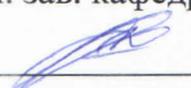


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовых и технических ракетных комплексов  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. зав. кафедрой

 В.В. Соловьев

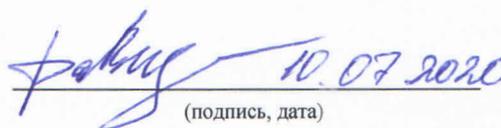
« 14 » июля 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции рамы транспортно-установочного агрегата с учетом влияния сварных соединений

Исполнитель

студент группы 617-об

 10.07.2020 С. В. Давиденко  
(подпись, дата)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент

 10.07.2020 В. В. Соловьев  
(подпись, дата)

Нормоконтроль

ассистент

 10.07.2020 М.А. Аревков  
(подпись, дата)

Благовещенск 2020

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовых и технических ракетных комплексов

УТВЕРЖДАЮ

Зам. зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ В.В. Соловьев  
подпись И.О.Фамилия

« 20 » апреля 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студентки Давиденко Светлана Викторовны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции рамы транспортно-установочного агрегата с учетом влияния сварных соединений

(утверждена приказом от 14.04.2020 №711-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 14.07.2020 г.

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): определение эксплуатационных нагрузок и расчет критических точек максимальных нагрузок, контроль качества сварных швов, оценка влияния дефектов сварных швов на прочность, экономическое обоснование использования УЗД.

5. Перечень материалов приложения: тема ВКР, цели и задачи, ТУА чертеж общего вида, блок-схема, статический анализ, критические точки, сварные соединения с дефектами, заключение.

6. Дата выдачи задания 20.04.2020 г.

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

Задание принял к исполнению (дата) 20.04.2020   
\_\_\_\_\_ (подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 72 с., 34 рисунка, 14 таблиц, 6 приложений, 11 источников.

ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, АВТОНОМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, СВАРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ, ДЕФЕКТ, ДЕФЕКТОСКОПИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, СВАРКА

Сварочное производство продолжает не терять свою актуальность и в 21 веке, данный факт в основном обусловлен использованием сварки в качестве получения неразъемного соединения металла в строительстве металлоконструкций. Широкий охват производства металлических конструкций связан с низкой ценой строительства, а также скоростью возведения быстровозводимых зданий и сооружений. Благодаря сварке металлических заготовок создается большое количество конструкций, в их числе фермы, балки и другая элементная база конструкций из металла.

Транспортно-установочный агрегат - это мобильная система, используемая для перемещения ракеты-носителя в горизонтальном положении, которая также может обеспечить движущую силу для вертикального перемещения до окончательной подготовки РН к запуску.

Цель работы – исследование влияния сварных соединений при напряженно-деформированном состоянии, изучение возможности обнаружения дефектов и методика их контроля.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Общие сведения	9
1.1 Устройство транспортно-установочного агрегата	9
1.2 Автономные испытания ТУА	11
1.2.1 Статические испытания ТУА на тележках при горизонтальном положении стрелы (вариант 1)	14
1.2.2 Статические испытания ТУА на тележках при поднятом положении стрелы (вариант 2)	14
1.2.3 Динамические испытания ТУА (вариант 3)	15
1.3 Технологические особенности процесса сварки металлоконструкций	17
1.4 Систематизация и характеристика дефектов при сварке стали 10ХСНД	20
2 Специальная часть	24
2.1 Определение эксплуатационных нагрузок и расчет критических точек максимальных нагрузок	24
2.2 Контроль качества сварных швов	36
2.2.1 Ультразвуковая дефектоскопия	37
3 Оценка влияния дефектов сварных швов на прочность	40
3.1 Анализ поведения сварочного шва под действием нагрузок	40
3.2 Определение НДС с использованием УЗД сварочного шва	51
4 Техника безопасности при проведении ТО	57
4.1 Объем работ при еженедельном техническом обслуживании	59
4.2 Объем работ при ежемесячном техническом обслуживании	59
4.3 Объем работ при ТО перед работой с изделием	60
4.4 Объем работ при годовом техническом обслуживании	61
5 Экономическая часть	63
5.1 Экономическое обоснование использования УЗД	63

Заключение	71
Библиографический список	72
Приложение А	74
Приложение Б	75
Приложение В	76
Приложение Г	77
Приложение Д	78
Приложение Е	79

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ

ЗИП – запасные части, инструмент и принадлежности;

ЗКН – зона концентрации напряжений;

КД – конструкторская документация;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

РКН – ракета космического назначения;

РН – ракета-носитель;

СК – стартовый комплекс;

ТЗ – техническое задание;

ТО – техническое обслуживание;

ТУА – транспортно-установочный агрегат;

УЗД – ультразвуковая диагностика;

ЭД – эксплуатационная документация;

ЭШС – электрошлаковая сварка.

## ВВЕДЕНИЕ

Область применения сварки непрерывно расширяется. Сварка стала ведущим технологическим процессом при изготовлении и ремонте металлических конструкций и изделий в промышленности, строительстве, транспорте, в сельском хозяйстве ракетостроении и многом другом.

Сварное соединение – это элемент конструкции или участок изделия, на котором с помощью сварки производится соединение двух его деталей в одну. При этом отдельные детали соединения могут состоять как из одного и того же металла, так и из разнородных металлов и их сплавов.

Преимуществами сварочного производства можно назвать:

- надежность;
- прочность стыковых швов;
- экономичность расхода материалов;
- неприхотливость и легкость исполнения;
- применяется, как для малогабаритных деталей, так и для крупных изделий;
- возможность получения стыков любого вида: угловой, тавровый, внахлест или торцевой.

Транспортно-установочный агрегат (ТУА) – сложная крупногабаритная конструкция, совмещающая в себе функцию транспортного и подъемного агрегата для РКН. ТУА при работе испытывает различные динамические и статические нагрузки, связанные с особенностями транспортирования и подъема РКН.

Условия функционирования агрегатов стартовых ракетных комплексов и их механизмов имеют ряд специфических особенностей.

- Ракеты имеют большую стоимость, большие габариты и массу, выполнены с минимальными запасами прочности, поэтому при разработке агрегатов и их механизмов необходимо обеспечить минимальные статические и динамические воздействия на изделие;

- Из-за наличия большого числа взрывоопасных компонентов ракетных топлив требуется выполнять основные операции в соответствии с циклограммами пусков за минимальное время, в автоматическом режиме или в режиме дистанционного управления;

- Следует учитывать, что для каждого стартового ракетного комплекса агрегаты в основном уникальны и не имеют близких прототипов, а их экспериментальная отработка очень дорога.

Специфические условия разработки и функционирования агрегатов стартового оборудования ракетных комплексов и их механизмов (уникальность, высокая стоимость, единичная реализация, повышенная надежность, быстрдействие) придают исключительную важность подробному математическому моделированию агрегатов и механизмов стартового оборудования и пусковых установок на стадии их разработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи;

- 1) Проанализировать методы нахождения дефектов в сварных соединениях, определить наиболее подходящий для заданных условий;

- 2) Приложить нагрузки к раме ТУА, рассмотреть напряженно-деформированное состояние, выявить критические точки;

- 3) Проанализировать поведение сварочного шва в критических точках под действием нагрузок;

- 4) Определить самый выгодный метод контроля качества сварных соединений.

## 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.

Цикл работы ТУА с РКН включает в себя погрузку нижней части РКН на ТУА, стыковку верхней и нижней части РКН, транспортирование ТУА с РКН с универсального технического комплекса на СК и установку РКН на агрегат 373ПУ07 (пусковое устройство СК 371СК14), снятия РКН с агрегата 373ПУ07 в случае несостоявшейся работы, транспортирование ТУА с РКН от СК на универсальный технический комплекс, отсоединение верхней части РКН и разгрузку нижней части РКН с ТУА.

### **1.1 Устройство транспортно-установочного агрегата**

ТУА представляет собой подъемно-транспортный агрегат на железнодорожном ходу, оборудованный гидроприводом для подъема стрелы с РКН в вертикальное положение и вывешивания ТУА на гидроопорах и электрооборудованием для приведения в действие исполнительных механизмов и контроля за их положением.

ТУА состоит из следующих основных узлов: платформы 4 на тележках (Приложение А), стрелы 10 с откидной консолью 1 (Приложение Б), крыльев 17 (Приложение В), нижней и средней опор 1 (Приложение А), сменного оборудования 12, механизма подвески 7, двух механизмов доводки 13, гидропривода, состоящего из двух насосных установок 1 (Приложение Г), блока гидроаппаратуры

2, гидроцилиндра 3, двух гидропор 37, 45, и электрооборудования 14 (Приложение А).

Стрела, насосные установки и гидроцилиндр размещены на платформе ТУА. Нижняя, средняя, верхняя опоры и механизм подвески размещены на стреле ТУА. Средняя опора выполнена подвижной в радиальном направлении, что обеспечивает необходимый для разгрузки корпуса РКН подпор, уменьшающийся до нуля при подъеме стрелы с РКН в вертикальное положение. Нижняя, средняя и верхняя опоры и механизм подвески обеспечивают надежное закрепление РКН на стреле при его транспортировании и установке на агрегат 373ПУ07.

Подъем стрелы в вертикальное положение производится гидроцилиндром. Устойчивость ТУА с вертикально поднятой стрелой обеспечивается двумя гидропоррами, установленными на крыльях. Подача рабочей жидкости в гидроцилиндр производится насосными установками 1 (Приложение Г), по трубопроводам, закрепленным на платформе, стреле и крыльях ТУА. При походном положении ТУА гидропоры крепятся механизмами подъема гидропор.

Перед подъемом стрелы в вертикальное положение платформа ТУА крепится к кронштейнам на СК двумя механизмами доводки, с помощью которых можно перемещать в продольном направлении ТУА, вывешенный на гидропорах, в пределах  $\pm 50$  мм.

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

Основные технические данные ТУА приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические данные ТУА

<b>1. Габариты ТУА:</b>	
- длина	45875 мм
- ширина	6520 мм

- высота при горизонтальном положении стрелы	7165 мм
- высота при вертикальном положении стрелы	37500 мм
<b>2. Вес ТУА</b>	216000 кг
<b>3. Скорость транспортирования ТУА:</b>	
- тепловозом	не более 10 км/ч
- самоходными тележками	4,0/1,8 м/мин
<b>4. Максимальная нагрузка на ось тележки:</b>	40000 кг
<b>5. Платформа:</b>	
- база	12250 мм
- колея	1520 мм
- количество тележек	2 шт
- тип головной тележки	самоходная, двухосная с двумя электроприводами самоходная,
- тип задней тележки	четырёхосная с двумя электроприводами

## 1.2 Автономные испытания ТУА

Автономные испытания – это комплекс различных видов испытаний для всесторонней отработки изделий, узлов, агрегатов и систем, входящих в изделия. Автономные испытания являются основой экспериментальной отработки любого изделия.[1]

Вся система экспериментальной отработки строится на последовательных испытаниях изделий все более высоких иерархических уровней. Так, после успешных испытаний агрегатов и узлов переходят к испытаниям систем и корпуса, а на завершающем этапе испытывают изделие целиком. Каждый уровень представляет собой ряд автономных изделий, начиная от узлов и агрегатов до

подсистем, систем и комплексов, причём с каждым более высоким уровнем происходит постепенное усложнение изделий. Автономные испытания проводятся для каждого изделия каждого уровня сложности этой системы. Низший уровень определяется простейшими изделиями, состоящими из отдельных деталей, не имеющих самостоятельного применения, и для которых автономные испытания не проводятся, а качество и надёжность этих деталей определяется соответствием их КД. Автономные испытания нацелены на всестороннюю проверку характеристик изделия, на правильность КД и подтверждение надёжности и безопасности изделия.

В соответствии с ГОСТ Р 51143-98 автономные испытания – это испытания полностью смонтированного, укомплектованного и отлаженного (прошедшего заводские испытания) агрегата стартового (технического) комплекса, проводимые на месте эксплуатации для определения его работоспособности и готовности к участию в дальнейших испытаниях или эксплуатации.

В соответствии с ГОСТ Р 51143-98 задачами автономных испытаний агрегатов являются проверки:

- 1) комплектности агрегата;
- 2) качества сборки (монтажа) и отладки агрегата на требуемые параметры;
- 3) соответствия технических характеристик и границ работоспособности агрегата требованиям ТЗ и КД;
- 4) стыкуемости и совместной работы с другими изделиями и сооружениями;
- 5) достаточности предусмотренных в ЭД мер безопасности при эксплуатации агрегата;
- 6) удобства обслуживания и проведения ремонта;
- 7) условий обитаемости (освещение, вентиляция, отопление, вредные газовые примеси и т.п.);
- 8) достаточности обслуживающего персонала;
- 9) эффективности проведенных доработок по результатам ЗИ;

10) достаточности и возможности применения инструмента, приспособлений и контрольно-измерительных приборов, необходимых при эксплуатации агрегата;

11) метрологического обеспечения испытаний, а также оценка надежности агрегата.

Для проведения автономных испытаний следует:

1) настроить предохранительные клапаны на  $280 \text{ кг/см}^2$  и  $220 \text{ кг/см}^2$ ;

2) подготовить грузовой макет к проведению испытаний;

3) подготовить ТУА к погрузке грузового макета;

4) Осмотреть следующие составные части ТУА:

а) металлоконструкцию платформы, стрелы, крыльев, верхней и нижней опор и убедиться в отсутствии трещин в металле и сварных швах;

б) гидропривод и убедиться в отсутствии течи в узлах и соединениях;

в) приборы и устройства безопасности и сигнализации и убедиться в целостности стекол манометров, наличии пломб и установки стрелки на нуле, а также в том, что установлены манометры необходимого класса точности;

г) гидробаки и редукторы железнодорожных тележек и убедиться в том, что уровень рабочей жидкости соответствует допускаемому;

д) пульт управления и убедиться в отсутствии механических повреждений;

5) Проверить сопротивление изоляции электрооборудования;

6) Проверить работу блокировок электрической схемы;

7) Проверить ТУА на функционирование без груза;

8) Погрузить на ТУА грузовой макет;

9) Провести статические испытания ТУА (статические и динамические испытания проводятся с грузовым макетом, имитирующим нормативную перегрузку от расчетного сочетания нагрузок).

Объем испытаний:

- статические испытания ТУА на тележках при горизонтальном положении стрелы (вариант 1);

- статические испытания ТУА на тележках при приподнятом положении стрелы (вариант 2);

- динамические испытания ТУА (вариант 3).

### **1.2.1 Статические испытания ТУА на тележках при горизонтальном положении стрелы (вариант 1)**

Для проведения статических испытаний ТУА на тележках при горизонтальном положении стрелы необходимо:

- установить на ТУА фермы грузового макета в соответствии с инструкцией на погрузку (разгрузку) грузового макета на ТУА;

- загрузить фермы грузами;

- подвесить отвес к консоли в точке «б» (Приложение Д);

- измерить через 5 мин расстояние «h» от грузика до земли (погрешность первого замера не более 3 мм).

Еще через 10 мин вновь измерить расстояние «h». При повторном замере «h» может отличаться от первоначального не более чем на 6 мм (сумма максимально допустимых погрешностей двух измерений). Если расстояние «h» отличается на большую величину, делается вывод о текучести металлоконструкции. В этом случае испытания прекращаются и эксплуатация ТУА запрещается;

- снять отвес;

- осмотреть стрелу, платформу, нижнюю, среднюю, верхнюю опоры. Никаких повреждений не должно быть.

### **1.2.2 Статические испытания ТУА на тележках при поднятом положении стрелы (вариант 2)**

Для проведения статических испытаний ТУА на тележках при приподнятом положении стрелы необходимо:

- подвесить отвес на стреле в точке «а» (Приложение Е);

- загрузить фермы грузами по варианту 2 (Приложение Е);

- поднять стрелу на высоту от 400 мм до 450 мм от опорной поверхности

упоров на платформу;

- измерить расстояние «h» от грузика до земли (погрешность первого замера не более 3 мм);

- еще через 10 мин вновь измерить расстояние «h» (погрешность второго замера не более 3 мм);

Расстояние «h» при повторном замере может отличаться от первоначального не более, чем на 6 мм (сумма максимально допустимых погрешностей двух измерений).

Если расстояние «h» отличается на большую величину, делается вывод о наличии текучести металлоконструкции. В этом случае испытания прекращаются и эксплуатация ТУА запрещается.

- опустить стрелу на платформу и снять отвес;

- осмотреть стрелу, платформу, нижнюю, среднюю, верхнюю опоры. Никаких повреждений не должно быть.

### **1.2.3 Динамические испытания ТУА (вариант 3)**

Для проведения динамических испытаний ТУА необходимо:

- загрузить фермы грузами по варианту 3 (Приложение Е);

- транспортировать ТУА тепловозом со скоростью до 10 км/ч с проведением от двух до трех торможений;

- передвинуть ТУА вперед и назад самоходом на большой скорости на расстояние 20 м в каждую сторону. Операции по передвижению ТУА вперед и назад выполнить три раза;

- передвинуть ТУА вперед и назад самоходом на малой скорости на расстояние 1 м в каждую сторону. Операции по передвижению ТУА вперед и назад выполнить три раза;

- вывинтить штыри из нижней опоры макета;

- расфиксировать ложементы нижней опоры и ослабить крепление траверс;

- подъехать самоходом к сооружению;

- установить механизмы доводки;

- выставить ТУА на гидроопорах;

- поднять стрелу в вертикальное положение;
- опустить стрелу в горизонтальное положение.

Операции по подъему и опусканию стрелы выполнить три раза. В процессе подъема и опускания произвести по три остановки стрелы в промежуточных положениях;

- поднять стрелу в вертикальное положение;
- опустить ТУА на левой гидроопоре до автоматической остановки;
- опустить ТУА на правой гидроопоре до автоматической остановки;
- поднять ТУА на левой гидроопоре до автоматической остановки;
- поднять ТУА на правой гидроопоре до автоматической остановки.

Операции по подъему и опусканию ТУА на гидроопорах выполнить три раза. В процессе подъема и опускания ТУА на гидроопорах произвести по три остановки ТУА в промежуточных положениях:

- опустить стрелу в горизонтальное положение;
- убрать гидроопоры;
- отсоединить механизмы доводки;
- отъехать ТУА от сооружения;
- осмотреть верхнюю, среднюю и нижнюю опоры ТУА, стрелу, платформу с тележками, гидроцилиндр, крылья, механизм подвески; гидроопоры. После испытаний не должно быть никаких повреждений.

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

После испытаний необходимо:

- установить лестницы к нижней опоре;
- зафиксировать макет штырями 20 и зафиксировать положение траверс;
- снять лестницы нижней опоры и закрепить их по-походному;
- подать ТУА на технологическую площадку;
- снять грузовой макет согласно инструкции;
- выключить напряжение;

- уложить фермы грузового макета на подставки;
- законсервировать грузовой макет.

Эксплуатация ТУА запрещается в следующих случаях:

- а) при обнаружении трещин в металлоконструкциях или сварных швах;
- б) при обнаружении текучести металлоконструкции платформы или стрелы;
- в) при обнаружении течи в узлах и соединениях гидропривода.

### 1.3 Технологические особенности процесса сварки металлоконструкций

В данном ТУА свариваются конструктивные элементы из стали 10ХСНД. Сталь 10ХСНД – это низколегированная конструкционная сталь, которая применяется для изготовления сварных металлоконструкций повышенной прочности и коррозионной стойкости. Данный материал производится в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 6713, ДСТУ 8541, ГОСТ 19281.

Химический состав стали приведен в таблице 2.

