

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический

Направление подготовки 13.04.03 Энергетическое машиностроение

Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
«Исследование сварного соединения, выполненного из сталей 12Х1МФ и 12Х18Н9Т для паропровода энергетического котла»

УДК 621.186:621.791.05

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ5А	Кавун Дмитрий Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ПГС и ПГУ	Любимова Людмила Леонидовна	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры МЕН	Грахова Елена Александровна			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Бородин Юрий Викторович	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	д.т.н., профессор		

# Планируемые результаты обучения по ООП

## 13.04.03 Энергетическое машиностроение

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P1	Способность и готовность самостоятельно учиться и развивать свой общекультурный и интеллектуальный уровень, изменять свой научный и научно-производственный профиль в течение всего периода профессиональной деятельности с учетом изменения социокультурных и социальных условий, вести педагогическую работу в области профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 2.6.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	Способность проявлять и использовать на практике навыки и умения организации работ по решению инновационных инженерных задач в качестве члена или руководителя группы, нести ответственность, в том числе в ситуациях риска, за работу коллектива с применением правовых и этических норм при оценке и самооценке профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов, проблемных инженерных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-2; ОПК-1; ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.3., п. 2.4., п. 2.5.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Способность и готовность приобретать и применять новые знания и умения с использованием методологических основ научного познания и библиографической работы с привлечением современных технологий, понимать роль информации в развитии науки, анализировать её естественнонаучную сущность, синтезировать и творчески применять при решении инновационных профессиональных задач	Требования ФГОС ВО (ОК-1,3; ПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	Требования ФГОС ВО (ОК-1; ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	Способность осуществлять коммуникации в профессиональной сфере и в обществе в целом, принимать нестандартные решения с использованием новых идей, разрабатывать, оформлять, представлять и докладывать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке	Требования ФГОС ВО (ОК-2,3; ОПК-2,3), Критерий 5 АИОР (п. 2.2.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	Способность и готовность выполнять инженерные проекты с использованием современных технологий проектирования для разработки конкурентно способных энергетических установок с использованием знаний теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах и аппаратах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,3), Критерий 5 АИОР (п. 1.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
P7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и вырабатывать компромиссные решения с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний в условиях неопределенности, использовать методы решения задач оптимизации параметров в различных сложных системах	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-1,2,5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, формулировать выводы в условиях неоднозначности с применением глубоких теоретических и экспериментальных методов исследований, современных достижений науки и передовых технологий, строить и использовать модели с применением системного подхода для описания и прогнозирования различных явлений, осуществлять их качественный и количественный анализ, описывать результаты выполненной работы, составлять практические рекомендации по их использованию	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Способность и готовность оценивать техническое состояние объектов профессиональной деятельности, с применением современного оборудования и приборов, анализировать и разрабатывать рекомендации по их надежной и безопасной эксплуатации, понимать проблемы научно-технического развития сырьевой базы, современных технологий по утилизации отходов в энергетическом машиностроении и теплоэнергетике и научно-техническую политику в этой области	Требования ФГОС ВО (ОПК-1; ПК-7,8,9), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Способность и готовность к эффективному участию в программах освоения новой продукции и технологий, использованию элементов экономического анализа в практической деятельности на предприятиях и в организациях, готовность следовать их корпоративной культуре	Требования ФГОС ВО (ПК-9,10), Критерий 5 АИОР (п. 1.6, п. 2.1.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт Энергетический  
 Направление подготовки 13.04.03 Энергетическое машиностроение  
 Кафедра Парогенераторостроения и парогенераторных установок

УТВЕРЖДАЮ:  
 Зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись) (Дата) Заворин А.С.  
 (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b>
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5BM5A	Кавун Дмитрию Александровичу

Тема работы:

Исследование сварного соединения, выполненного из сталей 12X1МФ и 12X18Н9Т для паропровода энергетического котла	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	07.02.17г №592/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.17г.
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	1. Труба пароперегревателя парового котла 2. Сварное соединение, состоящее из сталей марок 12X1МФ и 12X18Н9Т 3. Образцы сварного соединения в исходном состоянии при нормальных условиях. 4. Исследование влияния термоциклирования на характеристики сварного соединения сталей марок 12X1МФ и 12X18Н9Т
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Введение (Обоснование необходимости исследований трубной энергетической стали. Актуальность исследований, методика и средства исследований. Постановка цели и задач исследования). 2. Обзор литературы по проблеме диагностики и оценки остаточного ресурса особо опасных производственных объектов (ОПО). 3. Обоснование методики и методов исследования. 4. Экспериментальные результаты исследования. Обсуждения, выводы и заключения. 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 6. Социальная ответственность. 7. Заключение.
<b>Перечень графического материала (формата А1)</b>	

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Грахова Елена Александровна
Социальная ответственность	Бородин Юрий Викторович
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Реферат	
Классификация повреждений сварных соединений и основные виды разрушений сварных соединений	
Заключение	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	13.03.17г.
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ПГС и ПГУ	Любимова Людмила Леонидовна	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM5A	Кавун Дмитрий Александрович		17.03.17г.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 172 страниц, 53 рисунка, 14 таблиц, 30 источников и 3 приложений.

Ключевые слова: сталь, сварное соединение, термоциклирование, микротвердометрия, внутренние напряжения I рода, рентгенофазовый анализ.

Объектом исследования является сварное соединение из сталей марок 12X1М и 12X18Н9Т.

Цель работы – предотвращение трещинообразования сварного узла паропровода энергетического котла вследствие воздействия термического цикла.

В результате исследования получены и обработаны экспериментальные результаты, сформулированы выводы, научная новизна и практическая значимость.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

ОПО – опасные производственные объекты;

РФА – рентгенофазовый анализ;

РСА - рентгеноспектральный анализ

(*hkl*) – индексы Миллера атомной плоскости;

*E* – модуль нормальной упругости, МПа;

*a* – параметр элементарной ячейки, Å ;

*T* – температура, К;

$\sigma_I$  – напряжения I рода, МПа;

Hv – микротвердость, МПа;

*P* – нагрузка, г;

*C* – диагональ отпечатка, мкм;

*L* – расстояние от поверхности.

## Оглавление

	с.
Введение .....	9
1 Классификация повреждений сварных соединений и основные виды разрушений сварных соединений.....	11
2 Разрушение сварных соединений.....	21
3 Техническое диагностирование сварных соединений и критерии оценки работоспособности .....	27
4 Послесварочная термическая обработка.....	34
5 Методология диагностирования по уровню внутренних напряжений.....	36
6 Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	46
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение .....	68
8 Социальная ответственность .....	81
Заключение .....	99
Список публикаций.....	100
Список использованной литературы.....	101
Приложение А Результаты расчетов микротвердости .....	104
Приложение Б Результаты расчетов зависимости $\sigma_T$ от температуры ....	148
Приложение В Research of the welded connection executed from steels 12Cr1MoV and 12Cr18Ni9Ti for a steam line of a power plant .....	153



## Введение

В настоящее время многие предприятия страны, будь то производящие или обеспечивающие необходимые услуги в сфере энергетики сталкиваются с различного рода проблемами.

Одной из таковых проблем является модернизация оборудования в сфере энергетики, создание необходимых систем по обновлению или улучшению уже имеющейся технологической базы, а также проектирование инновационных систем, которые бы позволили усилить данную сферу.

Чтобы решить данную проблему необходимо определить другую первоочередную задачу в данной области – это повышение эксплуатационного срока службы комплексов, систем или же отдельного оборудования, причем не только на стадиях эксплуатации, но и на стадиях разработки и проектирования.

