

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Вержбицкий Кирилл Дмитриевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО
РЕЗЕРВУАРА ПУТЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ НИЖНЕГО ПОЯСА**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор А.М. Щипачев

Санкт-Петербург - 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Влияние технологии изготовления сварного соединения типа «уторный узел» в резервуаре на его ресурс	8
1.1 Отрицательные факторы, влияющие на ресурс резервуара.....	8
1.2 Особенности конструкции уторного узла, технология монтажа и дефекты.....	13
1.3 Методы контроля уторного узла резервуара.....	17
1.4 Способы повышения качества уторного узла резервуара.....	21
1.5 Анализ технических решений и патентов изобретений.....	30
1.6 Выводы по первой главе и постановка задач исследования.....	37
Глава 2. Анализ моделирования напряженно деформированного состояния уторного узла резервуара, в программном комплексе ANSYS	40
2.1 Характеристики объекта исследования.....	40
2.2 Расчет внутренних напряжений при упругой деформации окрайки днища в модели уторного узла, без учета сварочных напряжений.....	42
2.3 Расчет внутренних напряжений при упругой деформации окрайки днища в модели уторного узла, с учетом сварочных напряжений.....	54
2.4 Расчет полей напряжений в моделях экспериментальных образцов.....	54
2.5 Выводы по второй главе.....	56
Глава 3. Экспериментальные исследования уторного узла	57
3.1 Подготовка к проведению экспериментов на циклическую	

долговечность.....	57
3.2 Анализ результатов экспериментов образцов уторного узла.....	59
3.3 Проведение экспериментов на статическую прочность.....	69
3.4 Выводы по третьей главе.....	72
Глава 4. Разработка метода повышения ресурса резервуара путем внедрения дополнительной обработки сварного соединения уторного узла.....	73
4.1 Определение величины зазора в уторном узле стального вертикального резервуара.....	73
4.2 Разработка метода повышения ресурса резервуара путем внедрения дополнительной обработки сварного соединения уторного узла.....	78
4.3 Выводы по четвертой главе.....	84
Заключение.....	85
Список сокращений и условных обозначений.....	87
Список литературы.....	88

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Со времен начала добычи нефти на территории России и по сегодняшний день был основан один из крупнейших топливно-энергетических комплексов в мире, включая систему трубопроводного транспорта и хранения нефти и продуктов ее переработки. С начала 70-х годов прошлого столетия в СССР были разработаны типовые проекты резервуаров различного объема и типа, среди которых одним из самых распространенных является вертикальный стальной резервуар (РВС). По различным оценкам, на сегодняшний день в России насчитывается более 50 тысяч резервуаров объемом от 3 до 50 тысяч кубических метров.

Работоспособность резервуаров зависит от герметичности всех его узлов и соединений, качество которых формируется на этапе сооружения. Анализ результатов экспертизы технического состояния РВС, указывает, что значительное количество дефектов сконцентрировано в уторном узле резервуара – место стыковки стенки и днища, который является одним из самых нагруженных участков всего сооружения.

Снижение ресурса резервуара в зоне уторного узла может быть спровоцировано технологическим непроваром в уторном узле; дефектами сборки таврового соединения уторного узла (завышенный зазор, местные деформации элементов узла); формированием высокого уровня остаточных напряжений в уторном шве после сварки; дефектами сварного шва и коррозионными процессами от действия среды.

Особенностью конструкции узла является наличие конструктивного зазора между стенкой и окраечным листом, который, согласно нормативно-технической документации, должен находиться в пределах 0...2 мм. Наличие регламентированного зазора между стенкой и крайкой приводит к осложнению процесса монтажа стенки вследствие необходимости соблюдения нормативно допустимых пределов величин зазора. Опыт монтажа резервуаров показывает, что не всегда удается выдержать необходимый зазор.

Проведенные замеры на реальных объектах позволили установить, что длина таких участков достигает до 7% от общей площади соприкосновения стенки и окрайки, а увеличение зазора в соединении уторного узла значительно снижает ресурс резервуара, поэтому обеспечение ресурса работы резервуара с наличием вышеуказанных участков является актуальной задачей.

Цель работы

Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем применения дополнительной обработки уторного узла для снижения уровня остаточных напряжений.

Задачи исследования

1. Проанализировать состояние проблемы обеспечения долговечности сварного соединения уторного узла резервуара.
2. Рассчитать внутренние напряжения конструкции при отклонении от технологии изготовления в математической модели уторного узла.
3. Экспериментально исследовать влияние дополнительной обработки уторного узла с дефектами сборки на его циклическую долговечность.
4. Разработать методику определения потенциально опасных зон в уторном узле резервуара и рекомендации по увеличению его ресурса.

Идея работы

В результате операций по устранению ненормативного зазора путем упругой деформации окрайки днища возникают остаточные растягивающие напряжения в уторном узле, что снижает долговечность конструкции. Для уменьшения уровня остаточных технологических напряжений, предлагается применять обработку нижнего пояса резервуара.

Научная новизна работы

1. Получена зависимость циклической долговечности зоны уторного узла резервуара от величины первоначального зазора в стыке сварного шва.
2. Исследовано влияние ультразвуковой ударной, термической, вибрационной обработок сварного шва на циклическую долговечность.

Защищаемые научные положения

1. Влияние упругих напряжений, возникающих в связи с необходимостью уменьшения зазора перед сваркой, на циклическую долговечность уторного узла;
2. Обоснование метода обработки уторного узла резервуара на участках с увеличенным зазором с целью повышения циклической долговечности.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовался комплексный способ исследований, включающий экспериментальные и теоретические методы исследований: анализ современного состояния теории, практики и патентных материалов; расчет внутренних напряжений в математической модели уторного узла с применением программного комплекса ANSYS; проведение экспериментов на образцах уторного узла, изготовленных с применением ультразвуковой ударной, вибрационной и термической обработками.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений подтверждается сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований с доверительной вероятностью не менее 0,95.

Практическая значимость работы

1. Разработаны рекомендации по внедрению ультразвуковой ударной и вибрационной обработки в технологию сварки уторного узла резервуара.
2. Разработана методика определения величины зазора в уторном узле резервуара, находящегося в процессе эксплуатации.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Научно-практической конференции, проводимой в рамках Уральского промышленного форума «Сварка и контроль – 2014» (г. Уфа, 2014 г.); VII - VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2015 г.); X Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт –

2015» (г. Уфа, 2015 г.); 66-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2015 г.); XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2016 г.); Юбилейной 70-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ 2016» (г. Москва, 2016 г.); XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (г. Уфа, 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, 2 из которых в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК.

Личный вклад соискателя

Обосновано влияние величины зазора на долговечность уторного узла резервуара; разработаны математические модели полей напряжения в уторном узле резервуара в условиях увеличенного зазора; обоснован выбор формы и размеры экспериментальных образцов; проведены экспериментальные исследования; разработаны рекомендации по выбору метода обработки уторного узла резервуара.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 103 страницах текста, состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 130 источников, содержит 51 иллюстрацию и 11 таблиц.

1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИПА «УТОРНЫЙ УЗЕЛ» В РЕЗЕРВУАРЕ НА ЕГО РЕСУРС

1.1 Отрицательные факторы, влияющие на ресурс резервуара

Из источников известно, что в России первый металлический резервуар для нефти из клепанных металлических листов был изготовлен по проекту инженера В.Г. Шухова в 1878 году. Первый резервуар в США построили еще в 1864-ом, однако его конструкция была прямоугольной, а русский инженер придал своей емкости цилиндрическую форму, что по расчетам значительно сэкономило металл при изготовлении. С этого времени резервуарное нефтяное оборудование широко распространено практически на всех этапах от добычи до переработки углеводородного сырья.

Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние годы в резервуаростроении, резервуары для нефти и нефтепродуктов остаются одними из наиболее опасных объектов.

Резервуары представляют собой сосуды различных размеров, предназначенные для накопления, хранения, выполнения технологических операций и учета нефти и нефтепродуктов. По форме резервуары выпускаются цилиндрическими, вертикальными и горизонтальными, сферическими. Наиболее распространенным видом емкости для хранения нефти и нефтепродуктов является цилиндрический вертикальный стальной резервуар.

С каждым годом количество аварий на резервуарах возрастает в связи с тем, что большой процент резервуаров уже выработал свой проектный ресурс. Износ эксплуатируемых вертикальных стальных резервуаров (РВС) составляет 60 – 80%.

Опасность возникновения аварийных ситуаций оценивается тяжестью причиняемого ущерба, который зависит от того, как проявляется авария: в виде взрывов и пожаров от разлившегося нефтепродукта, в виде хрупких разрушений или локальных отказов резервуаров. Как показывает практика, аварии РВС в большинстве случаев сопровождаются значительными потерями нефтепродуктов, отравлением местности и гибелью людей. В экстремальных случаях по статистическим данным общий материальный ущерб превышает в 500 и более раз первичные затраты на сооружение резервуаров.

Поэтому есть основания считать, что на сегодняшний день вопрос обеспечения надежности резервуарных конструкций остается нерешенным. Проблема повышения надежности резервуарных конструкций должна решаться на всех этапах при проектировании, при изготовлении, при монтаже и испытаниях, при эксплуатации и диагностировании резервуаров.

Детальный анализ результатов комплексных обследований РВС и материалов [7,14,123], представленных на рисунке 1, свидетельствует о том, что наиболее часто предаварийные либо аварийные ситуации возникают в самом опасном и перегруженном участке - уторном узле, соединении стенки с днищем. Последнее объясняется тем, что в зоне вышеуказанного соединения имеет место сложно - напряженное состояние, обусловленное наличием как кольцевых растягивающих усилий, так и меридиональных напряжений изгиба от краевых моментов.

Образование дефектов и трещин в уторном узле, обусловлено следующими причинами:

- малоциклового усталостью металла в перегруженном сварном шве [15];
- наличием остаточных напряжений, как в теле, так и в околошовной зоне сварного шва уторного узла;
- возникновением остаточных напряжений непосредственно в вертикальной стенке резервуара в ходе формирования ее цилиндрической формы;

– наличием высокого температурного градиента в вертикальной стенке из-за большого перепада температуры между хранимым нефтепродуктом и внешней средой;

– местной потерей устойчивости вертикальной стенки РВС как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях непосредственно в зоне уторного узла.

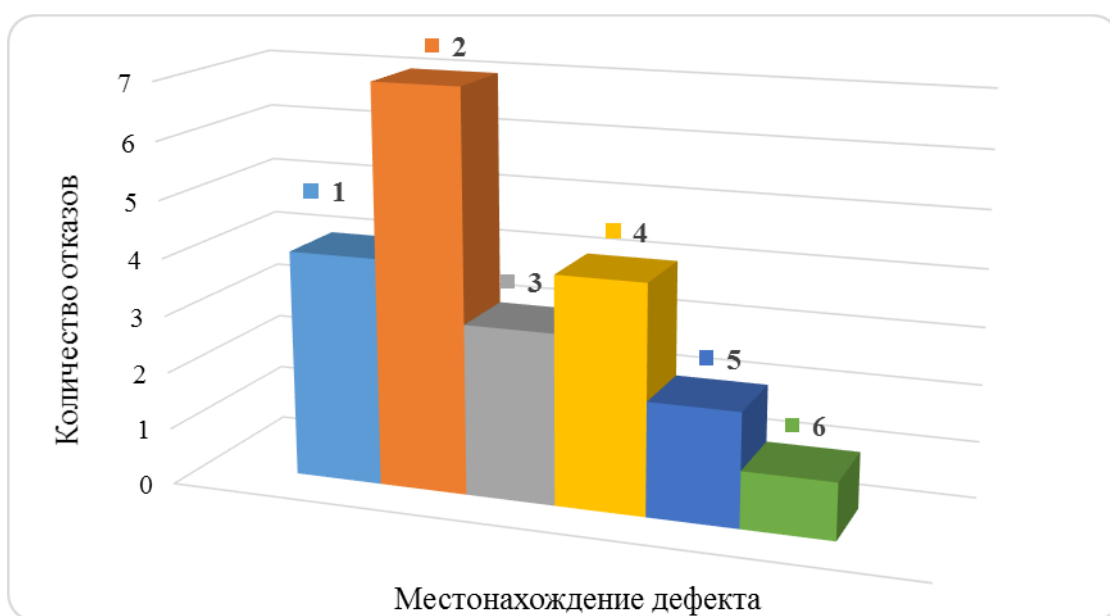


Рисунок 1 - Статистика отказов резервуаров по местонахождению дефекта

1 – дефекты, расположенные в стенке; 2 – дефекты, расположенные в уторном узле; 3 – дефекты, расположенные в монтажных швах; 4 – дефекты, расположенные в патрубке; 5 – дефекты, расположенные в днище; 6 – дефекты, расположенные в трубопроводе.

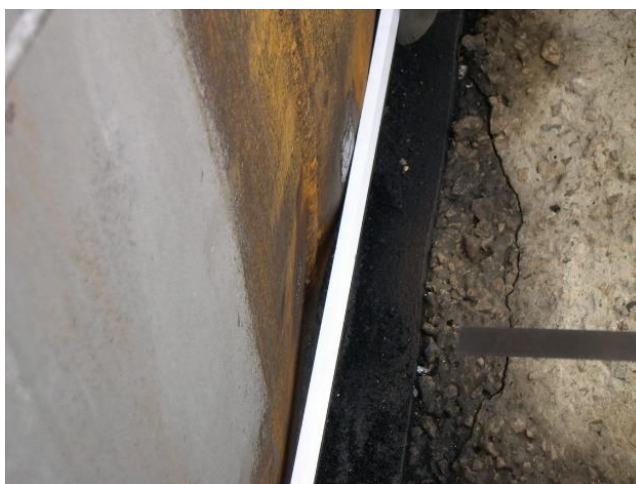
Погодные условия, несоблюдения технологического режима работы (перелив), дефекты сварных соединений также отрицательно сказываются на долговечности и безотказности резервуара.

После продолжительного времени работы резервуара погодные условия значительно влияют на долговечность конструкции:

– лакокрасочное покрытие со временем теряет свои защитные свойства и облупливается, что приводит к появлению коррозии на поверхности металла резервуара;

– при попадании воды небольшие зазоры между бетонным основанием и днищем в осенний период, зимой, застывая вода расширяется, превращаясь в лед. Длительное повторение данного процесса ведет к деформации днища резервуара, а также разрушение бетонного основания и кольцевого лотка, как следствие дополнительные просадки стенки резервуара в данных местах.

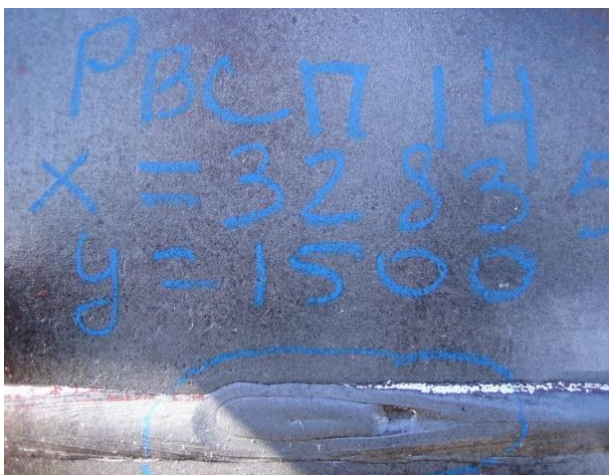
При сварке РВС (вертикальный стальной резервуар) на монтаже возможно появление дефектов швов что так же отрицательно влияет на надежность и долговечность конструкции (рисунок 2).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Различные типичные дефекты РВС

а – угловатость шва, б – скопление пор, в – кратер сварного шва

В совокупности данных дефектов при толщине стенки резервуара до 10-12 мм можно получить уменьшение рабочей зоны сварного соединения 3,3-3,6 мм, что составляет 27-30%. Значительно уменьшает качество сварного соединения также наличие дефектов, которые сложно выявляются физическими методами контроля в данном узле. Увеличение зазора в стыке сопряжения стенки с днищем, приводит к дополнительному увеличению напряжений в шве после сварки, что ослабляет шов, и может привести к короблению крайки днища.

При длительной эксплуатации резервуара, осадка резервуара неизбежно приведет к деформации днища, а также нижнего пояса резервуара, что повлечет к нарушению защитного покрытия внутри резервуара, а влияние подтоварной воды приведет к появлению язвенной или сплошной коррозии металла. Нарушение технологии работы резервуара в экстренных ситуациях (перелив) приводит к деформации поясов (вспучивание). Учитывая, что сварное соединение имеет большую прочность за счет усиления шва, данный дефект приведет к большим напряжениям в околошовной зоне которая является самым слабым местом в стыке, и соответственно приведет к более

раннему отказу РВС. При осадке резервуара деформация днища приводит к образованию дефектов типа «хлопун», вспучивание металла, который негативно влияет на показания уровня продукта в резервуаре.

1.2 Особенности конструкции уторного узла, технология монтажа и дефекты

В работах Н.О. Окерблома, В.А. Винокурова, С.А. Куркина, Г. А. Николаева, Н.А. Зайцева, Т.Ю. Малеткиной, К.М. Гатовского, [79, 84-89] были изучены виды сварочных деформаций и напряжений.

В работах Г.Г. Васильева, В.Е. Шутова, М.К. Сафаряна, Е.Е. Семина [26-28, 96-100] указывается, что наибольшие значения напряжений при эксплуатационных нагрузках в РВС возникают в уторном узле.

В местах приварки люка лаза или ПРП к первому поясу, а также в вертикальных швах сварки листов стенки в тонкостенных конструкциях возникают местные деформации, что в дальнейшем приводит к возникновению увеличенного зазора перед сваркой в уторном узле, и как следствие требует исправления данного дефекта сборки.

По результатам изучения нормативно-технической документации [1-6] было выяснено, что предельные показания отклонения размеров фундамента, в дальнейшем приводят к возникновению увеличенного зазора в стыке перед сваркой.

В следствие непосредственно на месте монтажа резервуара применяются способы устранения данного отклонения, не регламентированные в НТД (упругая деформация окрайки днища), что приводит по нашему мнению, к дополнительным напряжениям внутри сварного соединения, которые отрицательно влияют на надежность и долговечность конструкции.

Конструктивные элементы сварного соединения уторного узла, его размеры и предельные отклонения представлены на рисунке 3.

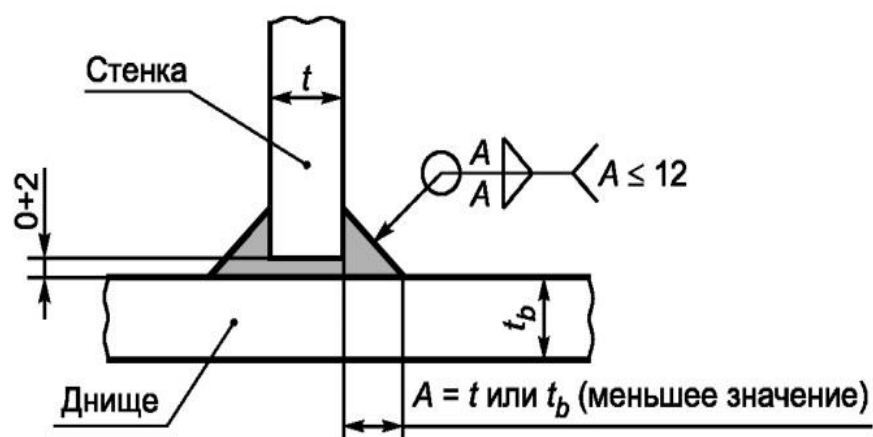


Рисунок 3 – Соединение стенки с дном при толщинах листа стенки и листа дна 12 мм и менее по ГОСТ 31385-2016

Наличие нерегламентированного зазора между стенкой и окрайкой приводит к осложнению процесса монтажа стенки вследствие необходимости соблюдения нормативно допустимых пределов величин зазора. Опыт монтажа резервуаров показывает, что не всегда удается выдержать необходимый зазор. Проведенные замеры на реальных объектах показывают, что длина таких участков достигает до 7% от общей площади соприкосновения стенки и окрайки [78,79]. Для примера на фотографии (рисунок 4), представлен смонтированный уторный узел резервуара, подготовленный к обварке, зазор в котором составлял до 3,9 мм.



Рисунок 4 – Фото зазоров в уторном узле строящегося резервуара

Как правило, на практике завышенный зазор в соединении либо не устраняется, либо исправляется путем подтягивания краечного листа с последующей обваркой (рисунок 5). На сегодняшний день для приведения величины зазора в допустимые пределы применяется прием, не регламентируемый в нормативной документации. Он заключается в том, что окрайка снизу подпирается и поднимается на необходимую высоту до устранения зазора.



Рисунок 5 – Фото выполнения подтягивания краечного листа на строящемся резервуаре

По методам изготовления и монтажа листовых конструкций резервуары делятся на следующие виды:

- а) резервуары рулонной сборки, листовые конструкции которых изготавливаются и монтируются в виде рулонизируемых полотнищ;
- б) резервуары полистовой сборки, изготовление и монтаж всех листовых конструкций, которых ведется из отдельных листов;
- в) резервуары комбинированной сборки, часть листовых конструкций которых изготавливаются и монтируются из отдельных листов, а часть - в виде рулонизируемых полотнищ.

При сборке полистовым способом сварку уторного узла (приварка стенки к днищу) необходимо производить после монтажа не менее 3-х поясов

стенки. Это необходимо для предотвращения деформации стенки и также обеспечении прижатия листов стенки к окрайке днища.

При сборке под сварку листы первого пояса и окрайку днища соединяют при помощи сборочный приспособлений (рисунок 6), для обеспечения проектного зазора в стыке перед сваркой. В процессе сборки так же контролируют геометрическую форму стенки резервуара по поясам, для обеспечения совпадения кромок и зазоров в горизонтальных и вертикальных стыках.

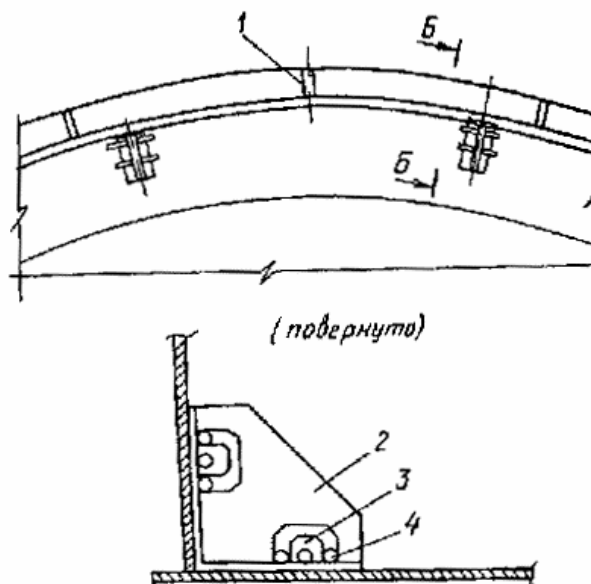


Рисунок 6 – Сборка листов первого пояса стенки с днищем

1– ограничитель, 2 – угловое стяжное приспособление, 3 – проушина, 4 – клин

1.3 Методы контроля уторного узла резервуара

При проведении контроля качества сварных соединений вертикального стального резервуара применяют следующие виды неразрушающего контроля [5]:

- визуально-измерительный контроль (ВИК);
- контроль герметичности (непроницаемости);

— капиллярный метод (цветная дефектоскопия), магнитопорошковая дефектоскопия;

— ультразвуковая дефектоскопия (УД);

— рентгенографическая дефектоскопия (РД);

— гидравлические и пневматические испытания конструкции резервуара.

В связи с конструктивными особенностями уторного узла к нему применимы только визуально-измерительный, вакуумирование (контроль герметичности) с внутренней стороны шва и капиллярный виды контроля. По требованию заказчика или согласно проекту допускается замена капиллярного контроля на пробу «мел-керосин» с наружной стороны шва до сварки его с внутренней стороны.

Визуально-измерительный контроль (ВИК) проводится в объеме 100% всех сварных соединений резервуара и выполняется с целью подтверждения их соответствия требованиям конструкторской, проектно-технической документации. Нормы для оценки качества сварных швов и значения допускных дефектов должны быть указаны в проектной документации.