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

Так как сталь низколегированная, то это значит, что она хорошо сваривается. Но легирующие элементы обуславливают возможность возникновения закалочных структур в зоне термической обработки.

Также неблагоприятные факторы могут привести к уменьшению ее стойкости против холодных трещин. Легирующие элементы способны снизить сопротивляемость швов горячим трещинам.

Механические свойства стали приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Механические свойства стали 10ХСНД

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

Таблица 4 - Механические свойства стали 10ХСНД

Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup> , для проката категорий, при температуре, °С, не менее		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
-40	-60	-70
-40	-60	-70
-	29	29
-	29	29

Крупнозернистость строения металла шва приводят к заметной химической неоднородности, это касается, главным образом, наиболее ликвидируемых примесей стали — углероду, фосфору и сере.

Если применяется электрошлаковый способ сварки, то он оказывает рафинирующее действие. Типичным для всех методов дуговой сварки является шов по оксидным включениям, он исключительно чист. Сульфиды и фосфиды представлены немногочисленно.

Электрошлаковая сварка – это способ соединения металла большого сечения.

Известно, что расплавленные флюсы образуют шлаки, которые являются проводниками электрического тока. При этом в объеме расплавленного шлака при протекании сварочного тока выделяется теплота. Этот принцип и лежит в

основе электрошлаковой сварки (рис. 1). Электрод 1 и основной металл 2 связаны электрически через расплавленный шлак 3 (шлаковая ванна). Выделяющаяся в шлаковой ванне теплота перегревает его выше температуры плавления основного и электродного металлов. В результате металл электрода и кромки основного металла оплавляются и ввиду большей плотности металла, чем шлака, стекают на дно расплава, образуя ванну расплавленного металла 4 (металлическую ванну).

Электродный металл в виде отдельных капель, проходя через жидкий шлак, взаимодействует с ним, изменяя при этом свой состав. Шлаковая ванна, находясь над поверхностью расплавленного металла, препятствует его взаимодействию с воздухом. При правильно подобранной скорости подачи электрода зазор между торцом электрода и поверхностью металлической ванны остается постоянным.

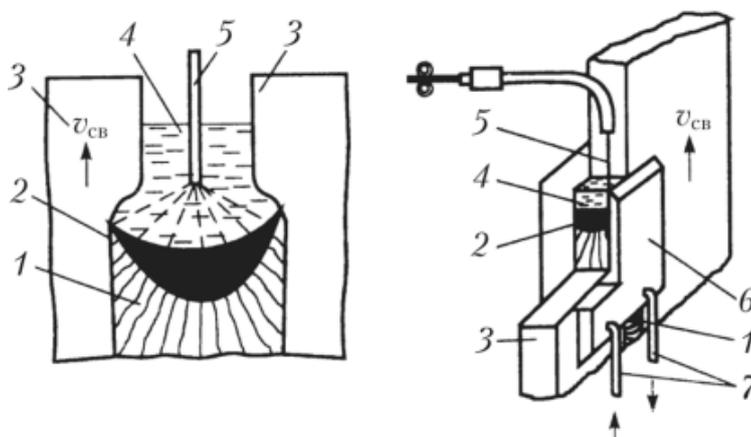


Рисунок 1 – Схема процесса электрошлаковой сварки

Свариваемый металл, шлаковая и металлическая ванны удерживаются от вытекания обычно специальными формирующими устройствами - подвижными или неподвижными медными ползунами 5, охлаждаемыми водой 6, или остающимися пластинами. Верхняя кромка ползуна располагается несколько выше зеркала шлаковой ванны. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны расплавленный металл образует шов 7. Шлаковая ванна, находясь над поверхностью металлической ванны, соприкасаясь с охлаждаемыми ползунами,

образует на них тонкую шлаковую корку, исключая тем самым непосредственный контакт расплавленного металла с поверхностью охлаждаемого ползуна и предупреждая образование в металле шва кристаллизационных трещин.

Расход флюса при этом способе сварки невелик и обычно не превышает 5% массы наплавленного металла. Ввиду малого количества шлака легирование наплавленного металла происходит в основном за счет электродной проволоки. Доля основного металла в шве может быть снижена до 10-20%. Вертикальное положение металлической ванны, повышенная температура ее верхней части и значительное время пребывания металла в расплавленном состоянии способствуют улучшению условий удаления газов и неметаллических включений из металла шва.

#### **1.4 Систематизация и характеристика дефектов при сварке стали 10ХСНД**

Наибольшую опасность при сваривании стали 10ХСНД представляют такие дефекты как: холодные трещины и горячие трещины.

Дефектом называется несоответствие параметров и характеристик сварного шва или соединения требованиям нормативно-технической документации.

Согласно ГОСТ 7512-75 в зависимости от местонахождения различают наружные и внутренние дефекты. К наружным относятся дефекты формы сварного шва и вышедшие на поверхность швов поры, свищи, трещины и подрезы, а к внутренним – поры, твердые включения шлака или инородного металла, непровары и внутренние трещины разного рода. Однако подобное разделение дефектов весьма условное, так как многие наружные дефекты оказываются следствием существования, а зачастую и внешним проявлением внутренних дефектов.

Основные дефекты сварных соединений представлены на рисунке 2 и показаны виды коррозионного поражения сварных соединений при эксплуатации конструкций.

Наиболее опасным недопустимым дефектом в сварных соединениях являются трещины. На острых краях трещин при соответствующих условиях может

происходить резкое увеличение напряжений, способствующее их развитию, что приводит к полному разрушению конструкций. Трещины относятся к самым серьезным дефектам сварных соединений и, как правило, подлежат устранению.

Трещина – это дефект в виде разрыва в сварном шве и прилегающих к нему зонах.

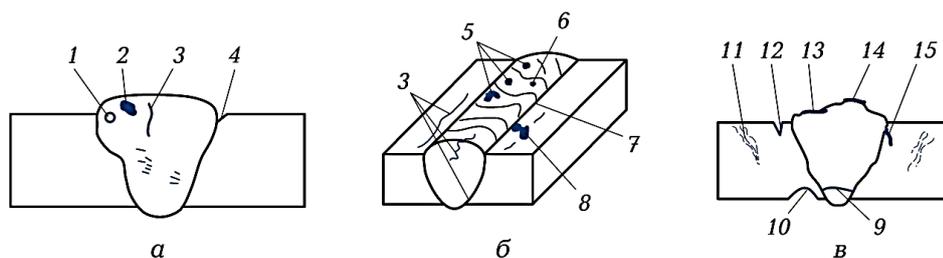


Рисунок 2 – Основные дефекты в сварных соединениях: в сечении шва (а), на поверхности шва (б) и виды коррозионных поражений при эксплуатации конструкций (в)

1 – пора; 2 – шлаковое включение; 3 – кристаллизационная трещина; 4 – подрез; 5 – грубочешуйчатая поверхность шва; 6 – поверхностная пора; 7 – цвета побежалости (окисление поверхности); 8 – разбрызгивание; 9 – гальваническая коррозия; 10 – эрозия поверхности; 11 – межкристаллитная коррозия; 12 – коррозия по кромке шва; 13 – питтинговая коррозия; 14 – скрытая коррозия; 15 – коррозионное растрескивание

Горячие трещины представляют собой хрупкие межкристаллические разрушения металла шва или околошовной зоны, возникающие в нем в твердожидком состоянии в процессе кристаллизации и в твердом состоянии при высоких температурах (в сталях образуются при температурах, превышающих 1000 °С). Горячие трещины извилисты, в изломе они имеют темный цвет, сильно окислены и распространяются по границам зерен.

Холодные трещины представляют собой локальные меж- или транскристаллические разрушения сварных соединений, образующиеся в металле при остывании до относительно невысоких температур (как правило, ниже 200 °С).

Холодные трещины в шве и переходной зоне могут располагаться под любым углом к шву.

Общими причинами появления горячих и холодных трещин в швах сварных соединений являются:

- 1) излишне высокая жесткость соединений;
- 2) недостаточная ширина сварного шва для данной толщины соединения;
- 3) несоблюдение или неправильный выбор технологии сварки;
- 4) наличие дефектов в сварном шве;
- 5) неправильная подготовка соединения под сварку;
- 6) неудовлетворительное качество или неправильный выбор типа электродов;
- 7) использование сварочного тока повышенной силы, что может приводить к образованию крупнозернистых охрупченных участков структуры;
- 8) высокое содержание углерода или легирующих элементов в основном металле, не учтенное при выборе технологии сварки.

Для предупреждения возникновения трещин в швах сварных соединений необходимо:

- 1) оптимизировать форму металлоконструкции и технологию сварки в целях исключения применения соединений с высокой жесткостью;
- 2) при сварке деталей значительной толщины увеличивать ширину шва и накладывать шов короткими участками (200...250 мм);
- 3) выбирать такую последовательность выполнения сварных швов, при которой концевые участки соединения, оставаясь максимально долго незаваренными, сохраняют наибольшую подвижность;
- 4) обеспечивать сплошность сварных швов;
- 5) в отдельных случаях осуществлять предварительный подогрев свариваемых деталей;

б) производить сборку свариваемых деталей или узлов с зазорами, установленными стандартными требованиями на сварку заданного металла и соответствующей технологией. При необходимости для выравнивания зазора применять стягивающие сборочные приспособления;

7) не превышать заданную силу сварочного тока;

8) по возможности выполнять многопроходный сварной шов, так как отжиг предыдущих слоев такого шва уменьшает его хрупкость;

9) подготовленную разделку кромок свариваемых деталей заполнять сразу после завершения сварки корня шва, поскольку воздействию напряжений обычно подвергается область корневого шва.

## 2 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Определение эксплуатационных нагрузок и расчет критических точек максимальных нагрузок

Расчет агрегатов и их составных частей должен определять соответствие их конструкций нагрузениям, возникающим при эксплуатации, и допустимость этих нагружений.

Расчет выполняют по критериям работоспособности для определяющих (наиболее опасных) расчетных случаев, устанавливаемых в соответствии с требованиями настоящего стандарта, ТЗ, РЭ и опыта эксплуатации агрегатов-аналогов.[8]

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 стандарте, или вероятностные методы с учетом требований настоящего стандарта и требований надежности, установленных в ТЗ.

При расчете методами допускаемых нагружений должно 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.

Согласно ГОСТ Р 51282-99 нагрузки, возникающие при эксплуатации агрегата как при выполнении требований эксплуатационной документации, так и при их нарушении в результате преднамеренных или непреднамеренных (ошибочных) действий обслуживающего персонала, делят на расчетные и нерасчетные.

Расчетные нагрузки подразделяют 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 относят нагрузки, возникающие в период проведения рабочего цикла при нормальных условиях работы агрегата:

- вес агрегата, его составных частей и груза;
- 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 относят 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 или стопорении;

- 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.

Анализ напряженно-деформированного состояния проводится посредством метода конечных элементов программного обеспечения SolidWorks.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений, широко используемый в различных областях техники (ракето- и самолетостроение, кораблестроение, строительство и др.).

В настоящее время МКЭ получил глубокие теоретические обоснования и применяется для решения весьма широкого круга задач, например:

- стационарные задачи распространения тепла, диффузии, распределения электрического поля, другие задачи теории поля;
- задачи гидромеханики, в частности, течение жидкости в пористой среде;
- задачи механики и прочности, в том числе проектирование самолётов, ракет и различных пространственных оболочек;
- и другие.

Основная идея МКЭ состоит в том, что:

1) любую непрерывную величину (например, температуру, давление, перемещение) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей (элементов);

2) кусочно-непрерывные функции строятся с помощью значений непрерывной величины в точках соединения элементов (в узлах). Обычно такими функциями являются полиномы – линейные, квадратичные, кубические и т.д.

Таким образом, чтобы определить неизвестную непрерывную величину, нужно определить ее значения в узлах.

Основные этапы создания дискретной модели неизвестной величины следующие:

1. В исследуемой области задается конечное число точек (узлов).
2. Значения непрерывной величины в каждом узле считаются неизвестными, они должны быть определены.

3. Исследуемая область разбивается на конечное число подобластей (элементов), имеющих общие точки (узлы).

4. Непрерывная величина в каждом элементе аппроксимируется полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины: для каждого элемента определяется свой полином, но его коэффициенты подбираются так, чтобы сохранялась непрерывность величины на каждой границе элемента.

Если неизвестная непрерывная величина  $\phi$  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 (рис. 3, а) или криволинейными (рис. 3, б) поверхностями (двумерная область).

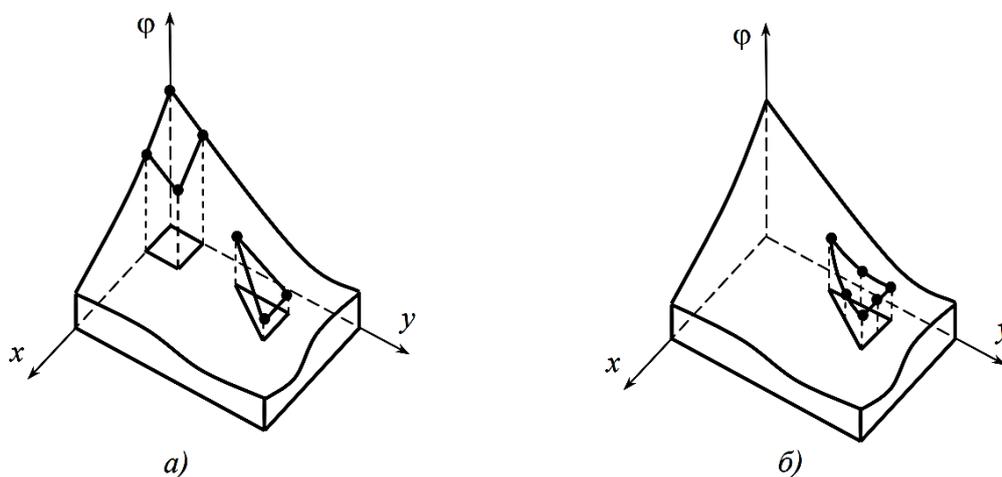


Рисунок 3 – Аппроксимирующие функции

а – функция, представленная плоской поверхностью; б - функция, представленная криволинейной поверхностью

Основными преимуществами МКЭ являются:

1. Возможность исследовать тела (конструкции), составленные из нескольких материалов (так как свойства материалов соседних элементов могут быть разными).

2. Возможность исследовать области (конструкции) любой формы (так как криволинейная область аппроксимируется прямолинейными элементами или точно описывается криволинейными элементами).

3. Возможность учета различных граничных условий: с разрывной нагрузкой, смешанных.

Метод конечных элементов в среде SolidWorks использует МКЭ как численный метод анализа технических конструкций. МКЭ принят в качестве стандартного метода анализа благодаря его универсальности и пригодности для работы на компьютерах. МКЭ делит модель (рисунок 4) на много малых частей простых форм, называемых элементами (рисунок 5), эффективно заменяющими сложную задачу несколькими простыми, которые необходимо решить совместно. [11]



Рисунок 4 – Модель САПР

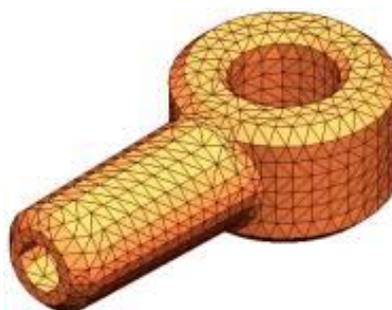


Рисунок 5 – Модель делится на малые части (элементы)

Элементы имеют общие точки, называемые узлами. Процесс деления модели на малые части называется созданием сетки.

Поведение каждого элемента по всем возможным сценариям опоры и нагрузки хорошо известно. Метод конечных элементов использует элементы различных форм.

Реакция в любой точке элемента интерполируется из реакции узлов элементов. Каждый узел полностью описывается рядом параметров, зависящих от типа анализа и используемого элемента. Например, температура узла полностью описывает его реакцию в термическом анализе. Для расчетов конструкции реакция узла представляется, в целом, тремя перемещениями и тремя вращениями. Они называются степенями свободы. Анализ, использующий МКЭ, называется анализом конечных элементов (АКЭ).

Программное обеспечение разрабатывает уравнение, управляющее поведением каждого элемента, учитывая его соединения с другими элементами. Эти уравнения связывают реакцию с известными свойствами материала, ограничениями и нагрузками.

Далее программа упорядочивает уравнения в большую систему совместных алгебраических уравнений и находит неизвестные.

К примеру, для расчета напряжений решающая программа находит перемещения в каждом узле, а затем вычисляет деформации и конечное напряжение.

Программное обеспечение предлагает 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 коэффициента запаса прочности базируется на одном из четырех критериев прочности;

- 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;

- Динамические исследования. Динамические исследования вычисляют реакцию модели, вызванную нагрузками, приложенными внезапно, или изменяющимися со временем или по частоте;

- 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: например, перегрева и плавления;

- Исследования на ударную нагрузку. С помощью испытаний на ударную нагрузку можно оценить влияние падения конструкции на твердый пол. Кроме силы тяжести, указывается высота сбрасывания или скорость во время удара. Программа решает динамическую задачу в виде временной зависимости, используя эксплицитные методы интегрирования. Эксплицитные методы - быстрые, но требуют использования малых временных инкрементов. Благодаря большому количеству информации параметры анализа можно генерировать, программа сохраняет результаты в определенное время и в определенном месте в соответствии с инструкцией, заданной перед запуском анализа;

- Исследования усталости (материалов). Повторяющиеся операции применения нагрузки и ее ослабления со временем приводят к ослаблению объектов, даже если индуцированные напряжения намного меньше, чем допустимые ограничения нагрузки. Количество циклов, требуемое для усталостного разрушения в местоположении, зависит от материала и колебаний напряжения. Настоящая информация, для определенного материала, обеспечивается кривой, называемой S-N кривая. Кривая показывает количество циклов, которое вызывает разрушение на различных уровнях напряжения. Исследования усталости вычисляют срок службы объекта, основанный на событиях усталости материалов и кривых S-N.

Общая последовательность подготовки конечноэлементной модели (КЭ) и проведения расчета следующая:

1. Построение геометрии детали в программе Solid Works;
2. Создание «упражнения» в модуле КЭ расчета с выбором типа проводимого анализа;
3. Задание свойств материала для детали (для деталей в случае анализа сборки);
4. Задание граничных условий (нагрузок и закреплений);
5. Задание условий контакта в случае анализа сборки из нескольких компонентов;
6. Создание сетки КЭ;
7. Запуск анализа;
8. Анализ зон с максимальными напряжениями, а также мест с концентраторами напряжений - определение максимальных напряжений в этих местах;
9. Расчет коэффициент запаса прочности детали.