Непосредственное выполнение данной задачи должно подкрепляться необходимой диагностикой, при учете уже имеющегося многолетнего опыта эксплуатации. Вследствие этого необходимо изучение определенного ряда характеристик и факторов, которые, в свою очередь, позволили бы своими результатами обеспечить возможность модернизации комплексов или оборудования, путем получения новых процессов и методов диагностики на стадии проектирования или монтажа.

Очевиден тот факт, что не до конца изучены процессы, протекающие в металлах или соединениях металлов на уровне структурно-атомных процессов. Мало изучены свойства материалов, которые бы давали полное описание всех структурных особенностей, особенно таких как напряжение в металлах сварных конструкций, которые оказывали бы особое влияние на стабильную их работу в течении длительного срока эксплуатации или же брались во внимание при изготовлении материалов нужных свойств, а также в применении их в различного рода монтажных работах при непосредственных ремонтах оборудования.

Необходимо изучение новых методик, которые бы давали наиболее полное описание всех свойств материалов, содержащих в себе внутренние структурные напряжения.

В соответствии с данными потребностями актуально и перспективно разрабатывать новые методики по изучению данной проблемы, которые бы отражали в своих экспериментах эксплуатационные особенности или же особенности работ в условиях высоких температур данных конструкций.

Цель работы – предотвращение трещинообразования сварного узла паропровода энергетического котла вследствие воздействия термического цикла.

Цель достигается решением следующих задач:

- микрорентгеноспектральным анализом сварного узла и критических зон;
- измерением зональных напряжений при термоциклировании;
- измерением значений микротвёрдости при термоциклировании ;

## 1. Классификация повреждений сварных соединений и основные виды разрушений сварных соединений

### 1.1 Классификация повреждений сварных соединений

Повреждения сварных соединений, связанные с эксплуатацией, обычно возникают из-за ряда определенных факторов, которые подразделяются на несколько групп:

1) наличие в изделии концентраторов напряжений, вызванных дефектами формы стыка, технологическими дефектами, возникшими при изготовлении изделия, и образованием начальных, стабильно растущих, трещин из-за усталости, ползучести или коррозии;

2) высокая степень напряженности стыка от действия рабочих, термических и остаточных напряжений;

3) несоответствие свойств материала конструкции или металла отдельных зон сварного соединения требуемому уровню в результате использования некачественных или несоответствующих техническим условиям сварочных материалов, отклонений от оптимальных режимов сварки и термической обработки.

Сварные соединения, используемые в паросиловых установках, которые наиболее всего подвержены эксплуатационным повреждениям из-за одновременного воздействия вышеупомянутых факторов. Таковыми являются:

- кольцевые стыки труб с литыми или коваными фасонными элементами, корпусами арматуры и цилиндров турбин;
- кольцевые стыки камер с днищами;
- кольцевые стыки тройников по типу "труба в трубу";
- угловые соединения труб поверхностей нагрева с камерами, дренажных отводов с паропроводами и труб у неподвижных опор;

– продольные стыки труб паропроводов.

Резкое изменение формы в районе стыков является основной причиной наибольшей вероятности возникновения концентраций напряжений [1].

Уровень рабочих и компенсационных напряжений изгиба, расположенных вблизи участков повышенной жесткости, носит повышенный характер и наблюдается в фасонных элементах и корпусах. Условия сварки и термическая обработки этих элементов вызывают, в свою очередь, большие затруднения.

Следует выделять следующие механизмы разрушения, приводящие к повреждениям, в зависимости от условий эксплуатации:

– хрупкое разрушение при гидравлических испытаниях или пуске из холодного состояния вследствие хладноломкости;

– хрупкое высокотемпературное разрушение при температурах выше 450°C в условиях ползучести;

– усталостное разрушение в условиях высокого или малоциклового нагружения, преимущественно под воздействием термических напряжений;

– коррозионное разрушение под воздействием агрессивной водной среды.

Условия образования вышеперечисленных видов трещин различны в своем расположении и морфологических признаках по внутри- или межзеренному характеру разрушения.

Возникшие при изготовлении изделий на заводах-производителях, или сварке в условиях монтажа зародышевые дефекты могут способствовать образованию трещин в процессе эксплуатации. Таковыми могут быть поры или различные шлаковые включения, и особенно опасными являются трещины, возникшие в результате сварки. Разного рода трещины отличаются по своему характеру, т. е. определенным морфологическим признакам или же толщине

слоя окалины и возникают вследствие некорректно произведенных механизмов изготовления или эксплуатации.

Хрупкие разрушения вследствие хладноломкости [1]. Трещины этого типа обычно развиваются при умеренных (до 100-150 °С) температурах во время гидравлических испытаний и пусков-остановов из холодного состояния при номинальных напряжениях ниже предела текучести. Они в основном начинаются в металле шва или в околошовной зоне (рис. 1.1) от концентраторов напряжений (подрезов, непроваров, сварочных трещин и т.п.).

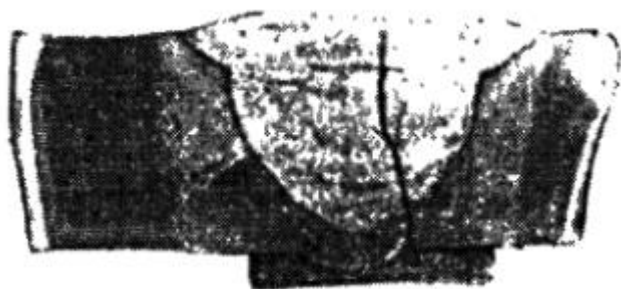


Рисунок 1.1 – Излом сварного стыка вследствие хладноломкости.

Процесс развития трещин, расположенных как вдоль, так и поперек шва, идет непосредственно по всем участкам сварных соединений, в отдельных случаях, переходя в основной металл соединения. Ветвистость и внутризеренный характер являются основными отличительными металлографическими признаками трещин хладноломкости.

Нарушение установленного режима сварки и термической обработки самого изделия приводят к смещению порога хладноломкости в сторону положительных температур – это является причинами появления вышеупомянутых трещин. Также это особенно сильно сказывается на охрупчивании металла при длительной эксплуатации на высоких температурах. При действии ударных нагрузок высока вероятность к разрушению по механизму хладноломкости.

При нарушениях режима отпуска или его отсутствия после сварки приводит к склонности сварного соединения к хладноломкости. Факторами, приводящими к этому, являются заниженная температура и недостаточное время выдержки отпуска.

В этих случаях значения твердости металла шва, в первую очередь верхней его части, превышают нормативные, а в структуре участка неполной перекристаллизации зоны термического влияния отчетливо видны характерные плотные темнотравящиеся участки, расположенные по границам зерен.

Перегрев сварного соединения при отпуске выше температуры, которая соответствует критической точке  $A_{с3}$  приводит к образованию трещин хладноломкости, что отчетливо видно на рис. 1.2. Признаком таких сварных соединений является отсутствие характерных участков, составляющих зону влияния, что отчетливо видно при визуальном осмотре поперечного шлифа после травления.



Рисунок 1.2 – Структура металла шва после перегрева выше температуры  $A_{с3}$  при отпуске.

Для предупреждения трещин хладноломкости основной мерой является корректировка режимов сварки и термообработки. Также необходимо удаление дефектов, которые в свою очередь, являются концентраторами напряжений.