При проведении ВИК шва уторного узла применяют (рисунок 7):

— лупы;

— линейки измерительные металлические;

— угольники поверочные 90° лекальные;

— стенкомеры и толщиномеры индикаторные;

— шаблоны;



Рисунок 7 – Комплект для проведения визуально-измерительного контроля.

Для выполнения визуально-измерительного контроля необходимо обеспечить достаточный обзор. Контролируемая поверхность должна рассматриваться по углом не более 30° к плоскости объекта контроля и с расстояния до 600 мм (рисунок 8) [14].

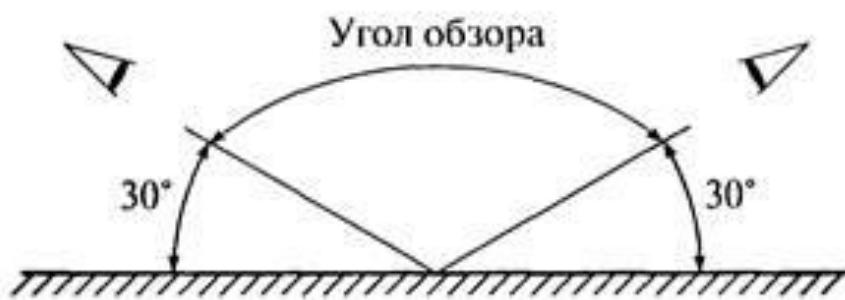


Рисунок 8 – Условия визуального контроля.

Контроль герметичности уторного узла резервуара проводят вакуумированием. Данное испытание шва состоит в следующем. Сварной шов смачивается мыльным раствором. На исследуемый участок шва накладывается специальная рамка (рисунок 9), имеющая по всему периметру уплотнение из губчатой резины. Рамка соединяется с вакуум-насосом и через смотровое

стекло, смонтированное на коробке, или через стенки коробки, если она изготовлена из органического стекла, ведется наблюдение за сварным швом. Наличие мыльных пузырей указывает на дефекты сварки.

Капиллярный контроль основан на проникновении индикаторных жидкостей в поверхностные и сквозные дефекты. При наличии дефектов образуются индикаторные следы, регистрирующиеся визуальным способом или с помощью преобразователя. С помощью данного метода определяется расположение дефектов, их протяженность и ориентация на поверхности. Контроль проводится в соответствии ГОСТ 18442 [15].



Рисунок 9 – Угловая вакуумная рамка

Методы капиллярной дефектоскопии подразделяются в зависимости от способа получения первичной информации:

- цветной (хроматический);
- яркостный (ахроматический);
- люминесцентный;
- люминесцентно-цветной;

В результате примененных при цветной дефектоскопии процессов на белом фоне контрастным цветом (как правило, красным) выделяются дефекты. Индикаторные следы несплошностей проявляются после высыхания проявителя; изготовитель может рекомендовать короткий срок дополнительной выдержки (например, пять минут или более) для полного

проявления индикаторных следов. Трещины, складки, несплавления в сварных швах обнаруживаются в виде цветных линий. Глубокие дефекты могут проявляться в виде точек, образующих линию. Поры обнаруживаются в виде рассеянных скоплений точек.

Особенность методики контроля сквозных дефектов (трещин, течей) на тонкостенных изделиях заключается в нанесении пенетранта и проявителя с разных сторон контролируемого изделия. Прошедший насквозь пенетрант будет хорошо виден с другой стороны контролируемого объекта.

Результат контроля оценивается визуально и может быть задокументирован с помощью фото- и видеоаппаратуры или перенесен на клейкую пленку.

При применении люминесцентных (флюоресцентных) пенетрантов исследование результатов происходит при ультрафиолетовом освещении в темном помещении. Дефекты проявляются в виде светящихся линий и точек желто-зеленых оттенков.

К достоинствам капиллярных методом дефектоскопии относятся простота операции контроля и применимость к широкому ряду материалов. С помощью капиллярной дефектоскопии не только выявляются поверхностные или сквозные дефекты, но и получается ценная информация об их расположении, протяженности, ориентации и форме, что, как правило, облегчает понимание причин возникновения этих дефектов.

К недостаткам капиллярной дефектоскопии следует отнести невозможность выявления внутренних несплошностей, не имеющих выхода на поверхность. Выявление поверхностных несплошностей, имеющих ширину раскрытия более 500 мкм, капиллярными методами контроля не гарантируется.

1.4 Способы повышения качества уторного узла резервуара

На сегодняшний день известно достаточно большое количество способов и приемов снижения уровня сварочных напряжений и деформаций, многие из которых имеют ограничения по применению в связи с конструктивными особенностями свариваемых конструкций либо применяемых технологий сварки. Одним из наиболее распространенных и универсальных способов является термическая обработка (подогрев, отпуск). С целью снижения трудоемкости работ по снижению уровня внутренних напряжений и деформаций в последние годы активно исследуются альтернативные способы, такие как сопутствующая вибрационная обработка и ультразвуковая ударная обработка.

Под внутренними напряжениями понимают напряжения, уравнивающиеся в объеме тела при отсутствии внешних нагрузок. Их появление может быть связано с осуществлением различных технических операций (литья, сварки, обработки давлением, термической обработки и т. д.). Нагрев и охлаждение металла, фазовые превращения в твердом состоянии сопровождаются изменением удельного объема сталей. Так как в процессе технологических операций обычно возникает градиент температур по сечению изделия, то изменение удельного объема в различных участках изделия происходит неодновременно и в неодинаковой степени, что и приводит к появлению внутренних напряжений. Другой причиной возникновения внутренних напряжений является неодинаковая пластическая деформация в различных объемах изделия, например, наблюдается при обработке давлением.

Внутренние напряжения в большей или меньшей мере сохраняются после окончания технологических операций. В этом случае они называются остаточными напряжениями. Последние не могут быть выше предела

текучести. Определение величины остаточных напряжений, их знака и распределения по объему изделия нередко сопряжено с большими трудностями. Всегда есть опасность, что остаточные напряжения будут складываться с внешними рабочими напряжениями. Большие суммарные напряжения могут вызвать нежелательные изменения формы (коробление) и размеров изделий. Если остаточные напряжения велики, то возможно разрушение изделия при незначительных внешних нагрузках. Особенно способствуют образованию и развитию трещин растягивающие напряжения.

В процессе обработки и эксплуатации изделий равновесие остаточных напряжений может нарушаться, что часто является причиной изменения формы и размера изделий. Например, такой эффект нередко наблюдается при обработке резанием, когда характер распределения остаточных напряжений изменяется в результате снятия поверхностных слоев металла. Релаксация остаточных напряжений в той или иной мере происходит и при хранении изделий. Если в разных участках изделия этот процесс развивается с различной скоростью, это приводит к перераспределению остаточных напряжений, что также может явиться причиной изменения формы и размеров изделий.

Остаточные напряжения влияют не только на механические, но и на физические и химические свойства изделий. Они пропорциональны модулю упругости и величине упругой деформации. Эти напряжения уменьшаются в тех случаях, когда они вызывают пластическую деформацию в микрообъемах. С повышением температуры модуль упругости, а, следовательно, и остаточные напряжения снижаются менее интенсивно, чем предел текучести. При определенном нагреве, когда предел текучести становится ниже остаточных напряжений, оказывается возможным развитие пластической деформации, в результате чего остаточные напряжения уменьшаются до значений предела текучести при данной температуре.

Во время выдержек при повышенных температурах релаксация остаточных напряжений за счет генерирования и скольжения дислокаций идет сравнительно быстро. В дальнейшем снижение остаточных напряжений может происходить путем развития ползучести. Этот процесс протекает относительно медленно, так как контролируется термически активируемым перераспределением дислокаций. Если предел текучести превышает уровень остаточных напряжений, то уменьшение последних возможно только в результате развития процессов ползучести. С течением времени релаксация остаточных напряжений постепенно затухает. Поэтому слишком длительные выдержки могут оказаться практически бесполезными. Чтобы полностью произошло снятие остаточных напряжений, следует повысить температуру нагрева.

Вопросами термообработки сварных соединений занимались такие ученые как В.Н. Земзин, Р.З. Шрон, П.М. Корольков, М.А. Смирнов, В.М. Счастливец, Л.Г. Журавлев, Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин, и другие [16-24]. Существуют несколько основных видов термической обработки:

- отжиг;
- закалка;
- отпуск;
- нормализация.

Некоторые виды термической обработки одновременно с решением основной задачи обеспечивают уменьшение остаточных напряжений. Так, рассмотренный в предыдущем разделе рекристаллизационный отжиг наряду с формированием заданной структуры снижает уровень внутренних напряжений, возникших при холодной обработке давлением.

Для уменьшения остаточных напряжений может быть использована специальная термическая обработка — отжиг, при котором нагрев

осуществляют до температур, лежащих ниже точки A_{c1} . Как правило, отжиг проводится в интервале 450...650 °С, так как при более низких температурах предел текучести большинства сталей остается достаточно высоким. Длительность отжига обычно устанавливают экспериментально.

Отжиг существует 2х видов первого и второго рода. Целью отжига первого рода является устранение отклонений от равновесного состояния, возникающих при различных технологических операциях: литье, обработке давлением, сварке механической обработке. При этом не используются фазовые превращения, хотя они могут протекать в процессе обработки. Отжиг заключается в нагреве до определенной температуры, выдержке и последующем, обычно медленном, охлаждении.

Для сталей отжиг второго рода заключается в нагреве до аустенитного состояния и последующем охлаждении, обеспечивающем распад переохлажденного аустенита по диффузионному механизму.

В большинстве случаев такой отжиг является подготовительной термической обработкой. После литья, горячей деформации и других операций, связанных с высокотемпературными нагревами, стальные изделия обычно характеризуются крупнозернистостью, ярко выраженной неоднородностью структуры и повышенным уровнем внутренних напряжений. Применение отжига второго рода позволяет измельчить зерно и уменьшить структурную неоднородность. Отжиг может быть использован также для снижения твердости стали и улучшения обрабатываемости резанием. После отжига получают структуру и свойства, необходимые для качественного осуществления холодной обработки давлением. Он может быть операцией, подготавливающей структуру изделий для проведения последующей термической обработки, например, закалки и отпуска. Применение отжига позволяет уменьшить внутренние напряжения в отливках, поковках и других изделиях. Отжиг используется и как окончательная

термическая обработка стали, обеспечивающая получение нужного комплекса механических свойств.

Отпуск – это операция термической обработки, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температур, не превышающих точки A_1 . Необходимость такой операции обусловлена тем, что при закалке в стали возникают высокие внутренние напряжения, которые могут являться причиной коробления изделий и образования трещин. Одна из задач отпуска – снижение внутренних напряжений в закаленных изделиях. Чем выше температура отпуска и длительность его выдержка, тем полнее снимаются внутренние напряжения. Другая цель отпуска – получение нужного комплекса механических свойств. Закаленная на мартенсит сталь в неотпущенном состоянии характеризуется высокой твердостью, но имеет высокую склонность к хрупкому разрушению. Варьируя температурно-временными условиями проведения отпуска, можно существенно влиять на структуру закаленной стали и в широких пределах изменять ее механические свойства.

Различают 3 вида отпуска:

- низкий отпуск;
- средний форме;
- высокий отпуск.

Низкий отпуск характеризуется температурой нагрева 150...300 °С. В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Так же применяют для получения мартенсита отпуска.

Средний отпуск характеризуется температурой нагрева 300...450 °С. Данная термообработка необходима для получения структуры металла – троостит отпуска, сочетающего высокую твердость с хорошей упругостью и вязкостью.

Высокий отпуск – это нагрев стали до 500...670 °С, выдержка при этой температуре и охлаждение с определенной скоростью. Цель такой обработки –

повысить вязкие и пластические свойства стали (при существенном понижении ее твердости и прочности) и уменьшить внутренние напряжения.

Для снижения уровня остаточных напряжений было принято провести термообработку образцов в муфельной печи при температуре 550 °С, время выдержки 3,5 часа с последующим охлаждением на воздухе.

Одним из альтернативных способом повышения качества сварных соединений является вибрационная обработка. Вибрационную обработку сварных соединений можно разделить на два типа: для обработки расплавленного и кристаллизующегося металла шва и для обработки закристаллизовавшегося металла шва. Часть научных трудов по воздействию вибрационной обработки относятся к затвердевшему металлу. Основное значение такой обработки – снижение уровня остаточных напряжений и деформаций. Данными исследованиями занимались И.В. Гаврилин, И.Н. Голиков, С.Б. Маслеников и др.

В работах В.М. Сагалевича, Г.В. Сутырина, Е.А. Соловьева, А. Ф. Петрова, О.Г. Чикалиди, Б.М. Анкирского, А.М. Файрушина, И.Г. Ибрагимова, Р.Г. Ризванова, О.Ф. Хафизовой и других исследователей [25-37,124,125] был разобран вопрос влияния вибрационной обработки в процессе сварки. В данном случае воздействие оказывается не только на затвердевший металл сварного шва, но и еще на расплавленный металл, что дает возможность применения локального ввода упругих колебаний непосредственно в зону сварки, что значительно снижает необходимую мощность оборудования и повышает универсальность метода. При обработке кристаллизующегося уменьшение уровня напряжений в сварном соединении достигается за счет:

– перемешивания жидкой фазы благодаря разности давлений между упругими волнами, что приводит к увеличению теплопроводности и более

равномерному распределению включений, входящих в состав расплавленного металла;

– вывода растворенных в жидкости включений в процессе кавитации, которая возникает из-за образования ультразвуковых колебаний от различных элементов конструкции, что снижает вероятности возникновения пор;

– повышения теплоотдачи с твердой поверхности, окружающей расплавленный металл, что несколько увеличивает скорость охлаждения.

При ультразвуковом методе происходит пластическое деформирование поверхности обрабатываемого металла, что приводит к поверхностному наклепу на небольшую глубину. При обработке сварных швов углеродистых и низколегированных сталей этот метод позволяет растягивающие напряжения перевести в сжимающие вследствие деформации поверхности.

Результат воздействия ультразвуковой ударной обработки на сварное соединение:

– снижение уровня остаточных напряжений в сварном шве и околошовной зоне;

– создание упрочненного слоя с повышенным сопротивлением к образованию трещин;

– повышение циклической долговечности сварного соединения.

Влияние ультразвуковой ударной обработки в своих работах описывают Е.Ш. Статников, А.С. Тарасов, А.В. Кимстач, Д.И. Волченко, М.М. Сидоров, Н.И. Голиков. При разработке данного метода обработки использовалась модель физического воздействия ультразвука на поверхность сварного шва, разработанная Статниковым Е.Ш. (рисунок 10) [38-46].

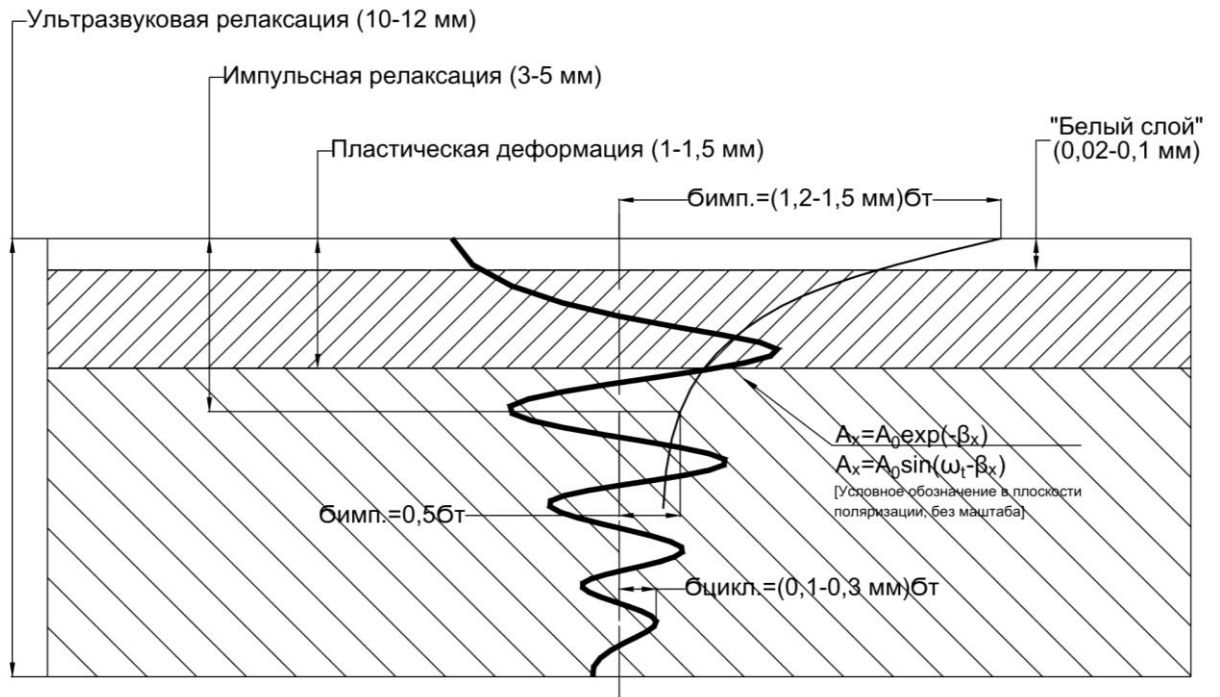


Рисунок 10 - Физические зоны влияние ультразвуковой ударной обработки

В таблице 1 приводится пояснение зон влияние ультразвуковой ударной обработки и эффект, который достигается в них.

Таблица 1 - Зоны влияния УУО

Зоны	Эффект
«Белый слой»	Износостойкость, коррозионная стойкость
Пластическая деформация	Циклическая долговечность, компенсация деформаций, коррозионно-усталостная прочность
Импульсная релаксация	Снижение остаточных сварочных напряжений и деформаций до 70% исходного состояния
Ультразвуковая релаксация	Снижение остаточных сварочных напряжений и деформаций до 50% исходного состояния

В качестве инструмента воздействия на материалы, использовался многоэлементный ультразвуковой элемент, который позволяет обеспечить

обработку поверхности при любой неровности и расположении сварочного шва (рисунок 11)

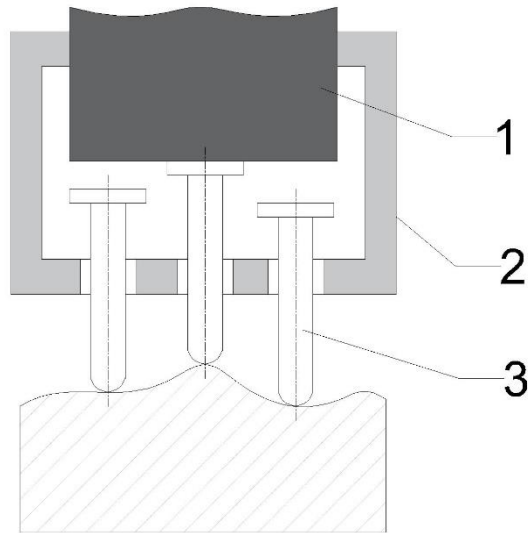


Рисунок 11 - Схема рабочего узла многоэлементного инструмента для обработки сварных швов:

1 – волновод; 2 – обойма; 3 – деформирующие элементы

Исследования В.Е. Зарезина показывают, что материал обработанный ультразвуковой ударной обработкой имеет заметное измельчение зерен и сложный характер деформации (изгиб-кручение) кристаллической решетки. В результате обработки наблюдается также измельчение частиц вторых фаз, средние размеры которых составляют 0,1...0,3 мкм. В результате структурнофазовых превращений повышается прочность, твердость и коррозионная стойкость материала [46].

1.5 Анализ технических решений и патентов изобретений

С точки зрения конструирования и технологии изготовления данный узел сложно назвать технологичным. На сегодняшний день работы по совершенствованию уторного узла ведутся в различных направлениях.

Авторы работы [81] считают, что оптимальной формой сварного шва в уторном узле является шов, вогнутый вовнутрь. Причем величина вогнутости должна составлять 3-4 мм, величина подреза – не более 0,3 мм. Такой шов гарантирует отсутствие пластических деформаций в зоне уторного сварного соединения в процессе эксплуатации. Также, по мнению авторов, при диагностировании резервуаров могут допускаться для дальнейшей эксплуатации уторные узлы с подрезами не более 2 мм, так как это максимально допустимый подрез для эксплуатации уторного узла в течение 10 лет.

Авторы статьи [93] рассматривают влияние ширины технологического непровара на ресурс работы уторного узла. Согласно работе, увеличение ширины непровара до 5 мм приводит к снижению циклической прочности на 13-14 %. На основании проведенных исследований для увеличения срока службы резервуара авторы статьи рекомендуют производить сварку уторного узла с полным проплавлением.

В работе [82] исследователи рассматривают величину выступа окрайки как причину больших внутренних напряжений в узле при неравномерной осадке. Согласно статье, 33 % обследованных резервуаров имеют показатели неравномерности осадки значительно превышающие допустимые. ГОСТ 31385-2016 [5] рекомендует принимать выступ листов окрайки за стенку резервуара в интервале от 50 до 100 мм. Авторы статьи провели расчет с изменением выступа окрайки от 0 до 300 мм и выявили, что наименьшие напряжения и прогиб стенки резервуара при неравномерной осадке будут при выступе окрайки за стенку на 60 мм.

Также на сегодняшний день проводятся исследования по изменению конструктивного исполнения данного узла с исключением сварного шва из зоны утора. Авторами статьи [83] предлагается заменить уторный узел из отдельных элементов, привариваемых к окрайке, на монолитный узел из профиля особой формы. Это позволит уменьшить уровень эквивалентных напряжений и повысить циклическую прочность уторного узла.

Авторы патента Пат. ВУ 4133 U 2008.02.28 Республика Беларусь [84] предлагают сделать стенку составной со стыковым неразъемным соединением, причем нижнюю часть стенки выполнить в виде тавра с опорной поверхностью, установленной на днище и приваренной к нему внахлест. Высота тавра должна соответствовать минимальному значению изгибающего момента (рисунок 12).

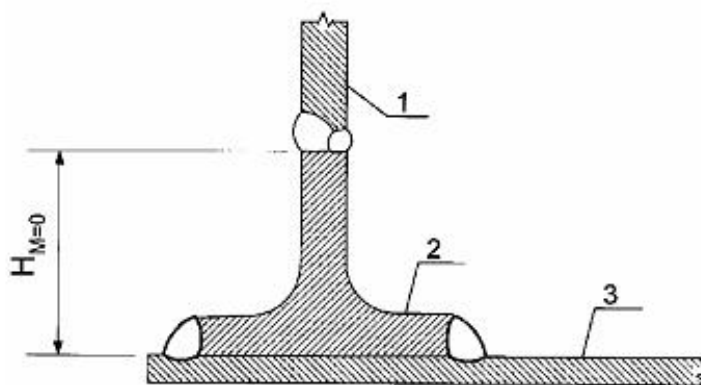


Рисунок 12 – Схема исполнения соединения стенки и днища резервуара

1 – стенка резервуара; 2 – тавр; 3 – днище; $H_{M=0}$ – высота, соответствующая минимальному значению изгибающего момента

Данная конструкция обладает следующими недостатками:

- наличие сварных швов работающих на срез;
- сложность установки стенки резервуара на поверхность тавра.

Авторы патента Пат. RU 2400610 С1 Российская Федерация [85] предлагают заменить уторный узел компенсационным элементом, выполненным в виде кольцевого параболообразного элемента, расположенного строго вертикально между стенкой резервуара и кольцевым ребром жесткости (рисунок 13). Параболообразный элемент герметично закреплен в кольцевом направлении на днище резервуара, а также своими верхними концами на ребре жесткости и вертикальной стенке резервуара. При этом высота кольцевого ребра жесткости выполняется в 3 раза больше, чем образующий диаметр параболообразного элемента, для обеспечения условия

равновесия и надежного удержания в рабочем положении параболообразного элемента только за счет сил трения и гидростатического давления нефтепродукта. Для обеспечения минимального трения стенки о днище с внешней стороны по всему периметру резервуара установлены роликовые подшипники качения, а для защиты от атмосферных воздействий данный узел снабжен козырьком.

Предполагается, что данная конструкция устраним возможность появления в стенке резервуара дополнительных напряжений от жесткого защемления, а также от температурных воздействий и неравномерных деформаций грунтового основания.