Для определения эксплуатационных нагрузок рамы ТУА:

- задаем материал и его свойства – сталь 10ХСНД;
- задаем максимально допустимое нагружение – 1564860 Н или 159 т.
- создаем сетку (рисунок 6 и 7);

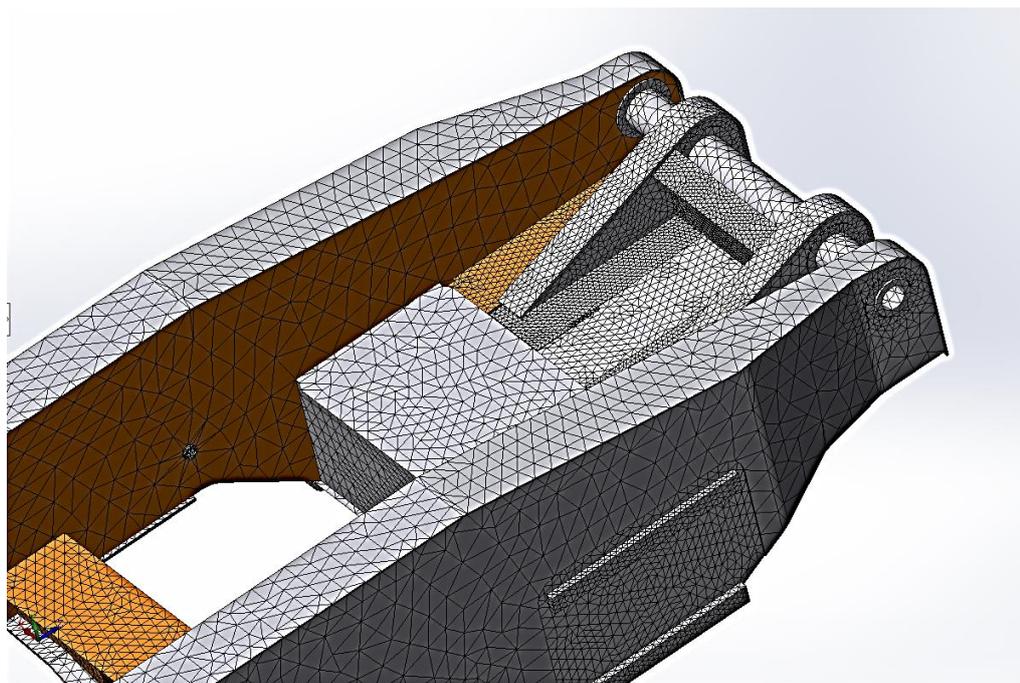


Рисунок 6 – Создание сетки рамы ТУА

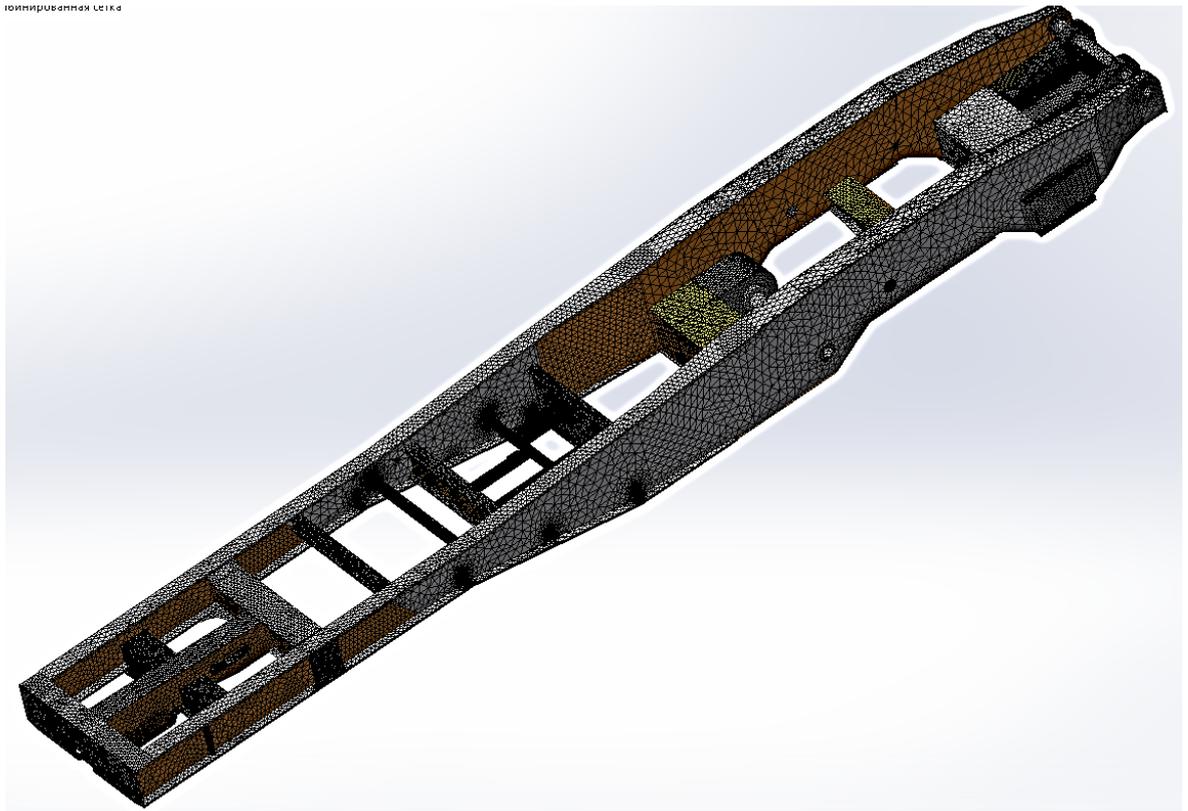


Рисунок 7 – Создание сетки рамы ТУА

- проводим статический анализ, где определяются перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и деформации (рисунки 8, 9, 10);

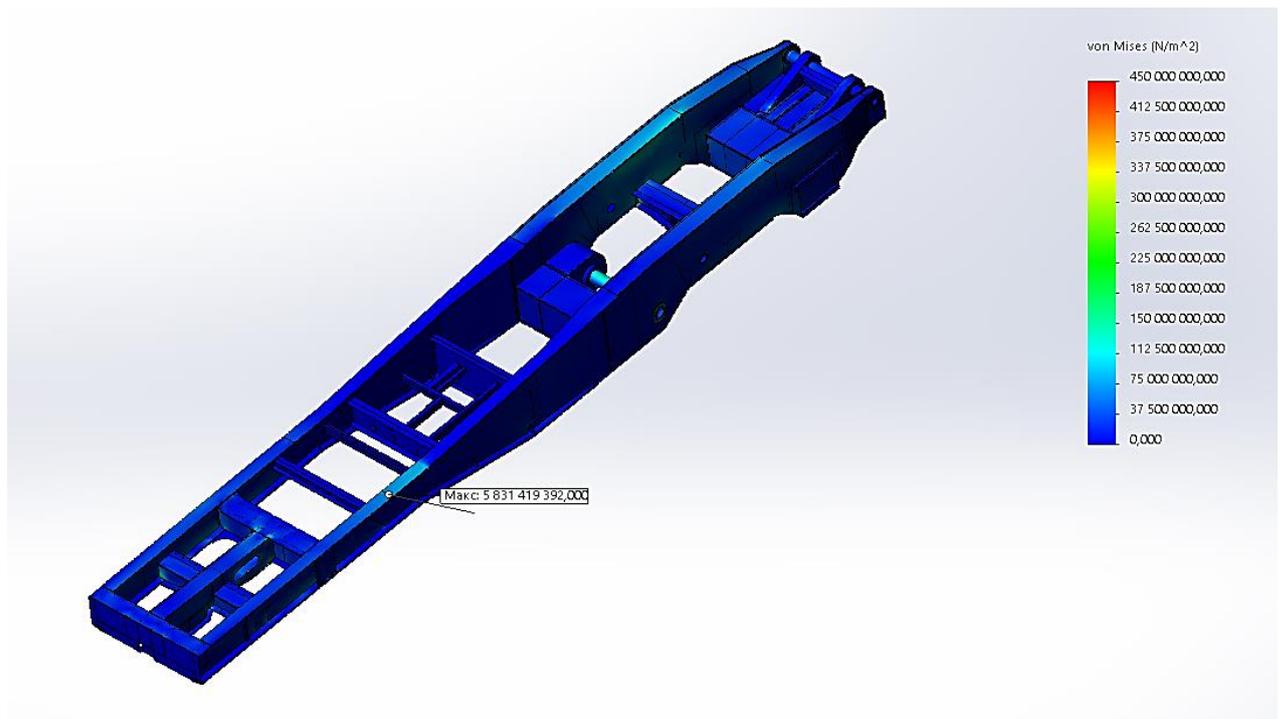


Рисунок 8 – Анализ напряжений рамы ТУА

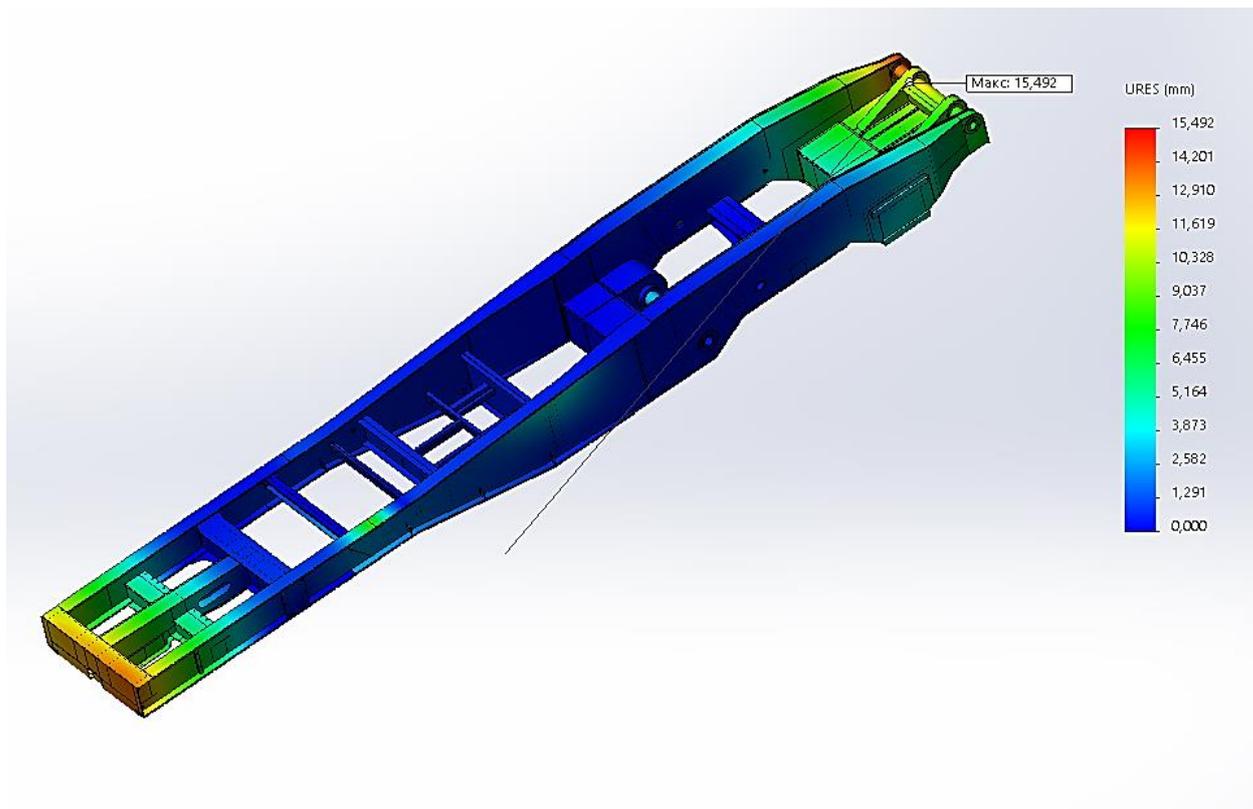


Рисунок 9 – Анализ перемещений рамы ТУА

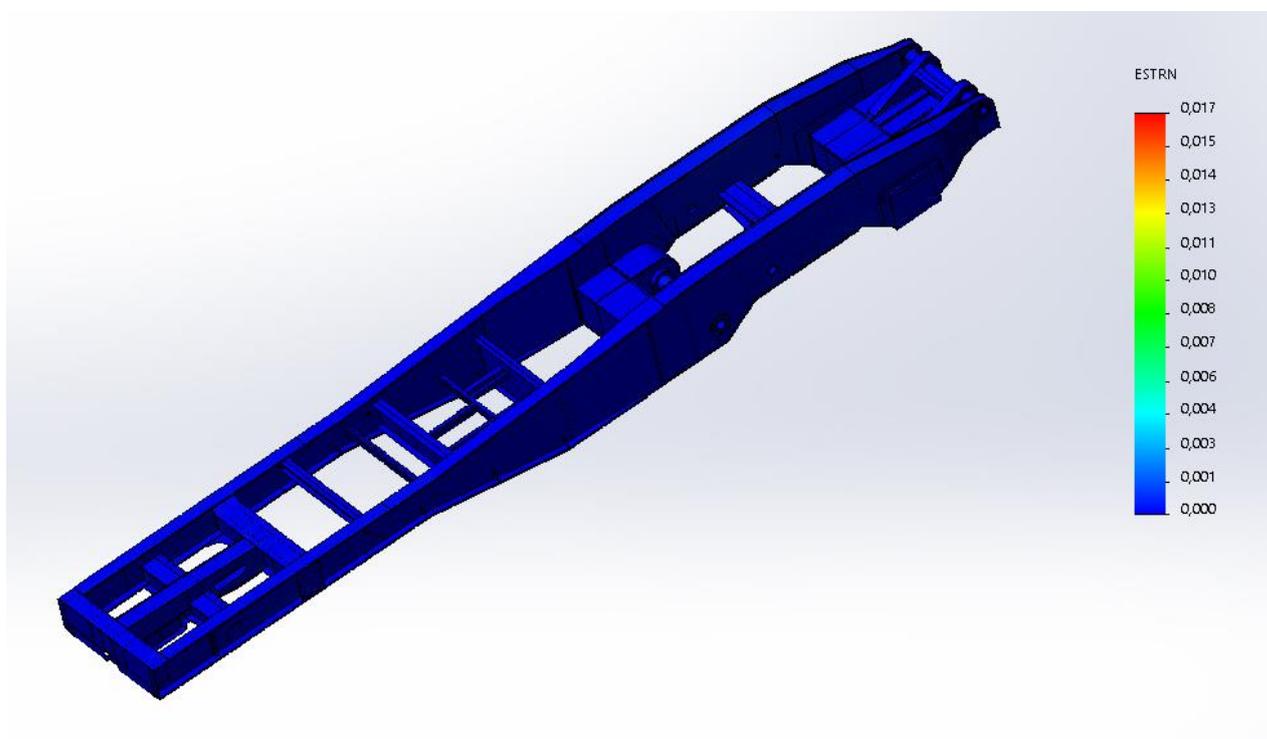


Рисунок 10 – Анализ деформаций рамы ТУА

Отчет по исследованию представлен в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Результаты исследования рамы ТУА

Имя	Мин	Макс
Напряжение	0,000 Н/м <sup>2</sup> или 0,000 Па Узел: 115383	5831419392,000 Н/м <sup>2</sup> или 5831,419 МПа Узел: 596920
Перемещение	0,000 мм Узел: 115383	15,492 мм Узел: 308478
Деформация	0,000 Элемент: 54248	0,017 Элемент: 289477

Таблица 6 – Результирующие силы

Силы реакции					
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
Вся модель	Н	-0,00557709	1,56486×10 <sup>6</sup>	-0,288208	1,56486×10 <sup>6</sup>
Моменты реакции					
Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
Вся модель	Н·м	4861,22	2040,55	1084,85	5382,58

Рама ТУА выдерживает все приложенные нагрузки. Критические точки обнаружены в узлах 596920, 308478, они приведены на рисунках 11 и 12.

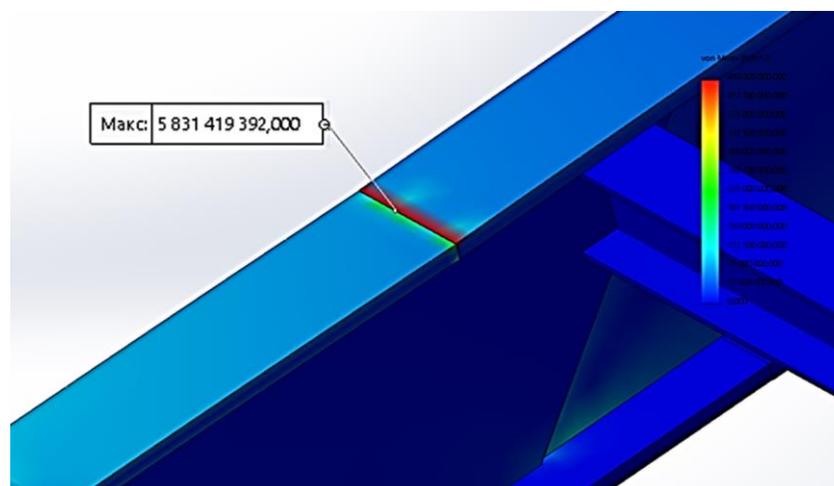


Рисунок 11 – Критическая точка при исследовании напряжений

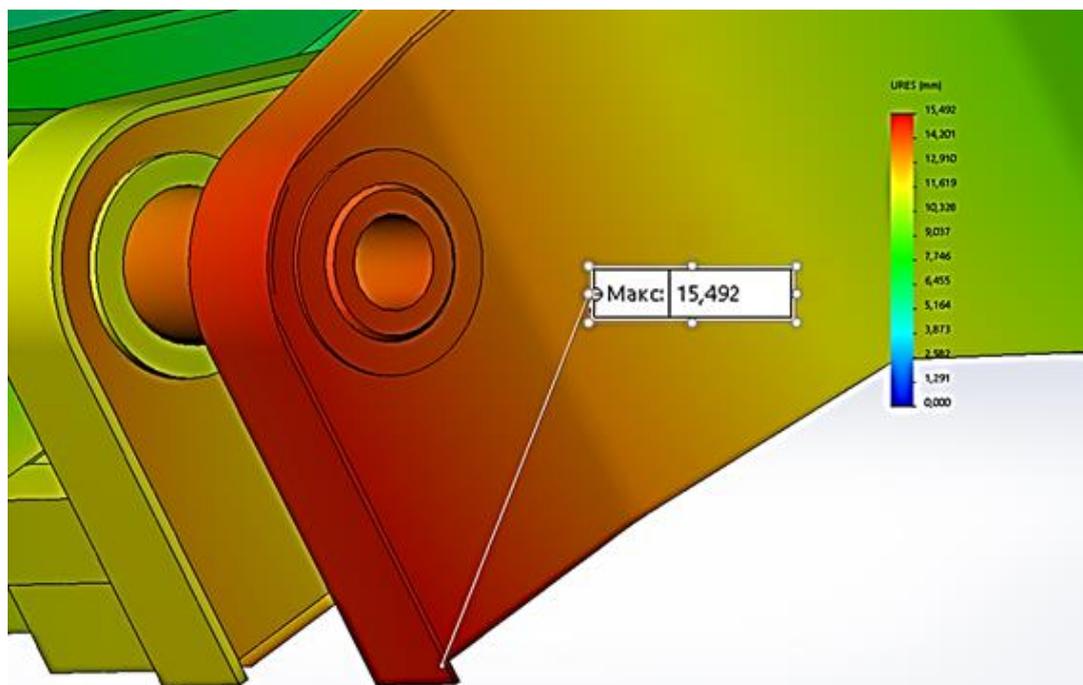


Рисунок 12 – Критическая точка при исследовании перемещений

При исследовании на деформацию критические точки обнаружены не были.

## 2.2 Контроль качества сварных швов

По ГОСТ 15467-79 качество продукции есть совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Качество сварных изделий зависит от соответствия материала техническим условиям, состояния оборудования и оснастки, правильности и уровня отработки технологической документации, соблюдения технологической дисциплины, а также квалификации работающих. Обеспечить высокие технические и эксплуатационные свойства изделий можно только при условии точного выполнения технологических процессов и их стабильности. Особую роль здесь играют различные способы объективного контроля как производственных процессов, так и готовых изделий. При правильной организации технологического процесса контроль должен быть его неотъемлемой частью.[4]

Каждый из методов контроля имеет свои плюсы и минусы. Метод вихревой дефектоскопии пока не нашел широкого применения при контроле сварных

швов, так как электропроводность отдельных зон шва и околошовной зоны значительно изменяется, что создает сильные помехи при выявлении дефектов сварки. При магнитной дефектоскопии, если дефект расположен вдоль направления силовых линий, то возмущение магнитного потока невелико и данный дефект можно пропустить. Визуальный и измерительный контроль материалов производят в целях выявления только поверхностных дефектов.