Трещины, возникающие при температурах выше 450 °С в условиях ползучести. Это основной вид повреждений сварных соединений хромомолибденованадиевых сталей в паросиловых установках. С повышением температуры эксплуатации свыше 545°С и особенно свыше 565 °С вероятность их появления заметно возрастает [1].

Условия образования и место расположения являются основными критериями для разделения их на несколько типов:

1) трещины, возникающие на участках пониженной длительной пластичности сварного соединения, которыми являются околошовная зона и непосредственно сварной шов). Их условно называют "локальными";

2) трещины в "мягкой" прослойке зоны термического влияния или шва.

Трещины типа "локальных" разрушений (рис. 1.3) чаще всего образуются в околошовной зоне на участке перегрева в сварном соединении. Возможность их проявления и в самом металле шва. Выявление их осуществляется на всех стадиях эксплуатации установок. На начальной стадии они в большинстве случаев развиваются от зародышевых трещин, возникших при термической обработке узла и не выявленных при контроле на заводе и станции. В отдельных случаях трещины этого вида из околошовной зоны переходят далее в «мягкую» прослойку зоны термического влияния.

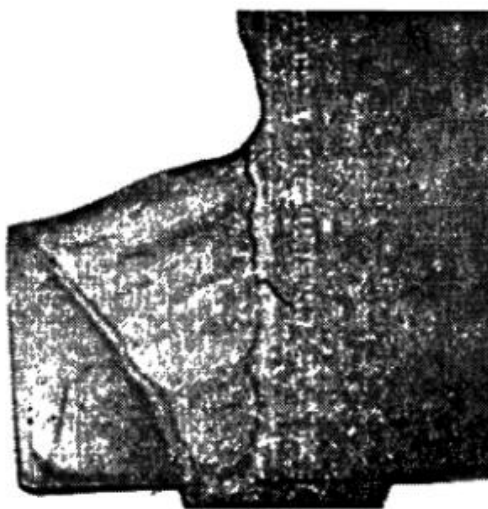


Рисунок 1.3 – "Локальное" разрушение в оклошовной зоне сварного соединения

Разрушения такого рода обычно зарождаются на наружных поверхностях и имеют свое начало от подрезов или других поверхностных дефектов. Также возможно их возникновение вследствие технологических дефектов в самом сечении шва.

Трещины в околошовной зоне чаще всего имеют кольцевой характер и удалены от границы сплавления не более чем на 1 мм. В металле шва трещины такого типа в верхних слоях и в корне (при наличии в нем концентратора), как правило, ориентированы произвольно. Основным признаком при металлографическом исследовании локальных трещин - четкая ориентировка их по границам первичного возникновения повреждения представляют собой поры и клиновидные трещины. Трещины типа "локальных" следует отличать от горячих, образующихся в процессе сварки. Последние также имеют межзеренный характер, но обычно располагаются по границам кристаллитов структуры затвердевания. Основным признаком при металлографическом исследовании горячих трещин – наличие зазубренных краев и переменное раскрытие. Снижение длительной пластичности металла шва и околошовной зоны, являющееся главной причиной подобных повреждений, обусловлено отклонениями от рекомендуемых режимов сварки и термической обработки. В сварных соединениях, отпуск которых не проводился либо был выполнен с отклонениями в сторону занижения по температуре и времени от установленного режима, снижение пластичности связано с дисперсионным твердением. В этих случаях твердость металла шва выше, а значения ударной вязкости ниже нормативных требований.

Некачественное проведение отпуска или отсутствие его может быть установлено по структуре. При этом на участке неполной перекристаллизации, а в некоторых случаях и в околошовной зоне видны плотные темно-травящиеся участки, расположенные по границам зерен.

Структурный признак занижения температуры подогрева при сварке – отсутствие ферритных оторочек по границам кристаллитов в металле шва.



Для предупреждения трещин, связанных со снижением длительной пластичности, следует соблюдать установленные режимы сварки и термической обработки. При выявлении сварных соединений с твердостью, превышающей нормативные значения, желательно произвести перепварку и последующую термообработку.

Стойкость сварных соединений против разрушений типа "локальных" значительно повышается при использовании основного металла, имеющего механические свойства, отвечающие нижнему или среднему уровню значений по соответствующим техническим условиям [1].

Трещины в "мягкой" прослойке. Трещины этого типа образуются в участках сварного соединения, имеющих пониженное сопротивление ползучести ("мягких" прослойках). Такими участками в первую очередь являются участки доотпуска и неполной перекристаллизации в зоне термического влияния, характеризующиеся мелкозернистым строением. "Мягкой" прослойкой может быть и металл шва, если он, благодаря структуре или легированию, имеет сопротивление ползучести меньше, чем основной металл. Особенностью этих повреждений является то, что они возникают в сварных соединениях, выполненных без отступления режимов сварки и термообработки. Твердость таких сварных соединений находится в пределах нормы. Рассматриваемые трещины образуются, как правило, в местах конструктивных концентраторов напряжений (штуцерные и тройниковые соединения, стыковые соединения труб разной толщины, соединения типа "труба - литье").

Данного рода повреждения обычно начинаются на наружных поверхностях сварных соединений и носят кольцевой характер. Трещины расположены обычно в зоне термического влияния, в большинстве случаев располагаются на участках, имеющих мелкозернистую структуру. Расположение их по границам зерен отлично просматривается по

многочисленным надрывам, которые, в свою очередь, впоследствии дают развитие магистральных трещин.

Магистральные и сопутствующие им трещины отличаются от других по характерно окисленным краям, а в некоторых случаях и по значительному слою окалинообразований.

Конструктивные недостатки, имеющие изменения сечения в районе стыков или некорректные условия эксплуатации, приводят к возникновению такого рода повреждений. Также на этот вид повреждений оказывает влияние действие напряжений, превышающих допускаемые.

Наладка паропроводов за счет изменения его конструкций, или самой конструкции напряжений, процедура снижения концентраций путем зачистки, создание плавных переходов в местах соединений деталей – все это служит уменьшению внешних нагрузок, которые в свою очередь приводят к значительным мерам предупреждения повреждений.

Усталостные и коррозионно-усталостные повреждения [1]. Усталостные повреждения в сварных соединениях паросиловых установок обычно связаны с термической усталостью и возникают в результате многократного воздействия высоких термических напряжений при забросах конденсата или недопустимо высоких скоростях прогрева и охлаждения. Быстрому развитию их способствует коррозионное воздействие водной среды, поэтому в большинстве случаев выявляемые трещины можно классифицировать как коррозионно-усталостные повреждения.

Местом возникновения такого типа трещин обычно является внутренняя поверхность зон конструктивных или технологических концентраторов в местах приварки штуцеров.

Также возможно их образование в местах присоединения отводов к клапанам, дренажным или импульсным линиям, или в стыковых сварных

соединениях паропроводов. Расположение трещин, вызванных термической усталостью, локализовано в сварных соединениях как вдоль, так и поперек шва.

На внутренних поверхностях термическое растрескивание чаще всего имеет вид некой сетки.

Об усталостном характере разрушения можно судить по виду излома, на котором выявляются две зоны: одна - собственно усталости с концентрическими кольцами, другая - статического долома. При анализе изломов необходимо обращать внимание на степень окисленности их, имея в виду, что начальные участки трещины имеют более сильное окисление.

Усталостные трещины, которые проявляются в результате изменения внутреннего давления или же внешних нагрузок, обычно расположены на наружной поверхности концентраторов. Чаще всего их образование и ускоренное развитие связано с зародышевыми трещинами, возникающими при сварке соединений.

Общий признак коррозионно-усталостных трещин при металлографическом анализе – их внутризеренный характер.