Конструкция, предлагаемая в патенте [85], обладает следующими недостатками:

- сложным конструктивным оформлением узла сопряжения стенки и днища (наличием компенсационного элемента сложной формы, подшипников качения по внешнему периметру резервуара и т.д.);

- наличие параболообразного элемента существенно осложняет подготовку резервуара к ремонтным работам (очистке от продукта), так как вследствие его геометрических особенностей будет требоваться его отдельная очистка;

- наличием угловых сварных швов, обладающих пониженной по сравнению со стыковыми сварными швами циклической прочностью.

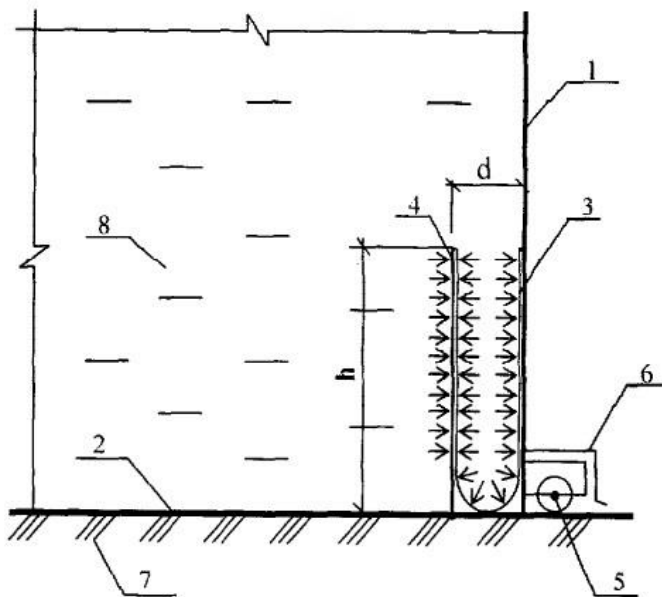


Рисунок 13 – Конструкция уторного узла резервуара

- 1 – стенка резервуара; 2 – днище; 3 – кольцевой параболообразный элемент;
 3 – кольцевое вертикальное ребро жесткости; 5 – роликовый подшипник качения; 6 – горизонтальный козырёк; 7 – грунтовое основание резервуара;
 8 – хранимый нефтепродукт

Авторы патента Пат. RU 2270904 С1 Российская Федерация [86] предлагают соединить стенку и днище резервуара компенсационным элементом, выполненным в виде вогнутого гофрированного кольцевого элемента. Также по уторному узлу внутри резервуара авторы предлагают установить герметично перегородку в виде вертикального ребра жесткости. Зазор между перегородкой и стенкой предлагается заполнить эластичным резиновым маслостойким уплотнителем. А полость между вогнутым гофрированным кольцевым элементом, стенкой и днищем предлагается заполнить дегазированной несжимаемой и незамерзающей жидкостью (рисунок 14). С внешней стороны по всему кольцевому периметру стенки могут быть установлены роликовые подшипники качения. За подшипниками установлено вертикальное кольцевое ребро жесткости с образованием между ним (подшипниками качения и стенкой) кольцевого зазора, заполненного сначала резиновым уплотнителем, а затем эластичной маслостойкой резиной.

Предполагается, что данное изобретение повысит эксплуатационную надежность резервуара и позволит уменьшить рабочую толщину стенки.

Конструкция обладает следующими недостатками:

- сложное техническое и конструктивное исполнение компенсационного элемента;
- наличие в компенсационном элементе ненадежного маслостойкого уплотнения, которое разрушается на практике из-за старения клеевого соединения резины с металлом, задолго до истечения срока эксплуатации объекта;
- в ходе возведения резервуара сложно заполнить внутреннюю полость компенсационного элемента дегазированной несжимаемой и незамерзающей жидкостью, что в целом снижает общую эксплуатационную надежность объекта.

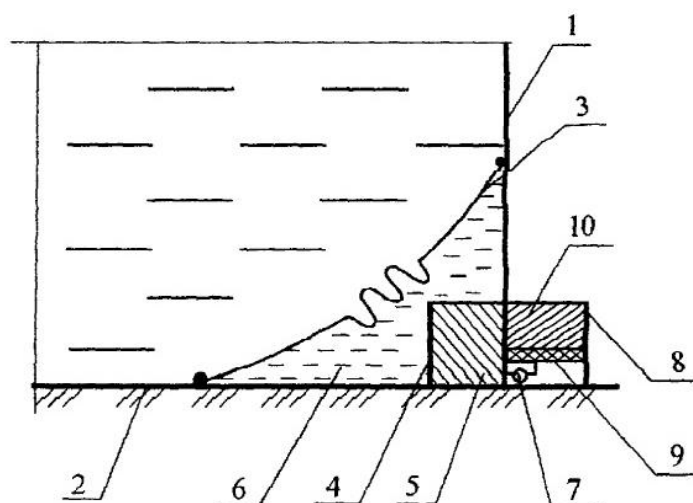


Рисунок 14 – Соединение стенки и дна резервуара

- 1 – стенка резервуара; 2 – днище; 3 – кольцевой элемент; 4 – перегородка в виде вертикального ребра жесткости; 5 – эластичный резиновый маслостойкий уплотнитель; 6 – дегазированная несжимаемая незамерзающая жидкость;
- 7 – роликовые подшипники качения; 8 – вертикальное кольцевое ребро жесткости; 9 – резиновый уплотнитель; 10 – эластичная маслостойкая резина

Авторы патента Пат. 844742 [87] предлагают выполнить окрайку в виде угольника, изогнутого по радиусу кривизны стенки резервуара, при этом стенка устанавливается на горизонтальную полку угольника, примыкает к его вертикальной полке и приваривается к ней двумя угловыми швами (рисунок 15,а). Кроме того, на вертикальной полке угольника со стороны, обращенной к стенке, может быть выполнен паз, глубина которого равна толщине стенки. В этот паз вставляется и приваривается стенка (рисунок 15,б). Днище в обоих случаях приваривается стыковыми швами к горизонтальной полке уголка.

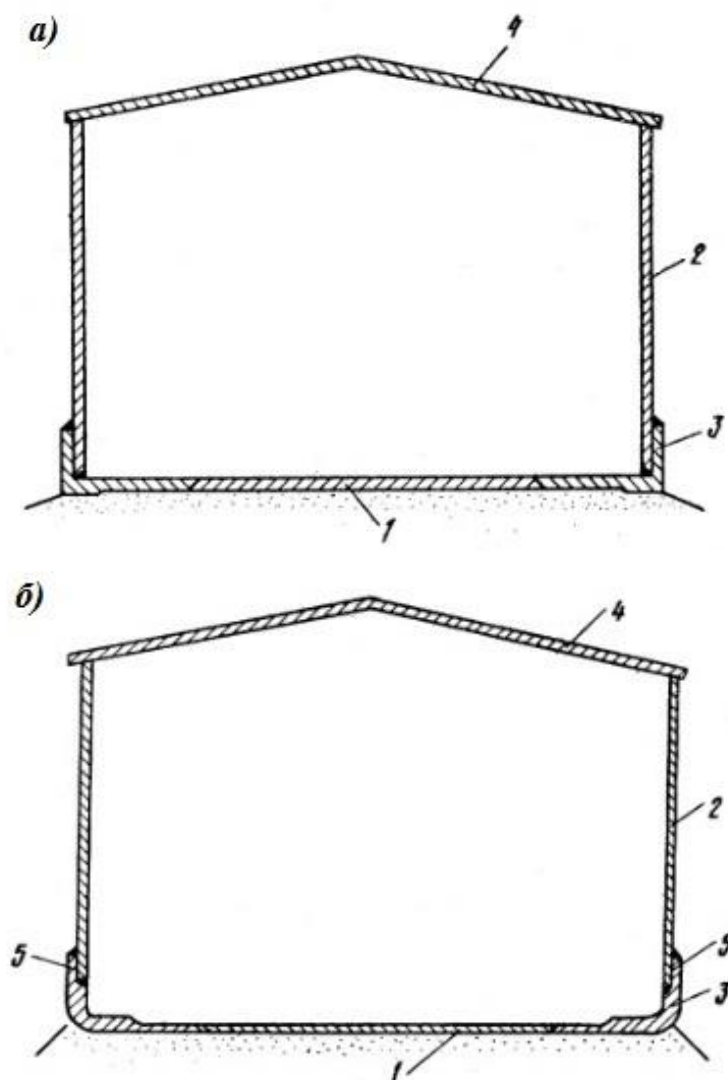


Рисунок 15 – Конструкция резервуара с окрайкой в виде угольника
1 – днище резервуара; 2 – стенка; 3 – угольник; 4 – крыша; 5 – внутренний паз

Недостатками данной конструкции являются:

- трудности при проведении неразрушающего контроля сварных швов стенки резервуара;
- отсутствие выступа окрайки может привести к большим отклонениям стенки от вертикали;
- большие деформации в случае неравномерной осадки основания резервуара
- сложность установки стенки в паз при варианте б.

Авторы патента Пат. 614206 [88] предлагают делать окрайку с глухими вырезами с внешней стороны, имеющими плавный переход во внутренней части (рисунок 16).

Предполагается, что вырезы позволят перераспределить напряжения, а именно снять напряжения, возникающие от температурного перепада в наружных областях днища, тем самым снизив вероятность образования трещин и повысив эксплуатационную надежность всего резервуара.

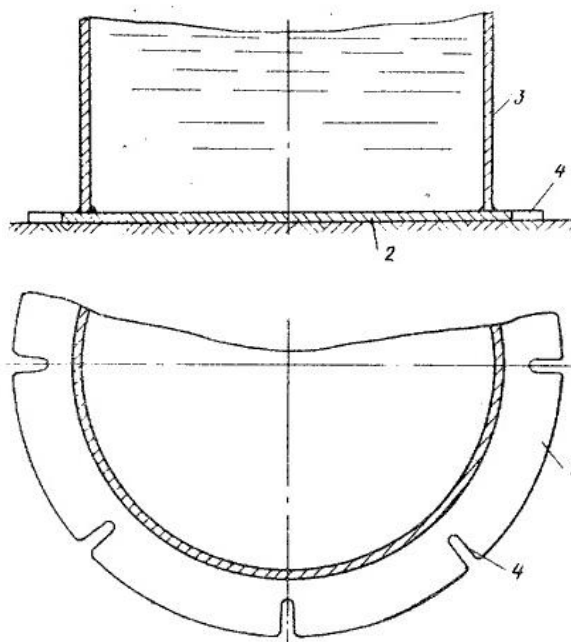


Рисунок 16 – Резервуар с окрайкой, имеющей глухие вырезы

1 – выступы окрайки; 2 – днище; 3 – корпус резервуара; 4 – вырезы

Недостатками конструкции являются:

- уменьшение площади окраек может привести к образованию дополнительных напряжений в стенке резервуара;
- возможность деформации окрайки, появление волнистости под действием сварочных напряжений и деформаций;
- возможность появления вертикальных усилий, способствующих увеличению вероятности появления трещин во внутренней части выреза.

Несмотря на большое количество технических решений, направленных на повышение ресурса работы уторного узла, на сегодняшний день наиболее широко используется конструкция резервуара, включающая в себя плоское днище и вертикальную цилиндрическую стенку. Стенка установлена перпендикулярно днищу на некотором расстоянии от его края, при этом стенка и днище сопряжены друг с другом при помощи таврового сварного соединения, с конструктивным непроваром.

1.6 Выводы по первой главе и постановка задач исследования

1. Анализ результатов комплексных обследований вертикальных стальных резервуаров свидетельствует о том, что наиболее часто предаварийные либо аварийные ситуации возникают в самом опасном и перегруженном участке - уторном узле, соединении стенки с днищем.

2. Возникающие в процессах сварки вертикального стыка стенки первого пояса резервуара, приварки люка-лаза, приемо-раздаточных патрубков к первому поясу остаточные напряжения и деформации значительно снижают точность сборки таврового соединения уторного узла, а также негативно влияют впоследствии на работоспособность конструкции. Проведенные замеры на реальных объектах показывают, что длина участков с

дефектами сборки достигает до 7% от общей площади соприкосновения стенки и окрайки.

3. На сегодняшний день для приведения величины зазора в допустимые пределы применяется прием, не регламентированный в нормативной документации. Он заключается в том, что окрайка снизу подпирается и поднимается на необходимую высоту до устранения зазора. Данная технология на наш взгляд создает дополнительные напряжения в уторном узле, что может привести к преждевременному разрушению.

4. Одним из наиболее распространенных и универсальных способов снижения внутренних напряжений и повышения механических свойств металла является термическая обработка (подогрев, отпуск). С целью снижения трудоемкости работ по снижению уровня внутренних напряжений и деформаций также активно исследуются альтернативные способы, такие как сопутствующая вибрационная обработка и ультразвуковая ударная обработка.

5. Анализ данных открытой печати и проведенная патентная проработка показала наличие достаточного количества работ в данной области. Среди прочего были предложены различные конструктивные исполнения уторного узла, однако практически данные предложения не были реализованы.

Для обеспечения ресурса работы резервуара, учитывая острое реагирование общественности на возможные техногенные последствия, связанные с разрушением опасных производственных объектов, целью данной работы является исследование влияния дефектов сборки таврового соединения на ресурс уторного узла резервуара и обоснование методов его повышения.

Поставленная цель может быть достигнута проведением комплекса теоретических и экспериментальных исследований и разработок. Данные задачи изложены в следующей последовательности:

1. Проанализировать состояние проблем обеспечения долговечности сварного соединения уторного узла резервуара.

2. Разработать математические модели распределения внутренних напряжений уторного узла при отклонении от технологии изготовления.

3. Экспериментально исследовать влияние послесварочной обработки уторного узла на его циклическую долговечность.

4. Разработать технологические рекомендации по увеличению ресурса (долговечности) уторного узла резервуара.

2. АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УТОРНОГО УЗЛА РЕЗЕРВУАРА, В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

В резервуарах, где толщина первого пояса не превышает 12 мм, допускается применять тавровое соединение с двухсторонней сваркой. Технологический непровар в корне шва таких соединений, является сильным концентратором напряжений. В совокупности с нагрузкой от веса стенки, крыши, гидростатического давления продукта, снеговой и ветровой нагрузки [5] данный узел имеет сложное НДС и является наиболее опасным участком резервуара.

Исследованию напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров посвящены работы А.А. Тарасенко, В.Л. Березина, А.А. Катанова, Г.Г. Васильева, О.В. Дидковского, Ф.Е. Дорошенко, Э.Я. Еленицкого, Е.Е. Семина и других авторов [47-77].

Возникновение увеличенного зазора из-за местных деформаций первого пояса резервуара, и как следствие его устранение приводит к возникновению дополнительных упругих растягивающих напряжений. Предлагается провести расчет полей напряжений в уторном узле резервуара с учетом этих условий.

2.1 Характеристики объекта исследования

Для исследования уторного узла был выбран резервуар номинальным объемом 5000 м³. Внутренний диаметр резервуара составляет 22800 мм, высота стенки – 11920 мм толщина всех поясов стенки – 10 мм, толщина краечных листов – 10 мм, толщина листов днища – 8 мм. Характеристику материала принимаем как у стали 09Г2С. Основные характеристики стали представлены в таблицах 2 и 3 [94]

Таблица 2 - Теплофизические характеристики стали 09Г2С

Т, °С	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)
20	57	470
100	55,6	486
200	52,7	502
300	48,5	519
400	45,0	536
500	40,8	548
600	37,1	586
700	34,2	645
800	30,1	695
900	27,3	687
1000	27,7	674
1100	28,5	670
1200	29,8	670

Таблица 3– Механические характеристики стали 09Г2С

Характеристика	Значение
Модуль упругости, Е (МПа)	$2,06 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона, η	0,28
Плотность, $\rho_{ст}$ (кг/м ³)	7850
Условный предел текучести, σ_T (МПа)	330
Предел прочности, σ_B (МПа)	500

В качестве расчетной схемы принимаем одну из наиболее распространенных схем (рисунок 17):

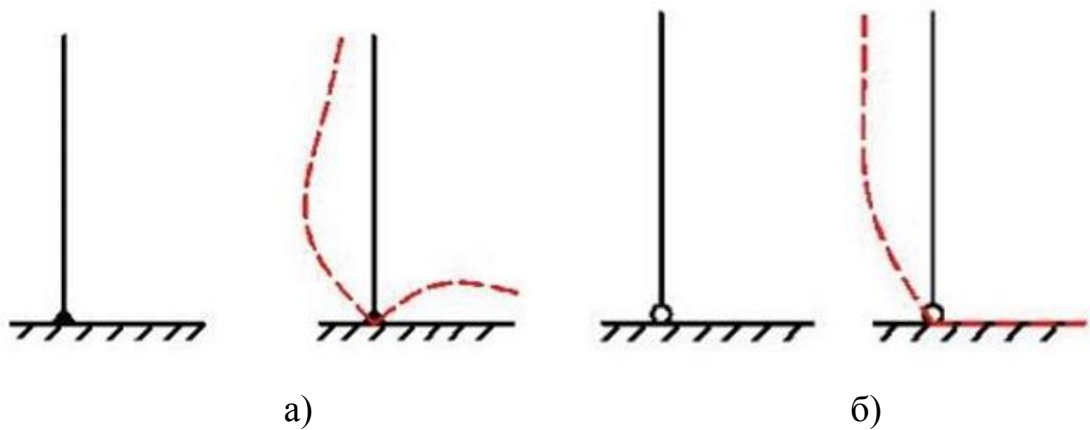


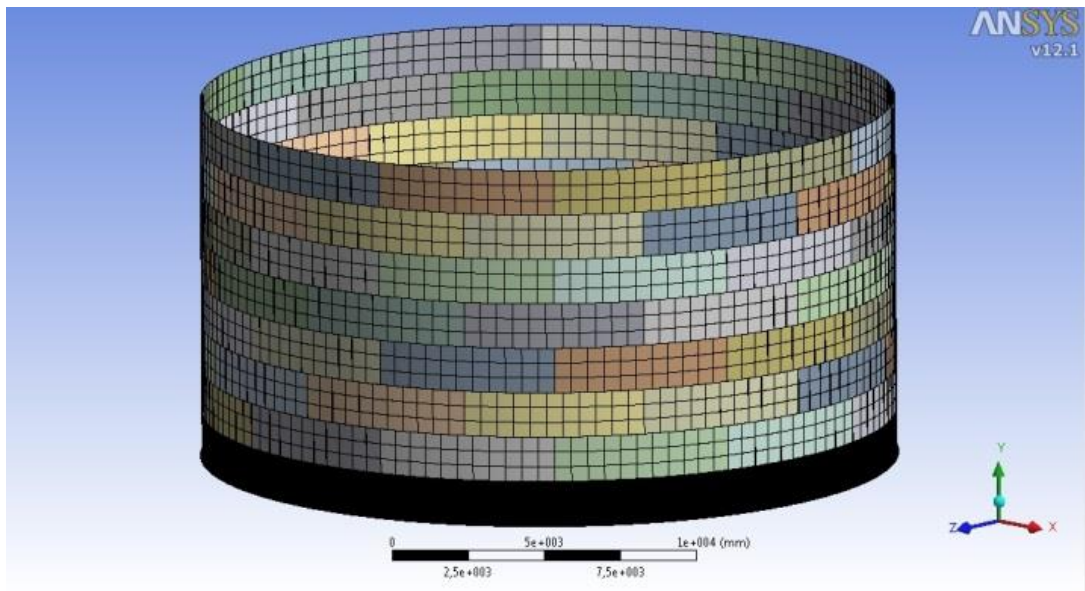
Рисунок 17 - Расчетная схема уторного узла
а - жесткий узел; б - шарнирный узел

В качестве расчетной схемы выбрано соединение в виде шарнирного узла.

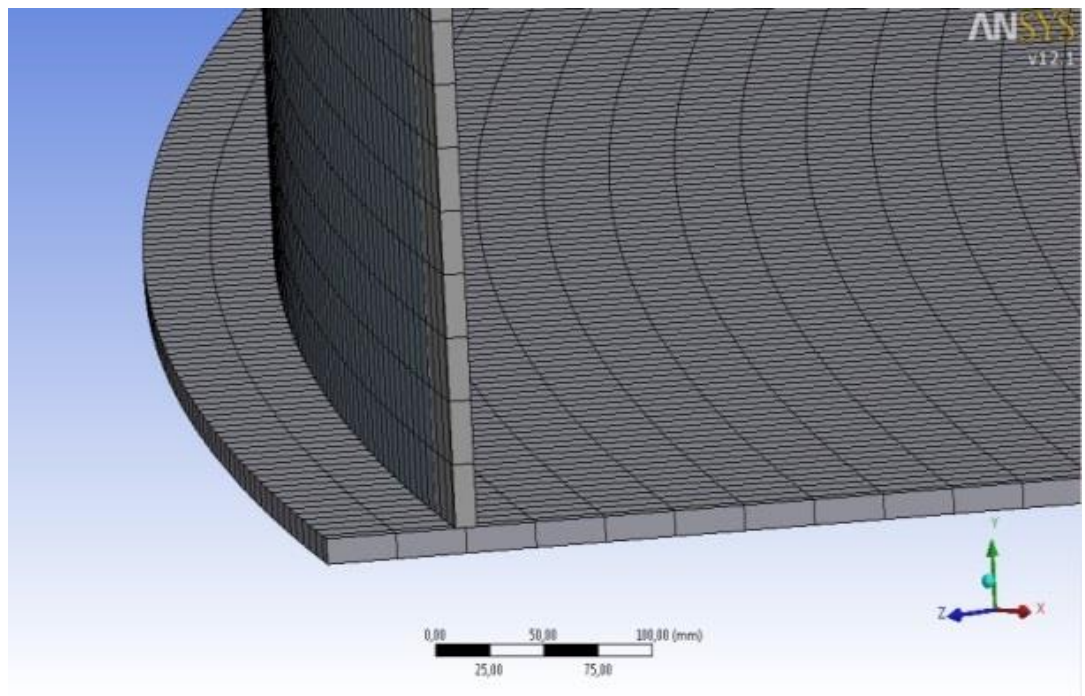
2.2 Расчет внутренних напряжений при упругой деформации окрайки днища в модели уторного узла, без учета сварочных напряжений

С целью определения уровня напряженно-деформированного состояния в уторном узле в процессе эксплуатации, в случае применения данного технологического приема, были проведены расчеты при помощи метода конечных элементов в программном комплексе Ansys Workbench. Для этого были построены модели резервуара (рисунок 18) без дефекта, с локальным увеличением зазора в стыке (смоделировано подтягивание в пределах одного окраечного листа), с протяженным увеличенным зазором в стыке (непрерывное подтягивание на длине до трех окраечных листов).

Данная модель была разбита на сетку конечных элементов (рисунок 18, а), где для первого пояса стенки и окраек днища для получения более точных результатов размер элементов уменьшен (рисунок 18, б).