Ультразвуковая дефектоскопия является наиболее правильным методом и обеспечивает высокую достоверность результатов контроля.

### **2.2.1 Ультразвуковая дефектоскопия**

Ультразвуковые колебания – это механические колебания упругой среды с частотой, находящейся за порогом слышимости человеческого уха, т.е. превышающей 20 кГц. Для ультразвукового контроля применяют колебания частотой от 0,5 до 25 МГц.

В качестве излучателей и приемников ультразвука, называемых пьезопреобразователями, используются пластины из пьезоэлектрического материала – керамики или кварца. При подаче на пьезопластину электрического напряжения вследствие возникновения обратного пьезоэлектрического эффекта изменяется ее толщина. Если к пьезопластине приложено знакопеременное напряжение, то она колеблется в такт с этими изменениями, создавая в окружающей среде упругие колебания. При этом пьезопластина действует как излучатель (рис.13 (а)). И наоборот, если пьезоэлектрическая пластина воспринимает импульс давления (отраженную ультразвуковую волну), то на ее обкладках вследствие возникновения прямого пьезоэлектрического эффекта появляется электрический заряд, который можно измерить. В этом случае пьезопластина действует как приемник (рис. 13 (б)). Для подвода и снятия напряжения на противоположные поверхности пьезопластины нанесены серебряные электроды.

На практике для оценки размеров и типа выявленного дефекта используются только те его характеристики, которые легко может измерить в любых условиях каждый оператор и выразить в простой числовой форме.

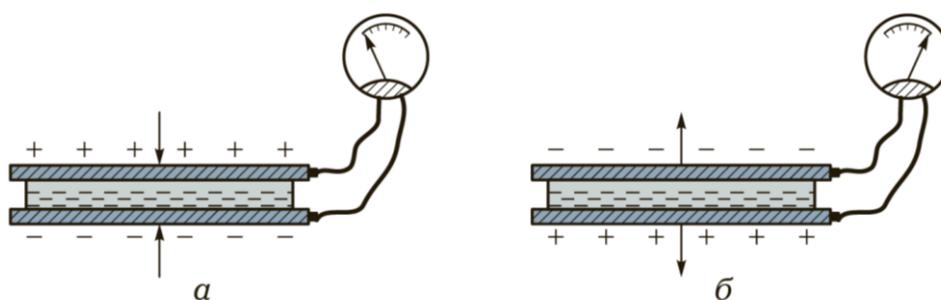


Рисунок 13 – Схемы, поясняющие принцип действия пьезопластины в качестве излучателя (а) и приемника (б) ультразвука (стрелками показаны направления действия возникающей при этом силы)

Для оценки качества сварных швов обычно определяются следующие характеристики дефектов:

- амплитуда эхо-сигнала, пропорциональная площади проекции отражающей поверхности дефекта на плоскость, перпендикулярную оси ультразвукового пучка;

- условная протяженность, определяемая длиной зоны перемещения преобразователя вдоль шва, в пределах которой фиксируется эхо-сигнал от выявленного дефекта;

- условная высота, равная разности значений глубин залегания дефекта, измеряемых в крайних положениях наклонного преобразователя при перемещении его перпендикулярно оси шва (крайними являются те положения преобразователя, которые соответствуют появлению и исчезновению эхо-сигнала от дефекта на развертке дефектоскопа);

- число дефектов, приходящихся на единицу длины шва;

- координаты дефекта по сечению и длине шва.

В ультразвуковой дефектоскопии амплитуду эхо-сигнала от дефекта измеряют посредством его сравнения с каким-либо опорным сигналом, имеющим известное значение и форму и поступившим в тот же преобразователь от отражателя. Если вид обнаруженного дефекта известен заранее, то наиболее правильно сравнить эхо-сигнал от дефекта с сигналом от искусственного отражателя, форма

которого наиболее близка к форме дефекта. Однако чаще всего невозможно достаточно уверенно распознать вид дефекта. Кроме того, его размер должен выражаться через какую-либо стандартизованную величину, воспроизводимую при любых измерениях.

Анализ распределения дефектов, встречающихся в разных зонах сечения шва, позволяет выделить те зоны, которые нуждаются в наиболее тщательном контроле, а также выработать рекомендации по изменению конструкции соединения в целях обеспечения возможности «прозвучивания» всего металла шва. Такой подход (от изучения характеристик реальных дефектов к разработке методики контроля) является наиболее правильным и обеспечивает высокую достоверность результатов контроля.[4]

## 3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ ШВОВ НА ПРОЧНОСТЬ

### 3.1 Анализ поведения сварочного шва под действием нагрузок

Анализ проводился над сварными швами в критических точках.

Сварка производилась по ГОСТ 14771-76 – дуговая сварка в инертных газах и их смесях с углекислым газом и кислородом плавящимся электродом. Сварочная смесь газов ТУ 2114-002-05015259-97, где 20 % двуокиси углерода и 80 % аргона. Проволока СВ-08Г2С.

Красным цветом на рисунках 14, 15, 17 выделены критические точки.

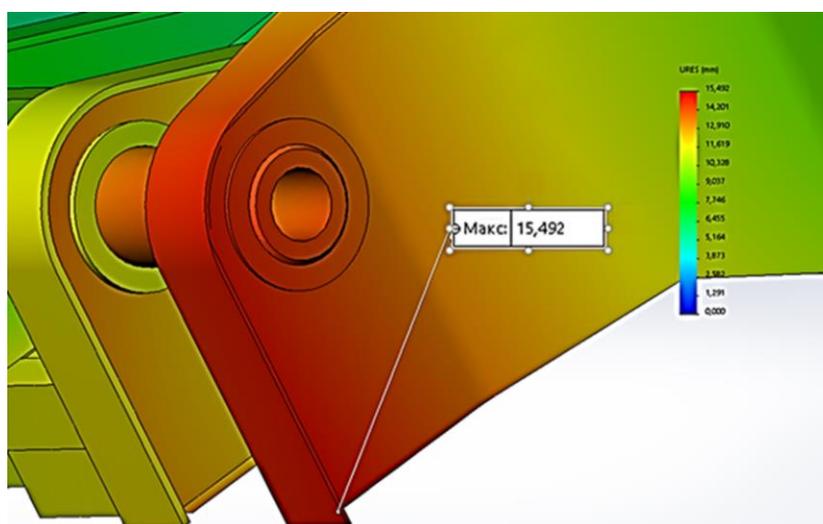


Рисунок 14 – Критическая точка № 1

Таблица 7 – Данные о сварном шве

Тип:	Стыковой сварной шов двусторонний	
Частичный запас прочности:	1,25	
Коэффициент корреляции:	1	
Прочность сварки:	$4.7 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$	
Размер шва:	5,5 мм	

Отчет программы по приложению сил к сварному шву в критической точке №1 представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Отчет программы

Тип	Мин	Макс	Среднее
Нормальная сила (Н)	-64208	$2,4885 \times 10^5$	61881
Сила продольного среза (Н)	$-1,8177 \times 10^5$	79360	-12088
Сила поперечного среза (Н)	0	0	0
Изгибающий момент (Н· м)	-81,968	531,73	172,6

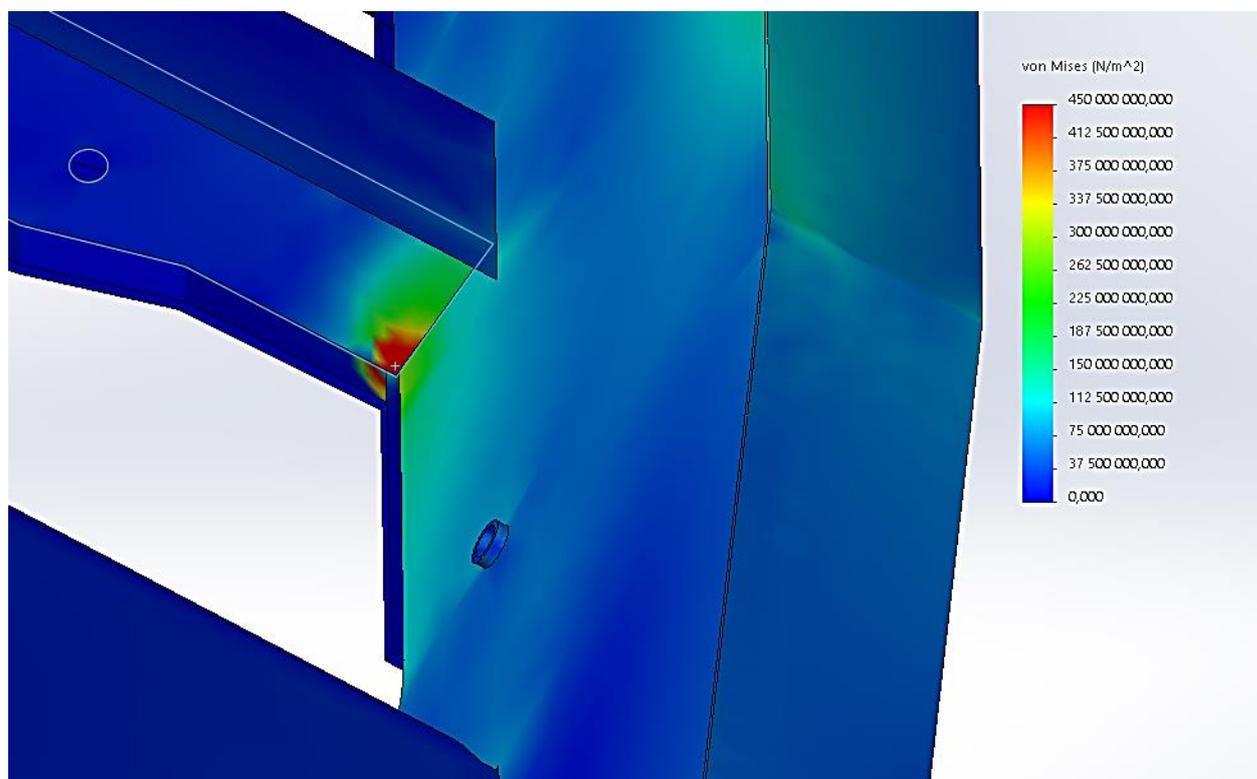
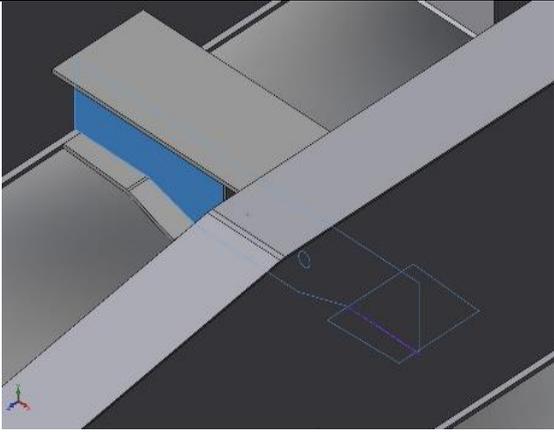


Рисунок 15 – Критическая точка № 2

Данные о сварном шве в критической точке №2 представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Данные о сварном шве в критической точке №2

Тип:	Тавровый или угловой односторонний	
Частичный запас прочности:	1,25	
Коэффициент корреляции:	1	
Прочность сварки:	$4.7 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$	
Размер шва:	8 мм	

Эпюра размера торцевого сварного шва

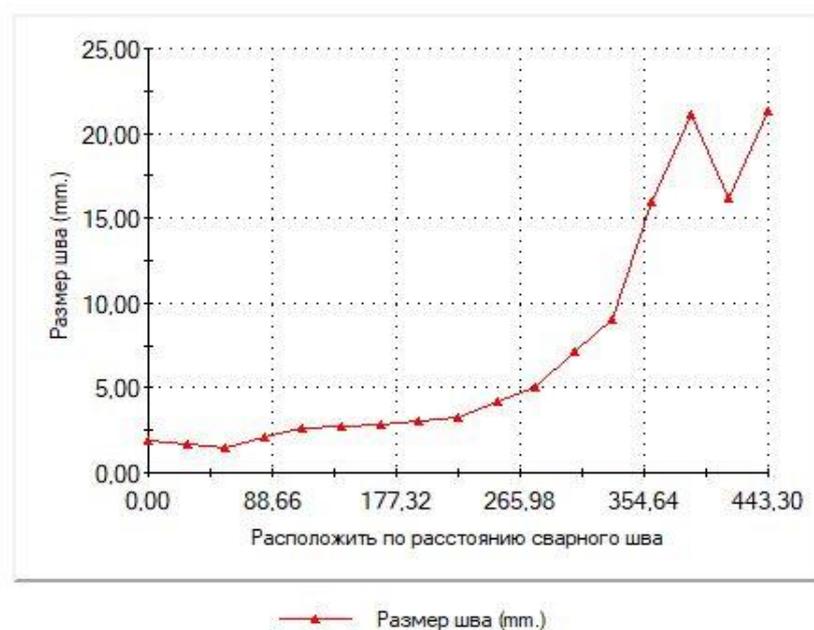


Рисунок 16 – Эпюра размера торцевого сварного шва

Таблица 10 – Отчет программы

Тип	Мин	Макс	Среднее
Радиус галтели шва (м)	0,0015118	0,021318	0,0071602
Нормальная сила (Н)	$-3,5053 \times 10^6$	94979	$-1,0665 \times 10^6$
Сила продольного среза (Н)	$-1,2498 \times 10^5$	$3,5518 \times 10^5$	$4,0777 \times 10^5$
Сила поперечного среза (Н)	0	0	0
Изгибающий момент (Н·м)	-4331	7357,1	697,7

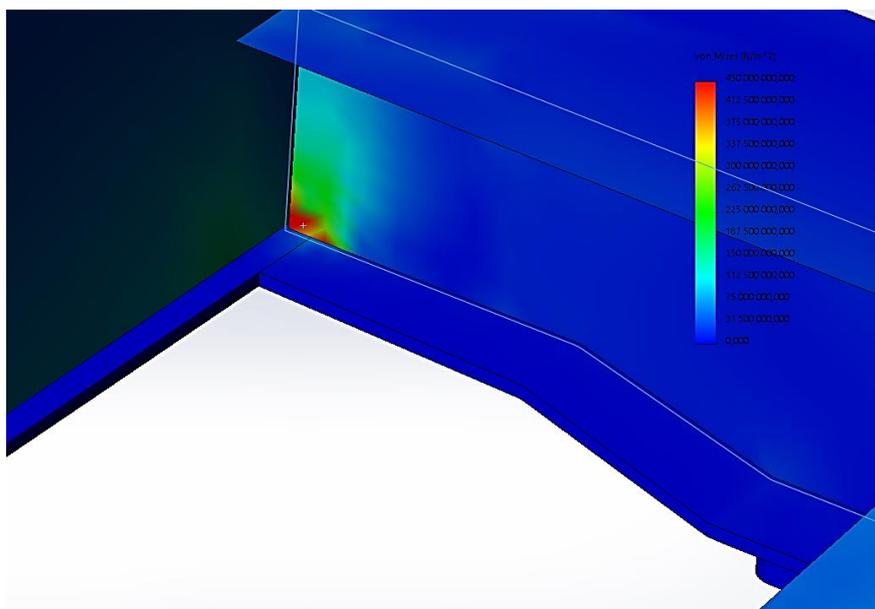


Рисунок 17 – Критическая точка № 3

Таблица 11 – Данные о сварном шве в критической точке №3

Тип:	Стыковой сварной шов двусторонний	
Частичный запас прочности:	1,25	
Коэффициент корреляции:	1	
Прочность сварки:	$4.7 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$	
Размер шва:	8 мм	

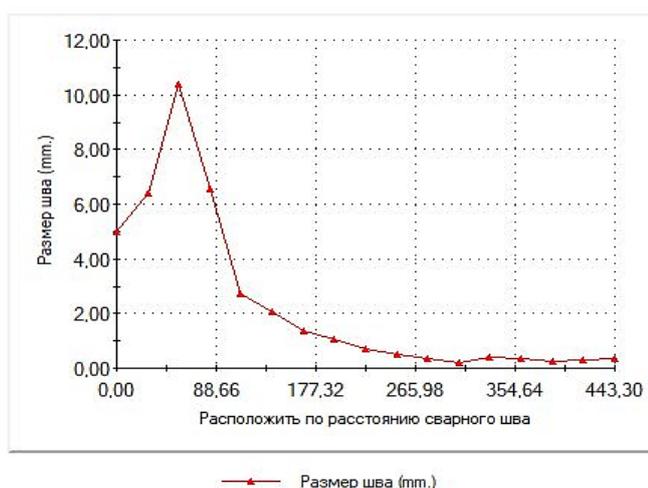


Рисунок 18 – Эпюра размера торцевого сварного шва

Таблица 12 – Отчет программы

Тип	Мин	Макс	Среднее
Радиус галтели шва (м)	0,00020284	0,010405	0,0022914
Нормальная сила (Н)	$-2,3857 \times 10^5$	$1,2602 \times 10^5$	$-6,204 \times 10^5$
Сила продольного среза (Н)	$-1,7465 \times 10^6$	97903	$-2,1485 \times 10^5$
Сила поперечного среза (Н)	0	0	0
Изгибающий момент (Н·м)	-2918	21707	2763,9

При применении сварочного шва критическая точка с максимальным перемещением сместилась на край рамы ТУА, но не изменилась по значению.