Более плавные переходы в зонах сопряжения элементов сварных соединений приводит к снижению концентрации напряжений, которые могут быть вызваны высокими амплитудами переменных напряжений. Устранение этих причин является мерой предупреждения такого рода трещин.

## 1.2. Типичные повреждения опасных производственных объектов

Происходящие сложные физико-химические явления в металлах соединений могут быть вызваны при длительных сроках эксплуатации ТУ ОПО в некоторых сложных условиях, которыми являются высокие температуры или напряжения, активное воздействие агрессивных сред и циклические нагрузки.

Обычно промышленное оборудование рассчитывается на строго определенные условия эксплуатации с некоторым запасом, однако реальные условия очень часто и значительно отличаются от расчетных.

При длительных сроках эксплуатации металл подвергается воздействию различного рода, так называемых сверхрасчетных нагрузок, что впоследствии приводит к аварийным ситуациям, т. е. аварийным повреждениям определённого оборудования или его частей. Срок службы значительно снижается при допущении ошибок во время проектирования или же при проведении работ, включающих в себя наличие металлургических или монтажных дефектов.

Фактическая долговечность оборудования в первую очередь зависит от скорости протекающих в металле различных процессов и явлений, которые могут развиваться одновременно. Однако в конечном итоге какой-либо процесс становится ведущим, и разрушение происходит именно по механизму ведущего процесса.

## 2. Разрушение сварных соединений

### 2.1 Деформация и разрушение

В результате длительной эксплуатации в разных средах и при различных нагрузках происходит зарождение, развитие и накопление микроповрежденностей в технических устройствах ОПО [1].

В настоящее время большинство ОПО эксплуатируются с опеределенной накопленной микроповрежденностью в материалах, из которых изготовлены данные объекты.

Работы многих отечественных и зарубежных ученых посвящены вопросам зарождения, накопления и развития микродефектов, которые приводят к деформации и разрушению материалов.

Микротрещины являются источником процесса разрушения, который в свою очередь состоит из до- и закритической стадий. Первая стадия включает в себя процесс зарождения и медленного подрастания микротрещины. Вторая – включает в себя процесс разрушения, путем развития трещины.

В идеальной кристаллической решетке невозможно образование устойчивой трещины без пластической деформации. Существуют различные концепции взаимосвязи процессов пластической деформации и разрушения [2].

На основе результатов многих изучений и экспериментов сделаны выводы, что распространение трещин не контролируется пластической деформацией [3].

Взаимосвязь процессов деформации и разрушения, изученные в настоящее время можно разделить на определенные точки зрения [4]:

1. Процесс разрыва межатомных связей – ведущий на всех стадиях разрушения [5].

2. Процесс пластической деформации – ведущий не на всех стадиях разрушения и определяет временную зависимость прочности [6].

3. Процесс разрушения – ведущий только на стадии нестабильного (закритического) роста трещины [3].

4. Процесс пластической деформации определяет разрушение в условиях, когда реализуется ведущий элементарный механизм с энергией активации, равной энергии объемной самодиффузии; если же реализуется ведущий элементарный механизм с энергией, близкой к энергии активации разрыва межатомных связей, то разрушение контролирует пластическую деформацию [7]. Эту точку зрения считают более общей при условии, если ведущий механизм контролирует скорость процесса разрушения [7].

С точки зрения взаимосвязей разрушения и процессов пластической деформации существуют определенные виды излома. Различные стадии разрушения включают в себя различного рода процессы, которые контролируют скорости разрушения. Эти процессы включают в себя:

- разрыв межатомных связей с энергией активации  $U_0 = U_0^T$ ;
- пластическую деформацию с энергией активации  $U_0 = U_0^T \leq U_0^G$ .

В свою очередь два механизма разрушения: вязкий, если скорость разрушения контролируется пластической деформацией с энергией активации  $U_0$  на всех этапах повреждения, и хрупкий, если же скорость разрушения контролируется разрывом межатомных связей на всех этапах.

Если скорость зарождения трещины контролируется процессом разрыва межатомных связей с энергией активации  $U_0^G$ , то такое разрушение принято считать квазихрупким. В свою очередь, скорость зарождения и развитие трещины контролируется пластической деформацией  $U_0 - U_0^T$ , то разрушение принято считать квазивязким.

Рассматривается, что разрушение при ползучести, усталости как динамическое, либо как задержанное разрушение при статических нагрузках. Так, при низкотемпературной ползучести повреждение материала связано с накоплением нераспространяющихся трещин, возникающих по механизму хрупкого разрушения. Окончательное разрушение происходит при достижении критической плотности микротрещин, когда уже возможно пластическое

течение перешейков между микротрещинами и их слияние. В результате окончательное разрушение по внешнему виду излома имеет вязкий характер. Фактически такой вид разрушения следует отнести к квазихрупкому.

В условиях высокотемпературной ползучести разрушение связано с накоплением пор по границам зерен или микротрещин по телу зерен. Их зарождение и рост контролируются пластической деформацией, а на этапе окончательного разрушения также реализуется пластичность материала и такой вид разрушения классифицируется как вязкое разрушение.

Если при ползучести на начальном этапе скорость зарождения микроповрежденности контролируется пластической деформацией, а на этапе разрушения связана межзеренным разрушением, то такое разрушение относят к квазивязкому.

При знакопеременных нагрузках в зависимости от условий нагружения и структуры материала могут реализовываться следующие механизмы:

1. Вязкое разрушение, скорость которого контролируется пластической деформацией на всех стадиях зарождения и развития дефектов, т. е.  $U_{\bullet} = U_{\bullet}^{\tau}$ .
2. Хрупкое разрушение, скорость которого контролируется на всех этапах процессом  $U_{\bullet} = U_{\bullet}^{\sigma}$ .

Разрушение принято считать задержанным, если оно происходит при выдержке под напряжением предела текучести при наличии или отсутствии коррозионной среды.

Таким образом можно сделать вывод о том, что идентифицировать излом возможно на основе взаимосвязи деформации и разрушения и позволяет определить различного рода изломы, такие как вязкий, хрупкий, квазивязкий и квазихрупкий.

## 2.2 Образование микротрещин

Существует утверждение, что все без исключения микромеханизмы трещинообразования носят дислокационный характер, а также предполагается безусловное протекание процесса пластической деформации.

Образование микротрещин является результатом механизма релаксаций локальных напряжений в тех условиях, когда релаксация напряжений, которая связана с пластической деформацией невозможна.

Различают три основных вида трещин:

1. Пора – некоторый объем, ограниченный свободными поверхностями
2. Упругая трещина – разрез тела конечной длины, вдоль какой-либо плоскости.
3. Дислокационная трещина – один из возможных видов ядра дислокаций с большим вектором Бюргера

Содержащих хрупкие включения, зарождение трещин в реальных технических материалах может быть связано с растрескиванием хрупкой фазы.

Существует процесс образования микротрещин в материале, не имеющем трещин. Он предполагает, что разрушению всегда предшествует локальное пластическое течение и что в результате этого течения возникает основная доля концентрации напряжений, необходимой как для образования, так и для распространения трещины. Локальное пластическое течение наблюдалось в окрестности поверхностей разрушения в каждом исследованном материале с металлическими, ковалентными или ионными связями.

Область чистого пластического течения во всем образце может быть мала, она сосредоточена в непосредственной близости к трещине, но она всегда есть. Принимается также, что тот же самый механизм преобладает при развитии существующей трещины.