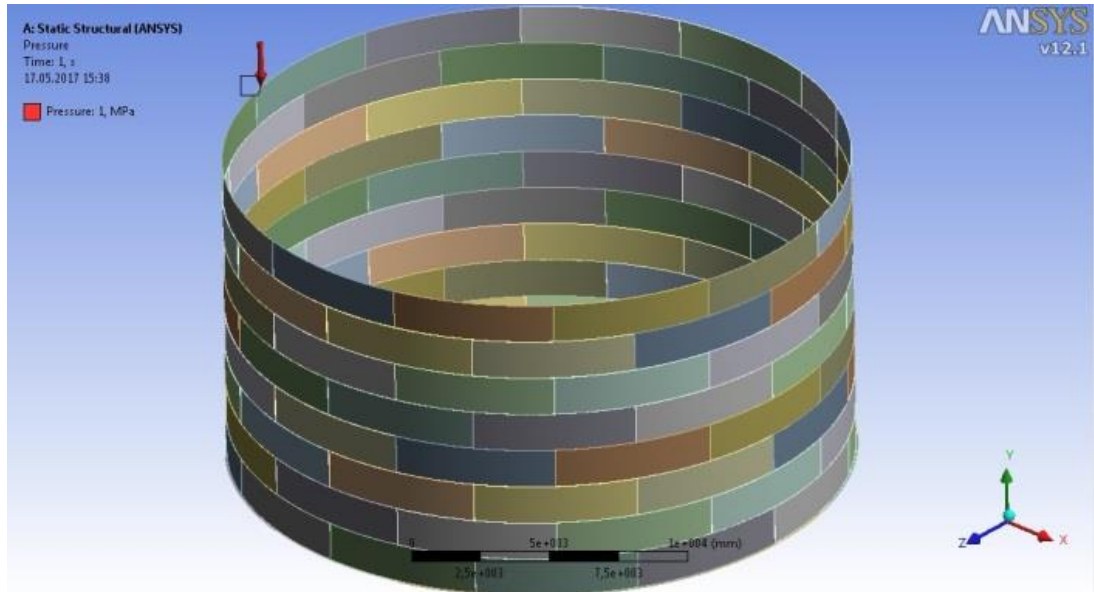
а)



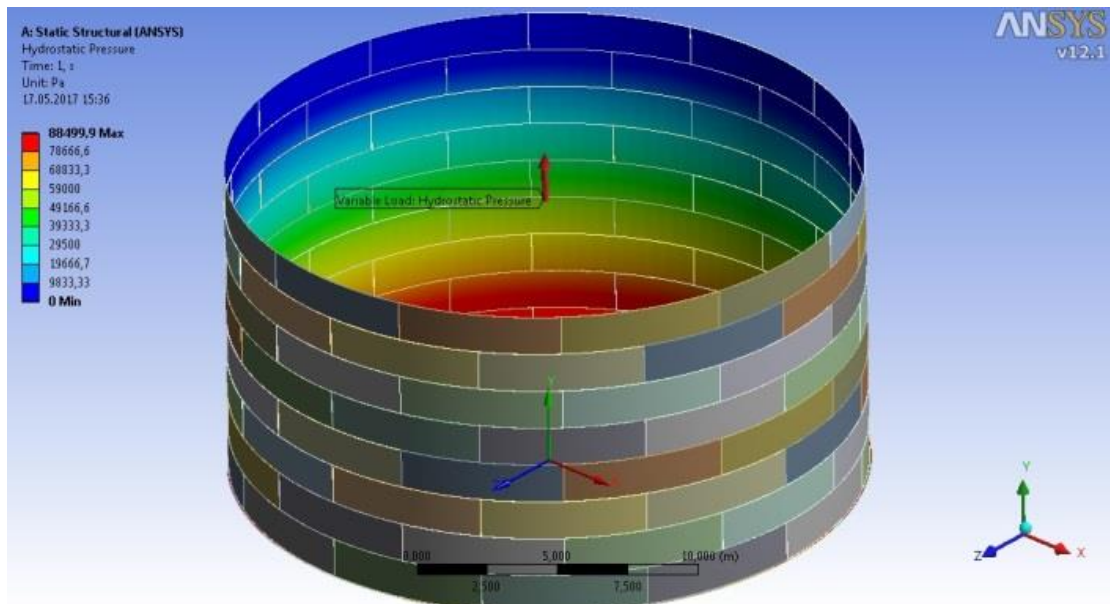
б)

Рисунок 18 – Модель резервуара и сетка конечных элементов резервуара: а – Модель и сетка конечных элементов всего резервуара; б – сетка конечных элементов первого пояса и окроек

На резервуар были приложены следующие нагрузки: давление веса крыши, приложенное по нормали к верхней грани стенки и величиной 1 МПа; гидростатическое давление, оказываемое на стенку и днище средой плотностью 860 кг/м^3 и высотой заполнения 10,5 м (рисунок 19).



а)



б)

Рисунок 19 – Приложение нагрузок

а – давление веса стенки; б – гидростатическое давление среды

Жесткое закрепление резервуара осуществлялось по внешней нижней поверхности днища и краек.

Результаты расчета полей напряжений показаны на рисунках 20-21.

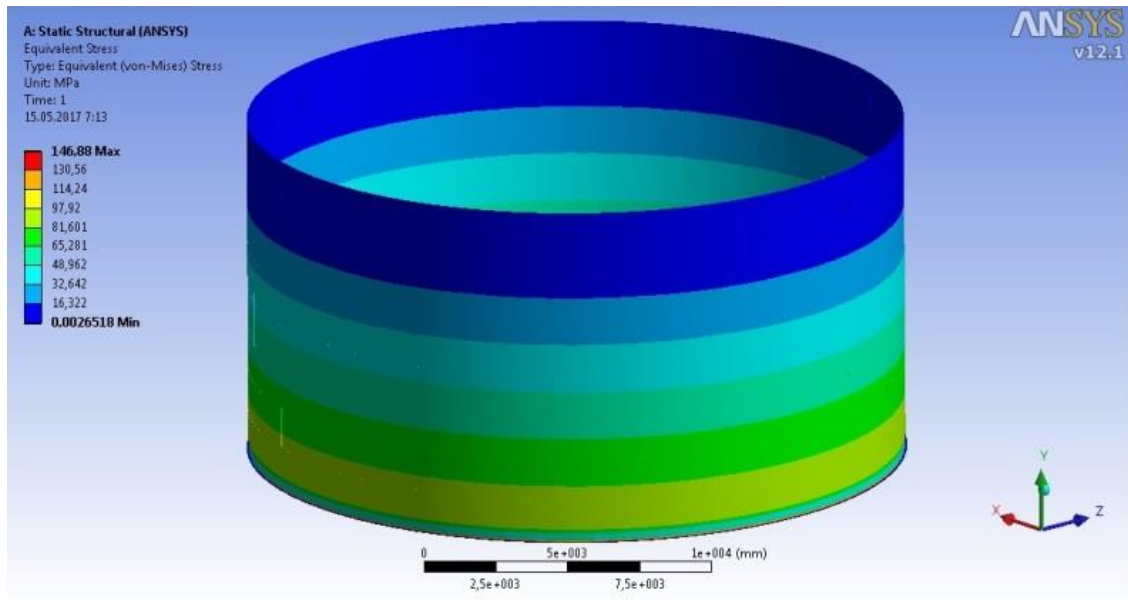
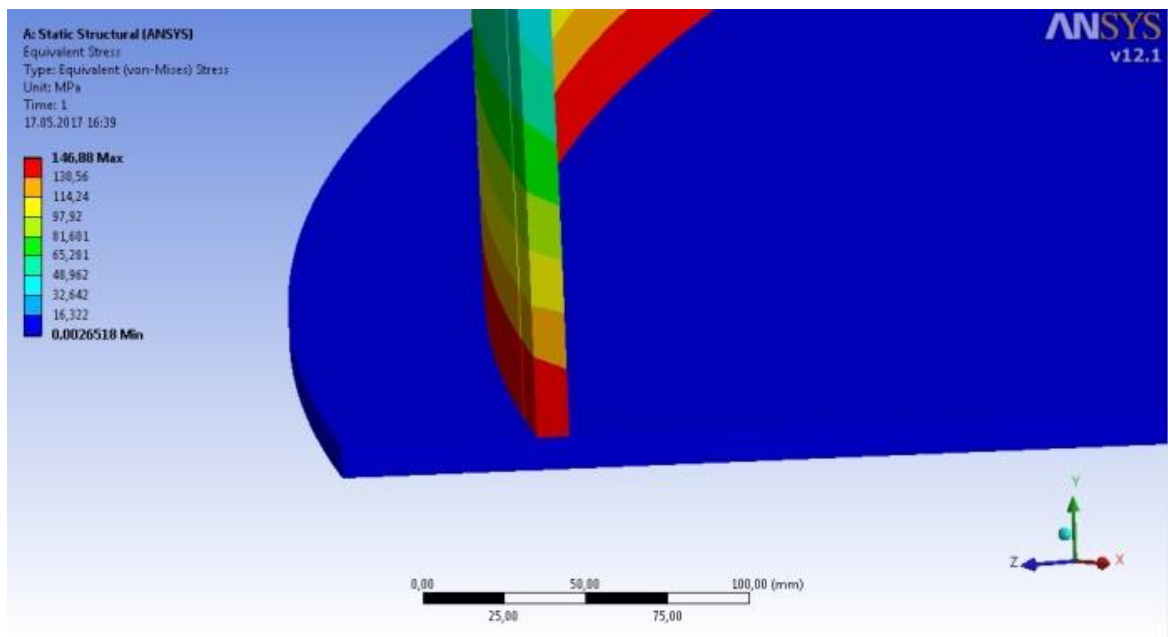
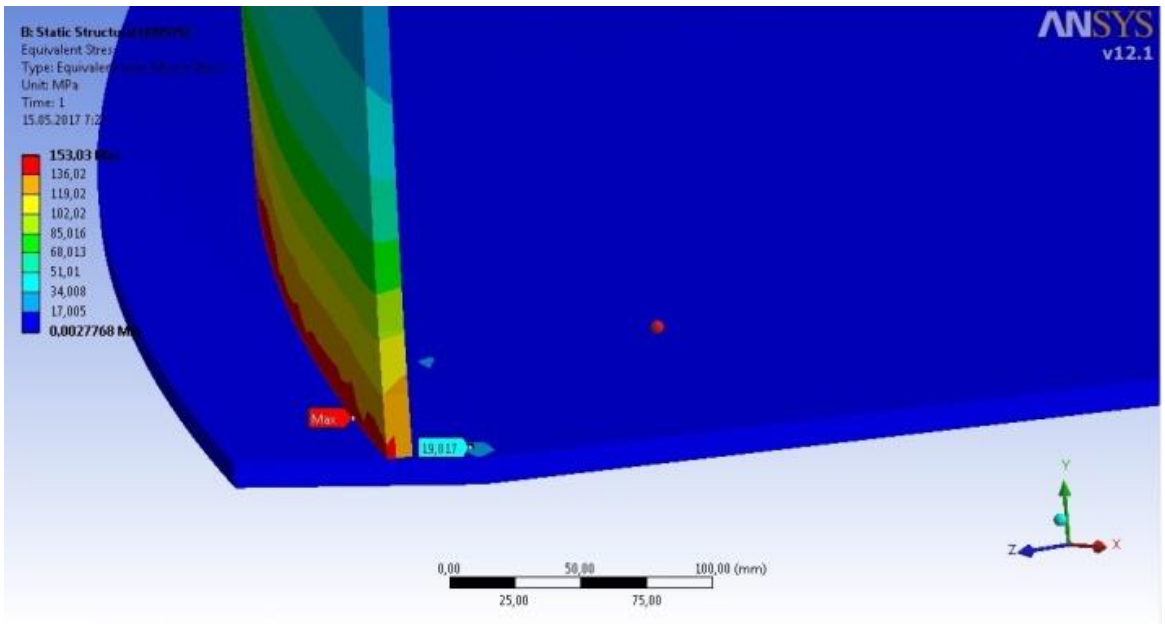


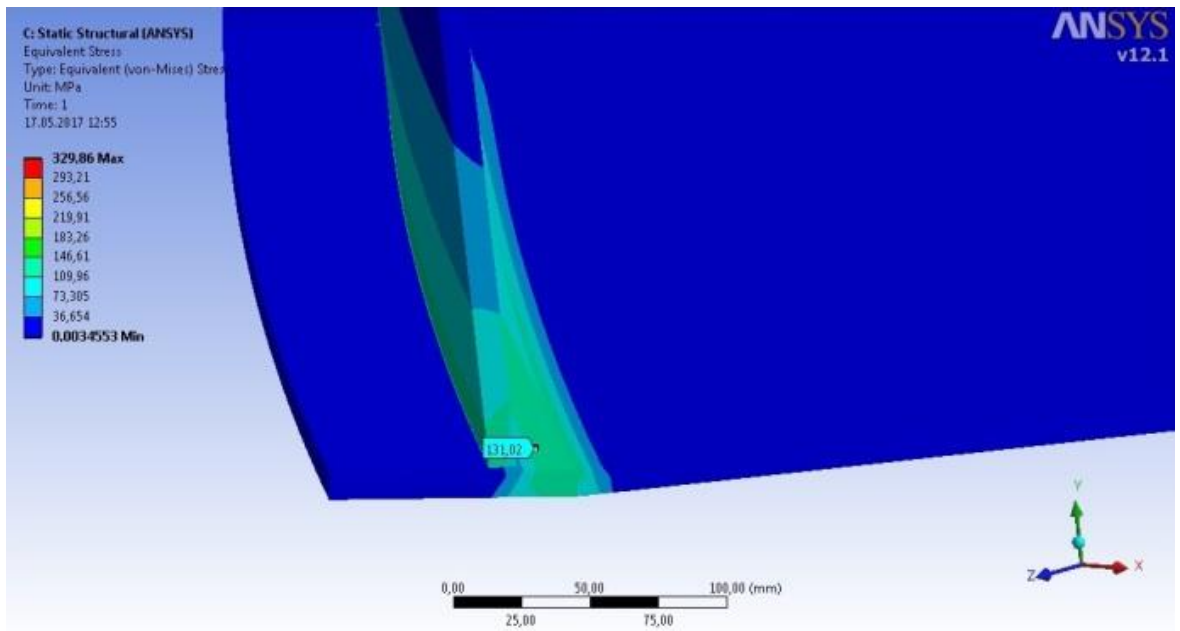
Рисунок 20 – Распределение эквивалентных напряжений на резервуаре без дефекта



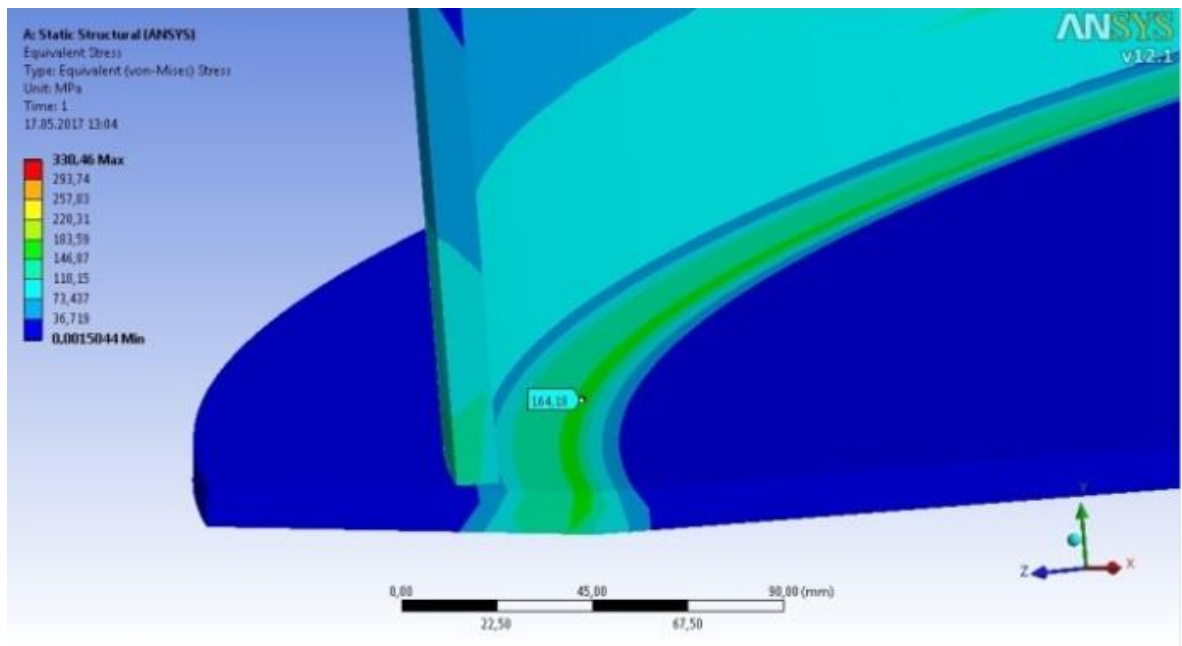
a)



б)



B)



г)

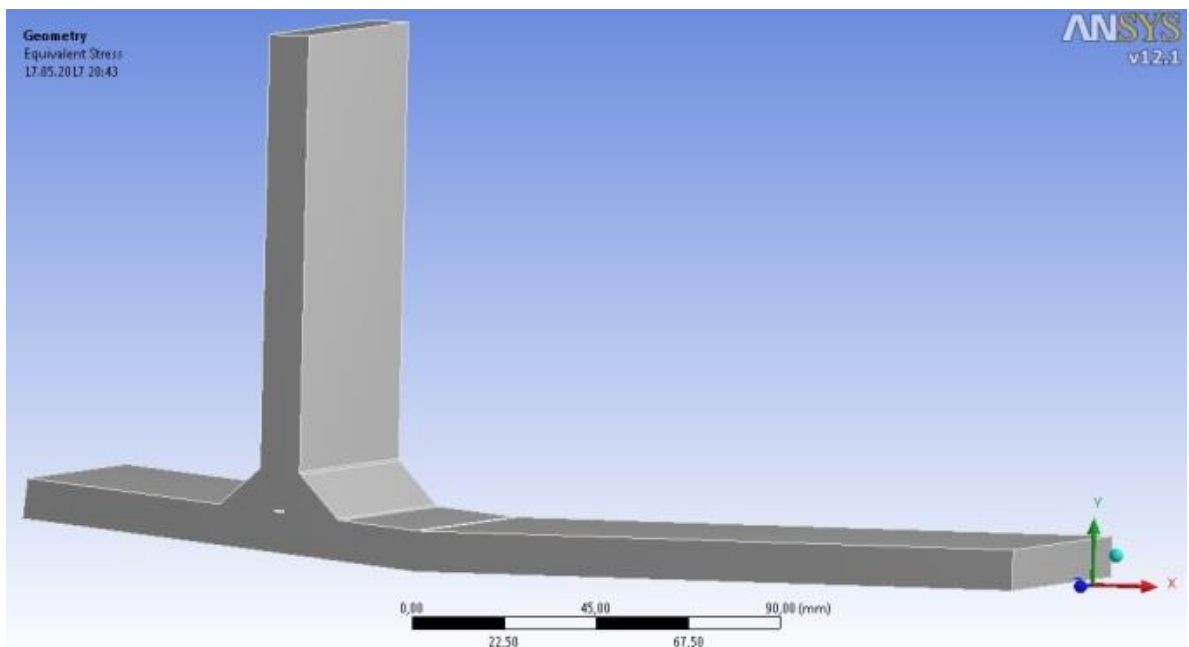
Рисунок 21 – Распределение эквивалентных напряжений в уторном узле:
 а – в резервуаре без дефекта окрайки; б – в резервуаре с локальным дефектом окрайки; в – в резервуаре с дефектом на 1 окрайке; г – в резервуаре с дефектом на двух окрайках

Результаты расчетов показывают, что максимальные эквивалентные напряжения расположены в зоне уторного узла. Установлено, что в уторном узле, изготовленном с поднятием окрайки, в процессе нагружения резервуара на окрайке возникают дополнительные напряжения на приподнятом участке. Наличие данных напряжений на окрайке может отрицательно влиять на ресурс работы уторного узла и на стойкость против действия коррозии. При эксплуатации резервуара, изготовленного согласно требованиям нормативной документации, возникновение данных напряжений не происходит.

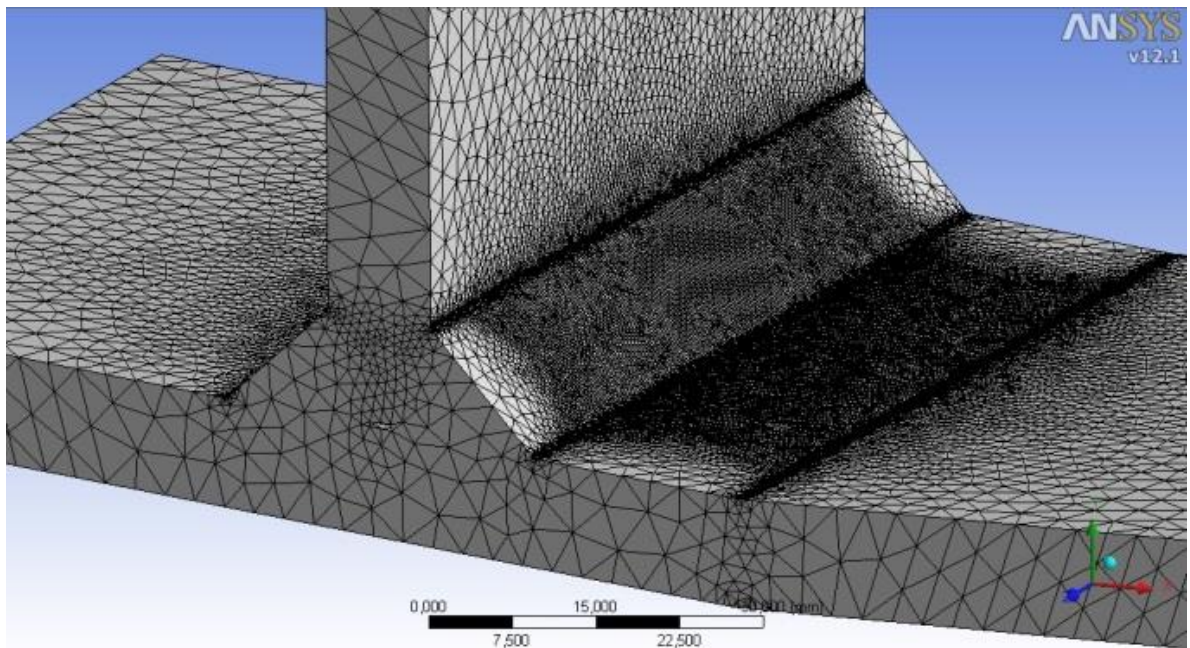
Также расчеты показали, что поднятие окрайки в процессе изготовления приводит к росту отклонений образующих стенки резервуара в процессе его эксплуатации.

С целью оценки уровня напряжений в месте сопряжения стенки и днища при различных углах загиба окрайки при помощи метода конечных элементов

был построен узел, состоящий из стенки первого пояса и окрайки, зазор между которыми составляет 4 мм, двустороннего углового сварного шва с катетом 10 мм. В первоначальном положении окрайка изогнута до касания ею внешней кромки стенки - на 5° от горизонтали (рисунок 22). В дальнейшем проведены расчеты для величины угла загиба окрайки с уменьшением от 4° и до 1° , также рассмотрена модель без загиба. На смоделированных образцах была построена сетка конечных элементов, которая сгущалась в местах перехода от основного металла к сварному шву и в местах сгиба окрайки. На стенку длиной 120 мм и окрайку длиной 250 мм, толщиной 10 мм и шириной 100 мм, прикладывалось гидростатическое давление хранимого продукта; на стенку прикладывалось давление, оказываемое всей стенкой и крышей на сварное соединение. Закрепление задавалось жесткое по нижней горизонтальной поверхности окрайки (рисунок 23). Сварочные напряжения в расчете не учитывались.