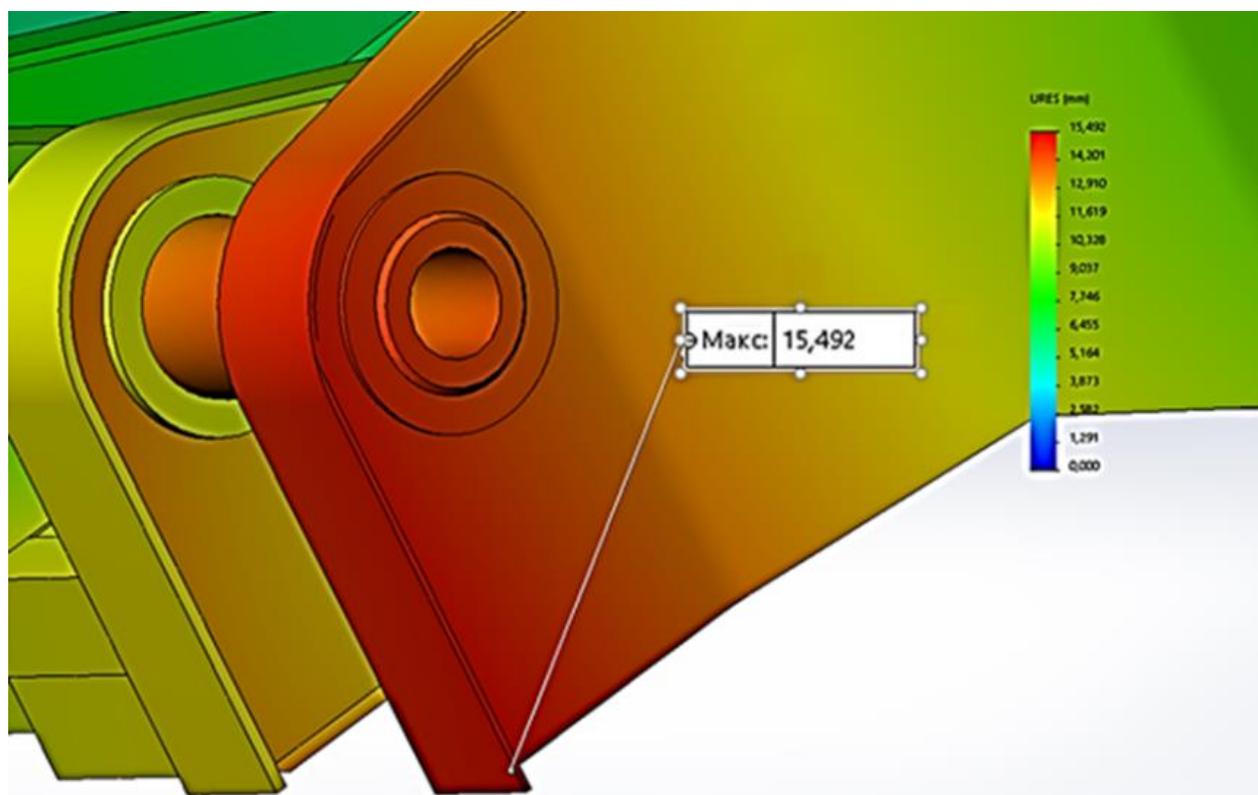


Рисунок 19 – Критическая точка №1 до применения сварочного шва

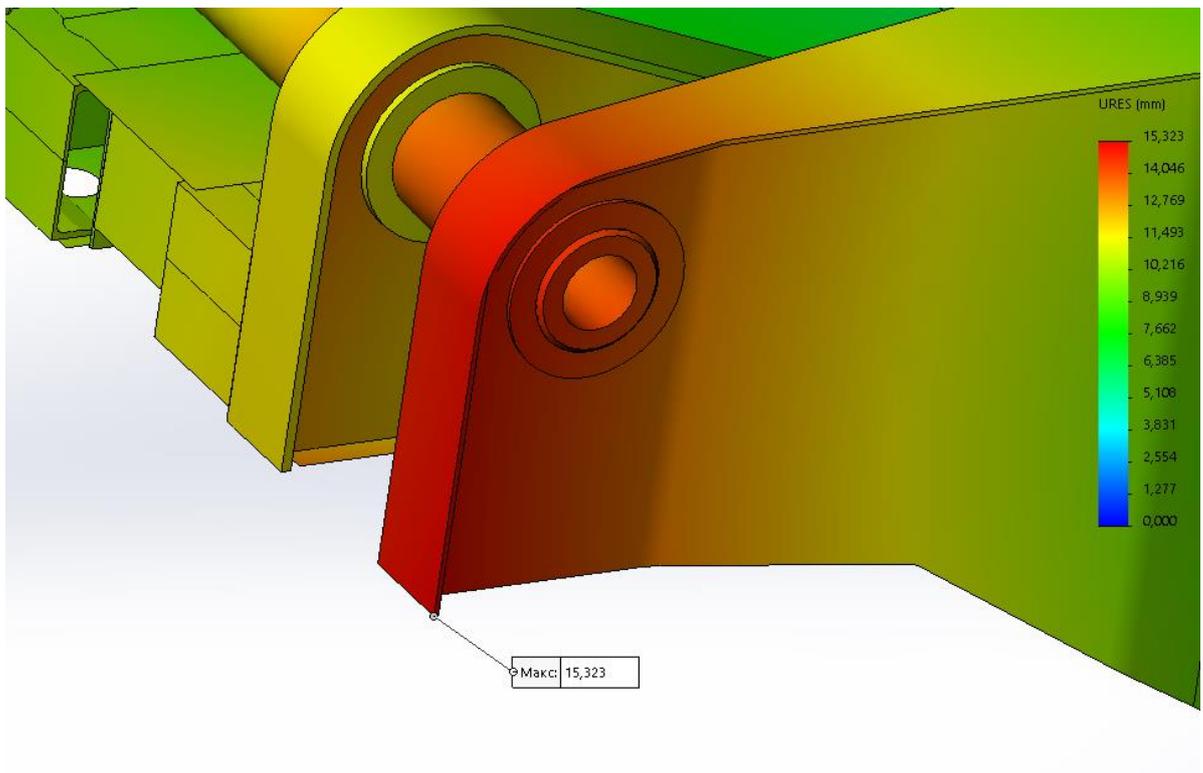


Рисунок 20 – Критическая точка после применения сварочного шва

Рассмотрим влияние дефектов на сварной шов в критической точке №1:  
 - Вычерчиваем отдельно нужные элементы сборки (рисунок 21);

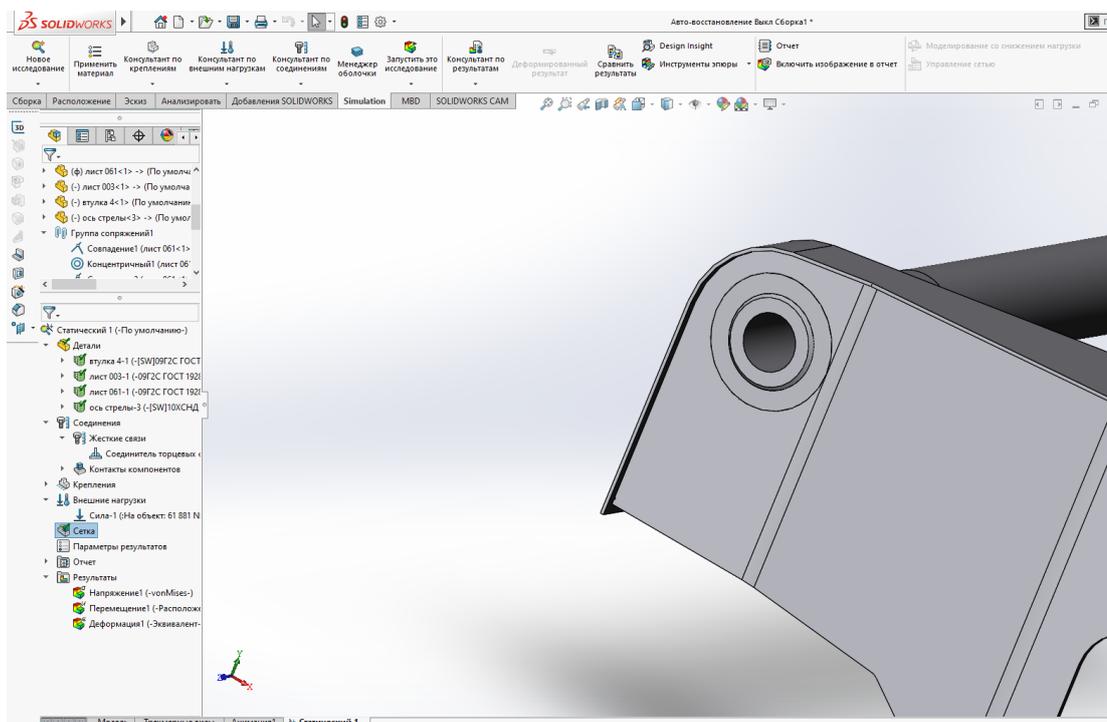


Рисунок 21 – Элементы сборки для анализа

- Накладываем сварной шов (рисунок 22, 23);

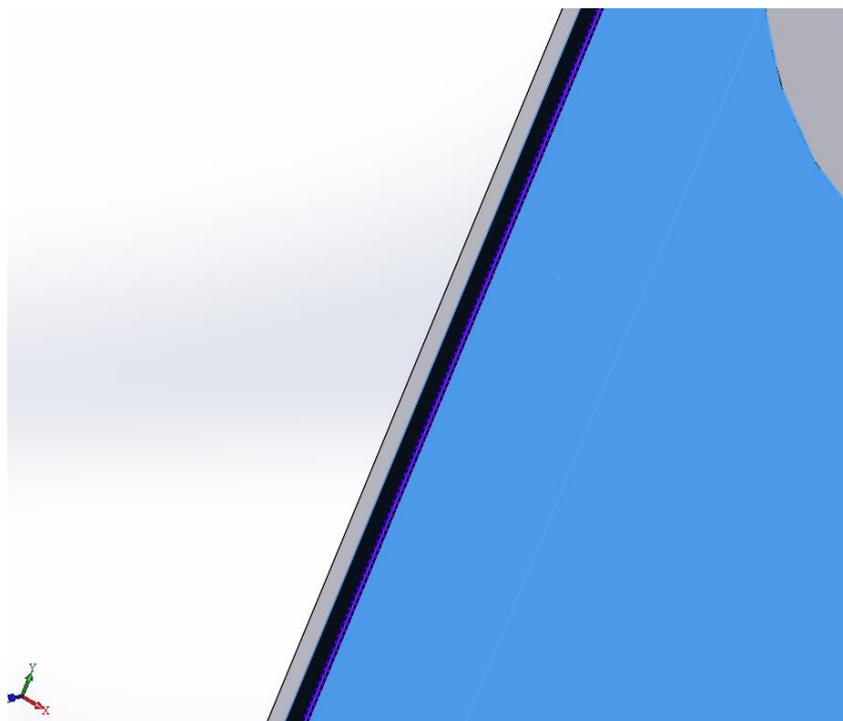


Рисунок 22 – Сварное соединение (фиолетовый цвет)

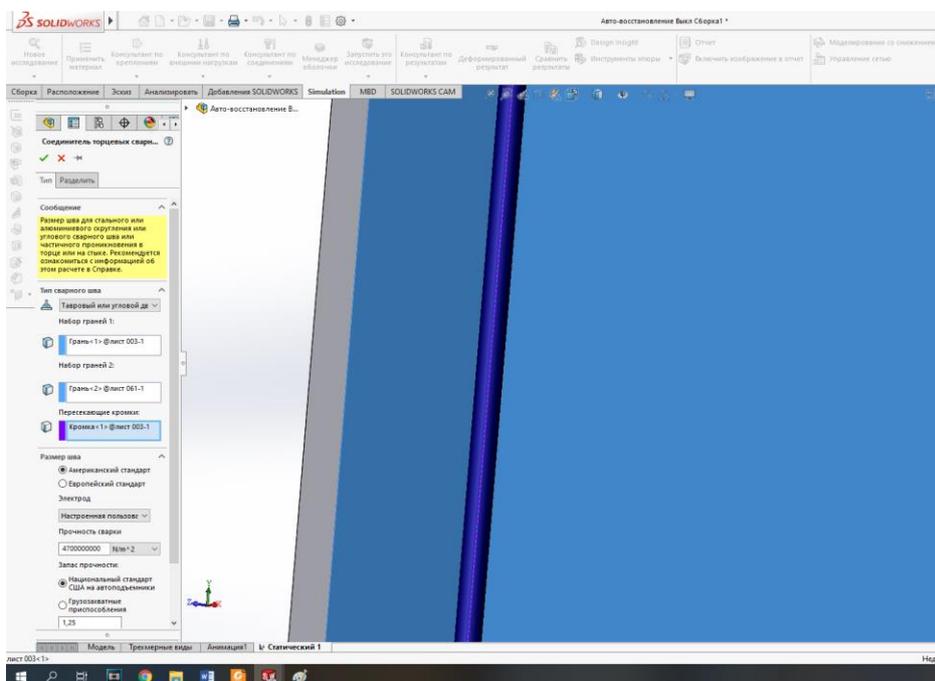


Рисунок 23 – Сварное соединение

- Выбираем материал;
- Строим сетку;

- Прикладываем нагрузку в размере 61881 Н и требуемые закрепления;
- Проводим исследование перемещения (рисунок 24).

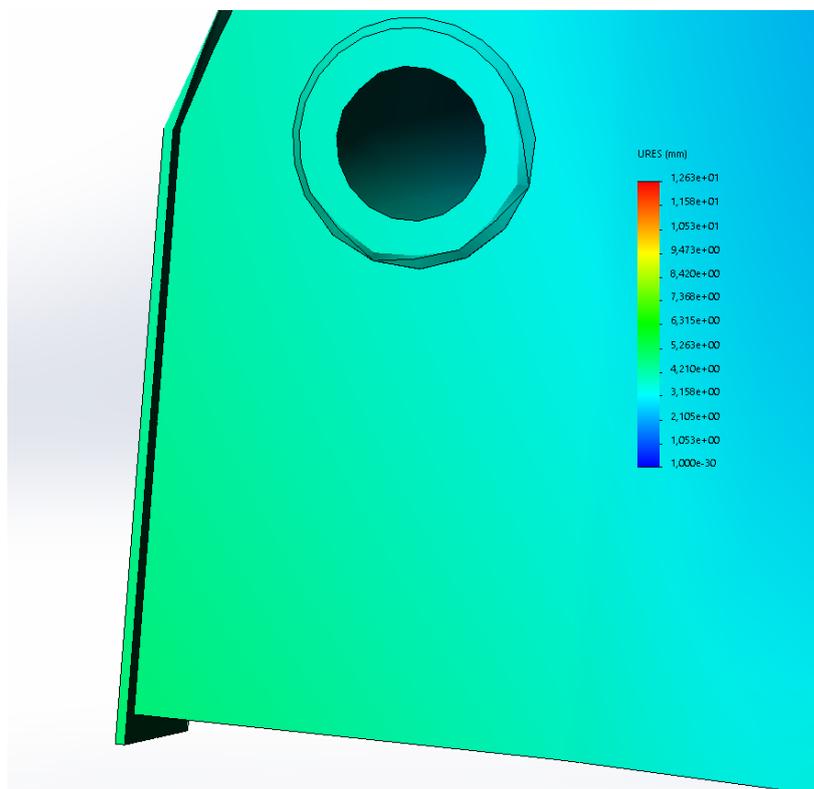


Рисунок 24 – Исследование перемещения



Рисунок 25 – Результаты исследования

Определено, что при заданных условиях перемещение в критической точке со сварным соединением составляет 4,210 мм.

На следующем этапе условно отобразим дефекты, возникновение которых возможно: трещина (рисунок 26) и полость (рисунок 27).

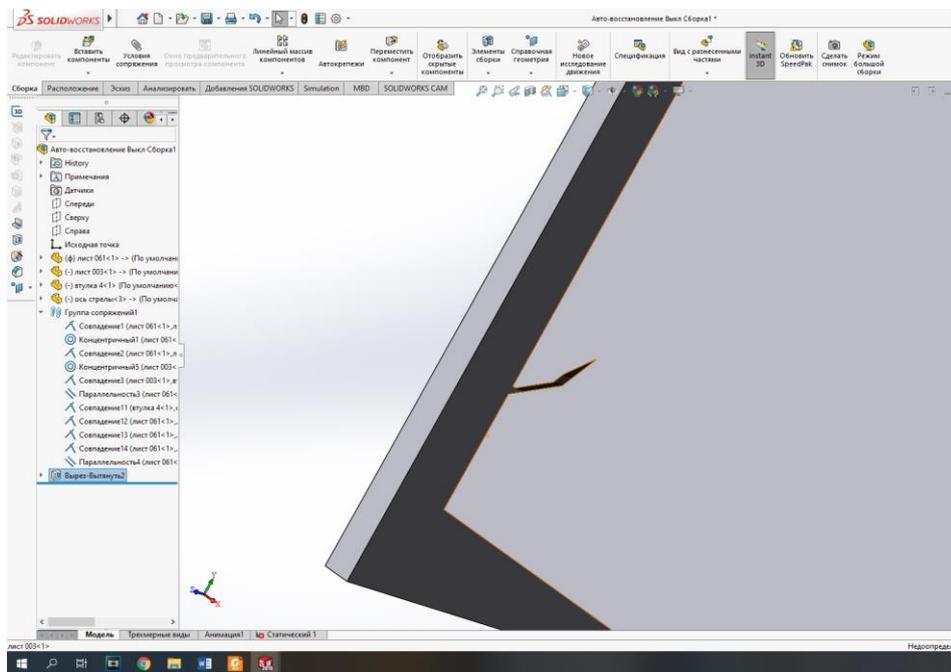


Рисунок 26 – Дефект в виде трещины

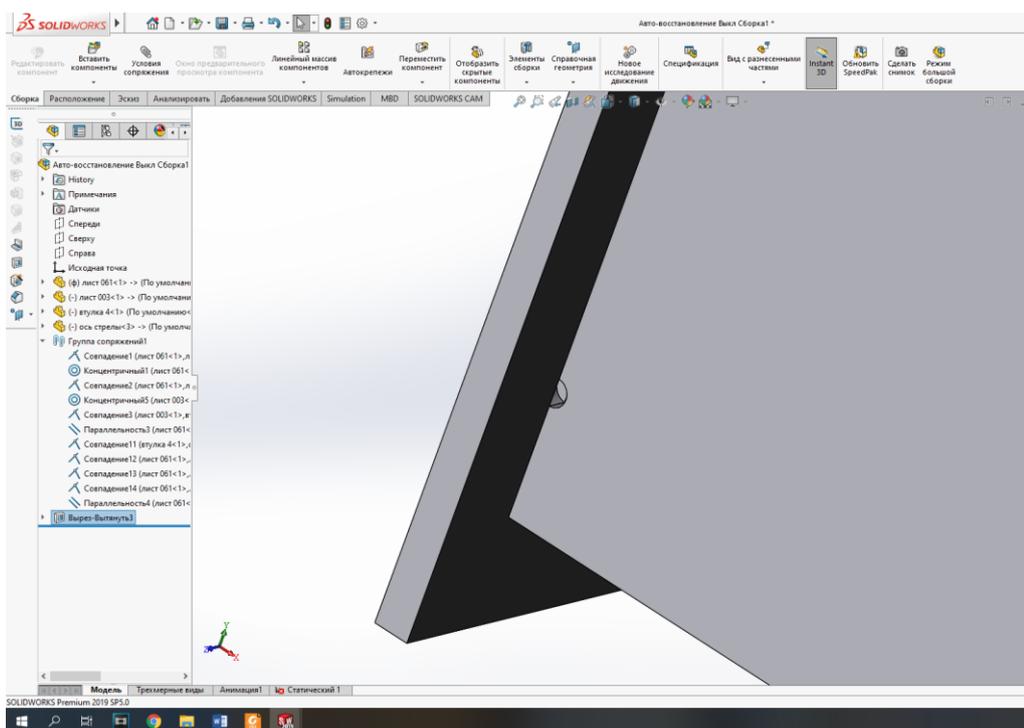


Рисунок 27 – Дефект в виде полости

При проведении исследования на перемещение с каждым из дефектов, получили результаты, представленные на рисунках с 28 по 31 и таблице 13.