Максимальное количество микротрещин образуется на участках деформационного упрочнения при определенной температуре ниже перехода вязкость – хрупкость.



Механизм образования трещин в карбидных частицах, которые действует в ферритной матрице в виде мощного концентратора напряжений и способен создавать зародыши разрушения уже даже при деформации в 1%.

### 2.3 Образование макротрещин

Для полного разрушения наличие микротрещин размерами примерно с диаметр одного зерна является недостаточным условием. Соответственно, необходимо и обязательно исследование образцом с наличием более 1% треснувших зерен, в которых течение разрушения продолжается обычным образом, если увеличить напряжения. В итоге результирующими локальные концентрации не дают высоких показателей и являются пренебрежительно малыми величинами.

Чтобы такого рода трещины развивались необходимыми условиями являются распространение трещин сквозь окружающие зерна и в результате проявлялось бы разделение образца, или же встречала трещины, которые начали свое развитие с подобного рода зарождений.

Все вышеупомянутое приводит к рассмотрению двух случаев.

1. По всему поперечному сечению элемента конструкции действуют напряжения, равные пределу текучести. Предполагается, что каждое зерно, имеющее активную систему скольжения, параллельную направлению максимального сдвигового напряжения подвергается локальному течению. При наличии в данном или соседнем зерне плоскости скола, нормальной к направлению растяжения, существуют благоприятные условия для образования микротрещины.

2. Макроскопическая трещина распространяется в пластине. Впереди нее также существует область пластического течения, и здесь также предполагается, что в каждом благоприятно ориентированном зерне будет образовываться микротрещина.

Возможно предположить, что все микротрещины в зоне пластического течения будут расти и развиваться назад, и сливаться со своего рода основной трещиной, которая в свою очередь имеет рост дискретными шагами. Этот процесс слияния и будет образовывать механизм зарождения макротрещин в сварных соединениях.

### 3. Техническое диагностирование сварных соединений и критерии оценки работоспособности

#### 3.1 Контроль качества сварных соединений

Контроль качества сварных соединений по данному регламентирующему документу имеет ряд особенностей, которые будут рассмотрены в данном разделе.

При изготовлении, монтаже или же ремонте трубопроводов и трубных систем котлооборудования обязательным является осуществление систематического контроля качества сварочных работ и выполнение сварных соединений. Для их оценки применимы такие процедуры, как: предварительный, операционный и приемочный контроли [1].

Результаты каждого из видов контроля, предварительного или операционного требуют обязательного оформления в виде отчетных документов. А также необходимо фиксирование производимого контроля в надлежащих журналах. Требования оформления результатов приемочного контроля отличаются от первых двух видов контроля и выполняются по иным требованиям, которые регламентируются в другого рода документах.

Правила Госгортехнадзора РФ, в свою очередь, контролируют выполнение приемочного контроля сварных соединений труб и трубных элементов котлооборудования и включают в себя следующие виды работ:

- визуальный и измерительный контроль;
- капиллярный или магнитопорошковый контроль;
- металлографические исследования;
- ультразвуковая и радиографическая дефектоскопия;
- стilosкопирование деталей и металла шва;
- контроль прогонкой металлического шара;
- измерение твердости металла шва;
- механические испытания;

– гидравлические испытания.

### 3.2 Процедуры, контролирующие выполнение сварных соединений

Монтаж, ремонт оборудования ТЭС, изготовление отдельных элементов требуют визуального и измерительного контроля сварных соединений. Сварные соединения независимо от марки стали или же типа сварного соединения, условий работы или же их принципиального назначения должны подвергаться визуальному контролю. К контролируемым процессам такого рода являются процессы приварки шипов плавников, элементов опор или подвесок непосредственно к самим трубам [8].

Выполнение процессов очистки от шлака, элементов расплавленного металла, окалин или же иных загрязнений на длину не менее 20 мм по обе стороны от оси сварного шва является обязательной процедурой перед визуальным контролем. Контроль выполняется невооруженным глазом или же при помощи увеличивающей лупы и при необходимости с привлечением дополнительного освещения. Непровары между металлом и швом, различного вида трещины, а также брызги и наплывы металла, скопления включений, свищи и прожоги – все это является недопустимыми дефектами при визуальном контроле качества. Перед проведением контроля другого рода методами необходимым и обязательным является исправление всех дефектов, которые были выявлены при визуальном и измерительном контролях.

Поверхностные дефекты сварных соединений могут быть определены с помощью капиллярного или магнитопорошкового контроля, являющиеся своего рода уточняющими процедурами к визуальному контролю. Найденные в результате проведения данных методов оценки качества удлиненные и неодионочные следы являются признаком брака сварных соединений.

Проверка на соответствие сварных соединений прочностным и пластическим свойствам, а также оценка размеров, формы, сплошности и различного рода характеристик макро- и микроструктур проводится путем выполнения механических испытаний разрушающего контроля и металлографических исследований. Испытания на растяжение, изгиб или

сплющивание, ударный изгиб относят к механическим испытаниям, а исследования форм шва и макроструктуры – к металлографическим. Все эти испытания производятся на специально подготовленных образцах или на производственных сварных соединениях. Правила Госгортехнадзора РФ распространяются на сварные соединения в целях контроля их качества путем следующих испытаний и исследований:

- выполненные газовой и контактной сваркой стыковые сварные соединения – механическими испытаниями;
- металлографические исследования добавляются при контроле деталей разного способа сварки и различных структурных классов, а также тавровых и угловых соединений

Окончательно изготовленные контролируемые соединения с включенной, если необходимо термообработкой, должны быть проверены этими же методами неразрушающего контроля. Если данные этой проверки окажутся неудовлетворительными, то необходимы подвергать проверке качество материала, из которого изготовлено сварное соединение или же исправность оборудования и квалификацию персонала.

Процедура стилоскопирования направлена на контроль свариваемых частей деталей и конструкций для установления материалов из которых выполнены образцы, подвергающиеся оценке качества. Устанавливается соответствие марки стали и содержащихся в ней легирующих элементов с теми, что указаны в чертежах. Данную процедуру проводят непосредственно перед сборкой или же во время нее, а также по окончании ремонта или монтажа трубопровода в целом. Стилоскопирование должно производиться на зачищенных до металлического блеска поверхностях сварных элементов. Неудовлетворительные результаты контроля качества требуют проведения дополнительного контроля методами количественного спектрального или химического анализов результаты которых будут считаться окончательными.

Обеспечение заданного проходного сечения сварных соединений труб котлоагрегатов, в частности поверхностей нагрева, проводится путем прогонки металлического шара.

Твердость металла подлежит измерению с целью определения качества термообработки сварного соединения. Твердость металла шва подвергается измерению для:

- всех сварных соединений трубопроводов, выполненных при помощи присадочного материала из хромомолибдена и хромомолибденованадия, а также подвергнутых термообработке;
- для сварных соединений в местах приварки штуцеров к термообработанным коллекторам или трубопроводам из такого же рода сталей, или же не имеющих термообработку однотипных сварных соединений.

Для измерения твердости металла шва необходимо использовать переносные твердомеры и проводить данные работы на зачищенных до металлического блеска участках поверхности. Всего подготавливается три таких участка и проводится по три измерения на каждом участке. Участки выбираются в разных местах по периметру стыка.

При производстве высокого отпуска результаты измерения твердости металла шва оцениваются по нормам, применяемым для их оценки.

Прочность и плотность соединений котлоагрегатов и трубопроводов пара и/или горячей воды проверяется путем проведения гидравлического испытания, при этом давление и технология проведения данного испытания устанавливается правилами Госгортехнадзора РФ.