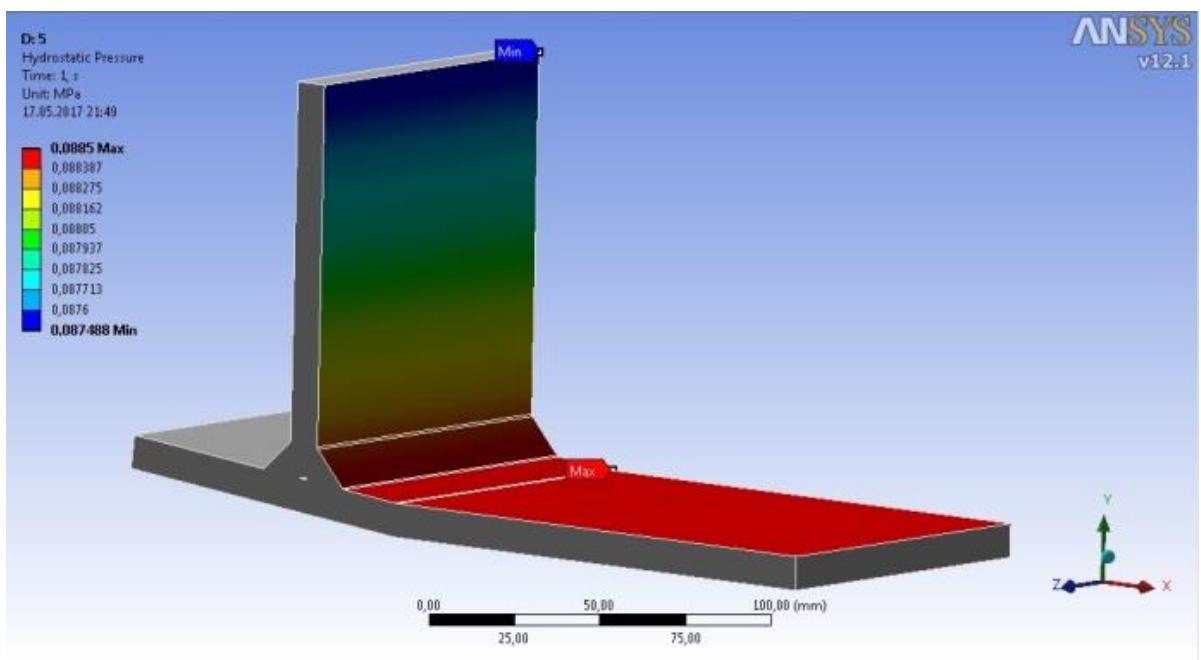


a)

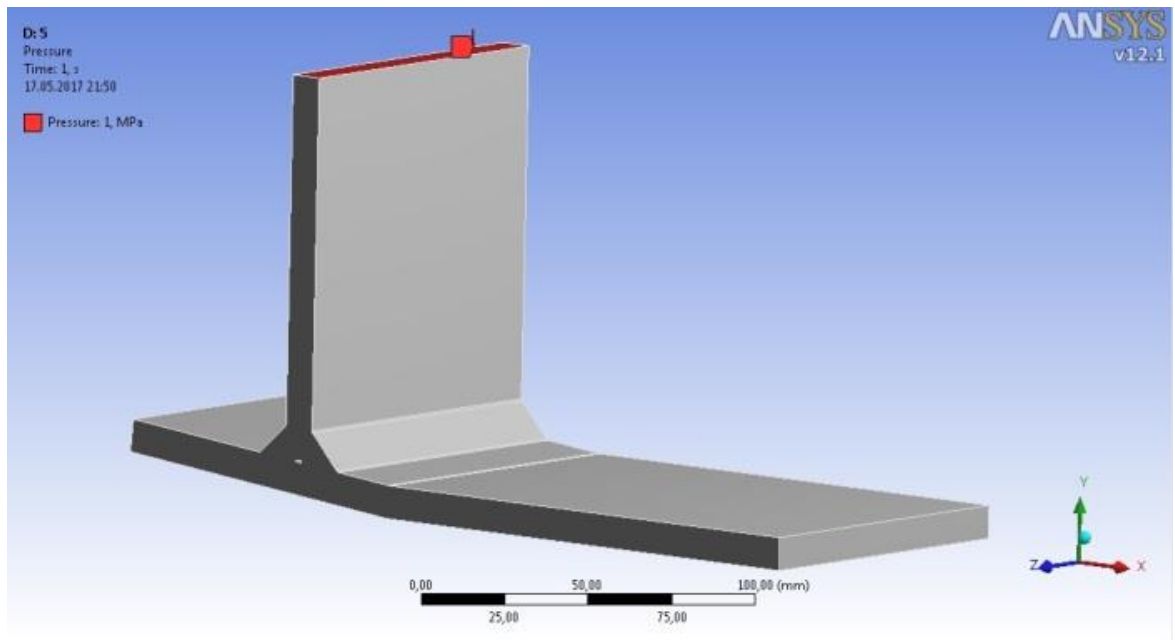


б)

Рисунок 22 – Моделирование уторного узла резервуара: а - образец уторного узла с приподнятой на 5° крайкой; б – сетка конечных элементов



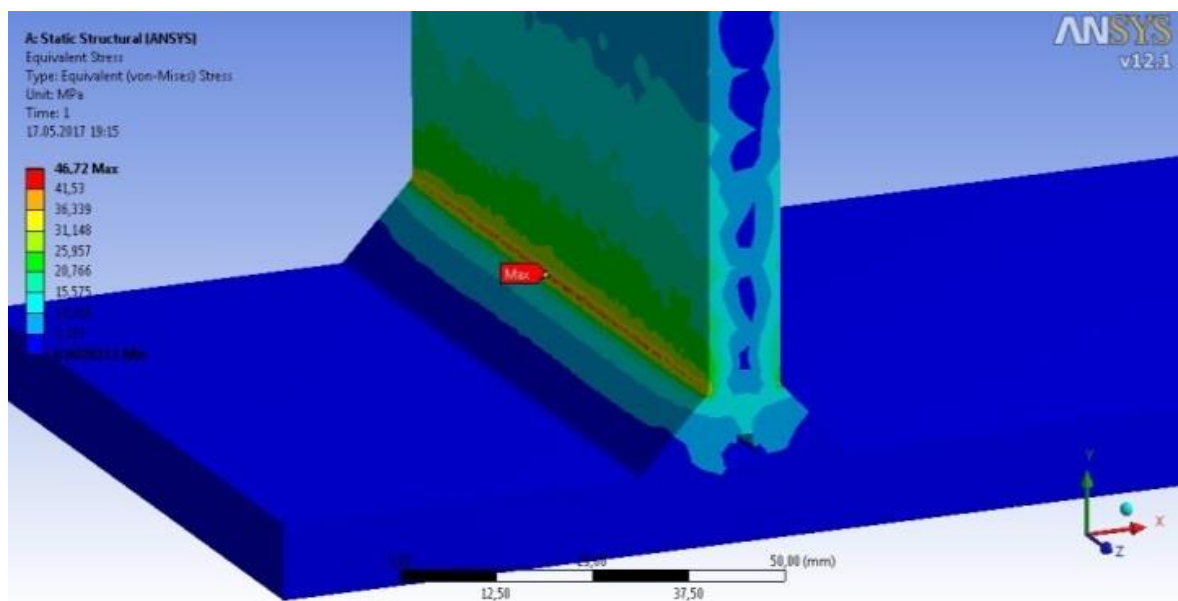
а)



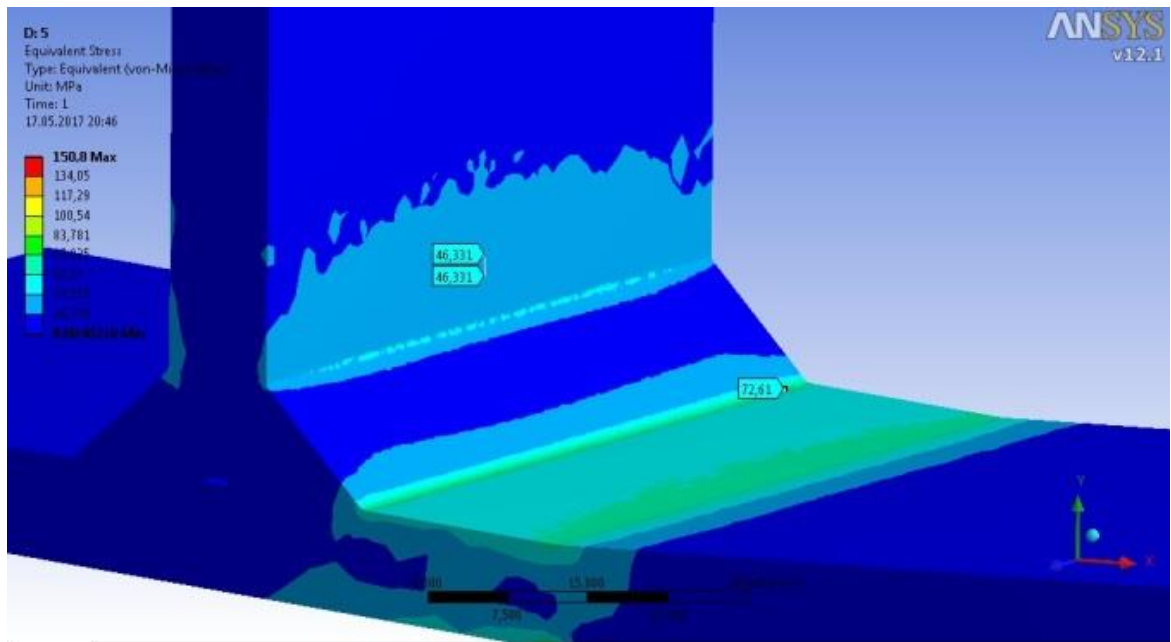
б)

Рисунок 23 – Приложение нагрузок на образец уторного узла с приподнятой на 5° крайкой: а – приложение гидростатической нагрузки; б – приложение веса стенки

На рисунке 24 представлено поле распределения эквивалентных напряжений в уторных узлах различных исполнений.



а)



б)

Рисунок 24 – Распределение эквивалентных напряжений

а – в образце без деформации; б – в образце с поднятой на 5° окрайкой

В результате проведенных расчетов установлено, что при нагружении резервуара уровень напряжений в зоне термического влияния стенки при монтаже с использованием приема подтяжки окрайки выше, чем при выполнении сварного соединения с завышенным зазором. Так, при увеличении угла подъема краечного листа с 1 до 5 градусов, эквивалентные напряжение в зоне термического влияния увеличиваются с 19,7 до 38,3% (рисунок 25).

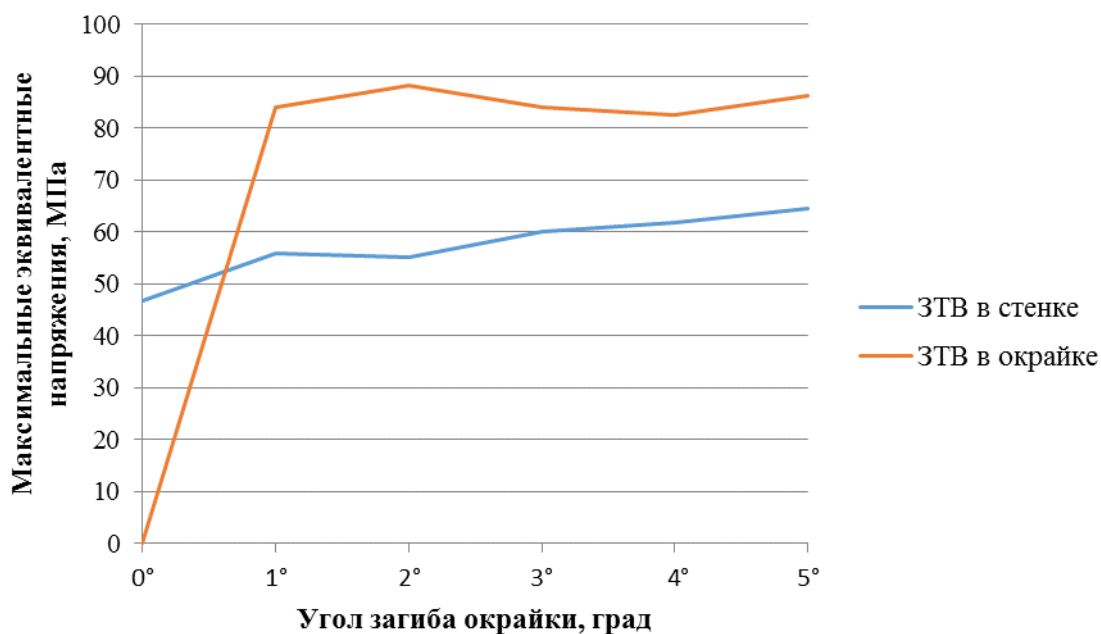


Рисунок 25 – Зависимость величины максимальных эквивалентных напряжений в зонах термического влияния (ЗТВ) сварного соединения уторного узла от угла загиба окрайки

В связи с этим считаем, что совокупность установленных негативных факторов, наблюдаемых при устранении увеличенного зазора в уторном узле могут иметь большое значение для ресурса работы РВС.

2.3 Расчет внутренних напряжений при упругой деформации окрайки днища в модели уторного узла, с учетом сварочных напряжений

При расчете остаточных сварочных напряжений производится решение нелинейной нестационарной задачи теплопроводности и набора квазистатических задач упругопластического неизотермического деформирования основного материала и наплавляемого материала. Механическая задача выполнена с учетом геометрической нелинейности. Решение задачи теплопроводности выступает в качестве температурных граничных условий механической задачи. Для расчетов использовались программные системы конечно-элементного анализа ANSYS. На этапе расчета

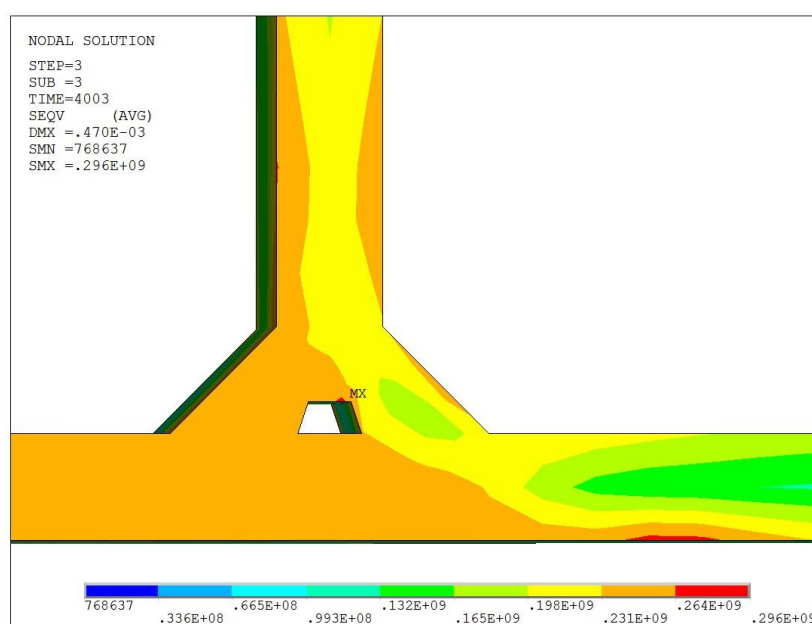
тепловых полей использовались объемные 20-ти узловые элементы SOLID90, а для расчета напряжений и деформаций SOLID186.

Геометрические размеры модели:

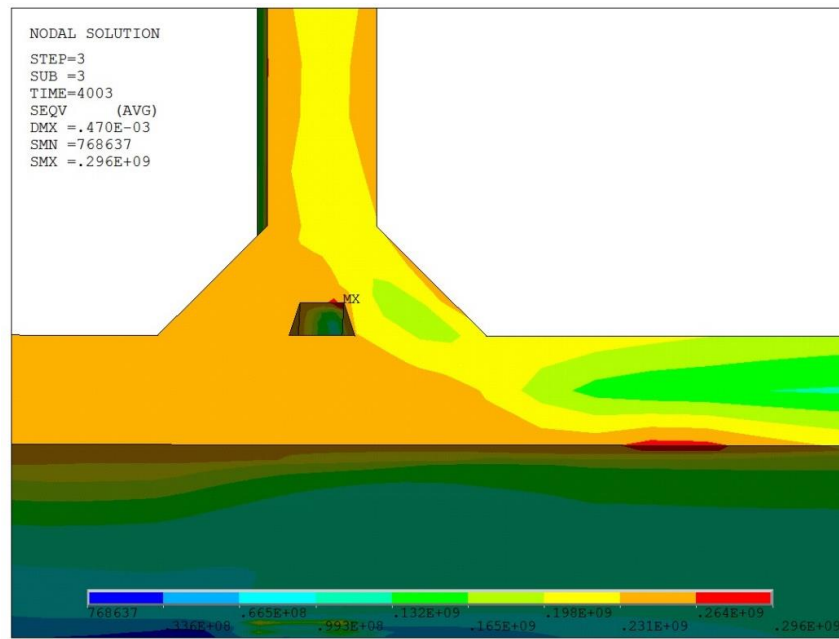
- ширина – 330 мм;
- длина – 597 мм (сектор 2°);
- высота – 1200 мм;
- толщина металла – 10 мм.

Размеры непровара – 4x2 мм. При расчете модели производился, нагрев сварного соединения до 1600 °С с дальнейшим остыванием при 20 °С в течении 4000 с. Перед началом термической нагрузки (сварки), для имитации несоблюдения зазора в стыке перед сваркой, производилась деформация окрайки днища.

На рисунке 26 представлен расчет полей внутренних напряжений в модели уторного узла, с дополнительной деформацией окрайки днища, приближенной к реальным размерам. Максимальные внутренние напряжения, равные 296 Мпа, находятся непосредственно в зоне технологического непровара, которые близки к пределу текучести материала (сталь 09Г2С).



a)



б)

Рисунок 26 – Распределение эквивалентных внутренних напряжений с учетом с учетом упругих и сварочных напряжений

2.4 Моделирование полей напряжений в моделях экспериментальных образцов

Выбор формы образцов проводился по результатам математического моделирования. Модель имеет одинаковые размеры и физические свойства с экспериментальными образцами. Закрепление модели перед нагрузкой производилось по всем осям, с торцов и посередине «окрайки днища». Нагрузка на образец разложена на 2 составляющие и приложена к верхнему торцу «стенки» в связи с тем, что на испытательной машине она направлена по углом в 55° (рисунок 27). Эквивалентная нагрузка составляет 10 кН.

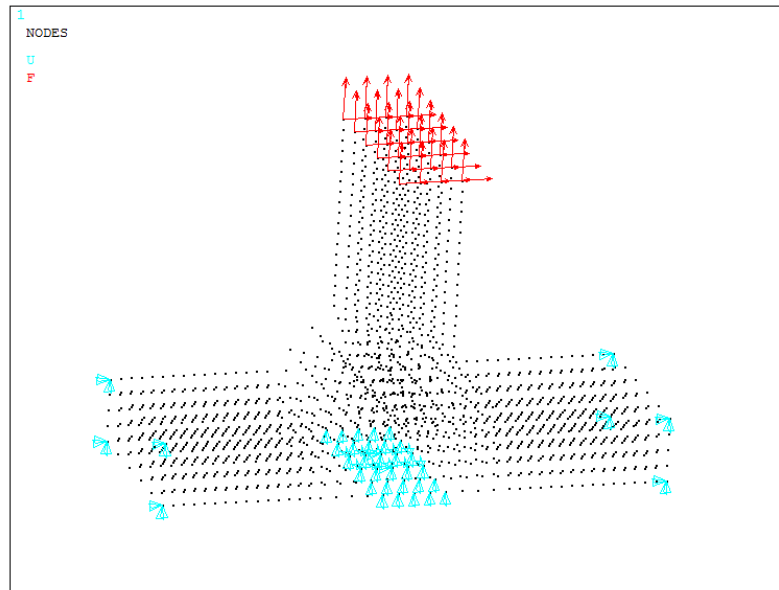


Рисунок 27 – Расположение закреплённых элементов и приложенных нагрузок в математической модели образца

Проанализировав результаты математического моделирования образцов (рисунок 28, 29) следует отметить, что максимальные внутренние напряжения находятся в зоне термического влияния и равны 270 Мпа. Следовательно, образец находится в упругой зоне.

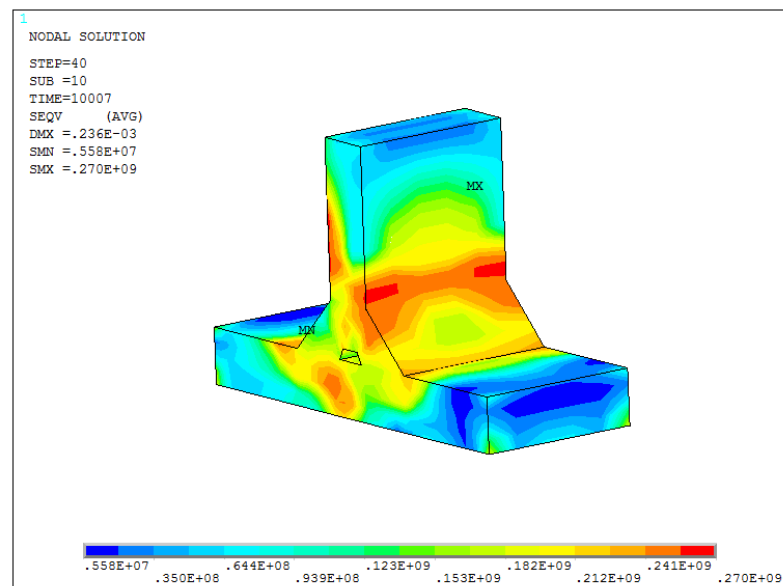


Рисунок 28 – Распределение полей напряжения в математической модели образца

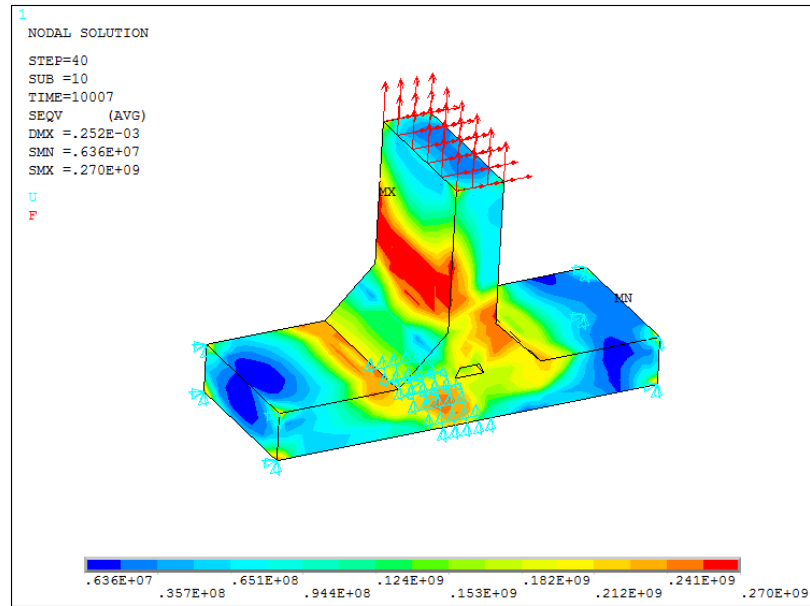


Рисунок 29 – Распределение полей напряжения в математической модели образца с указанием направления нагрузки и мест закрепления

2.5 Выводы по второй главе.

1. Расчет по математической модели полей напряжений в уторном узле резервуара показывает, что после сварки узел находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, а при моделировании увеличения величины зазора в стыке как вследствие его устранения, наблюдается локальное увеличение остаточных напряжений до величин близких к пределу текучести.

2. Разница между показаниями внутренних напряжений после сварки в математических моделях образцов уторного узла и модели приближенной к реальным размерам составляет 3,8%, вследствие можно утверждать, что результаты проведенных экспериментов можем считать верными.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ УТОРНОГО УЗЛА

3.1 Подготовка к проведению экспериментов на циклическую долговечность

С целью определения степени влияния величины зазора между стенкой и окрайкой на ресурс работы уторного узла были проведены практические исследования (малоцикловые испытания) [121-126]. Для этого были изготовлены образцы из листов толщиной 10 мм из стали 09Г2С (рисунок 30).



Рисунок 30 – Опытный образец уторного узла изготовленный с проведением термообработки после сварки

Ширина образцов составляла 30 мм. Листы сваривались в лабораторных условиях при помощи полуавтоматической сварки в среде углекислого газа проволокой диаметром 1,2 мм марки Св-08Г2С. Исследования на малоцикловую усталость проводились по ГОСТ 25.502-79 для трех изготовленных узлов: сваренному по технологии, с имитацией увеличения

зазора в 2 и 4 мм. Для имитации увеличения зазора образцы сваривались между с клином по центру. Данное закрепление позволяет с имитировать жесткое закрепление «окрайки», а также создаются дополнительные растягивающие напряжения в шве и зоне термического влияния. Данные образцы прошли определенный вид обработки:

- с применением после сварки термообработки (отпуск);
- с применением ультразвуковой ударной обработки после сварки (технологический комплекс Шмель);
- с применением виброобработки в процессе сварки.

Для снижения уровня остаточных напряжений с 24 образцами была проведена термообработка в режиме высокого отпуска, в муфельной печи при температуре 550 °С, время выдержки 3,5 часа с последующим охлаждением на воздухе.

На следующих 24 образцах проводилась ультразвуковая ударная обработка с использованием «Технологического комплекса «Шмель» ИЛ100-16 при частоте 25-27 кГц и амплитудой 35 мкм, в 2 прохода по поверхности сварного шва и основного металла в зоне термического влияния. При ультразвуковом методе происходит пластическое деформирование поверхности обрабатываемого металла, что приводит к поверхностному наклепу на небольшую глубину. При обработке сварных швов углеродистых и низколегированных сталей этот метод позволяет растягивающие напряжения перевести в сжимающие вследствие деформации поверхности.