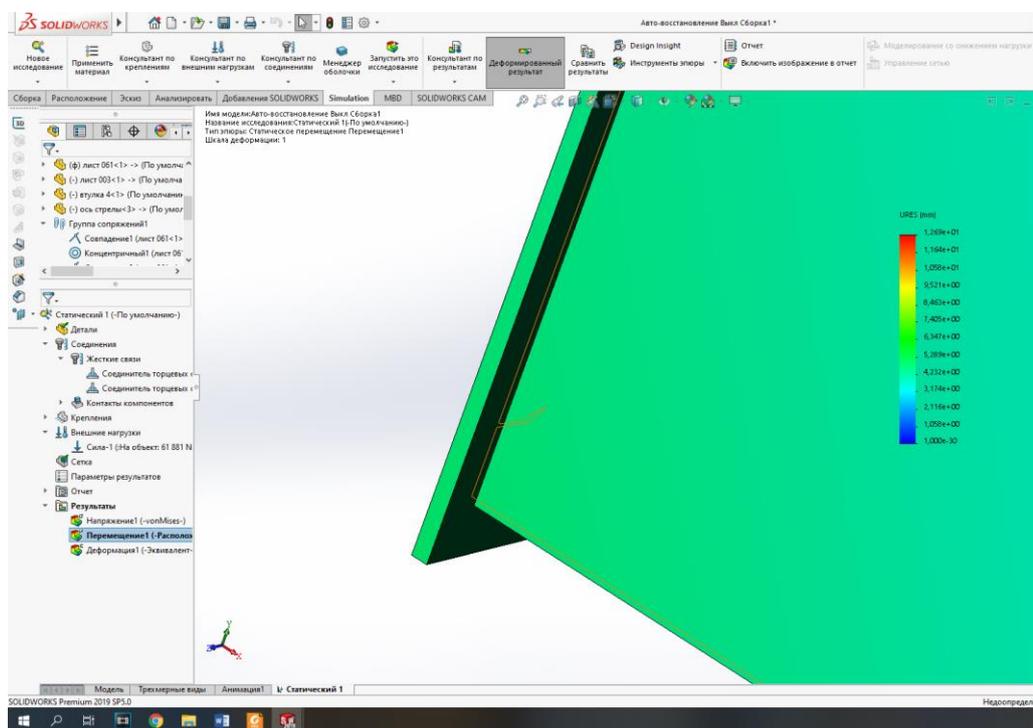


Рисунок 28 – Результаты исследования с дефектом в виде трещины

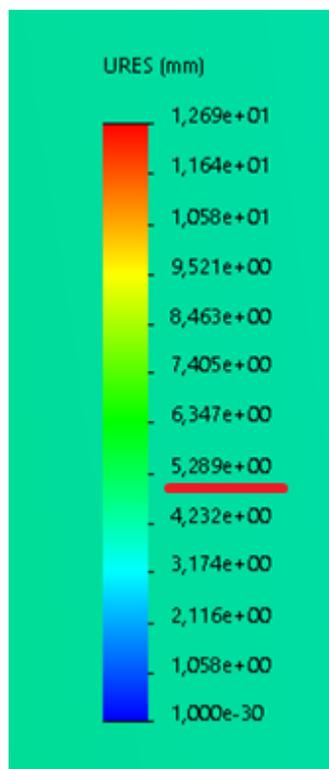


Рисунок 29 – Результаты исследования с дефектом в виде трещины

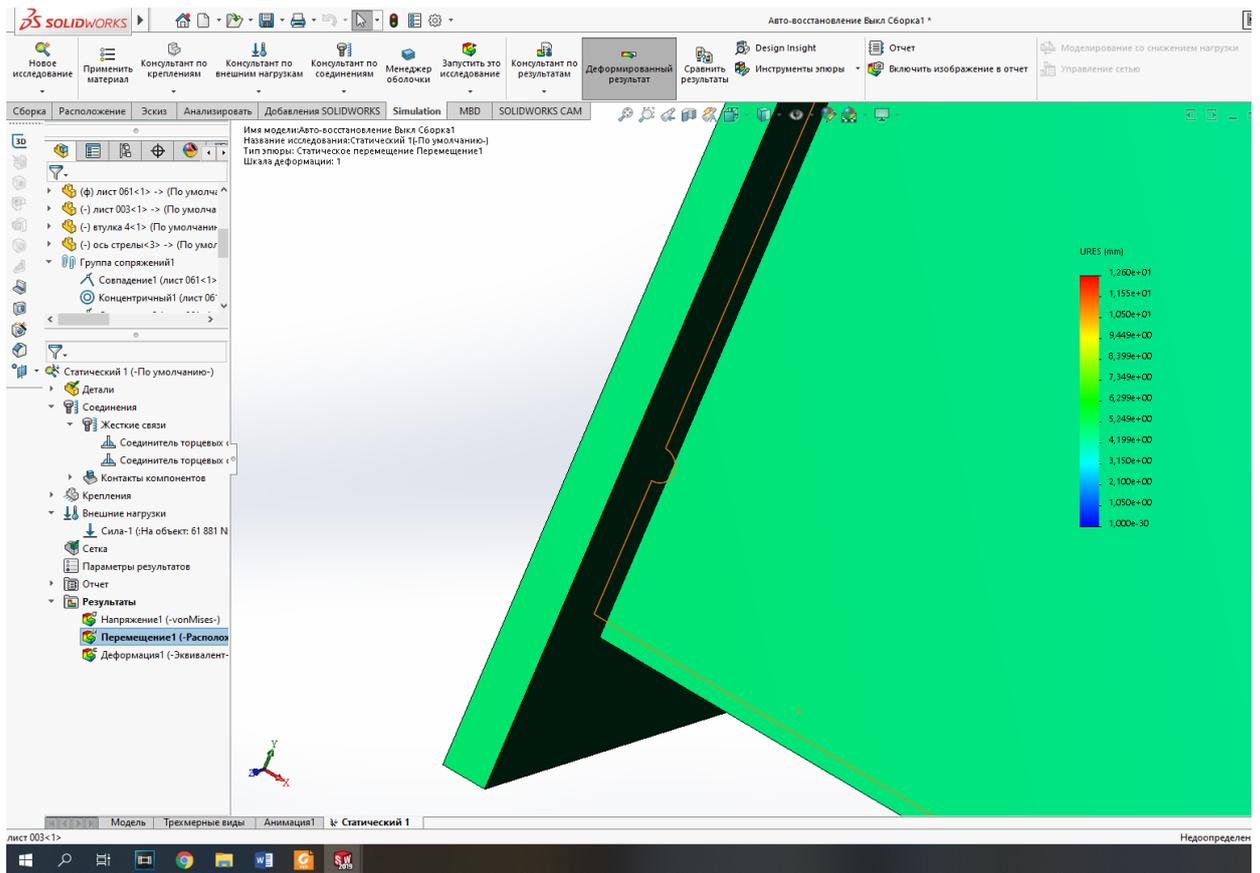


Рисунок 30 – Результаты исследования с дефектом в виде полости

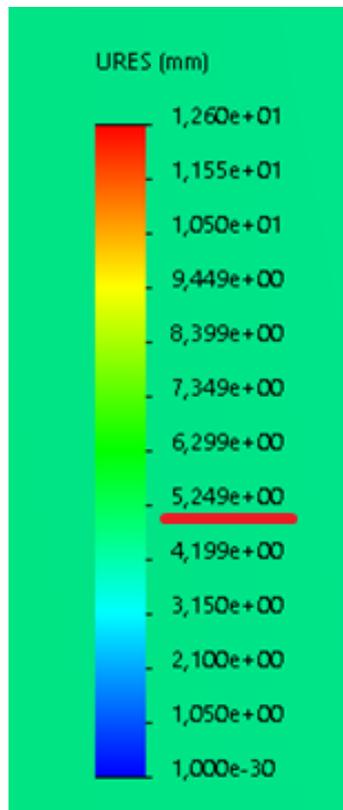


Рисунок 31 – Результаты исследования с дефектом в виде полости

Таблица 13 – Сводные результаты исследования

Название исследования	Сварной шов	Дефект в виде трещины	Дефект в виде полости
Перемещение	4,210 мм	5,289 мм	5,249 мм

Таким образом, определено, что дефекты в сварных соединениях влияют на прочность конструкции. Перемещение с дефектом в виде трещины увеличилось на 1,079 мм, в виде полости на 1,039 мм.

### 3.2 Определение НДС с использованием УЗД сварочного шва

Для контроля сварных швов применяют «прозвучивание» прямым лучом, прямым и однократно отраженным лучом, многократно отраженным лучом, по слоям (все эти способы основаны на совмещенной схеме включения преобразователя в дефектоскоп), а также эхо-зеркальный метод «тандем», зеркально-теневой и теневой методы.

При «прозвучивании» стыковых сварных швов прямым лучом (рис.32 (а)) преобразователь перемещают в околошовной зоне между валиком шва и точкой, удаленной от оси шва на расстояние

$$X_2 = 2\delta \tan \alpha + \frac{e}{2}, \quad (5)$$

где  $\delta$ ,  $e$  – соответственно толщина и ширина шва.

Данный способ контроля наиболее помехоустойчив: при его использовании наблюдается минимум ложных эхо-сигналов от каких-либо элементов конструкции в зоне соединения (приварных косынок, штуцеров и др.). Это единственный способ, пригодный для «прозвучивания» швов толщиной 3,5-10,0 мм, выполненных односторонней сваркой с проплавлением, в которых дефекты находятся в основном в корне шва.

Недостатком этого способа контроля является наличие «мертвой зоны», вызванное тем, что преобразователь упирается в валик шва. Для ее уменьшения

верхнюю часть шва целесообразно «прозвучивать» с помощью преобразователей, имеющих большие углы ввода ультразвука.

Контроль прямым и однократно отраженным лучом (рис. 32 (б)) осуществляется при перемещении преобразователя в околошовной зоне. Этот способ позволяет выполнять контроль с одной стороны сварного соединения. Преобразователь перемещают до линии, отстоящей от оси шва на расстояние  $X_2$ , определяемое по приведенной ранее формуле. Контроль многократно отраженным лучом (рис. 32 (в)) сопровождается большим числом ложных сигналов от валика шва и является наименее помехоустойчивым. Возможность его применения ограничивается случаями, когда отсутствует доступ непосредственно к шву, например, в стыковом соединении, с обеих сторон закрытом приварными накладками.

Контроль по слоям (рис. 32 (г)) обеспечивает наибольшую достоверность результатов, но его рекомендуется применять при толщине швов не менее 40 мм. «Прозвучивание» по слоям осуществляется любым из рассмотренных ранее способов, а эхосигналы от дефектов, расположенных в разных слоях сварного соединения, фиксируются только на определенном участке развертки.

Эхо-зеркальный метод контроля «тандем» (рис. 32 (д)) заключается в одновременном «прозвучивании» шва двумя преобразователями, расположенными с одной стороны шва друг за другом и синхронно перемещающимися в разные стороны относительно плоскости О-О. При таком перемещении преобразователей сумма расстояний  $X_1$  и  $X_2$ , а также время поступления в приемник сигналов, зеркально отраженных от дефектов и обратной стороны сварного соединения, постоянные для данной толщины шва. Это облегчает контроль, так как эхо-сигнал от любого дефекта находится на фиксированном участке развертки, где можно установить метку (строб-импульс) и обеспечить звуковую индикацию дефекта.

Преобразователи могут включаться по отдельной или отдельно-совмещенной схеме. В последнем случае дополнительно регистрируются эхо-сигналы, отраженные обратно к каждому преобразователю.

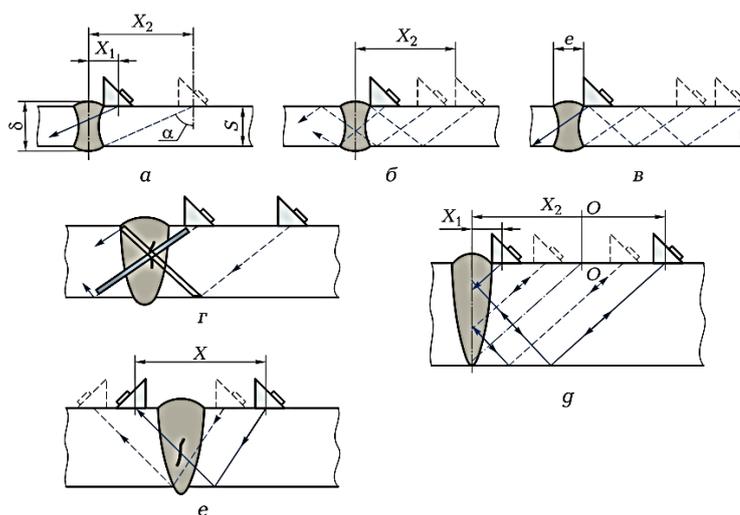


Рисунок 32 – Схемы «прозвучивания» стыковых сварных швов: прямым лучом (а), прямым и однократно отраженным лучом (б), многократно отраженным лучом (в), по слоям (г), эхо-зеркальным методом «тандем» (д), зеркально-теневым методом (е)

$X$  – расстояние между преобразователями;  $X_1$ ,  $X_2$  – расстояния от оси шва до осей преобразователей в их крайних положениях;  $e$  – ширина шва;  $S$  – толщина металла;  $\alpha$  – угол между осью излучателя и поверхностью контролируемой детали;  $\delta$  – толщина шва;  $O-O$  – плоскость, разделяющая зоны перемещения преобразователей

Зеркально-теневой (рис. 32 (е)) и теневой методы рекомендуются только для выявления относительно грубых дефектов. «Прозвучивание» здесь осуществляется двумя преобразователями, включенными по отдельной схеме. Преобразователи установлены по обе стороны шва навстречу друг другу и закреплены с помощью какого-либо приспособления (расстояние между ними равно  $X$ ). О наличии дефекта судят по отсутствию сигнала в стробимпульсе. Данный способ перспективен для контроля швов, выполненных сваркой трением и контактной сваркой давлением.

Особенности контроля. Сварные швы контролируются с одной (при толщине основного металла до 50 мм) или с обеих сторон соединения. Контроль выполняется после внешнего осмотра и устранения выявленных при этом недо-

пустимых поверхностных дефектов. Непосредственно перед контролем подготовленную поверхность околошовной зоны тщательно протирают ветошью и покрывают слоем контактного смазочного материала. Наиболее целесообразно использовать для этого минеральные масла (автолы, компрессорные масла и др.).

Поиск дефектов в шве производится при несколько завышенной чувствительности дефектоскопа посредством продольнопоперечного перемещения преобразователя 4 по всей контролируемой зоне сначала с одной стороны шва, а затем с другой (рис. 33).

Шаг продольного перемещения преобразователя должен составлять не более половины диаметра пьезоэлемента. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно поворачивать вокруг его оси на  $\pm 15^\circ$  для обнаружения дефектов с разной ориентацией. Контакт преобразователя с поверхностью контролируемого сварного соединения обеспечивается легким нажатием на него рукой.

При появлении эхо-сигналов от дефекта на рабочем участке развертки зону перемещения преобразователя сокращают и производят измерение информативных характеристик: координат, амплитуды эхо-сигнала, условной высоты и протяженности дефекта, коэффициента его формы  $K_{\Phi}$  и числа дефектов на стандартном участке шва.

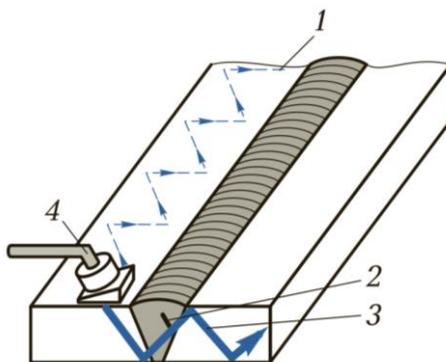


Рисунок 33 – Схема ультразвуковой диагностики сварного шва при наличии в нем трещины

1 – траектория преобразователя; 2 – трещина; 3 – звуковая волна; 4 – преобразователь

При толщине стали от 15 до 30 мм швы, выполненные односторонней сваркой, контролируют прямым и однократно отраженным лучом с использованием одного преобразователя. Наиболее эффективен в этом случае стандартный преобразователь ( $\beta = 50^\circ$ ,  $f = 2,5$  МГц). Если возникает ложный эхо-сигнал от провисания шва, то в целях повышения надежности и помехоустойчивости контроль целесообразно производить отдельно в корневой и остальной части шва. При этом верхнюю часть шва предпочтительно контролировать преобразователем с  $\beta = 40^\circ$ .

Односторонние сварные швы листовых конструкций без подварки корня, как правило, имеют весьма низкое качество. При сварке образуется провисание шва значительных размеров (3-5 мм). Контроль корневой зоны таких швов возможен только после удаления всех неровностей поверхности шлифовальной машинкой.

При толщине стали от 30 до 200 мм швы, выполненные двухсторонней или односторонней с подваркой корня сваркой, контролируют наклонными преобразователями с  $\beta = 30^\circ$  и  $40^\circ$  на частотах 1,8 и 2,5 МГц. Статистика контроля показывает, что в этих швах распределение дефектов по видам следующее: от 65 % до 70 % – шлаковые включения, 10 % – поры и от 20 % до 25 % – плоскостные дефекты.

Наиболее опасные дефекты – трещины и непровары – ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости. Такие дефекты, расположенные в сечении шва, плохо выявляются при однощуповой схеме «прозвучивания». Для их обнаружения необходимо применять схему «тандем».

Сварные швы при толщине стали более 200 мм необходимо контролировать на пониженных частотах (1,0-1,25 МГц) и, что особенно важно, после термообработки, если она предусмотрена технологией. Благодаря термообработке измельчается зерно и возрастает степень однородности структуры, что уменьшает затухание ультразвука в шве и околошовной зоне и повышает достоверность контроля.

#### 4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТО

Работы по ТО обеспечивают выполнение задачи по поддержанию ТУА в состоянии постоянной технической исправности и готовности к применению.

При выработке гарантийных ресурсов комплектующих элементов производится их замена новыми из комплекта ЗИП или продление срока эксплуатации.

Замена комплектующих элементов производится по технологическим картам. Комплектующие элементы, срок гарантии которых истек, допускаются к дальнейшей эксплуатации в составе ТУА до очередного частичного технического освидетельствования, если при предыдущем техническом освидетельствовании они функционировали нормально.

К ТО ТУА допускаются лица, хорошо изучившие инструкцию по эксплуатации и указания по технике безопасности.

При проведении ТО необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

- обслуживание производить на свободной от посторонних предметов площадке. Площадка должна быть хорошо освещена и оборудована противопожарными средствами;

- запрещается производить работы по обслуживанию во время установки и подъема груза;

- все работы производить только по командам руководителя работ;

- немедленно докладывать руководителю работ обо всех замеченных неисправностях;

- немедленно подавать команду "Стоп", если замеченная неисправность или неправильное действие любого номера расчета могут повлечь за собой несчастный случай, повреждение оборудования или аварию;

- немедленно выполнять команду "Стоп", поданную любым номером расчета;

- запрещается находиться на платформе ТУА во время подъема стрелы;

- все работы производить только исправным инструментом;

- работы по ТО электрооборудования должны производить не менее двух человек;
- запрещается производить работы при наличии напряжения на металлоконструкции или корпусах электрооборудования;
- подключать ТУА к колонке питания разрешается только после установки заземляющего провода;
- работы по регулировке узлов электрооборудования и осмотр токоведущих частей проводить только при снятом напряжении;
- запрещается заменять или регулировать гидравлическую аппаратуру, подтягивать резьбовые соединения при наличии давления в гидроприводе;
- запрещается пользоваться удлинителями при подтягивании резьбовых соединений;
- запрещается производить включение гидропривода при неисправных манометрах или с истекшими сроками поверки;
- запрещается производить включение гидропривода при обнаружении в нем течи;
- для монтажа и демонтажа узлов ТУА применять подъемные средства и испытанные штатные палочные приспособления, срок освидетельствования которых не истек;
- запрещается поднимать и переносить одному человеку детали и узлы, вес которых более 30 кг;
- запрещается хранить на технологической площадке горюче-смазочные и обтирочные материалы;
- запрещается хранить на открытом воздухе использованную, пропитанную горюче-смазочными материалами ветошь (использованную ветошь хранить в специальных закрытых железных ящиках);
- запрещается оставлять на ТУА и особенно на стреле какие-либо посторонние предметы (ветошь, инструмент, крепежные детали и т.д.) после очередного ТО;

- запрещается подтягивать соединения при наличии давления в гидроприводе;
- запрещается поднимать стрелу с грузом и без груза при скорости ветра более 15 м/с;
- запрещается применение обслуживающим персоналом одежды, приспособлений и материалов из синтетических тканей (нейлон, перлон и т.п.), а также изделий из материалов, на которых аккумулируются заряды статического электричества (кольца, броши, браслеты и т.п.);
- запрещается применение обуви и одежды, вызывающей искрообразование.