Сварные соединения газопроводов, а также технических трубопроводов необходимо проверять согласно определенным требованиям при помощи гидравлического или пневматического испытания. Соединения различных прочих трубопроводов необходимо подвергать гидроиспытаниям, если это предусмотрено технической документацией. При не обнаружении в сварных

швах течи, "потений" и "слезок", или других видимых остаточных деформаций то результаты гидравлического испытания принято считать удовлетворительными, при условии, что манометр не показывает падения давления при проведении данного рода процедуры.

### 3.3 Исправление дефектов в сварных соединениях трубопроводов и труб поверхностей нагрева котлов

Данный раздел направлен на описание процесса исправления дефектов в сварных соединениях, которые были допущены при монтаже или ремонте, при помощи ручной дуговой или аргонодуговой сварки. Все дефекты должны быть устранены до эксплуатации сварных соединений.

Устранение дефектов применимо ко всем сварным соединениям труб из различных марок сталей, исключая соединения из стали аустенитного класса.

Исправление дефектов в бывших в эксплуатации сварных соединениях должно производиться для трубопроводов, коллекторов, штуцерных соединений, барабанов котлов и т.п. Также с помощью сварки возможно устранение дефектов в литых изделиях, которые еще не подвергались эксплуатации.

Поверхностные и подповерхностные дефекты в стыках трубопроводов независимо от их назначения и параметров рабочей среды и труб поверхностей нагрева котлов должны исправляться следующим образом:

- чрезмерные выпуклости (усиления) сварных швов удалить механическим способом, недостаточные выпуклости - исправить подваркой предварительно зачищенного шва;
- наплывы удалить механическим способом и при необходимости подварить;
- подрезы и углубления между валиками подварить, предварительно зачистив места подварки;

– сквозной прожог или непровар в корневом слое, выполненном аргонодуговой сваркой, исправить ручной аргонодуговой сваркой с применением присадочной проволоки соответствующей марки.

Исправление поверхностных и подповерхностных дефектов без последующей заварки мест их выборки допускается на сварных соединениях в случае, если остающаяся толщина металла в месте максимальной глубины выборки не менее расчетной толщины стенки, но не менее 75% ее номинальной толщины.

Механическими способами при помощи абразивного инструмента путем резания или вырубки следует удалять поврежденный металл сварных соединений. Под поврежденным металлом сварного соединения следует понимать металл шва и прилегающую к шву зону с дефектами в виде трещин, скоплений пор, несплавлений и других несплошностей, превышающих допустимые нормы.

Удаление дефектного металла возможно при помощи воздушно-дуговой, воздушно-плазменной или кислородной резкой при непосредственной последующей обработкой поверхностей выборки.

Для исправления шва следует применять подварку выборок или же наплавку, причем, тем же способом сварки и теми же присадочными материала, что применялись для сваривания основного шва соединения.

Перед подваркой или наплавкой стык, независимо от толщины стенки трубы и марки стали, необходимо подогреть по всему периметру до температуры предварительного подогрева, регламентированной при сварке труб из стали этой марки. Один и тот же участок может быть исправлен не более 3 раз.

После заварки выборки стык подвергается термообработке по всему периметру в случае, если глубина выборки равна или больше толщины элемента сварного соединения.



Визуальный контроль, ультразвуковая дефектоскопия или радиография, или же магнитопорошковый и капиллярный контроль – все эти процессы применяются в 100% случаях к исправленным с помощью сварки стыкам [8].

Контролируемая зона должна включать место заварки и прилегающие к нему участки шириной не менее 20 мм сварного шва и 10 мм основного металла.

В продольных швах газоплотных панелей паровых котлов дефекты в виде трещин, распространяющихся в пределах плавников, исправляют путем подварки. Для этого дефектное место вышлифовывают, обеспечивая плавные очертания выборок, проверяют капиллярным методом или травлением очертания дефекта, рассверливают концы трещины и заваривают электродами диаметром 2,5 - 3 мм. Если после вышлифовки трещины в плавнике образовалась сквозная щель шириной более 4 мм, то на это место ставят пластину из стали, аналогичной по химическому составу стали свариваемых плавниковых труб, и приваривают ее к трубам в соответствии с определенными указаниями.

#### 4 Послесварочная термическая обработка

Послесварочная термическая обработка сварных соединений включает в себя различного рода процедуры по термообработке. Данный процесс выполняется для того, чтобы снизить остаточные напряжения после сварочных работ в изделиях из углеродистых и низколегированных сталей. Также обладает механизмом уменьшения твердости околосшовной зоны, повышает пластичность и ударную вязкость и обеспечивает освобождение водорода из сварного соединения [8].

Снижения различного рода остаточных напряжений является главной задачей послесварочной термической обработки сварных соединений. Этот процесс также принято называть отжигом для снятия напряжений.

Термообработке после сварочных работ не подвергаются изделия из аустенитной нержавеющей стали, но при условии, что изделие не будет эксплуатироваться в условиях сильной коррозии. Если же эксплуатация в такого рода условиях необходима то проводится термическая обработка с целью растворения карбидов хрома и должна быть выполнена твердым раствором, стабилизации карбидов ниобия и карбидов титана стабилизирующей термообработкой для снижения остаточных напряжений путем отжига.

Важными факторами термической обработки после сварки являются скорость нагрева, температура и время прогрева, скорость остывания, а также разница температур в свариваемом изделии во время циклов нагрева и остывания. Температура и время прогрева – это наиболее важные факторы, так как они определяют скорость снятия напряжений и качество сварного шва. Для того, чтобы обеспечить равномерное распределение температуры и свести к минимуму термическое напряжение, указываются максимальные скорости нагрева и остывания, а также максимальная разница температур.

Тогда как в целом металлургический эффект термической обработки после сварки благоприятен, у нее есть и негативные стороны. Продолжительное нагревание может привести к снижению предела прочности на разрыв и ударной вязкости швов. В определенных типах хромомолибденовой стали могут возникнуть трещины отжига.

Для большинства изделий термическая обработка после сварки производится в печи. На больших строительных участках бывает целесообразным возведение временных специально спроектированных печей для отжига сосудов под давлением и трубных секций.

## 5. Методология диагностирования по уровню внутренних напряжений

### 5.1 Материал. Образцы. Схемы вырезки образцов

Объектом исследования в данной работе являлся участок сварного соединения пароперегревателя, выполненного из разнородных сталей, энергетического парового котла. Образец состоит из сваренных между собой двух труб ручной электродуговой сваркой (каждая длиной 181,5...182 мм, диаметром 32 мм и толщиной стенки 5 мм). Поперечный сварной шов соединил два разнородных материала. Одна труба выполнена из перлитной стали 12Х1МФ, а другая – из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Использование таких сложных сварных соединений в энергетике обуславливается: как условиями работы стенки трубы при высоких температурах, так и экономическими показателями. Научное значение сводится к исследованиям термической совместимости этих разнородных материалов [9].

Для дальнейших исследований из различных участков трубы, находящихся как в сварном шве, так и на различном удалении от него, были вырезаны 16 образцов в плоскостях, параллельных оси трубы (рис. 5.1, 5.2).

Плоскость, ближайшая к оси трубы, условно, принята за внутреннюю поверхность (рис. 5.1). Плоскость, расположенная на расстоянии 2,14 мм от наружной поверхности (почти в центре стенки трубы), условно, названа наружной (рис. 5.1). Изготовленные образцы позволили исследовать 20 зон (рис. 5.2), в их числе: сварной шов, околошовную зону и зону термического влияния сварки (ЗТВ). Результаты данного исследования представлены в [9].

