Контроль опломбирования элементов.

4.2 Объем работ при ежемесячном ТО

При ежемесячном ТО ТУА производят следующие действия:

- Осуществление работы в размере недельного ТО ТУА;
- Осуществление проведения внешнего досмотра металлических конструкций ТУА на отсутствие дефектов в сварных соединениях;
- При обнаружении дефектов во время проверки состояния окрашенных поверхностей проводят их подкраску;
- Контроль и внешний осмотр прочности резьбовых соединений, находящихся на стреле, при обнаружении не полной затяжки резьбовых соединений их нужно подтянуть специальным инструментом;
- Проверка и, если требуется, заливка рабочей жидкости в гидравлических баках насосных станций, при этом контролирование заливки осуществляется по красным меткам масло – указательных окон;

- Заливка жидкости проводится через заливную горловину через хлопчатобумажную ткань, предварительно сложенной в два раза, из заводской тары. Заводскую тару вскрывают непосредственно перед заливкой;

- Если во время проведения внешнего осмотра пультов управления и, расположенного в них, электрического оборудования обнаружены неисправные элементы, их заменяют из комплекта ЗИП.

4.3 Объем работ по ТО перед работой с изделием

Перед работой с изделием на ТУА устанавливают одну из верхних опор и грузы для средней опоры.

При ТО ТУА перед работой с изделием проводят следующие действия:

- Осуществление проведения внешнего осмотра металлических конструкций ТУА на отсутствие дефектов в сварных соединениях;

- При обнаружении дефектов во время проверки состояния окрашенных поверхностей проводят их подкраску;

- Контроль и внешний осмотр прочности резьбовых соединений, находящихся на стреле, при обнаружении не полной затяжки резьбовых соединений их нужно подтянуть специальным инструментом;

- Если гидравлический привод ТУА проводит более 20 циклов работы, то производится проверка сроков чистки фильтров;

- Проверка и, если требуется, заливка рабочей жидкости в гидравлических баках насосных станций, при этом контролирование заливки осуществляется по красным меткам масла – указательных окон;

- Если во время проведения внешнего осмотра пультов управления и, расположенного в них, электрического оборудования обнаружены неисправные элементы, их заменяют из комплекта ЗИП;

- Проверка герметичности гидропривода, при этом возможно совмещение проверки на герметичность и проверку ТУА на функционирование;

- Если стрела ТУА находится в продольном состоянии, то нужно проверить положения стрелки указателя крена стрелы, положение стрелки должно совпадать с нулевой риской на шкале;

- Проверка и, если требуется, наладка технического состояния электро-светильников;
- Проверка сопротивлений изоляций аппаратного шкафа, пультов управления, пульта гидропривода и кабельной сети;
- Проверка ТУА на функционирование;
- Проведение обслуживания платформы в объеме ТО перед работой;

4.4 Объем работ при ежегодном ТО

При ежегодном ТО проводят следующие действия:

- Проведение работ в объеме ежемесячного ТО;
- Проверка и, если требуется, заливка рабочей жидкости в гидравлических баках насосных станций, при этом контролирование заливки осуществляется по красным меткам масло – указательных окон;
- Проводится очистка воздушных фильтров гидравлических баков насосных станций;
- Если гидравлический привод ТУА проводит более 20 циклов работы, то производится проверка сроков чистки фильтров, а так же их замена;
- Проводится проверка и прокачка рабочей жидкостью гидравлического привода;
- Проводится смазка всех узлов и деталей ТУА;
- Проверка манометров в контрольно-измерительной лаборатории;
- Проверка сопротивлений изоляций аппаратного шкафа, пультов управления, пульта гидропривода и кабельной сети;
- Проверка и, если требуется, наладка технического состояния электро-светильников;
- Если были заменены несколько выключателей, то проводится проверка регулировки программного механизма;
- Проверка наличия в комплекте ЗИП всех необходимых деталей, при необходимости их пополнение;
- Осуществление проведения внешнего досмотра грузового макета;
- Осуществление проведения внешнего досмотра металлических кон-

струкций ТУА на отсутствие дефектов в сварных соединениях, в случае их обнаружения проводится ремонт;

- Контроль наличия маркировки на фермах и грузах и проверка комплектности грузового макета.