#### **4.1 Объем работ при еженедельном техническом обслуживании**

При еженедельном ТО ТУА при его эксплуатации необходимо:

- очистить узлы и детали ТУА от грязи, песка, снега и льда;
- проверить целостность чехлов ТУА и, при необходимости, провести их ремонт;
- произвести наружный осмотр гидропривода;
- проверить отсутствие течи рабочей жидкости в узлах и соединениях гидропривода, убедиться в отсутствии наружных дефектов гидропривода;
- обнаруженные дефекты устранить;
- проверить состояние габаритных светильников;
- проверить надежность крепления двигателей и электрических кабелей.

Ослабление не допускается;

- проверить наружным осмотром целостность электрических кабелей и соединителей;
- проверить пломбировку узлов;
- провести еженедельное ТО платформы.

#### **4.2 Объем работ при ежемесячном техническом обслуживании**

При ежемесячном ТО в процессе эксплуатации ТУА необходимо:

- провести работы в объеме еженедельного ТО;

- проверить внешним осмотром состояние металлоконструкции ТУА на отсутствие трещин, вмятин и погнутостей; проверить отсутствие трещин в сварных швах;

- проверить состояние окрашенных поверхностей ТУА и при необходимости произвести их подкраску;

- проверить надежность затяжки и состояние резьбовых соединений оборудования стрелы, крыльев, узлов гидропривода и трубопроводов, электроаппаратуры и кабелей; при необходимости резьбовые соединения подтянуть;

- проверить уровень рабочей жидкости в гидробаках насосных станций по красным контрольным рискам маслоуказательных окон.

- рабочую жидкость долить. Заливку рабочей жидкости производить через заливную горловину с плотно уложенной в нее в два слоя хлопчатобумажной тканью из опломбированной заводской тары, вскрытой непосредственно перед заливкой при снятом стакане воздушного фильтра;

- убедиться в исправности манометров;

- вскрыть пульты управления и аппаратный шкаф и осмотреть состояние в них электрооборудования. Неисправные элементы заменить новыми из комплекта ЗИП. При необходимости с деталей электрооборудования удалить пыль кисточкой, смоченной в нефрасе или уайт-спирите.

#### **4.3 Объем работ при техническом обслуживании перед работой с изделием**

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

При техническом обслуживании ТУА перед работой с изделием необходимо:

- проверить внешним осмотром состояние металлоконструкции ТУА на отсутствие трещин, вмятин и погнутостей; проверить отсутствие трещин в сварных швах;

- проверить надежность затяжки и состояние резьбовых соединений оборудования стрелы, крыльев, узлов гидропривода и трубопроводов, электроаппаратуры и кабелей; при необходимости резьбовые соединения подтянуть;
- проверить срок чистки фильтров гидропривода и в случае наработки ТУА 20 циклов (после последней очистки фильтров);
- проверить уровень рабочей жидкости в гидробаках насосных станций по красным контрольным рискам маслоуказательных окон;
- убедиться в исправности манометров;
- вскрыть пульта управления и аппаратный шкаф и осмотреть состояние в них электрооборудования. Неисправные элементы заменить новыми из комплекта ЗИП. При необходимости, с деталей электрооборудования удалить пыль кисточкой, смоченной в нефрасе или уайт-спирите;
- произвести проверку сопротивления изоляции аппаратного шкафа, пультов управления, пульта проверки гидропривода и кабельной сети;
- проверить герметичность гидропривода. Допускается совмещать проверку герметичности с проверкой ТУА на функционирование.
- проверить регулировку торсионов нижней опоры и при необходимости произвести их регулировку;
- проверить положение стрелки указателя наклона стрелы. При горизонтальном положении стрелы стрелка должна совпадать с нулевой отметкой на шкале;
- провести обслуживание платформы в объеме ТО перед работой;
- провести проверку освещения ТУА;
- проверить ТУА на функционирование.

#### **4.4 Объем работ при годовом техническом обслуживании**

При годовом ТО в процессе эксплуатации ТУА необходимо:

- провести работы в объеме ежемесячного ТО;
- произвести анализ рабочей жидкости в гидроприводе;
- провести очистку воздушных фильтров гидробаков насосных станций;
- провести очистку фильтров гидропривода;

- провести прокачку гидропривода;
- произвести смазку ТУА;
- произвести обязательную проверку манометров в контрольно-измерительной лаборатории;
- произвести проверку сопротивления изоляции аппаратного шкафа, пультов управления, пульта проверки гидропривода и кабельной сети;
- произвести проверку освещения ТУА;
- проверить регулировку программного механизма. Регулировку программного механизма производить и в случае замены одного или нескольких конечных выключателей;
- провести ТО комплекта ЗИП;
- произвести внешний осмотр грузового макета и убедиться в отсутствии коррозии и повреждения окраски металлоконструкции макета. Проверить комплектность макета и наличие маркировки на фермах и грузах.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 5.1 Экономическое обоснование использования УЗД

Ультразвуковой контроль сварных соединений (дефектоскопия, УЗК) является популярным методом неразрушающего контроля. Он является обязательным.

Ультразвуковой контроль представляет собой экспертизу, которая способна в кратчайшие сроки выявить:

- износ изделий;
- поверхностные или внутренние дефекты металлов и сплавов;
- качество изделия или отдельного сварного шва.

С помощью проведения ультразвуковой экспертизы можно с легкостью определить такие дефекты сварного соединения, как:

- трещины в зоне рядом со швом,
- поры;
- непровар;
- расслоения металла;
- некачественность шва;
- свищи;
- коррозия;
- участки с искажением размера и несоответствием химического состава;
- провисание металла в нижней зоне шва;

Исследование сварного соединения можно проводить в таких металлах, как:

- медь;
- легированные и аустенитные стали;
- чугун и др.

Проверкам подвергаются следующие разновидности швов:

- плоские;
- продольные;

- кольцевые;
- тавровые соединения;
- сварные стыки;
- сварные трубы.

Геометрические рамки УЗД:

1. Максимальная глубина залегания сварного соединения: 10 метров.
2. Минимальная глубина сварных швов: 3-4 мм.
3. Минимальная толщина шва: 8-10 мм (зависит от прибора).

Таблица 14 – Стоимость услуг лаборатории неразрушающего контроля

Наименование вида оказываемых услуг.	Ед. изм.	Стоимость за единицу (без учета НДС)	Сумма НДС	Стоимость за единицу (с учетом НДС)
Визуальный и измерительный контроль:				
сварных соединений оборудования и конструкций в вертикальном и горизонтальном положении:				
стыковые, угловые, нахлесточные.	1 п.м.	144,42	26,00	170,42
Основной металл оборудования и трубопроводов:				
любой формы	1 м <sup>2</sup>	364, 53	65,62	430,15
Ультразвуковой контроль:				
сварных соединений (стыковых)				
Толщинометрия металлоконструкций	1 замер	239,66	43,14	282,80
57 мм	1 стык	638,24	114,88	753,12
76 мм	1 стык	720,27	129,65	849,92
89 мм	1 стык	720,27	129,65	849,92
108 мм	1 стык	720,27	129,65	849,92
114 мм	1 стык	818,74	147,37	966,11
127 мм	1 стык	818,74	147,37	966,11
133 мм	1 стык	818,74	147,37	966,11
146 мм	1 стык	818,74	147,37	966,11
152 мм	1 стык	818,74	147,37	966,11
159 мм	1 стык	947,42	170,54	1117,96
168 мм	1 стык	947,42	170,54	1117,96
194 мм	1 стык	947,42	170,54	1117,96
219 мм	1 стык	1 142,87	205,72	1348,59
245 мм	1 стык	1 142,87	205,72	1348,59
273 мм	1 стык	1 142,87	205,72	1348,59
325 мм	1 стык	1 256,56	226,18	1482,74

Продолжение таблицы 14

377 мм	1 стык	1 370,24	246,64	1616,88
426 мм	1 стык	1 515,61	272,81	1788,42
530 мм	1 стык	1 515,61	272,81	1788,42
630 мм	1 стык	1 813,02	326,34	2139,36
720 мм	1 стык	1 941,70	349,51	2291,21
820 мм	1 стык	2 072,07	372,97	2445,04
920 мм	1 стык	2 558,51	460,53	3019,04
1020 мм	1 стык	2 558,51	460,53	3019,04
1120 мм	1 стык	2 847,71	512,59	3360,30
1220 мм	1 стык	2 847,71	512,59	3360,30
Лист толщиной до 20мм	1 п.м.	1525,42	274,58	1800,00
Лист толщиной свыше 20мм	1 п.м.	1669,50	300,51	1970,01
сварных соединений (угловых)				
57 мм	1 стык	664,62	119,63	784,25
76 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
89 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
108 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
114 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
127 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
133 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
146 мм	1 стык	750,06	135,01	885,07
152 мм	1 стык	852,65	153,48	1006,13
159 мм	1 стык	986,24	177,52	1163,76
168 мм	1 стык	986,24	177,52	1163,76
194 мм	1 стык	986,24	177,52	1163,76
219 мм	1 стык	1189,6	214,13	1403,73
245 мм	1 стык	1189,6	214,13	1403,73
273 мм	1 стык	1189,6	214,13	1403,73
325 мм	1 стык	1307,81	235,41	1543,22
377 мм	1 стык	1426,03	256,69	1682,72
426 мм	1 стык	1577,04	283,87	1860,91
530 мм	1 стык	1577,04	283,87	1860,91
630 мм	1 стык	1887,28	339,71	2226,99
720 мм	1 стык	2020,85	363,75	2384,60
820 мм	1 стык	2156,51	388,17	2544,68
920 мм	1 стык	2662,15	479,19	3141,34
1020 мм	1 стык	2662,15	479,19	3141,34
1120 мм	1 стык	2962,29	533,21	3495,50
1220 мм	1 стык	2962,29	533,21	3495,50
1420 мм	1 стык	3231,52	581,67	3813,19
сварных соединений оборудования и конструкций в вертикальном и горизонтальном положении, при толщине основного металла:				
до 10 мм	1 п.м.	1440,68	259,32	1700,00
свыше 10 мм до 20 мм	1 п.м.	1559,32	280,68	1840,00
свыше 20 мм	1 п.м.	1711,86	308,13	2019,99

основного металла оборудования и конструкций				
простой формы одним датчиком	1 дм <sup>2</sup>	1440,84	259,35	1700,19
сложной формы одним датчиком	1 дм <sup>2</sup>	1496,84	269,43	1766,27
Радиографический контроль:				
сварных соединений (стыковых) трубопроводов, диаметром:				
57 мм толщина 5	1 стык	1 359,62	244,73	1604,35
57 мм толщина 11	1 стык	1 477,48	265,95	1743,43
76 мм толщина 5	1 стык	1 499,29	269,87	1769,16
76 мм толщина 10	1 стык	1 563,87	281,50	1845,37
89 мм толщина 5	1 стык	1 584,04	285,13	1869,17
89 мм толщина 10	1 стык	1 648,62	296,75	1945,37
108 мм толщина 5	1 стык	1 923,02	346,14	2269,16
108 мм толщина 10	1 стык	1 987,60	357,77	2345,37
114 мм толщина до 5	1 стык	2 124,51	382,41	2506,92
114 мм толщина до 10	1 стык	2 230,31	401,46	2631,77
127 мм толщина до 5	1 стык	2 248,79	404,78	2653,57
127 мм толщина до 10	1 стык	2 357,27	424,31	2781,58
133 мм толщина до 5	1 стык	2 248,79	404,78	2653,57
133 мм толщина до 10	1 стык	2 357,27	424,31	2781,58
146 мм толщина до 5	1 стык	2 248,79	404,78	2653,57
146 мм толщина до 10	1 стык	2 357,27	424,31	2781,58
152 мм толщина до 10	1 стык	2 248,79	404,78	2653,57
152 мм толщина до 15	1 стык	2 357,27	424,31	2781,58
159 мм толщина до 10	1 стык	2 672,52	481,05	3153,57
159 мм толщина до 15	1 стык	2 781,00	500,58	3281,58
159 мм толщина до 20	1 стык	3 030,39	545,47	3575,86
168 мм толщина до 10	1 стык	2 672,52	481,05	3153,57
168 мм толщина до 15	1 стык	2 781,00	500,58	3281,58
168 мм толщина до 20	1 стык	3 030,39	545,47	3575,86

## Продолжение таблицы 14

194 мм толщина до 15	1 стык	3 035,24	546,34	3581,58
194 мм толщина до 20	1 стык	3 199,88	575,98	3775,86
219 мм толщина до 12	1 стык	2 842,01	511,56	3353,57
219 мм толщина до 16	1 стык	3 035,24	546,34	3581,58
219 мм толщина до 20	1 стык	3 199,88	575,98	3775,86
245 мм толщина 10	1 стык	2 842,01	511,56	3353,57
245 мм толщина 15	1 стык	3 035,24	546,34	3581,58
245 мм толщина 20	1 стык	3 199,88	575,98	3775,86
273 мм толщина 10	1 стык	3 262,71	587,29	3850,00
273 мм толщина 15	1 стык	3 457,63	622,37	4080,00
273 мм толщина 20	1 стык	3 559,32	640,68	4200,00
325 мм толщина 10	1 стык	3 364,41	605,59	3970,00
325 мм толщина 15	1 стык	3 453,39	621,61	4075,00
325 мм толщина 20	1 стык	3 567,80	642,20	4210,00
377 мм толщина 10	1 стык	3 610,72	649,93	4260,65
377 мм толщина 15	1 стык	3 703,39	666,61	4370,00
377 мм толщина 20	1 стык	3 825,82	688,65	4514,47
426 мм толщина 10	1 стык	3 737,29	672,71	4410,00
426 мм толщина 15	1 стык	3 830,51	689,49	4520,00
426 мм толщина 20	1 стык	3 949,15	710,85	4660,00
530 мм толщина 10	1 стык	3 940,68	709,32	4650,00
530 мм толщина 15	1 стык	4 016,95	723,05	4740,00
530 мм толщина 20	1 стык	4 144,07	745,93	4890,00
630 мм толщина 10	1 стык	4 583,01	824,94	5407,95
630 мм толщина 15	1 стык	5 698,20	1025,68	6723,88

Продолжение таблицы 14

630 мм толщина 20	1 стык	6 854,15	1233,75	8087,90
720 мм толщина 10	1 стык	5 068,60	912,35	5980,95
720 мм толщина 15	1 стык	6 322,91	1138,12	7461,03
720 мм толщина 20	1 стык	7 601,94	1368,35	8970,29
820 мм толщина 10	1 стык	5 631,78	1013,72	6645,50
820 мм толщина 15	1 стык	7 025,46	1264,58	8290,04
820 мм толщина 20	1 стык	8 446,60	1520,39	9966,99
920 мм толщина 10	1 стык	6 758,13	1216,46	7974,59
920 мм толщина 15	1 стык	8 430,55	1517,50	9948,05
920 мм толщина 20	1 стык	10 135,92	1824,47	11960,39
1020 мм толщина 10	1 стык	6 758,13	1216,46	7974,59
1020 мм толщина 15	1 стык	8 430,55	1517,50	9948,05
1020 мм толщина 20	1 стык	10 135,92	1824,47	11960,39
1120 мм толщина 10	1 стык	6 558,48	1180,53	7739,01
1120 мм толщина 15	1 стык	8 649,15	1556,85	10206,00
1120 мм толщина 20	1 стык	9 133,10	1643,96	10777,06
1220 мм толщина 10	1 стык	7 990,48	1438,29	9428,77
1220 мм толщина 15	1 стык	9 459,22	1702,66	11161,88
1220 мм толщина 20	1 стык	9 962,10	1793,18	11755,28
1420 мм толщина 10	1 стык	8 800,55	1584,10	10384,65
1420 мм толщина 15	1 стык	11 537,88	2076,82	13614,70
1420 мм толщина 20	1 стык	12 183,37	2193,01	14376,38
Лист толщиной до 25 мм	1п.м	2271,40	408,85	2680,25
Лист толщиной свыше 25 мм	1п.м	2476,40	445,75	2922,15

<b>Цветная дефектоскопия (капиллярный метод):</b>				
металлоконструкц ии	1 дм2	4 652,54	837,46	5490,00
<b>Цветная дефектоскопия (магнитно-порошковый метод):</b>				
металлоконструкц ии	1 дм2	1 140,37	205,27	1345,64

Для того чтобы определить какой из способов диагностики наиболее выгодный для производства, возьмем реальный лист из рамы ТУА:

- длина 2870 мм - 2,87 м;
- ширина 780 мм – 0,78 м;
- толщина 14 мм;
- 1 стык.

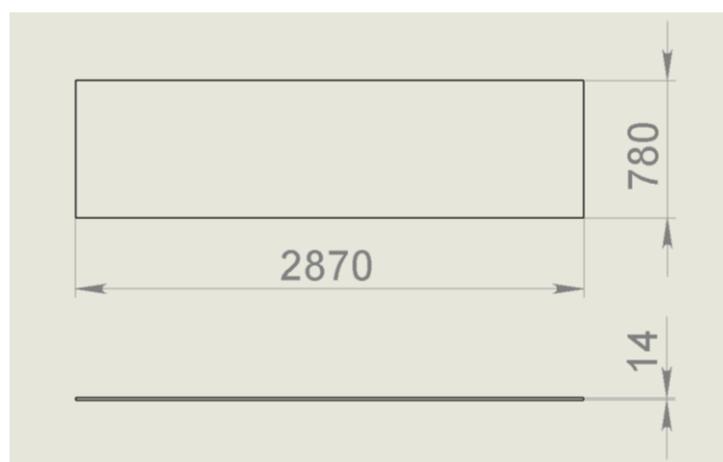


Рисунок 34 – Выбранный для расчета лист

Визуальный и измерительный контроль:

Для сварных соединений оборудования и конструкций в вертикальном и горизонтальном положении за 1 м с учетом НДС - 170,42 рублей.

$$2,87 \text{ м} \cdot 170,42 \frac{\text{руб}}{\text{м}} = 489,11 \text{ руб.}$$

Ультразвуковой контроль:

Для УЗК лист толщиной свыше 20 мм за 1 метр с учетом НДС составит - 1800,00 рублей. Тогда стоимость за данный лист составит:

$$2,87 \text{ м} \cdot 1800 \text{ руб/м} = 5166 \text{ руб.}$$

Радиографический контроль:

Лист толщиной до 25 мм за 1 м с учетом НДС составит – 2680 руб. Тогда для данного листа:  $2,87 \text{ м} \cdot 2680 \text{ руб/м} = 7691,60 \text{ руб.}$

Цветная дефектоскопия (капиллярный метод):

Металлоконструкции за 1 дм<sup>2</sup> с учетом НДС – 5490 рублей.

$$223,86 \text{ дм}^2 \cdot 5490 \frac{\text{руб}}{\text{дм}^2} = 1228991,40 \text{ руб.}$$

Цветная дефектоскопия (магнитно-порошковый метод):

Для металлоконструкций за 1 дм<sup>2</sup> с учетом НДС - 1345,64 рублей.

$$223,86 \text{ дм}^2 \cdot 1345,64 \frac{\text{руб}}{\text{дм}^2} = 301234,97 \text{ руб.}$$

Так как визуальный контроль не может оценить внутренние повреждения, а только наружные, то его в расчет не берем. Таким образом самым выгодным для диагностики является ультразвуковой контроль качества сварных соединений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассмотрены типичные дефекты при сварке стали 10ХСНД, а также влияние дефектов на работоспособность сварных конструкций. Проанализированы различные методы диагностики дефектов в сварных соединениях. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние, определена устойчивость ТУА. Проанализировано экономическое обоснование использования ультразвуковой диагностики. А также изучена техника безопасности при проведении ТО и объем работ при техническом обслуживании.