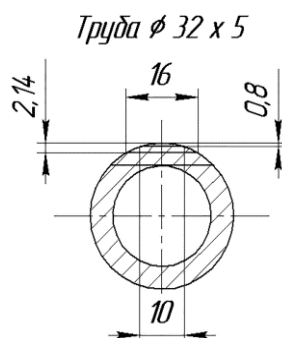


Рисунок 5.1 – Разрез трубы с указанием плоскостей резов при подготовке образцов

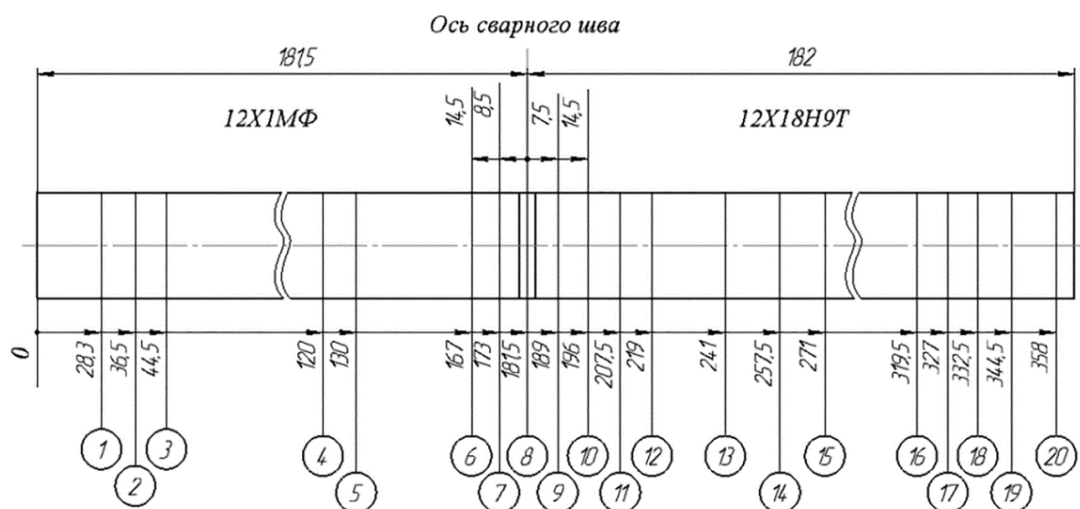


Рисунок 5.2 – Исследуемый участок трубопровода с указанием позиций анализируемых зон

На рисунке 5.3 представлена схема сварного узла с характерными для него критическими зонами, возникающими в процессе сварки. В настоящей работе участок 2 и 3 (рис. 5.3) назван околошовной зоной (ОШЗ). Участок нормализации 4 и участок неполной перекристаллизации 5 (рис. 5.3) названы в работе зоной термического влияния сварки (ЗТВ).

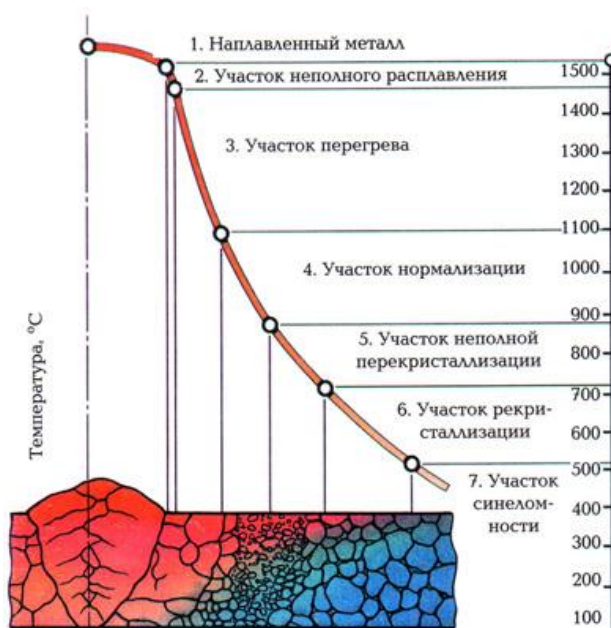


Рисунок 5.3 – Схема сварного узла

В данной работе исследованию подвергалась сварное соединение сталей марок 12Х1МФ и 12Х18Н9Т, а именно исследованию подвергались следующие образцы, схема вырезки которых показана на рисунке 5.4:

- Поперечный образец №1, середина которого расположена на оси сварного шва. Образец обхватывает зоны обеих сталей. Зона условно названа сварной шов.

- Продольный образец №2, длиной около 120 мм с центром на оси сварного шва (по 60 мм в каждую сторону). Образец охватывает околошовные зоны, зоны термического влияния сварки и сварной шов.

На рис. 5.4 представлены экспериментальные образцы (рис. 5.4г – продольный образец №2, рис.5.4б, в – поперечный образец №1) для исследования сварного шва (образец №1), околошовной зоны (образец №2), зоны термического влияния сварки (образец №2) и продольный образец для измерения микротвердости (образец №2).

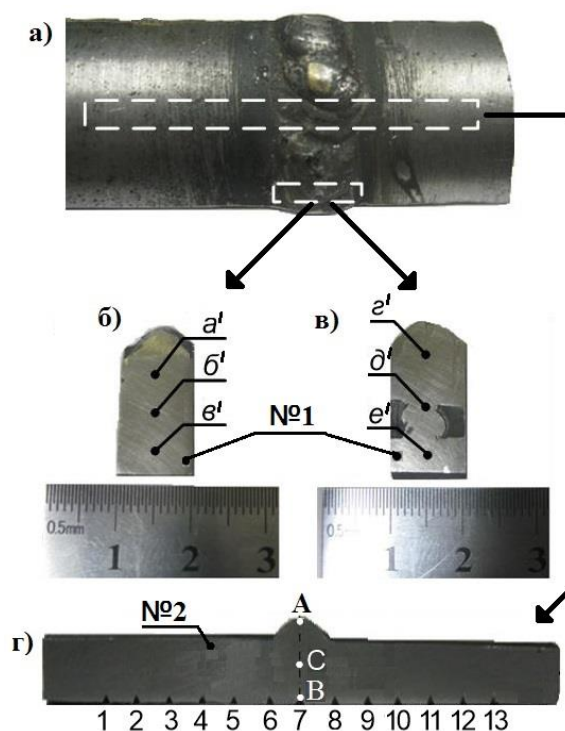


Рис. 5.4 Исследуемый сварной шов:

а) схема вырезки продольного образца (г) и поперечного образца (б, в); б)  $a^I$ ,  $b^I$ ,  $v^I$  – контролируемые точки с наружной стороны образца из зоны сварного шва; в)  $g^I$ ,  $d^I$ ,  $e^I$  – контролируемые точки с внутренней стороны образца из зоны сварного шва; г) 1 – 13 – зоны контроля спектрального состава продольного образца; г) AC, BC – направления измерения микротвердости по толщине стенки трубы из зоны сварного шва продольного образца.