5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ НА ПРОВЕДЕНИЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Модальное исследование (модальный анализ) проводится методом конечных элементов при помощи пакета прикладных программ SolidWorks Professional. Стоимость приобретения бессрочной лицензии SolidWorks Professional Network составляет 647262 рубля (с учетом НДС).

Для хорошей работы данной программы персональный компьютер должен соответствовать следующим требованиям:

1. Операционная система – Windows 10 x64;
2. Четырех – ядерный процессор с тактовой частотой 3,3 ГГц и более;
3. Оперативная память – 16 Гб (минимум 8 Гб);
4. Жесткий диск – накопитель SSD, минимум 20 Гб свободного места;
5. Видеокарта – NVIDIA Quadro или AMD Radeon.

Стоимость такого персонального компьютера со всеми комплектующими представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Стоимость персонального компьютера со всеми комплектующими

Наименование комплектующих персонального компьютера	Стоимость за единицу (без учета НДС), руб.	Сумма НДС, руб.	Стоимость за единицу (с учетом НДС), руб.
Системный блок DEXP Atlas H290 (Intel Core i3 10100F, 4x3600 МГц, 8 Гб DDR4, Radeon RX 550, SSD 512 Гб, без ОС)	27199,20	6799,80	33999,00
Лицензия Microsoft Windows 10 Professional GGK	13519,20	3379,80	16899,00
Монитор Philips 273V7QSB (27", 1920x2080, 60 Гц, IPS, 250 Кд/м ² , 178°/178°)	7599,20	1899,80	9499,00

Клавиатура проводная Oklick 130M (клавиш – 104, USB)	399,20	99,80	499,00
Мышь проводная Oklick 305M (кнопки – 3, USB)	192,00	48,00	240,00
Стоимость всех комплектующих (с учетом НДС), руб.			
61136,00			

Для проведения модального исследования также требуется объект исследования, в данном случае это стрела транспортно – установочный агрегата.

Твердотельная модель стрелы ТУА (сборка ТУА) в SolidWorks состоит из 340 деталей. В среднем на построение одной детали требуется от 10 до 15 минут рабочего времени. Так же нужно отметить, что около пяти часов понадобится на построение всей сборки ТУА (добавление деталей и расстановка сопряжений) и проведения модального исследования. Всего на данную работу понадобится приблизительно 90 часов работы.

Проведем расчет затрат, требуемых для оплаты данной работы сотруднику по формуле, представленной ниже:

$$S = S_{зп} \cdot S_{с.в.}, \quad (5)$$

где $S_{зп}$ – сумма заработной платы сотруднику, руб.;

$S_{с.в.}$ – сумма страховых взносов, руб.

$$S_{зп} = T_q \cdot n, \quad (6)$$

где T_q – тарифная ставка, руб./ч;

n – количество часов, требуемых на выполнение работы.

$$T_{\text{ч}} = \frac{S_{\text{с.м.}}}{N}, \quad (7)$$

где $S_{\text{с.м.}}$ – среднемесячная заработная плата в Амурской области за 2020 год, руб.;

N – среднемесячное количество рабочих часов.

$$S_{\text{с.в.}} = (S_{\text{с.в.}}^{\text{ОПС}} + S_{\text{с.в.}}^{\text{ОМС}} + S_{\text{с.в.}}^{\text{ВНиМ}}) \cdot S_{\text{Б}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{с.в.}}^{\text{ОПС}}$ – действующая ставка на обязательное пенсионное страхование;