Изготовление образцов еще 24 образцов проводилось на специальном вибрационном стенде с амплитудой колебаний 1 мм и частотой 50 Гц в процессе их сварки.

Также было изготовлено 24 образца без обработки.

При циклических испытаниях определяют механические свойства, характеризующие способность материала противостоять усталости, т. е.

процессу постепенного накопления необратимых изменений физико-механических свойств материала под действием переменных напряжений, в результате чего происходит его повреждение, образование усталостных трещин (частичное разделение материала под действием переменных напряжений), их развитие и усталостное разрушение (разрушение материала нагружаемого объекта до полной потери его прочности или работоспособности вследствие распространения усталостной трещины).

Испытания проводились при мягком осесимметричном нагружении, когда амплитуда напряжений является постоянной, а амплитуда деформаций изменяется с количеством циклов[126-130].

Эксперимент проводился на усталостной испытательной системе INSTRON 8801 (рисунок 31).

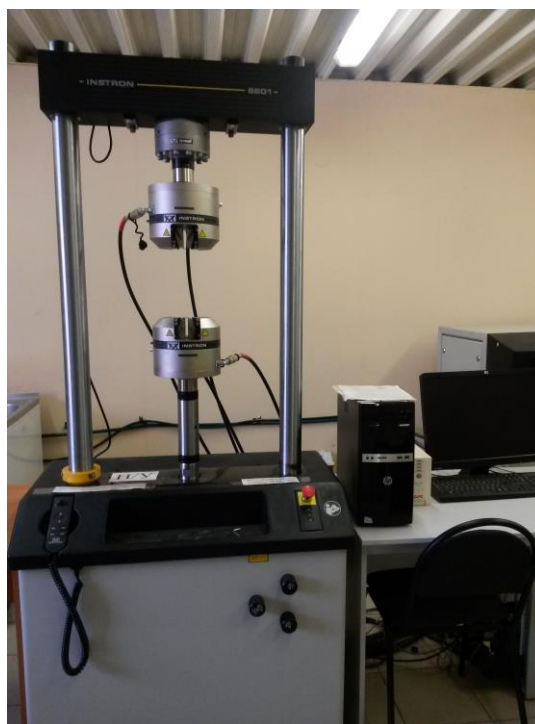


Рисунок 31 - Усталостной испытательной системе INSTRON 8801

Данная сервогидравлическая испытательная система модели 8801 отвечает требованиям, предъявляемым, как к динамическим, так и к

статическим испытаниям. Модель 8801 позволяет проводить различного рода механические испытания (статические, мало- и многоцикловые усталостные испытания). Эксперименты проходили в следующих условиях: температура – 20 °С, нагрузка – 10 кН, частота – 0,3 Гц. В процессе испытания было установлено, что трещины в сварном соединении образовывались в зоне термического влияния.

3.3 Анализ результатов экспериментов образцов уторного узла

Испытания на циклическую долговечность было проведено на 96 образцах уторного узла, по 8 образцов при разных видах обработки и зазор в стыке перед сваркой

Результаты испытания образцов приведены в таблице 4

Таблица 4 - Результаты испытаний образцов

Вид обработки	№ эксперимента	Количество циклов при разной величине зазора в стыке		
		2 мм	4 мм	6 мм
Без обработки	1	3287	3135	2512
	2	3526	3096	2598
	3	3315	3017	2676
	4	3392	2988	2534
	5	2727	2961	2628
	6	3176	3032	2634
	7	3309	3079	2037
	8	3284	2414	1982

Продолжение таблицы 4

Виброобработка	1	7333	6924	5824
	2	7281	7082	5793
	3	7294	7035	5739
	4	7386	6859	5881
	5	7055	6312	5942
	6	7508	7235	5418
	7	7249	7055	5752
	8	7377	6932	5967
Ультразвуковая ударная обработка	1	4825	4425	3638
	2	4734	4402	3681
	3	4712	4322	3533
	4	4879	4297	3690
	5	4853	4154	3487
	6	4728	4476	3772
	7	4743	4635	3313
	8	4436	4286	3528
Термообработка	1	11952	11126	9045
	2	12174	9429	8721
	3	10998	10287	7642
	4	11533	11065	8056
	5	11117	10048	8953
	6	10428	11382	8619
	7	11973	10538	9817
	8	11662	10625	8875

В ходе экспериментов часть образцов имели меньшее количество циклов, чем другие. Это связано с наличием в данных образцов дефектов типа

подрез, а также увеличенного непровара в корне стыка. Показания данных образцов не включались в расчет среднего количества циклов, а также при выводе уравнения регрессии. Усредненные показания испытаний на циклическую долговечность уторного узла представлены на рисунке 32

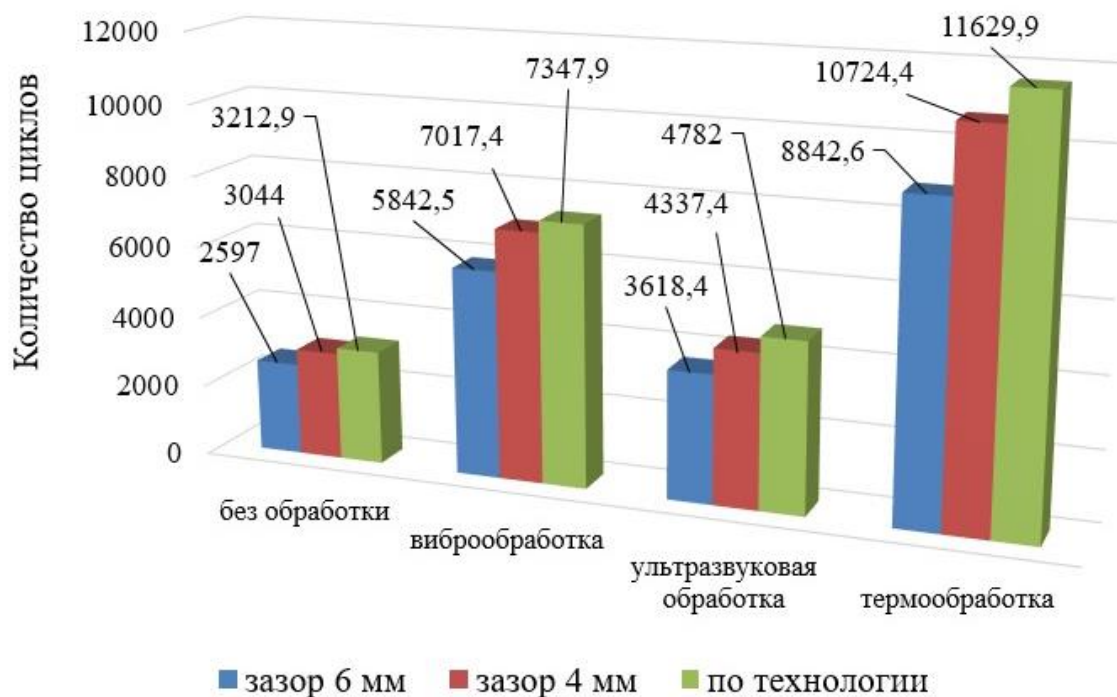


Рисунок 32 – Результаты экспериментов по определению усталостной прочности образцов

Таким образом, установлено, что применение ультразвуковой ударной обработки позволяет обеспечить должный ресурс уторного узла при величине зазора в стыке 6 мм, а в случае применения вибрационной и термической на 82% и 175% соответственно.

Таблица 5 - Матрица планирования для обработки результатов

Вид обработки	Среднее количество циклов при разной величине зазора в стыке y_{cp}			Среднее результатов
	2	4	6	
Без обработки	3213	3044	2597	2951
Виброобработка	7348	7017	5843	6736
Ультразвуковая ударная обработка	4782	4337	3618	4246
Термообработка	11630	10724	8843	10399

По данным результатов эксперимента образцов изготовленных без обработки вычисляем коэффициенты уравнения регрессии по системе нормальных уравнений

$$a \cdot n + b \cdot \sum x = \sum y; \quad (3.1)$$

$$a \cdot \sum x + b \cdot \sum x^2 = \sum y \cdot x. \quad (3.2)$$

Для расчета параметров регрессии построим расчетную таблицу 6

Таблица 6 – Расчетная таблица параметров регрессии

x	y	x^2	y^2	$x \cdot y$
2	3213	4	10323369	6426
4	3044	16	9265936	12176
6	2597	36	6744409	15582
12	8854	56	26333714	34184

Для наших данных система уравнений имеет вид:

$$3 \cdot a + 12 \cdot b = 8854 ; \quad (3.3)$$

$$12 \cdot a + 56 \cdot b = 34184 . \quad (3.4)$$

Умножим уравнение (3.3) системы на -4, получим систему, которую решим методом алгебраического сложения:

$$-12 \cdot a - 48 \cdot b = -35416 ; \quad (3.5)$$

$$12 \cdot a + 56 \cdot b = 34184 . \quad (3.6)$$

Принимаем:

$$8 \cdot b = -1232 ; \quad (3.7)$$

следовательно, $b = -154$.

Находим коэффициент «а» из уравнения (3.3):

$$3 \cdot a + 12 \cdot b = 8854 ; \quad (3.8)$$

$$3 \cdot a + 12 \cdot (-154) = 8854 ;$$

$$3 \cdot a = 10702 ;$$

$$a = 3567 .$$

Получаем эмпирические коэффициенты регрессии: $b = -154$, $a = 3567$.

По данным результатов эксперимента образцов изготовленных без обработки уравнение регрессии будут иметь вид: $y = -154 \cdot x + 3567$.

Рассчитываем по аналогии уравнения регрессии для других случаев:

– для вибрационной обработки: $y = -376 \cdot x + 8241 ;$

– для ультразвуковой ударной обработки: $y = -291 \cdot x + 5410 ;$

– для термообработки: $y = -697 \cdot x + 13186 .$

Проверяем на значимость коэффициентов уравнения регрессии на значимость.

Определяем дисперсию воспроизводимости по формуле (3.9):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2. \quad (3.9)$$

Таблица №7 - Расчеты выборочных дисперсий

j	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	S_j^2
1	3213	3044	2597	2951	68644	8649	125316	101305
2	7348	7017	5843	6736	374544	78961	797449	625477
3	4782	4337	3618	4246	287296	8281	394384	344981
4	11630	10724	8843	10399	1515361	105625	2421136	2021061

Далее получаем дисперсию воспроизводимости (3.10):

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2, \quad (3.10)$$

$$S_{\{y\}BO}^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j^2 = 33768;$$

$$S_{\{y\}BO}^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j^2 = 208492;$$

$$S_{\{y\}VVO}^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j^2 = 114994;$$

$$S_{\{y\}TO}^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 S_j^2 = 673687.$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф.}} = \sqrt{\frac{S_{\{j\}}^2}{n \cdot m}}, \quad (3.11)$$

где m – число опытов в каждом эксперименте;

n – число экспериментов.

$$S_{\text{коэф.}BO} = 37,51 ;$$

$$S_{\text{коэф.}BO} = 93,21 ;$$

$$S_{\text{коэф.}УУО} = 69,22 ;$$

$$S_{\text{коэф.}ТО} = 167,54 .$$

Из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n \cdot (m-1) = 3 \cdot 7 = 21$ при условии значимости $\alpha = 0,95$ находим $t_{кр} = 2,09$.

Следовательно:

$$t_{кр} \cdot S_{\text{коэф.}BO} = 2,09 \cdot 37,51 = 78,4 ;$$

$$t_{кр} \cdot S_{\text{коэф.}BO} = 2,09 \cdot 93,21 = 194,8 ;$$

$$t_{кр} \cdot S_{\text{коэф.}УУО} = 2,09 \cdot 69,22 = 144,67 ;$$

$$t_{кр} \cdot S_{\text{коэф.}ТО} = 2,09 \cdot 167,54 = 350,16 .$$

Сравнивая полученные произведения $t_{кр} \cdot S_{\text{коэф}}$ с коэффициентами уравнения регрессии, получаем:

$$b_{BO} |-154| > 78,4 ;$$

$$b_{BO} |-376| > 194,8 ;$$

$$b_{УУО} |-291| > 144,67 ;$$

$$b_{ТО} |-697| > 350,16 .$$

Следовательно, все рассчитанные коэффициенты значимы.

По результатам испытаний образцов были составлены зависимости по полиномиальному закону «количества циклов-величина зазора» (рисунки 33-37):

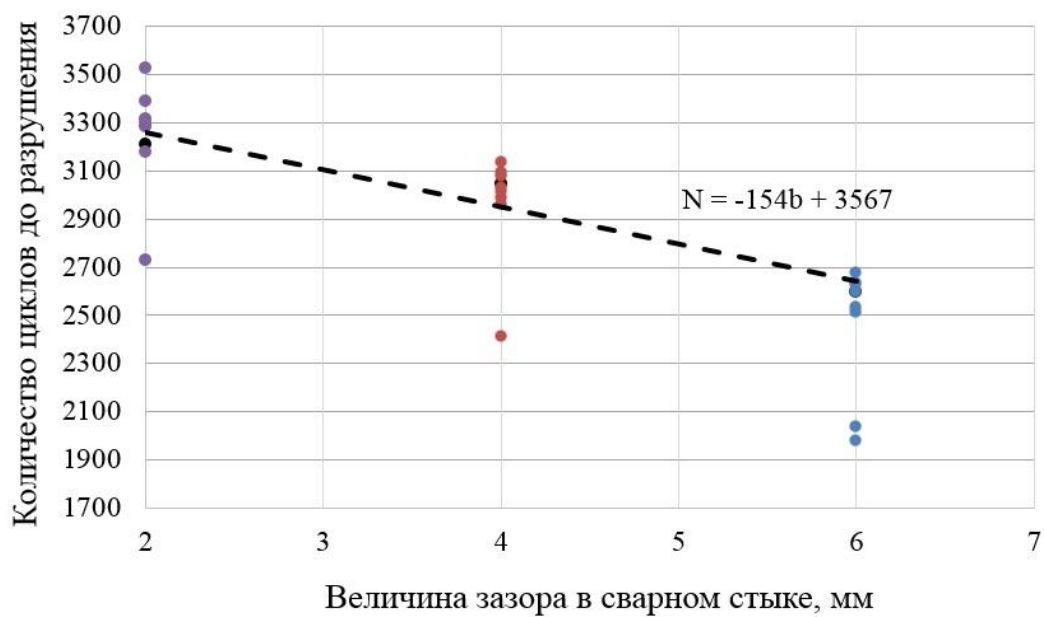


Рисунок 33 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных без дополнительной обработки

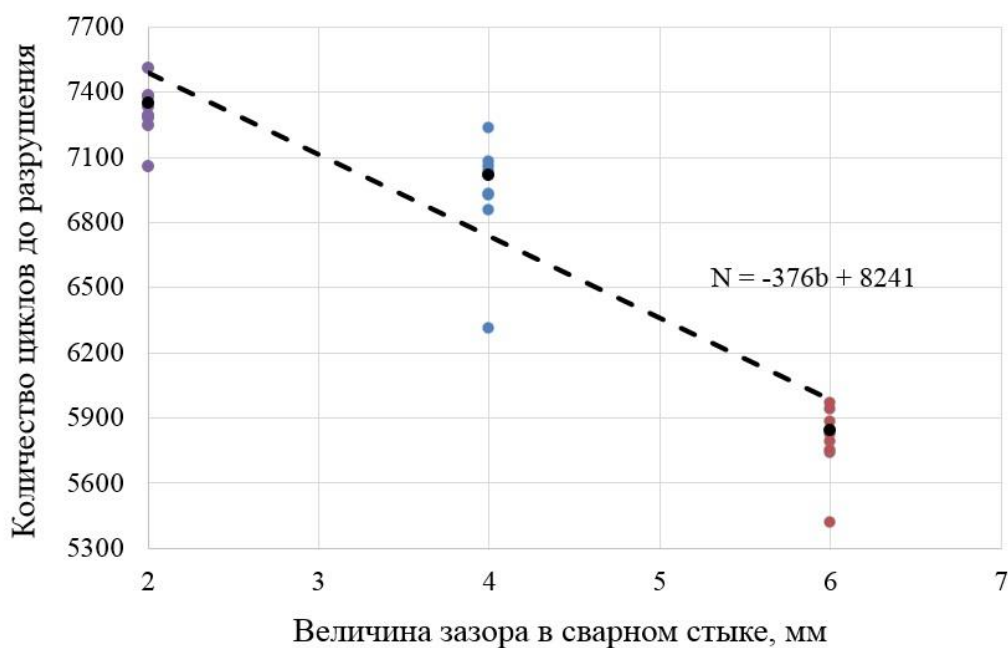


Рисунок 34 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с вибрационной обработкой в процессе сварки

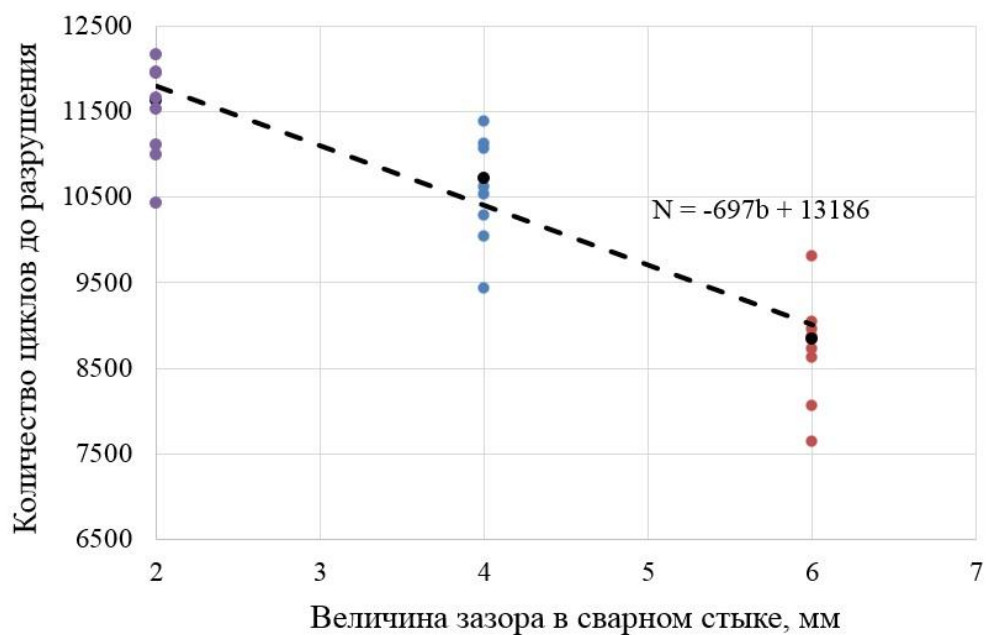


Рисунок 35 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с последующей термообработкой

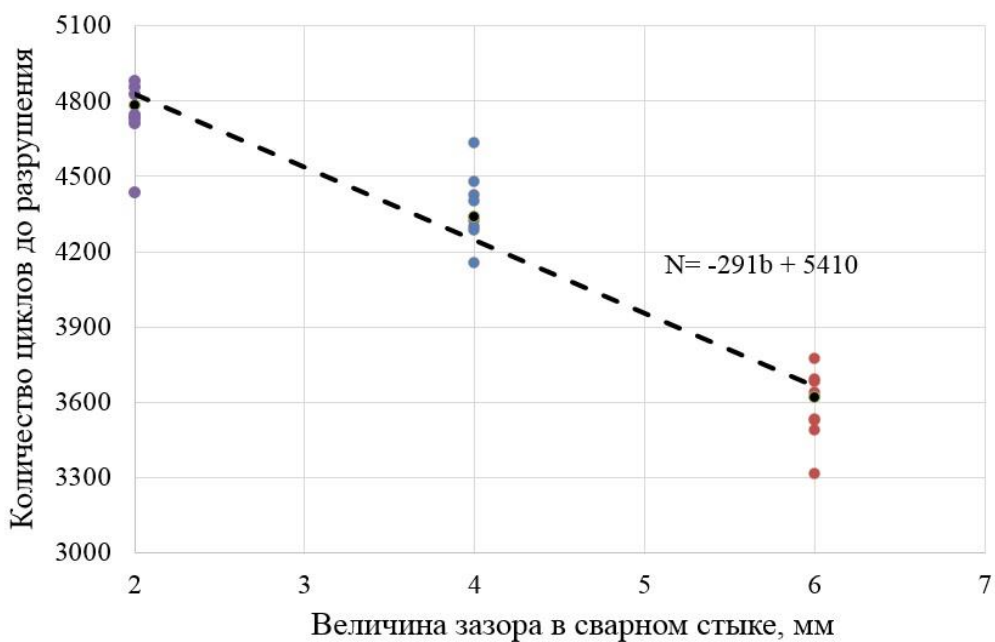


Рисунок 36 – Зависимость количества циклов от величины зазора на образцах, изготовленных с последующей ультразвуковой ударной обработкой

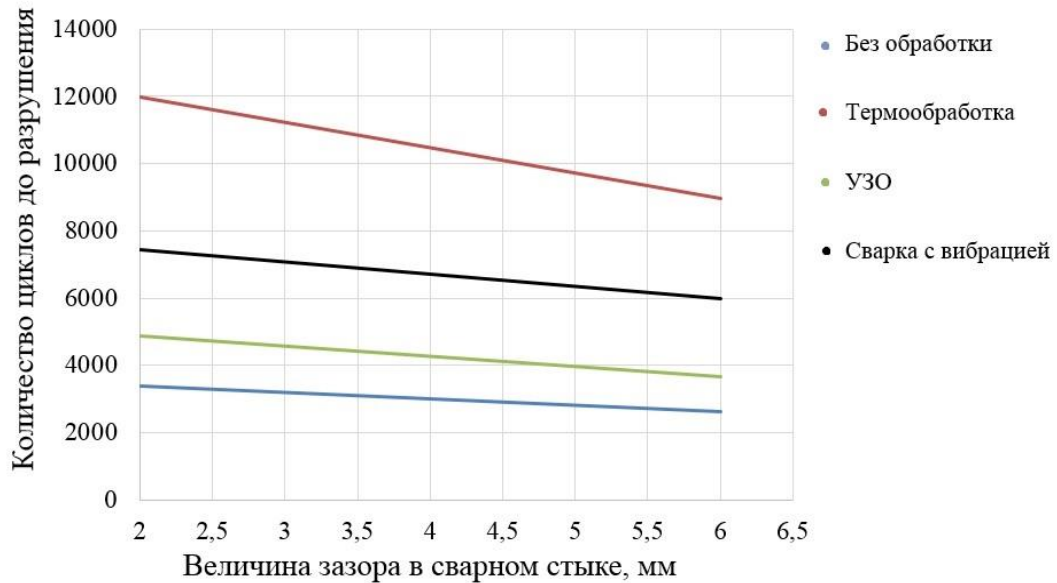


Рисунок 37 – Зависимость количества циклов до разрушения от величины зазора в сварном стыке для различных методов обработки сварного соединения

Согласно выведенным уравнениям регрессии циклическая долговечность уторного снижается на 4,4-5,6% с каждым увеличением зазора на 1 мм. Дополнительная обработка позволяет существенно увеличить ресурс данного узла, как и ресурс резервуара соответственно.

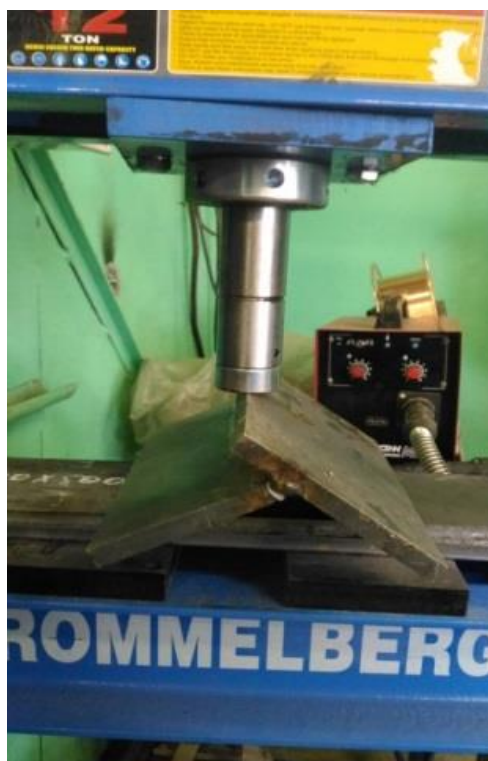
3.4 Проведение экспериментов на статическую прочность

В ходе проведения экспериментов на циклическую долговечность уторного узла резервуара, также были проведены эксперименты для определения статической прочности сварного соединения уторного узла резервуара, для определения влияния вибрационной и ультразвуковой ударной обработки.