В результаты данной работы были сделаны следующие выводы:

1) При анализе методов диагностики нахождения дефектов в сварных соединениях, определено что лучшим методом является ультразвуковая дефектоскопия, так как она обеспечивает высокую достоверность результатов контроля;

2) В специальной части были приложены нагрузки к раме ТУА, рассмотрено напряженно-деформированное состояние. В результате расчетов выявлены критические точки, которые обнаружены в узлах 596920, 308478. В них максимальное напряжение составило –  $5831419392,000 \text{ Н/м}^2$  или  $5831,419 \text{ МПа}$ , а максимальное перемещение –  $15,492 \text{ мм}$ . Выявлено, что рама ТУА выдерживает все заданные нагрузки;

3) Определено, что при применении сварочного шва в сборке всего транспортно-установочного агрегата, критическая точка с максимальным перемещением сместилась на край рамы ТУА, но не изменилась по значению. Также установлено, что дефекты в сварных соединениях влияют на прочность конструкции следующим образом: при влиянии дефекта в виде трещины перемещение увеличилось на  $1,079 \text{ мм}$ , в виде полости на  $1,039 \text{ мм}$ ;

4) Выявлено, что самым выгодным для диагностики является ультразвуковой контроль качества сварных соединений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бахвалов, Ю.О. Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность / Ю.О. Бахвалов // М.: ООО «АИР». – 2015. – 228 с.
- 2 Темис, Ю.М. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкций методом конечных элементов [Электронный ресурс] / Ю.М. Темис, Х.Х. Азметов // Лань: электронно-библиотечная система. – 2014.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/52253> (дата обращения: 29.04.2020)
- 3 Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В. В. Ключев // М.: Машиностроение. – 2005. – 656 с.
- 4 Овчинников, В.В. Контроль качества сварных соединений / В.В. Овчинников // М.: Изд. центр «Академия». – 2-е изд. – 2012. – 208 с.
- 5 Зорин, Е.Е. Лабораторный практикум: электродуговая, контактная сварка и контроль качества сварных соединений [Электронный ресурс] / Е.Е. Зорин // Лань: электронно-библиотечная система. – 2019.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/115659> (дата обращения: 29.04.2020)
- 6 Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования [Электронный ресурс] / В.В. Носов // Лань: электронно-библиотечная система. – 2017.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/90152> (дата обращения: 29.04.2020)
- 7 Абакумов, В.С. Строительная механика несущих конструкций и механизмов стартового оборудования [Электронный ресурс] / В.С. Абакумов, В.А. Зверев // Лань: электронно-библиотечная система. – 2007.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/52105> (дата обращения: 29.04.2020).
- 8 Зверев, В.А. Моделирование и расчет нагружения агрегатов стартовых комплексов для ракет космического назначения на различных этапах их функционирования [Электронный ресурс] / В.А. Зверев // Лань: электронно-библиотечная система. – 2016.  
Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103449> (дата обращения: 29.04.2020)

9 Чернышов, Г.Г. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением [Электронный ресурс] / Г.Г. Чернышов, Д.М. Шашин // Лань: электронно-библиотечная система. – 2013.

Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/12938> (дата обращения: 29.04.2020)

10 Бурмистров, Е.Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте / Е.Г. Бурмистров // Лань: электронно-библиотечная система. – 2020.

Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/138176> (дата обращения: 29.04.2020).

11 Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский / М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

## Приложение А

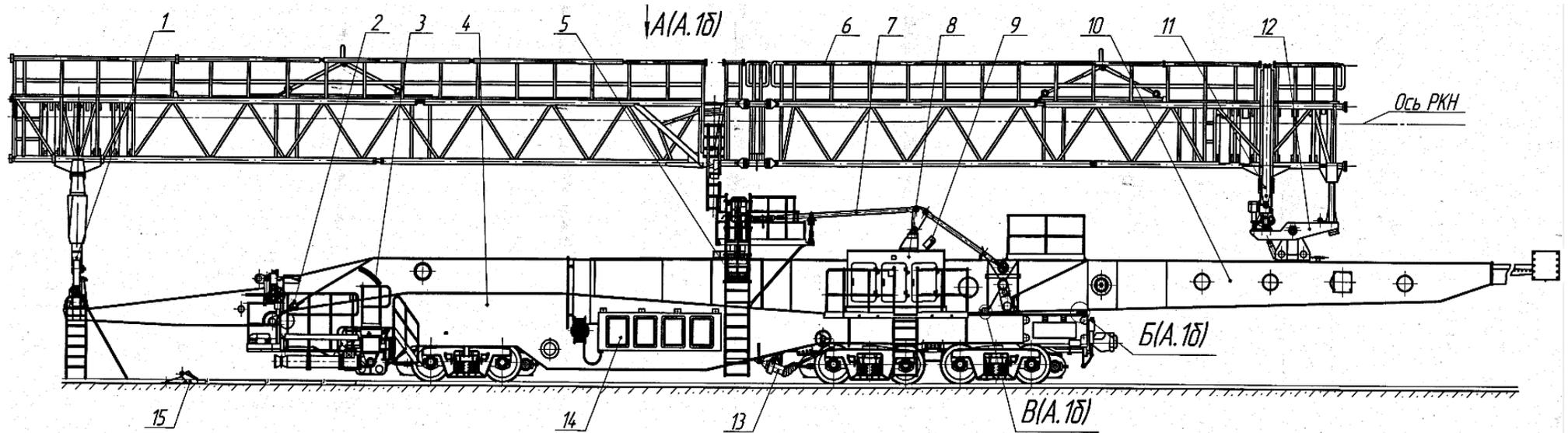


Рисунок А.1 – Агрегат 373УН34

1 – опоры нижняя и средняя; 2 – указатель вертикальности; 3 – указатель наклона; 4 – платформа; 5 – лестницы и площадки; 6 – макет грузовой; 7 – механизм подвески; 8 – гидропривод; 9 – элементы крепления; 10 – стрела; 11 – захват в сборе; 12 – сменное оборудование; 13 – механизм доводки; 14 – электрооборудование; 15 – оборудование площадки

## Приложение Б

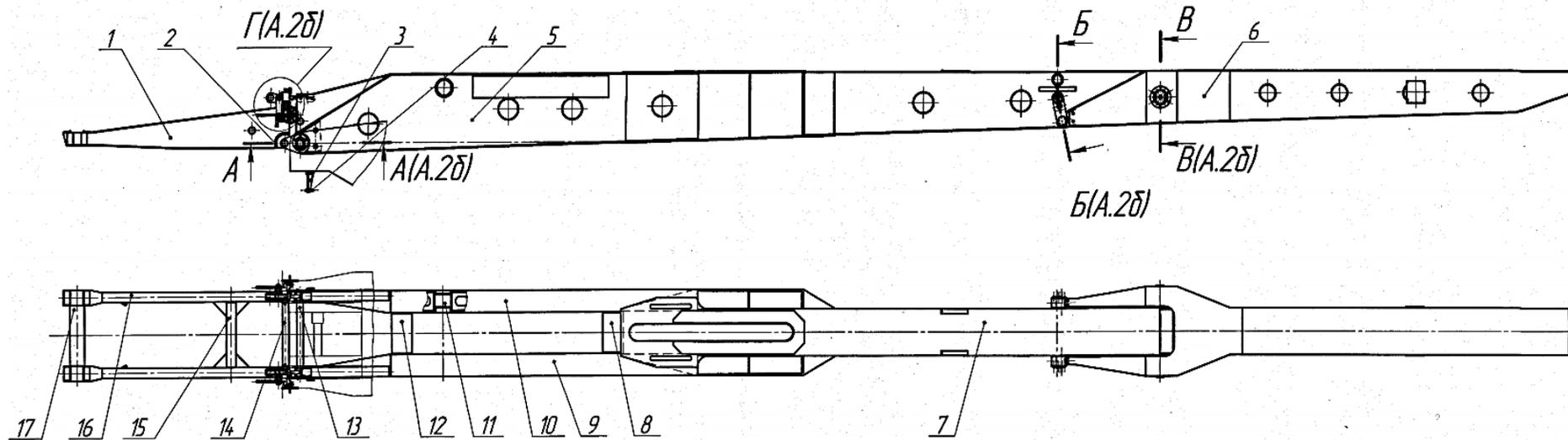


Рисунок Б.1 – Стрела

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 гидродомкрата; 12 – поперечная балка; 13 – труба; 14 – труба; 15 – балка; 16 – балка; 17 – балка.

## Приложение В

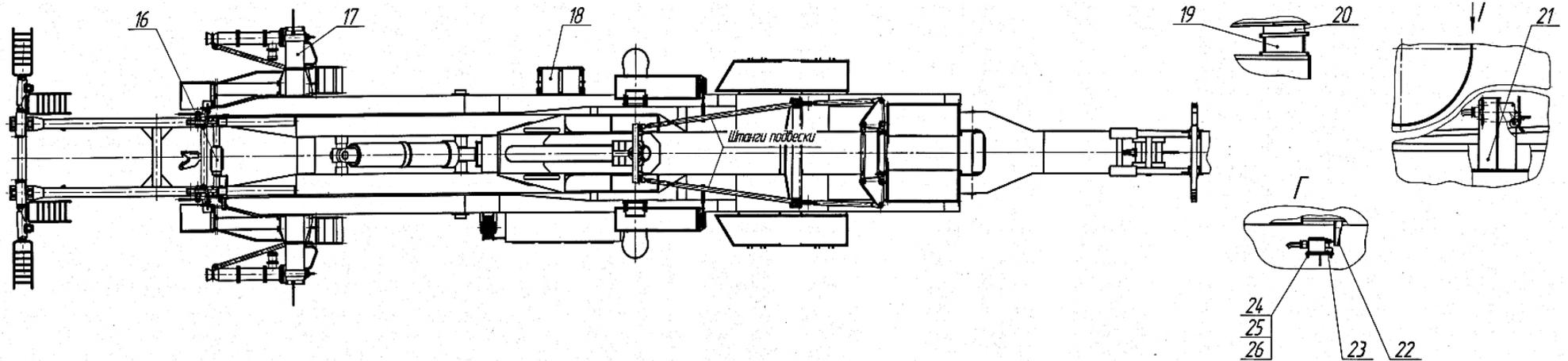


Рисунок В.1 – Агрегат 373УН34,

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

## Приложение Г

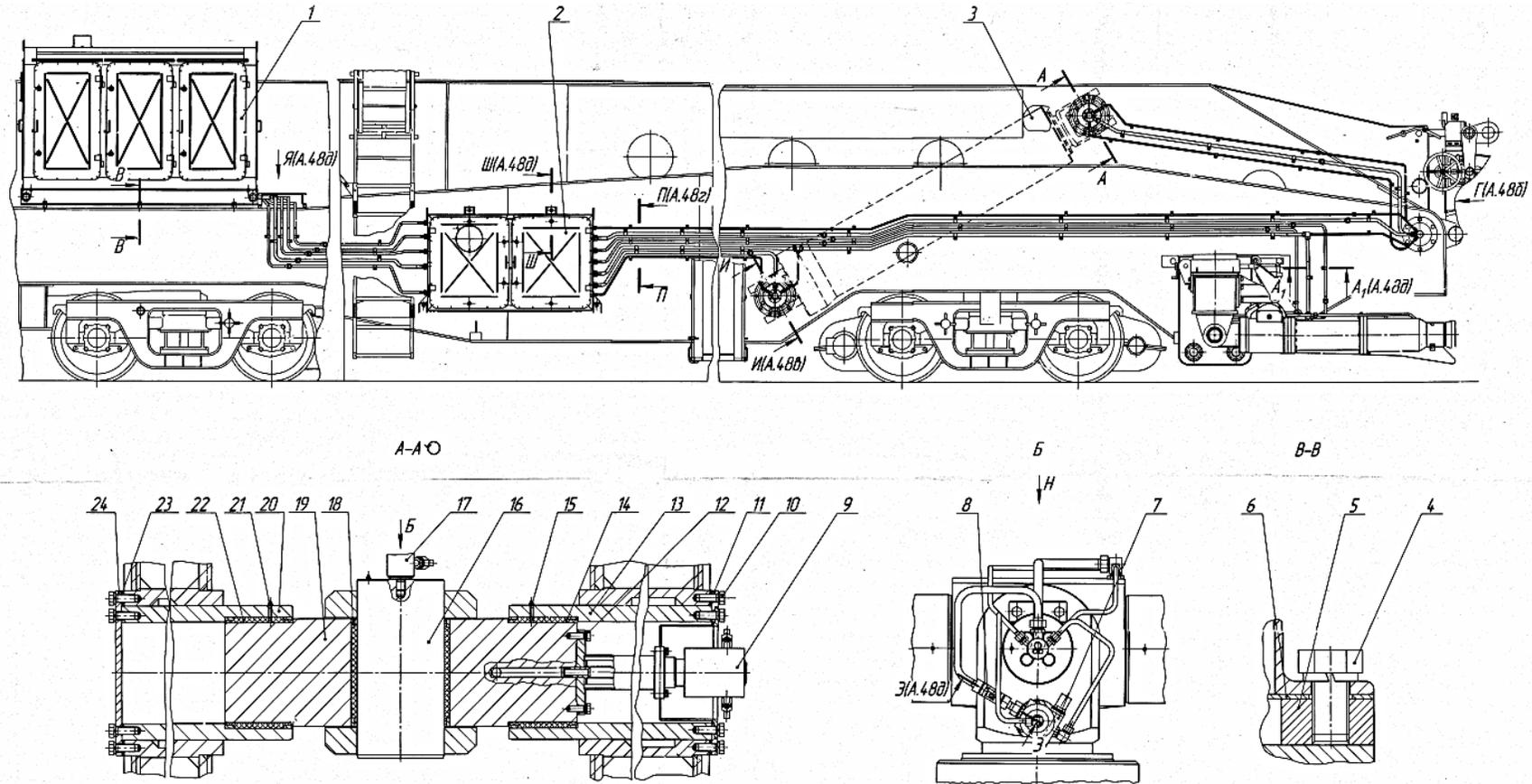


Рисунок Г.1 – Общий вид гидропривода

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.

## Приложение Д

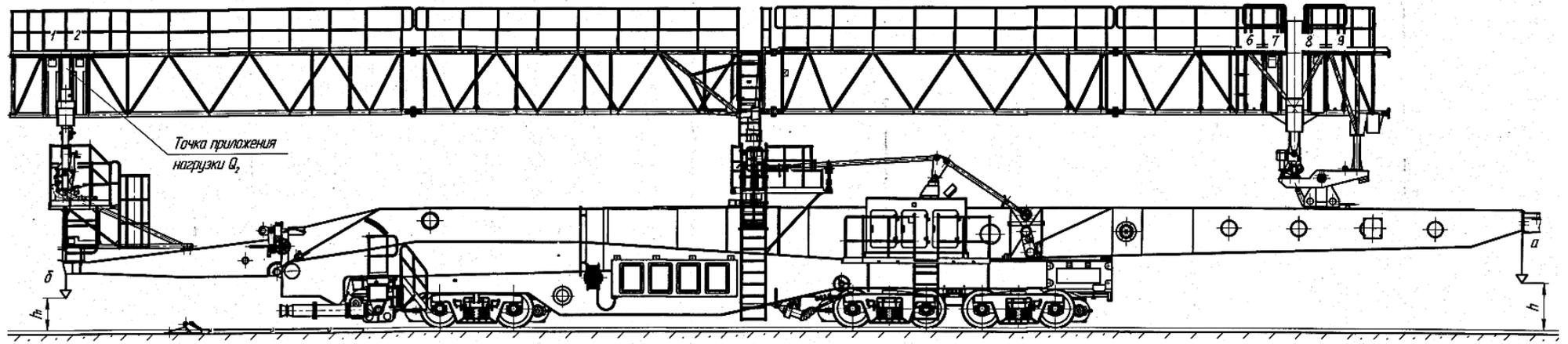


Таблица расположения грузов в ячейках грузового макета при различных вариантах загрузки

Вариант загрузки	№ ячейки грузового макета	1	2	3	4	5	6	7	8
		№ чертежа (веса груза, кг)							
Статические испытания	Варианты №1 и №2	3200.060 (1750 кг)	3200.070 (3750 кг)	—	—	—	—	3200.070 (3750 кг)	3200.050 (5300 кг)
Динамические испытания	Вариант №3	—	3200.070 (3750 кг)	—	—	—	—	3200.070 (3750 кг)	3200.060 (1750 кг)

Рисунок Д.1 – Схема испытаний агрегата под РН «Союз-2-1в»;

Таблица расположения грузов в ячейках грузового макета при различных вариантах загрузки.

## Приложение Е

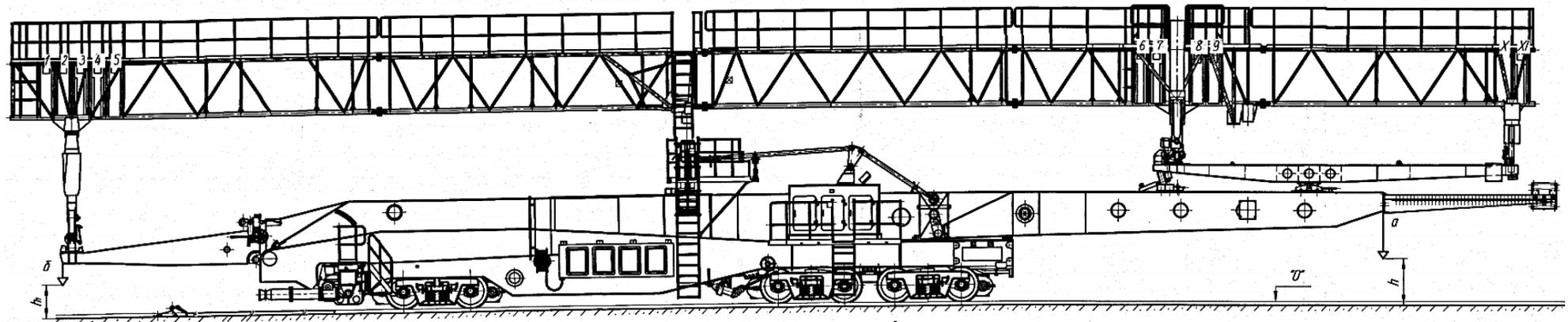


Таблица расположения грузов в ячейках грузового макета при различных вариантах загрузки

	Вариант загрузки	№ ячейки грузового макета										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Статические испытания	Вариант №1	3200.050 (5300 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	—	3200.060 (11750 кел)	—	—	—
	Вариант №2	3200.050 (5300 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	—	3200.060 (11750 кел)	3200.060 (11750 кел)	—	3200.070 (3750 кел)
Динамические испытания	Вариант №3	3200.050 (5300 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.070 (3750 кел)	3200.050 (5300 кел)	3200.070 (3750 кел)	—	3200.060 (11750 кел)	—	—	—

Рисунок Е.1 – Схема испытаний агрегата под РН «Союз-2-1а, 1б»;  
Таблица расположения грузов в ячейках грузового макета при различных вариантах загрузки.