$S_{\text{с.в.}}^{\text{ОМС}}$ – действующая ставка на обязательное медицинское страхование;

$S_{\text{с.в.}}^{\text{ВНиМ}}$ – действующая ставка на социальное страхование и ВНиМ;

$S_{\text{Б}}$ – база для начисления страховых взносов, равная сумме заработной платы сотруднику, руб.

$$T_{\text{ч}} = \frac{50546,7}{165} = 306,34 \text{ руб/ч.}$$

$$S_{\text{ЗП}} = 306,34 \cdot 90 = 27570,6 \text{ руб.}$$

$$S_{\text{с.в.}} = (0,22 + 0,051 + 0,029) \cdot 27570,6 = 8271,18 \text{ руб.}$$

$$S = 27570,6 + 8271,18 = 36021,78 \text{ руб.}$$

Таким образом, для проведения модального анализа твердотельной модели стрелы транспортно – установочного агрегата при помощи программного обеспечения SolidWorks Professional требуется 744419,78 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы были рассмотрены возможные дефекты в сварных соединениях при сварке стали 10ХСНД, а также влияние дефектов в сварных швах на значения резонансных частот в металлических конструкциях. Рассмотрено напряженно – деформированное состояние стрелы транспортно – установочного агрегата. Была изучена техника безопасности при проведении технического обслуживания и объем работ при еженедельном, ежемесячном и ежегодном техническом обслуживании. А так же определены экономические затраты на проведение модального анализа.

В результате бакалаврской работы были сделаны следующие выводы:

1. К стреле ТУА, в ходе расчета НДС, были приложены максимальные нагрузки. В результате расчетов обнаружены критические точки в узлах 428504, 353204. В них максимальное значение напряжения составило $7197408768,000 \text{ Н/м}^2$ или 7,197 МПа, а максимальное значение перемещения – 226,683 мм. Выявлено, что стрела ТУА при наложении всех максимальных нагрузок выдерживает их;

2. Установлено, что дефекты в сварных соединениях влияют на значения собственных частот конструкции. Значения собственных частот с дефектами в виде трещины и полости в критической точке №1 изменяются почти на 1,5%, а в критической точке №2 – почти на 3%.

3. Рассчитано, что для проведения модального анализа твердотельной модели стрелы транспортно – установочного агрегата при помощи программного обеспечения SolidWorks Professional требуется 744419,78 рублей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бахвалов Ю.О. Испытания ракетно – космической техники. Введение в специальность / Ю.О. Бахвалов // М.: ООО «АИР». – 2015. – 228 с.
2. Овчинников В.В. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений / В.В. овчинников // М.: Издательский центр «Академия». – 2017. – 224 с.
3. Техническое описание. Транспортно – установочный агрегат. Первое издание. – 2014.
4. Инструкция по техническому обслуживанию. Транспортно – установочный агрегат. Первое издание. – 2014.
5. Зверев В.А. Моделирование и расчет нагружения агрегатов стартовых комплексов для ракет космического назначения на различных этапах их функционирования [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103449> – 15.05.2021.
6. ГОСТ Р 51282 – 99. Оборудование технологическое стартовых и технических комплексов ракетно – космических комплексов; введ. 2000–01–01. – Москва: Госстандарт России; М.: Изд-во стандартов, 2000. – 24 с.
7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский / М.: ДМК Пресс. – 2015. – 562 с.
8. Тютрин Н.А. Использование модального анализа при диагностике сварных циклически симметричных конструкций / Н.А. Тютрин, Н.А. Астафьева // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2018. – № 1. С. 65-68.
9. Темис Ю.М. Расчет напряженно – деформированного состояния конструкции методом конечных элементов [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/52253> – 15.05.2021.
10. Чернышов Г.Г. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/12938> – 15.05.2021.

11. Metallichekiy-portal.ru: Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс]. – М., 2009. – Режим доступа: https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/10XSHD. – 15.05.2021.