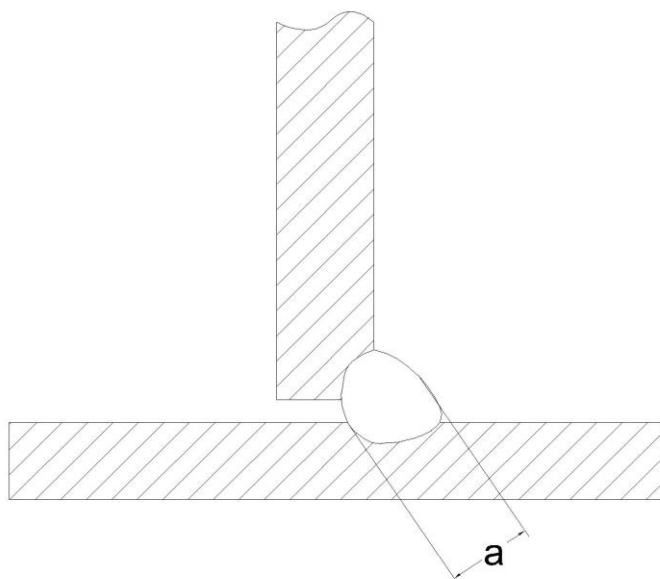
В связи со значительными габаритами резервуаров проведение операции термической обработки достаточно энергозатратно. Поэтому с данной точки

зрения более предпочтительным является применение ультразвукового или вибрационного метода снятия остаточных напряжений.

Одним из способов определения статической прочности таврового соединения является испытание на излом, который приведен в РД 03-495-02 «Технологический регламент проведения аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства» [80]. На основе этого нормативного документа была разработана схема проведения испытаний и изготовлены опытные тавровые соединения из листов стали марки 09Г2С длиной 225 мм, шириной 100 (для стенки) и 125 мм (для полки) и толщиной 12 мм. Сварка и обработка выполнялись в лабораторных условиях по вышеприведенным методикам. Испытания образцов проводились на гидравлическом прессе Trommelberg SD100803В (рисунок 38,а). Также с целью определения влияния обработки на величину проплавления основного металла листов был проведен замер толщины угловых швов образцов согласно схеме, представленной на рисунке 38,б.



а) фото нагружения на прессе



б) схема замера толщины шва

Рисунок 38 – Испытание таврового образца на излом

Результаты испытания показали, что наибольшей статической прочностью обладают образцы, выполненные с применением вибрационной обработки (рисунок 39). Возможно данный эффект объясняется тем, что в процессе вибрационной обработки ширина шва увеличивается в среднем на 1,5 мм.

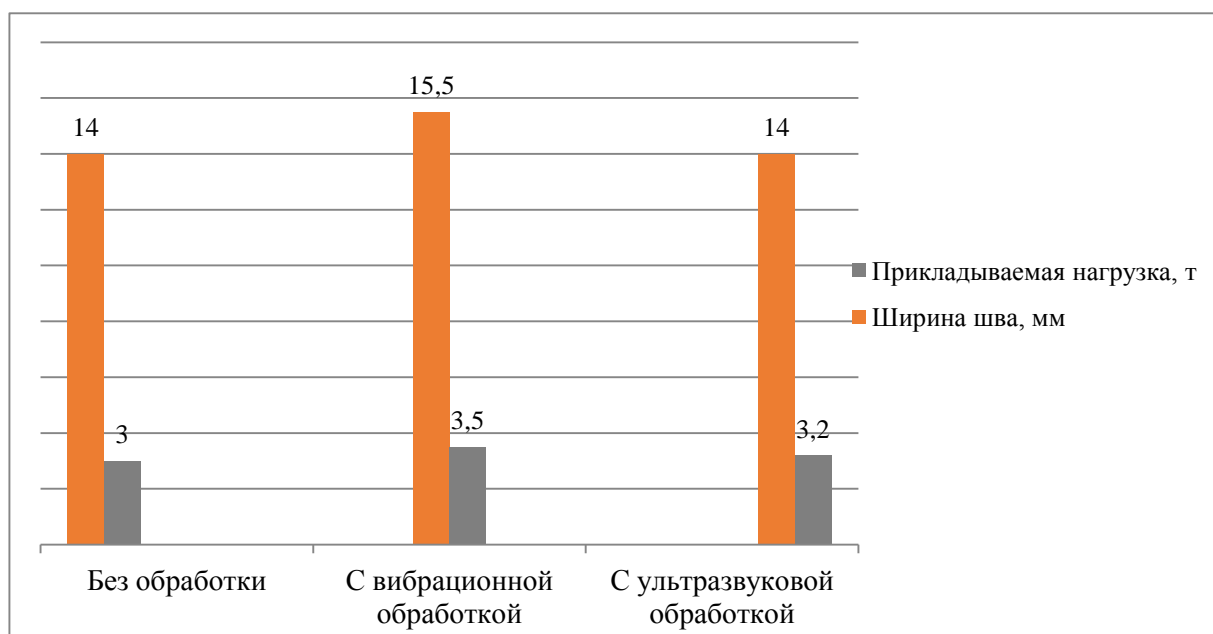


Рисунок 39 – Величины усилий, прикладываемые на образцы и значение ширины угловых швов образцов

3.5 Выводы по третьей главе

1. Увеличение зазора в стыке уторного узла перед сваркой снижают его циклическую долговечность на 17,2% и 30,2% соответственно значениям первоначального зазора в 4 и 6 мм, что объясняется увеличением упругих деформаций для приведения зазора к нормативным требованиям (до 2 мм).

2. Послесварочная обработка уторного узла позволяет увеличить его циклическую долговечность в зависимости от метода обработки. Самым эффективным методом, значительно повышающим циклическую прочность (на 241-262%) является термообработка, но данный метод обработки приведен в качестве сравнения, т.к. является самым ресурсо- и энергозатратным. Виброобработка в процессе сварки позволила увеличить долговечность образцов на 125-129%, а ультразвуковая обработка дала прирост в диапазоне 39-49%.

3. Опираясь на проведенные исследования, рекомендуется в участках превышения нормативного зазора в стыке применять ультразвуковую ударную обработку или проводить сварочные работы с сопутствующей виброобработкой, что позволит предупредить появление дефектов в уторном узле приводящих к отказу резервуара.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РЕЗЕРВУАРА ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ УТОРНОГО УЗЛА

4.1 Определение величины зазора в уторном узле стального вертикального резервуара

До проведения сварочных работ замерить величину зазора в уторном узле возможно с помощью специальных щупов УШС, штангенциркуля, линейки. Что же касается эксплуатируемых резервуаров, на сегодняшний день нет методики определения величины зазора в уторном узле уже построенного резервуара. В связи со всем вышеизложенным вопрос замера величины зазора после заварки уторного шва является актуальным.

На сегодняшний день известны различные способы неразрушающего контроля сварных узлов. Уторный узел проверяется капиллярно-проникающими веществами и вакуумированием с целью контроля герметичности. Данные методы не дают информации о величине зазора в данном узле.

Также известны методы просвечивания рентгеном и магнитопорошковый, но в связи с наличием двух сварных швов и конструктивного зазора между ними, они также не дадут точной оценки зазора в данном узле.

В связи с этим нами предлагается проводить контроль данного узла с помощью ультразвукового дефектоскопа и измерительного инструмента. Нами разработана следующая методика определения величины зазора:

1) Устанавливаем пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) на поверхность стенки резервуара, предварительно нанеся на неё контактную жидкость на расстоянии равном примерно $1,5S \cdot \operatorname{tg}\alpha$ от края валика усиления шва (для исследования применялся ПЭП с углом ввода $\alpha=65^\circ$). Находим

максимальный сигнал от зазора в уторном шве и фиксируем координату «х» (рисунок 40);

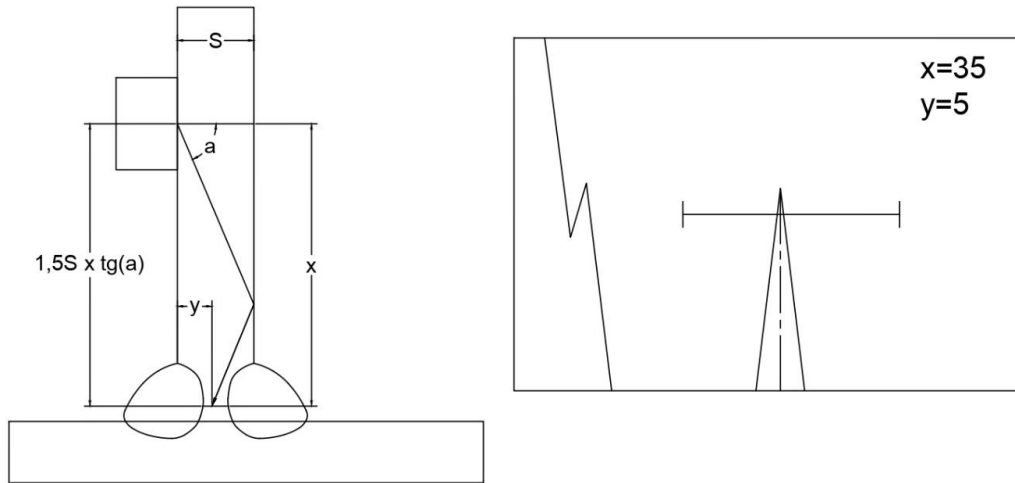


Рисунок 40 - Определение координаты x

2) Не изменяя положения ПЭП, удаляем контактную жидкость с поверхности стенки резервуара и наносим отметку в точке выхода луча ПЭП (рисунок 41);

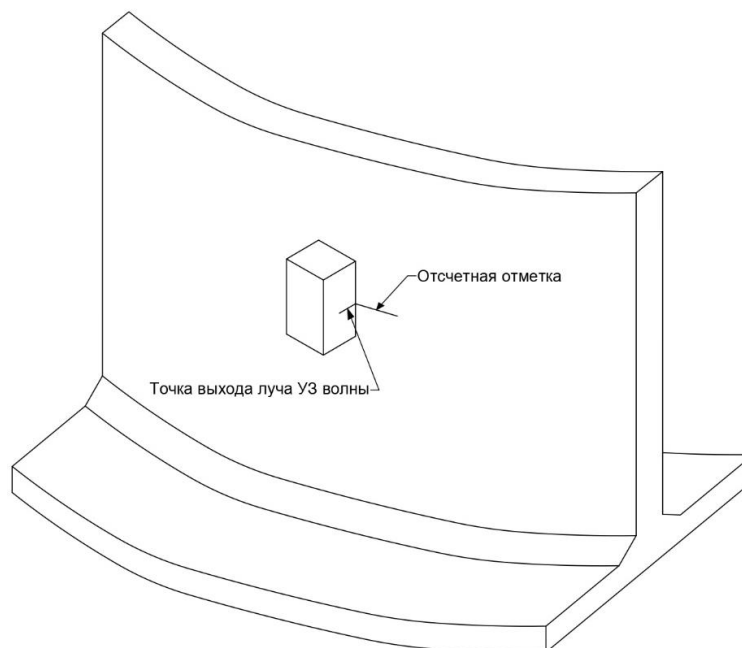


Рисунок 41 - Нанесение отсчетной отметки

3) Используя измерительный инструмент (штангенциркуль), определяем расстояние x_1 от отметки до окрайки резервуара по вертикали (рисунок 42);

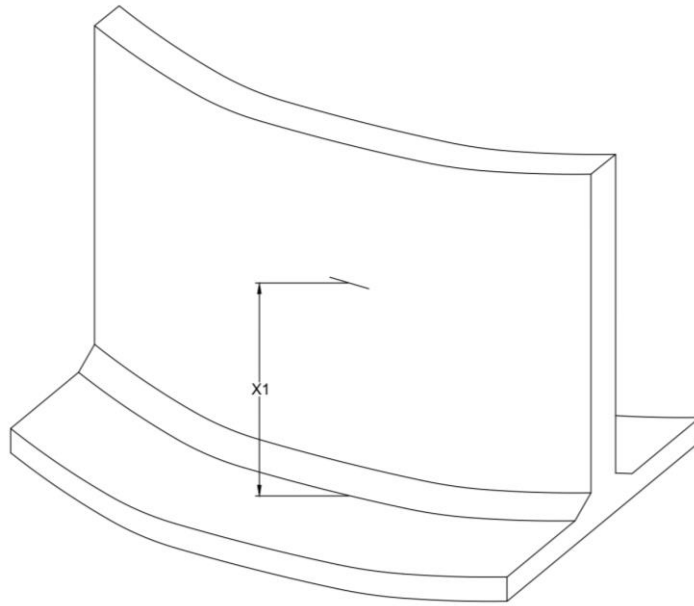


Рисунок 42 - Определение расстояния x_1

4) Величина зазора в уторном шве равна разнице между полученными значениями: $\Delta x = x_1 - x$.

Наличие возможности настройки «стрелы» ПЭП, поможет существенно облегчить замеры, т.к. точкой отсчета будет не точка выхода луча, а передний торец датчика. Данную настройку проводят на стандартном образце СО-3 (рисунок 43).



Рисунок 43 – Стандартный образец СО-3

Общая погрешность данного метода складывается из:

- погрешности показаний глубиномера ультразвукового дефектоскопа (для её снижения необходимо применять образец для настройки глубиномера, выполненный из материала идентичного по акустическим свойствам материалу стенки РВС; проводить настройку прибора при температуре контроля);
- погрешности при нанесении производителем ПЭП точки выхода луча (для снижения необходимо проверить её и учесть);
- погрешности при нанесении отметки на стенку резервуара (для снижения необходимо точно наносить отметку на стенку резервуара, отметка должна быть тонкой);
- погрешности при измерении расстояния (для снижения необходимо использовать оптимальный для данного способа измерительный инструмент: штангенциркуль, а также угольник для соблюдения вертикальности; либо использовать универсальный измерительный инструмент).

Практический замер величины зазора по предложенной методике на образце из стали 09Г2С, толщиной 10 мм, с величиной зазора в уторном узле от 3 до 5 мм показан на рисунках 44-46.



Рисунок 44 - Образец уторного узла

Определение координаты x с помощью пьезоэлектрического преобразователя представлено на рисунке 45.



Рисунок 45 - Определение координаты x

Далее проведем замер расстояния x_1 с помощью штангенциркуля от отметки до краечного листа (рисунок 46).



Рисунок 46 - Замер расстояния x_1

В результате проведенных замеров на экспериментальных образцах получены результаты, показанные в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты замеров расстояний до зазора и окрайки

Фактический зазор в уторе, мм	Значение x , мм	Значение x_1 , мм	Δx , мм	Относительная погрешность, %
3	33,43	36,75	3,32	9,6
4	32,17	36,63	4,46	10,3
5	32,21	37,55	5,34	6,3

Контролировать данным способом предлагается уторный шов резервуара, в участках наиболее вероятных к возникновению завышенных зазоров, таких как места врезки штуцеров и нижних люков, вертикальные стыковые соединения на стенке резервуара, сварные швы уторного узла с возникающими дефектами.

4.2 Разработка метода повышения ресурса резервуара путем внедрения дополнительной обработки сварного соединения уторного узла

При сооружении резервуара в зависимости от величины зазора в стыке предлагается выполнять следующие виды обработки:

- 1) при зазоре от 2-4 мм – ультразвуковую ударную обработку;
- 2) при зазоре 4-6 мм – вибрационную обработку.

Данный выбор обработки основывается на целесообразности ее применения в совокупности с ее трудозатратами.

Для проведения ультразвуковой ударной обработки необходимо иметь в наличие установку генерирующую вибрацию. Для работы необходим персонал в количестве одного человека, который будет проводить обработку металла шва непосредственно после сварки, локально, на участках с

увеличенным зазором. Также УУО является предпочтительной с точки зрения уровня шума и вибрации, возникающих при упрочнении конструкции.

Количество проходов в зоне обработки выбирается специалистом, но не менее одного прохода, для обеспечения ударной деформации поверхности металла.

Ультразвуковую ударную обработку предлагается выполнять с помощью технологического комплекса «Шмель» (рисунок 47) при параметрах:

- частота 25-27 кГц;
- мощность 400 Вт;
- амплитуда 35 мкм;
- скорость проведения обработки 2 м/мин.

Обработку рекомендуется выполнять с применением инструмента №1 (рисунок 48а) входящего в комплект данного комплекса. Преимущества данного инструмента заключается в возможности полноценной обработки участков небольших геометрических размеров, таких как угловой шов в уторном узле.



Рисунок 47 - Технологический комплекс ИЛ100-16 «Шмель»

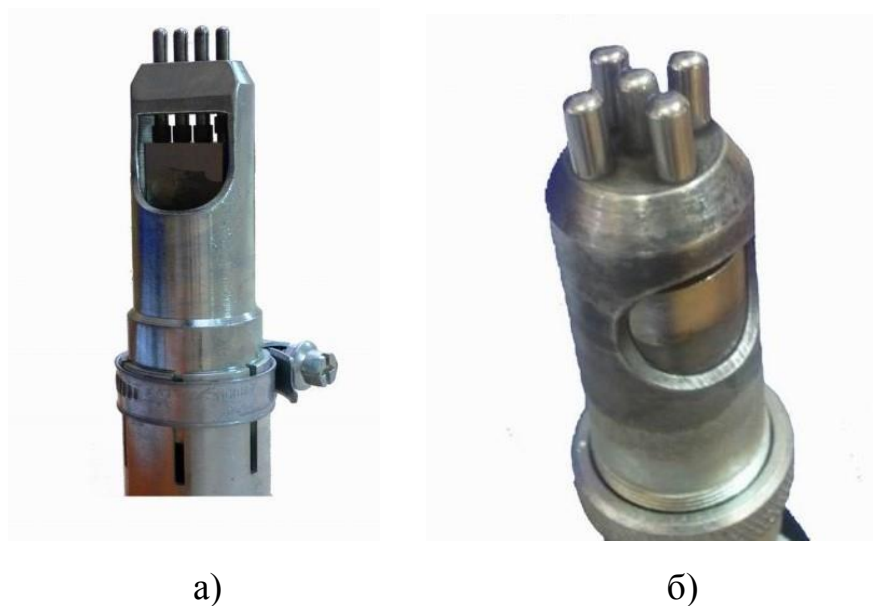


Рисунок 48 - Инструменты для УУО технологического комплекса «Шмель»: а – инструмент №1; б – инструмент №2.

Для обеспечения долговечности участков с увеличенным зазором перед сваркой, необходимо подвергать ультразвуковой ударной обработке металл шва, а также зону термического влияния. Для выполнения данных условий принимаем минимальную ширину обработки равной толщине обрабатываемого металла (рисунок 49).

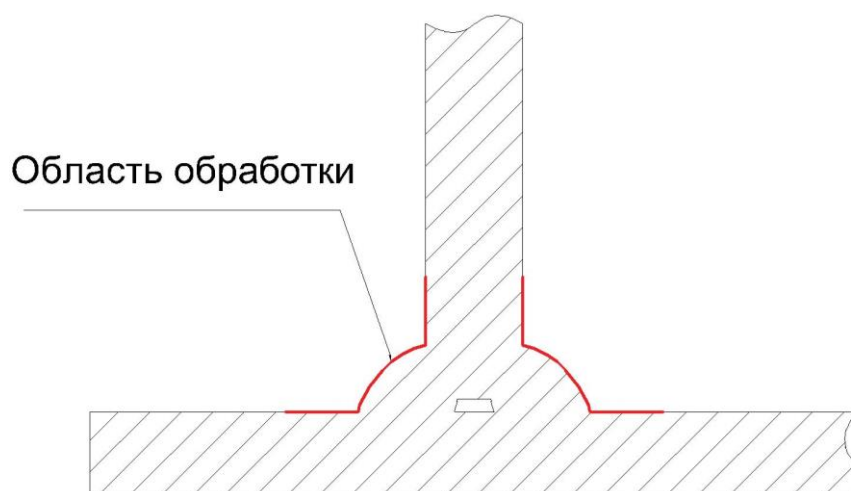


Рисунок 49 – Область ультразвуковой ударной обработки

Характеристики данного комплекса представлены в таблице 9

Таблица 9 - Характеристики технологического комплекса «Шмель»

Наименование показателя	Единица измерения	Номинальное значение	Предельное отклонение
Максимальная потребляемая электрическая мощность	кВт	1,2	
Напряжение питания	В	220	±10
Частота питающего напряжения	Гц	50	±0,4
Диапазон рабочих частот	кГц	18-28	±1,65
Максимальная электрическая мощность, подводимая к инструменту	Вт	630	
Выходная электрическая мощность	Вт	300/630	
Регулировка выходной мощности	Ступенчатая		
Режим работы	продолжительность включения 75% при цикле 30 мин		
Тип ультразвукового преобразователя	магнитострикционный		
Охлаждение инструмента	жидкостное, автономное		
Статическое усилие прижима инструмента	Н	20 ÷ 50	
Габаритные размеры инструментов №1 и №2	мм	455x180x75	
Масса инструмента	кг	3,5	

Перед выполнением обработки зоны термического влияния, а также основного металла стенки первого пояса резервуара необходимо:

- провести сборку и сварку конструкции;
- очистить шов от шлака.

Ультразвуковую ударную обработку необходимо выполнять в местах увеличенного зазора в стыке уторного узла после проведения сварочных работ.

Вибрационную обработку необходимо проводить на участках, где зазор в стыке превышает нормативное значение на 2-4 мм. Для проведения обработки рекомендуется применять технологический комплекс НВО "Резонанс" И100-17-1.0 (рисунок 50).



Рисунок 50 - Технологический комплекс НВО "Резонанс" И100-17:

а – пульт управления, б – вибровозбудитель

Проведении работ с вибрационной обработкой необходимо проводить в процессе сварки. Генератор вибраций необходимо установить на первый пояс стенки резервуара на расстоянии 1-1,2 метра от места проведения сварочных работ (рисунок 51).

Режим обработки:

- амплитуда колебаний 1 мм;
- частота 50 Гц.

Закрепить генератор вибраций на стенку резервуара с помощью сварки, на технологические прихватки.



Рисунок 51 - Установка оборудования для вибрационной обработки

Технические характеристики установки представлены в таблицах 10,11

Таблица 10 - Технические характеристики вибровозбудителя

	И100-17-1.0
Тип вибровозбудителя	центробежный, с круговой возмущающей силой и дисбалансом, регулируемым в не вращающемся состоянии
Тип двигателя	асинхронный
Мощность двигателя, кВт	1.0
Частотный диапазон, Гц	10 - 120
Максимальное виброусилие, кН	18

Таблица 11 - Технические характеристики пульта управления

Частотный диапазон, Гц	0 - 400
Точность поддержания частоты, Гц	± 0.5
Диапазон встроенного таймера, мин	0 - 100
Дискретность установки таймера, мин	1
Напряжение питания, В	380
Максимальная потребляемая мощность, Вт	1050

4.3 Выводы по четвертой главе

1. Разработаны рекомендации по внедрению ультразвуковой ударной и вибрационной обработки в технологию сварки уторного узла резервуара.

2. Разработана методика определения величины зазора в уторном узле резервуара, находящегося в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения диссертационных исследований были предложены рекомендации по обработки участков уторного узла с увеличенным зазором в стыке перед сваркой, для обеспечения долговечности всего узла в целом. Научные выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Проанализировав результаты технического диагностирования РВС, выявлено что наиболее часто выходящим из строя узлом является уторный узел, место сопряжения стенки с днищем. Наличие технологического непровара, а также в местах образования местных деформаций листов первого пояса, в связи с припаркой люков-лазов, приемо-раздаточных патрубков, наблюдается увеличение зазора в стыке между стенкой и днищем перед сваркой. Устранение увеличенного зазора путем упругой деформации окрайки днища, создает дополнительные растягивающие напряжения в шве, в совокупности с наличием непровара на данном участке формируется сложное напряженно-деформированное состояние, что негативно влияет на долговечность конструкции.

2. Расчет по математической модели полей напряжений в уторном узле резервуара показывает, что после сварки узел находится в сложном напряженно-деформированном состоянии, а при моделировании увеличенного зазора в стыке, наблюдается локальное увеличение остаточных напряжений до величин близких к пределу текучести.

3. На основе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение зазора в стыке снижает циклическую долговечность уторного узла резервуара. Применение дополнительной обработки сварного соединения ультразвуковой, термической или вибрационной обработкой положительно сказываются на циклическую долговечность.

4. Разработаны рекомендации к технологическому процессу сварки уторного узла резервуара, а именно применение определенного метода обработки в зависимости от величины зазора в стыке, для обеспечения долговечности всего узла в целом. Разработана методика измерения зазора в уторном узле резервуара, находящегося в эксплуатации.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИК – визуальный и измерительный контроль;

ЗТВ – зона термического влияния;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;

РВС – резервуар вертикальный стальной;

РД – рентгенографическая дефектоскопия;

УУО – ультразвуковая ударная обработка;

ЦД – цветная дефектоскопия;

b – величина зазор в стыке;

b_j – коэффициент полинома регрессионной зависимости;

m – количество опытов в одном эксперименте;

n – количество экспериментов;

N – количество циклов до разрушения;

$S_{\{y\}}^2$ – дисперсия воспроизводимости;

$S_{\text{коэф.}}$ – среднее квадратическое отклонение коэффициентов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 08-95-95 Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов – М.: ЗАО НТЦ ЦБ, 2004. –224 с.

2. СТО 0030-2004 Стандарт организации. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции – М.: ЗАО ЦНИИПСК, 2004. – 64 с.

3. РД 153-112-017-97 Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров. – М.: ОАО «Транснефтепродукт», 1997. – 73 с.

4. РД-23.020.00-КТН-296-07 Руководство по оценке технического состояния резервуаров. – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2007. –25 с.

5. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные стальные для нефти и нефтепродуктов – М.:Стандартинформ, 2016. –95 с.

6. СТО-СА-03-002-2009 Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов – М.: Ростехэкспертиза, 2009. –267 с.

7. Венгерцев Ю.А. Повышение эксплуатационной надежности резервуаров. Обзорная информация / Ю.А. Венгерцев, Е.А. Егоров, В.Н. Загоскин // Транспорт и хранение нефтепродуктов углеводородного сырья – 1990 – №6 – С.40-49.

8. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений – Л: Ленинградский ордена Ленина корабельный институт, 1980. –331 с.

9. Пашков Ю.И. Остаточные сварочные напряжения и пути снижения стресскоррозионных разрушений магистральный газопроводов

/ Ю.И. Пашков, М.А. Иванов, Р.Г. Губайдулин // Вестник ЮУрГУ – 2012 – №15 – С.28-30.

10. Малеткина Т.Ю. Сварочные напряжения и деформации: методические указания к лабораторным работам. Часть I и II. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. – 26 с.

11. Paul Colegrove, Chukwugozie Ikeagu, Adam Thistlethwaite, Stewart Williams, Tamas Nagy, WojciechSuder, Axel Steuwer, ThiloPirling. The welding process impact on residual stress and distortion // Science and Technology of Welding and Joining – 2009 – №14(8) – С.717-725.

12. Николаев Г.А., Винокуров В.А., Куркин С.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.

13. Бигер И.А. Остаточные напряжения – М.: Машгиз, 1963. – 233 с.

14. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю – М.: Госгортехнадзор, 2004. – 100 с.

15. ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – М.: Госстандарт СССР, 1980. – 16 с.

16. Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали – Екатеринбург: Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 2002. – 519 с.

17. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И. Материаловедение – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.

18. Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Золотухин В.И., Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Бреки А.Д. Технология конструкционных и эксплуатационных материалов – Тула: Тульский государственный университет, 2016. – 351 с.

19. Винокуров В.А. Отпуск сварочных конструкций для, снижения напряжений – М.: Машиностроение, 1973. – 213 с.

20. Лившиц Л.С., Хакимов А.Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. 2-е издание, переработанное и дополненное – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.

21. Хромченко Ф.А. Термическая обработка сварных соединений труб электростанций – М.: Энергия, 1972. – 224 с.

22. Хромченко Ф.А., Корольков П.М. Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений. – М.: Энергоатомиздат., 1987. – 200 с.

23. Хромченко Ф.А. Сварка оборудования электростанций – М.: Энергия., 1977. – 368 с.

24. Сагалевич В.М. Термические и деформационные методы обработки сварных конструкций. – М.: ИНИнформтяжмаш, 1975. – 56 с.

25. Соловьева Е.А. Вибрационная обработка металлических деталей / Е.А. Соловьева, А. Ф. Петров, О.Г. Чикалиди // Журнал «Химическое и нефтяное машиностроение» – 1991 – №1 – С.31-32.

26. Полнов В.Г. Влияние собственных колебаний сварных конструкций на устранение в них остаточных напряжений вибрацией / В.Г. Полнов, В.М. Сагалевич, М.Н. Могильнер // Сварочное производство – 1988 – №4 – С.37-39.

27. Анкирский Б.М. Влияние вибрационной и термической обработки на механические свойства металла и сварного соединения стали 20К // Сварочное производство – 1985 – №3 – С.19-21.

28. Сагалевич В.М. Устранение сварочных деформаций и напряжений листовых конструкций нагружением с вибрацией / В.М. Сагалевич, А.М. Мейстер // Сварочное производство – 1971 – №9 – С.1-3.

29. Сагалевич В.М. Устранение деформаций сварных балочных конструкций вибрацией / В.М. Сагалевич, Н.Н. Завалишин, В.В. Нашивочников // Сварочное производство – 1979 – №29 – С.9-12.

30. Гевлич С.О., Князев В.Н. Исследование релаксации остаточных напряжений в сварных соединениях из стали 09Г2С со сталью 20ГМЛ после виброобработки / С.О. Гевлич, В.Н. Князев // Химическое и нефтяное машиностроение – 1986 – №8 – С.8-9.

31. Дрыга А.И. Вибрационная обработка сварного корпуса концевой части турбогенератора для снижения остаточных напряжений // Автоматическая сварка – 1990 – №6 – С.10-11.

32. Ионов В.А. Влияние виброобработки на напряженное состояние сварных конструкций / В.А. Ионов, В.И. Борисов, А.М. Вельбель, В.Г. Смирнов // Сварочное производство – 1997 – №9 – С.26-29.

33. Галяш А.А. Определение частоты нагружения при низкочастотной виброобработке сварных конструкций / А.А. Галяш, К.И. Васильченко, Г.П. Чернецов // Сварочное производство – 1992 – №8 – С.35-36.

34. Файрушин А.М. Совершенствование технологического процесса изготовления корпусов аппаратов с применением вибрационной обработки: автореф. дис. канд. техн. наук / Файрушин Айрат Минуллович – Уфа, 2003. – 25 с.

35. Полнов В.Г. Определение режимов вибрационной обработки сварных конструкций с целью снижения остаточных напряжений / В.Г. Полнов, М.Н. Могильер // Сварочное производство – 1984 – №2 – С.32-34.

36. Карпов А.Л. Совершенствование технологии изготовления конструктивных элементов: аппаратов из стали 09Г2С с применением локальной виброобработки: автореф. дис. канд. техн. наук / Карпов Анатолий Львович – Уфа, 2007 – 24 с.

37. Шпеер Ф.З. Вибрационная обработка сварных крупногабаритных конструкций с целью уменьшения деформации и склонности к образованию

трещин / Ф.З. Шпеер, В.И. Панов // Сварочное производство – 1983 – №5 – С.13-15.

38. Абрамов О.В. Кристаллизация металла в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.

39. Погодина–Алексеева К.М. Влияние ультразвука на снятие остаточных напряжений в стали ХВФ при отпуске / К.М. Погодина–Алексеева, Е.М. Кремлев // Металловедение и термическая обработка металлов – 1966 – №9 – С.7-9.

40. Сагалевиц В.М. Установка для обкатки сварных швов и околошовной зоны с наложением ультразвуковых колебаний. / В.М. Сагалевиц, Ю.А. Янченко // Технология, организация и механизация сварочного – Серия 10-75-7, 1975. – С.21-24.

41. Горицкий В.М. Диагностика металлов – М.: Металлургиздат., 2004. – С.366-374.

42. Полоцкий И.Г. Снижение остаточных сварочных напряжений ультразвуковой обработкой / И.Г. Полоцкий, А.Я. Недосека, Г.И. Прокопенко и др. // Автоматическая сварка – 1974 – №4 – С.74-75.

43. Статников Е.Ш. Технология ультразвуковой ударной обработки как средство повышенной надежности и долговечности сварных металлоконструкций / Е.Ш. Статников, В.О. Муктепавел, // Сварочное производство – 2003 – №4 – С.25-29.

44. Статников Е.Ш. Ультразвуковой инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных сварочных напряжений / Е.Ш. Статников, Е.М. Шевцов, В.Ф. Куликов и др. // Тр. Московского института стали и сплавов – 1977 – №92 – С.27-29.

45. Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего

Севера: автореф. дис. канд. техн. наук / Сидоров Михаил Михайлович – Якутск, 2014 – 19 с.

46. Зарезин В.Е. Методика улучшения качества сварных швов ультразвуковой ударной обработкой с обоснованием оптимальных параметров упрочнения поверхностного слоя // Техничко-технологические проблемы сервиса – 2016 – №4 – С.16-22.

47. Березин В.Л., Шутов В.Е. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов – М.: Недра, 1973. – 200 с.

48. Березин В.Л. Об эксплуатационной надежности нефтезаводских резервуаров / В.Л. Березин, А.Г. Гомеров, К.Е. Ращепкин, Э.М. Ясин // НТО тр.НИИТранснефть сер. Транспорт и хранение нефтепродуктов – 1965 – Вып.4 – С.204-207.

49. Афанасьев В.А., Березин В.Л. Сооружение газохранилищ и нефтебаз: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 334 с.

50. Стулов Т.Т., Поповский Б.В., Иванцов О.М., Сафарян М.К., Афанасьев В.А. Сооружение газохранилищ и нефтебаз – М.: Недра, 1973. 368 с.

51. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров при ремонтных работах – М.: ОАО Недра, 1999. – 270 с.

52. Тарасенко А.А. Использование интерполирующих бикубических сплайнов в задаче моделирования несовершенств геометрической формы днища и стенки резервуара / А.А. Тарасенко, А.Л. Пимнев // Известия вузов. Нефть и газ – 2000 – №6 – С.76-78.

53. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры – М.: Недра, 1987 – 144 с.

54. Васильев Г.Г., Прохоров А.Д., Пирожков В.Г., Лежнев М.А., Шутов В.Е. Стальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2007 – 113 с.

55. Семин Е.Е. Оценка долговечности уторных узлов вертикальных стальных резервуаров в процессе эксплуатации: автореф. дис. канд. техн. наук / Семин Евгений Евгеньевич – Москва, 2012 – 21 с.

56. Лежнев М.А. Влияние процесса усталости металла при повторно-циклическом нагружении на работоспособность резервуаров // НТС «Магистральные и промысловые трубопроводы: проектирование, Строительство, эксплуатация, ремонт» – 2001 – № 3 – С.118-123.

57. Тарасенко А.А., Воробьев В. А., Васильев Г.Г., Иванцова С. Г. Практикум по проектированию, сооружению и ремонту вертикальных стальных цилиндрических резервуаров. Учеб. пособие – М.: Нефть и газ, 2004. – 167 с.

58. Любушкин В.В. Исследование осадки и напряженного состояния днища стальных вертикальных резервуаров: дис. канд. техн. наук / Уфа, 1979 – 229 с.

59. Востров В.К. Расчет напряжений и перемещений в уторном узле и окрайках днища резервуара / В.К. Востров, А.А. Катанов // Монтажные и специальные работы в строительстве – 2006 – №8 – С.22-26.

60. Сильницкий П.Ф. Влияние дефектов сварки на напряженно-деформированное состояние резервуара: дис. канд. техн. наук / Сильницкий Павел Федорович – Тюмень, 2012 – 181 с.

61. Землянский А.А. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов / А.А. Землянский, О.С. Вертынский // Инженерно-Строительный журнал – 2011 – №7 – С.40-44.

62. Тарасенко М.А. Разработка методики восстановления несущей способности резервуара с коррозионными повреждениями: автореф. дис. канд. техн. наук / Тарасенко Михаил Александрович – Тюмень, 2012 – 24 с.

63. Герасименко А.А. Прогнозирование остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров по параметрам циклической трещиностойкости в

условиях двухосного нагружения: дис. канд. техн. наук / Герасименко Анастасия Андреевна – Санкт-Петербург, 2014 – 160 с.

64. Самигуллин Г.Х. К вопросу о методике расчета остаточного ресурса резервуаров с трещиноподобными дефектами / Г.Х. Самигуллин, А.А. Герасименко // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» – 2013 – №3 – С.263-272.

65. Лукьянцев М.А. Оценка остаточного ресурса резервуаров при малоцикловом нагружении / М.А. Лукьянцев, Р.Г. Вильданов, Р.Р. Исхаков // Современные проблемы науки и образования – 2013 – №6 – С.151.

66. Роменский Д.И. Методика обследования и уточнения НДС уторного узла вертикальных цилиндрических резервуаров // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2012 – №3 – С.95.

67. Потапов А.Ю. Влияние деформационных характеристик грунтов основания на работу стенки и днища резервуара: дис. канд. техн. наук / Потапов Александр Юрьевич – Тюмень, 2006 – 106 с.

68. Дегтярев П.А. Влияние области неоднородности грунтового естественного основания резервуара на его напряженно-деформированное состояние: дис. канд. техн. наук / Дегтярев Петр Алексеевич – Уфа, 2008 – 131 с.

69. Афанасьев В.А., Березин В.Л. Сооружение газонефтехранилищ и нефтебаз – М. Недра, 1986. – 324 с.

70. Кондрашова О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / О.Г. Кондрашова, М.Н. Назарова // Нефтегазовое дело – 2004 – №2 – 8 с.

71. Еленицкий Э.Я. Уточненный расчет прочности стенки вертикальных цилиндрических стальных резервуаров // Строительная механика и расчет сооружений – 2009 – №1 – С.2-7.

72. Еленицкий Э.Я. Расчет узла сопряжения стенки и днища вертикальных цилиндрических стальных резервуаров // Строительная механика и расчет сооружений – 2007 – №4 – С.2.

73. Еленицкий Э.Я. Проблемы оценки прочности напряженных участков резервуарных конструкций / Э.Я. Еленицкий, О.В. Дидковский // Нефть, Газ и Бизнес – 2006 – №6 – С.58.

74. Нехаев Г.А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 216 с.

75. Гумеров А.Г. К оценке несущей способности резервуарных конструкций нефтепроводов / А.Г. Гумеров, Э.М. Ясин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья – 1970 – №7 – С.12-13.

76. Дидковский В.М. О надежности некоторых конструктивных узлов сварных резервуаров // Промышленное строительство – 1973 – №5 – С.7-8.

77. Щербаков А.Г. Исследование конструкций узлов соединения стенки с днищем в больших металлических резервуарах: дис. канд. техн. наук / Москва, 1979.

78. Файрушин А.М., Модернизация уторного узла стального вертикального резервуара / А.М. Файрушин, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, А.И. Биккинин, М.З. Ямилев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья – 2016 – №2 – С.18-21.

79. Файрушин А.М. Совершенствование технологии изготовления уторного узла стального вертикального резервуара / А.М. Файрушин, О.В. Четверткова, М.З. Ямилев, А.И. Биккинин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2016 – № 6 – С.84-87.

80. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения – М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с.

81. Васильев, Г.Г. Оценка долговечности уторных узлов вертикальных цилиндрических резервуаров в процессе эксплуатации / Г.Г. Васильев, А.А. Катанов, Е.Е. Семин // Журнал нефтегазового строительства. – 2012 – № 4. – С.36-41.

82. Чепур, П.В. Исследование влияния величины выступа окрайки на напряженно-деформированное состояние вертикального стального цилиндрического резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища / П.В. Чепур, А.А. Тарасенко, Д.А. Тарасенко // Фундаментальные исследования. – 2013 – № 10-15. – С.3441-3445.

83. Скорняков, А.А Совершенствование конструкции уторного узла стального вертикального резервуара / А.А. Скорняков, А.М. Файрушин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014 – № 2 (14). – С.32-37.

84. Пат. ВУ 4133 U 2008.02.28 Республика Беларусь, МПК E04H 7/00. Уторный узел резервуаров нефти и нефтепродуктов [Текст]/ Котов В.Е.; заявитель и патентообладатель Полоцкий госуд. ун-т. - № и 20070364; заявл. 2007.05.10; опубл. 2008.02.28.

85. Пат. RU 2400610 C1 Российская Федерация, МПК E04H 7/02. Металлический резервуар большого объема для хранения углеводородов [Текст]/ Землянский А.А.; заявитель и патентообладатель Саратовский госуд. технич. ун-т. - № 2009115260/03; заявл. 21.04.2009; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27.

86. Пат. RU 2270904 C1 Российская Федерация, МПК E04H 7/02. Резервуар большого объема для хранения нефтепродуктов [Текст]/ Землянский А.А.; заявитель и патентообладатель Саратовский госуд. технич. ун-т. - № 2004134988/03; заявл. 30.11.2004; опубл. 27.02.2006, Бюл. № 6.

87. Пат. 844742 Российская Федерация, МПК E04H 7/02. Вертикальный цилиндрический резервуар [Текст]/ Галеев В.Б.; заявитель и

патентообладатель Уфимский нефт. ин-т. - № 2808627/29-33; заявл. 13.08.1979; опубл. 07.07.1981, Бюл. № 25.

88. Пат. 614206 Российская Федерация, МПК E04H 7/02. Вертикальный цилиндрический резервуар [Текст]/ Галеев В.Б.; заявитель и патентообладатель Уфимский нефт. ин-т. - № 2451943/29-33; заявл. 14.02.1977; опубл. 05.07.1978, Бюл. № 25.

89. РД-25.160.10-КТН-015-15 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. Часть 1 – ОАО «АК «Транснефть», 2014. – 224 с.

90. Окерблом, Н.О. Сварочные деформации и напряжения – Ленинград: 1-я типография Машгиза, 1948. – 253 с.

91. Пат. 164588 Российская Федерация, МПК E04H 7/02. Металлический резервуар для хранения жидких продуктов [Текст] /Файрушин А.М., Каретников Д.В., Романчук А.С., Валеев Н.Н., Четверткова О.В., Ямалетдинова Л.И., Биккинин А.И.; заявитель и патентообладатель Уфимский госуд. нефт. техн. ун-т. - № 2016112006/03; заявл. 30.03.2016; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. 3 с.

92. Ачинович, Н.Н. Влияние остаточных напряжений на выносливость сварных соединений стали повышенной прочности / Н.Н. Ачинович, Н.А. Клыков // Автоматическая сварка. – 1973 – № 11. – С.6-8.

93. Скорняков, А.А. Исследование конструктивных элементов уторного шва резервуаров / А.А. Скорняков, М.З. Зарипов, И.Г. Ибрагимов, А.Л. Карпов, К.Д. Вержбицкий // Нефтегазовое дело – 2014 – № 12-4. – С.157-161.

94. Бабичев А.П. Физические величины: Справочник – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

95. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04 «Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000-50000 м³ – М.: ОАО «АК «Транснефть» – 2004.

96. СНиП II-23-81* Нормы проектирования. Стальные конструкции – М.: ЦИТП, 1990 – 201 с.

97. СН РК 3.05-24-2004 Инструкция по проектированию, изготовлению и монтажу вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов – М.: Издательство стандартов, 2004 – 115 с.

98. РД-25.160.10-КТН-050-06 Инструкция по технологии сварки при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2006 – 216 с.

99. РД-77.060.00-КТН-221-09 Методика контроля антикоррозионного покрытия, металла и сварных швов днища и внутренних металлоконструкций резервуара. - М.: ОАО «АК «Транснефть» – 2009 – 154 с.

100. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ – М.: МИСиС, 2002 – 370 с.

101. Шелехов Е.В. Программы для рентгеновского анализа поликристаллов / Е.В. Шелехов, Т.А. Свиридова // Металловедение и термическая обработка металлов – 2000 – №8 – С.16-20.

102. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

103. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость – М.: Межгосударственный стандарт, 1979. – 50 с.

104. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик

трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985 – 66 с.

105. ГОСТ 6996-66 Сварные соединения. Методы определения механических свойств – М.: Издательство стандартов, 1966 – 62 с.

106. РД 50-345-82 Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении – М.: Издательство стандартов, 1983 – 43 с.

107. Розин Л.А. Метод конечных элементов // Соросовский образовательный журнал – 2000 – Т.6, №4 – С.120-127.

108. Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г. Листовые металлические конструкции – М. Изд. Литературы по строительству, 1970 – 488 с.

109. Металлические конструкции. В 3-х томах. Том 2 Стальные конструкции зданий и сооружений. Справочник проектировщика. Под ред. В.В. Кузнецова – М. Изд. АСВ, 1998 – 576 с.

110. Соболев Ю.В. К расчету узла сопряжения стенки с днищем металлического цилиндрического резервуара // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура – 1998 – №11 – С.13-18.

111. Г.А. Нехаев, Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления – М.: Ассоциация строительных вузов, 1995. – 213 с.

112. М.К. Сафарян. Металлические резервуары и газгольдеры. М. Недра, 1987. – 200 с.

113. Белобородов А.В. Оценка качества построения конечно элементной модели в ANSYS // Матер. 2 Рос. межвуз. научн.-техн. конф. "Компьютерный инженерный анализ" – Екатеринбург, 2005. – С.78–84.

114. ГОСТ 25859-83 Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках – М.: Издательство стандартов, 1983. – 36 с.

115. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

116. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. Учебное пособие для вузов – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.

117. Методические рекомендации. Механика катастроф. Определение остаточного ресурса элементов конструкций – М., 1996. – 160 с.

118. МР 125-02-95 Правила составления расчетных схем и определения параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами – М.: ЦНИИТМАШ, НИКИЭТ, 1995. – 52 с.

119. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

120. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М., Махутов Н.А. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчетов и испытаний – М.: Наука, 1975. – 288 с.

121. Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. и другие, Механика малоциклового разрушения – М., Наука, 1986 – С.31.

122. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.

123. Скорняков А.А. Исследование конструктивных элементов уторного шва резервуаров / А.А. Скорняков, К.Д. Вержбицкий, М.З. Зарипов, И.Г. Ибрагимов, А.Л. Карпов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» – 2014 – Т.12, №4 – С.157.

124. Вержбицкий К.Д. Влияние сопутствующей вибрационной обработки на качество сварных соединений вертикальных стальных резервуаров / К.Д. Вержбицкий, А.М. Файрушин, А.Р. Ямилова, И.Р. Сагадеев, Р.Г. Шарафиев // Научно-технический и производственный журнал «Монтажные и специальные работы в строительстве» – 2015 – №871 – С.19.

125. Verzhbickiy K.D. Influence of vibrational treatment on quality of welding joints of vertical steel tanks / K.D. Verzhbickiy, A.M. Fairushin, O.F. Khafizova, A.R. Yamilova // International Journal of Innovative and Information Manufacturing Technologies – 2015 – №2 – С.68-72.

126. Вержбицкий К.Д. Обеспечение ресурса уторного узла вертикального стального резервуара на стадии сооружения / К.Д. Вержбицкий, Г.Х. Самигуллин // Сборник тезисов докладов XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» – 2017 – Т.1 – С.308.

127. Вержбицкий К.Д. Совершенствование технологии изготовления уторного узла вертикального стального резервуара / К.Д. Вержбицкий, Н.Н. Валеев, А.С. Романчук, Р.Р. Чернятьева, В.А. Князев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» – 2017 – №6 – С.57-75.

128. Вержбицкий К.Д. Повышение срока службы уторного узла вертикального стального резервуара / К.Д. Вержбицкий, А.С. Романчук, Н.Н. Валеев // Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» – 2016 г. – С.295.

129. Вержбицкий К.Д. Обеспечение ресурса уторного узла вертикального стального резервуара на стадии сооружения // Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2016» – 2016 – Т.1 – С.134.

130. Вержбицкий К.Д., Романчук А.С. Повышение срока службы уторного узла вертикального стального резервуара // Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2014» – 2014 – Т.2 – С.48.