Химический состав стали 12X18H9T по ГОСТ 5632-72 (по массе) приведён в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Химический состав стали 12X18H9T (по массе)

С, %	Ni, %	Cr, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Al, %	Cu, %	Nb, %	B, %	Fe, %
0,07	1,99	12,45	13	0,21	0,006	0,015	0,03	2,5	0,79	0,015	–

Химический состав стали 12X1МФ по ГОСТ 29072 - 74 приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Химический состав стали 12X1МФ

Элемент	Cr	C	Mo	V	Mn	Si	Ni	S	P	W
Содержание, %	0,9 - 1,2	0,08 - 0,15	0,25 - 0,35	0,15 - 0,3	0,4 - 0,7	0,17 - 0,37	< 0,3	<0,04	<0,04	-

## 5.2 Рентгенофазовый анализ

Среди всех различных методов, позволяющих изучать фазовый состав стальных изделий, метод рентгенофазового анализа (РФА) занимает особое место. Одной из основных задач, решаемых путем проведения РФА, является исследование твёрдых растворов. При этом имеется возможность прямого измерения параметра элементарной ячейки кристаллического вещества ( $a$ , Å), чрезвычайно чувствительного к концентрации примесей, растворённых в данном веществе. Перераспределение примесей в процессе эксплуатации изделия вызывает изменение параметра элементарной ячейки, что закладывается в основу расчёта зональных напряжений ( $\sigma_L$ , МПа), так что кристаллическая решётка является своеобразным индикатором состояния стали и диагностическим признаком [10].

## 5.3 Микротвердометрия

Микротвёрдость весьма чувствительна к изменению структуры металла. При сварке, нагревах или механических нагрузках микротвёрдость изменяется в направлении изменения предела текучести и, как твёрдость отдельных микролокальных участков микроструктуры материала, представляет собой очень сложное свойство, которое можно рассматривать как интегральную характеристику прочности и пластичности. В этой связи измерения микротвёрдости, могут быть использованы для контроля изменения механических свойств после различных обработок, механических свойств отдельных зёрен, структурных составляющих отдельных сплавов, а также для относительной оценки жаропрочности металла или сплава [11].

## 5.4 Методика исследований

Методика исследований заключалась в следующих этапах:

- 1) в микрорентгеноспектральном анализе для образца № 2;
- 2) в определении зональных напряжений для образца № 1;
- 3) в определении микротвёрдости для исходного образца № 2;
- 4) в термоциклировании образцов № 1, № 2, с определением:



- микротвёрдости образца № 2 в зависимости от температуры термоцикла;
- зональных напряжений в образце № 1 в зависимости от температуры термоцикла.

Основным методическим приёмом при исследованиях было термоциклирование исходных образцов. Термоциклирование имитировало процесс искусственного старения образцов и их термическую усталость. Данный приём позволяет при исследовании аномалий в металлах определить особые температурные точки, где отмечаются фазовые переходы первого и второго рода.

В процессе термоциклирования происходят деформационные явления, приводящие к формоизменениям и трещинообразованию поверхностей нагрева. В связи с тем, что циклический нагрев материалов влияет на срок службы изделий, эта проблема актуальна для энергетики. Причины наблюдаемых при термоциклировании явлений до конца не установлены, поэтому методы устранения изменения размеров, формы и свойств, в том числе связанные с разрушением обогреваемых изделий, не найдены. В числе причин, вызывающих изменение формы и размеров изделий, разрушение, изменение свойств материалов и соединений деталей, называют градиенты температур, фазовые переходы и разницу в коэффициентах линейных расширений. Для того чтобы вызвать необратимые формоизменения в изделиях, необходимо создать внутренние напряжения, преодолевающие предел текучести материала.

Термоциклирование образцов проводилось в атмосфере воздуха в электропечи МИМП – 10УЭ (рис. 5.5), в диапазоне температур от 100 °С до 1000 °С с шагом повышения температуры 100 °С в каждом цикле нагрева. Выдержка образцов в печи составляла 1,5 ч. После этого печь отключалась, и образцы остывали вместе с печью до комнатной температуры и подвергались соответствующему анализу. Затем выполнялся очередной цикл нагрева. Циклы воспроизводились. После каждого нагрева необходимо проводить шлифовку образцов. Это делается для того, чтобы убрать окислы и убрать от предыдущего

эксперимента (на образце № 2) отпечатки алмаза, оставшиеся после измерения микротвёрдости.



Рисунок 5.5 – Электродуховка МИМП – 10УЭ.

Диагностика возникновения процессов термической усталости осуществлялось на основе спектрального анализа, микротвердомерии и рентгенометрии.

Спектральный анализ произведён с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-2800 на основе измерения спектров характеристического излучения химических элементов в исследуемом образце №2 (рис. 5.6). Определяемые элементы идентифицировались по стандартной рабочей кривой, предусмотренной в качестве элемента сравнения, заложенного в программу спектрометра. Полученный спектр отображался на дисплее компьютера, количественный анализ производился автоматически по интенсивности экспериментальных спектральных линий и их площади.

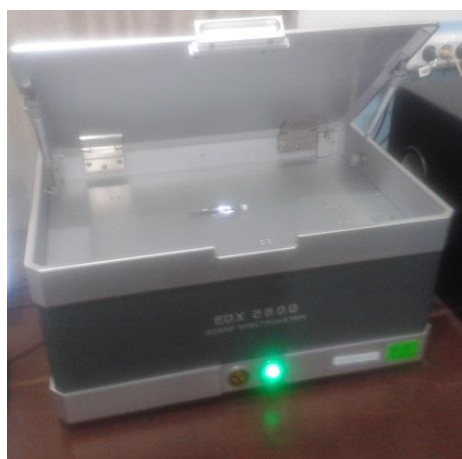


Рисунок 5.6 – Рентгенофлуоресцентный спектрометр EDX-2800.

Микротвёрдость анализировалась с применением микротвердомера ПМТ-3 (рис. 5.7) по методу Виккерса. Принцип действия метода основано на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырёхгранной пирамиды с углом между гранями 136 градусов в образец под действием силы  $F$ , приложенной в течение определённого времени, и измерении диагонали отпечатка  $d$ , оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки [11]. Измерения производились по толщине стенки трубы по направлению от внешней поверхности к внутренней.



Рисунок 5.7 – Микротвердомер ПМТ-3.

Микротвёрдость определяют на плоской полированной чистой поверхности. При приготовлении образца № 2 особое внимание уделялось на недопустимость нагрева исследуемой поверхности, так как нагрев может привести к искажению величины микротвёрдости. При выборе нагрузки руководствуются величиной площади исследуемого участка и толщиной слоя образца. Нагрузка составляла 100 гр. Минимальная толщина образца должна быть больше диагонали отпечатка в 1,5 раза, а расстояние от края образца до центра отпечатка или между центрами соседних отпечатков должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка [11]. Измерение твёрдости по методу Виккерса показано на рисунке 5.8.

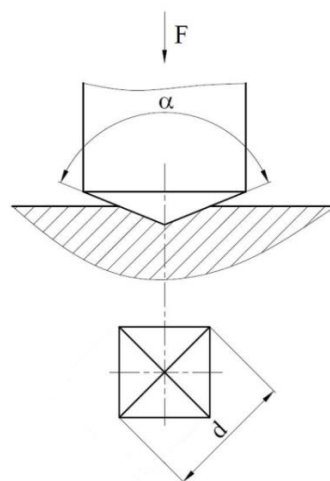


Рисунок 5.8 – Измерение твёрдости по методу Виккерса

Значение микротвёрдости вычислялось в соответствии с выражением [12]:

$$H_v = 9,81 \cdot \frac{1854 \cdot P}{d^2},$$

где  $H_v$  – микротвёрдость, МПа;

$P$  – нагрузка, гр.;

$d$  – диагональ отпечатка, мкм.

Например,  $P = 100$  гр;  $d = 0,76 \cdot 30,5 = 23,18$  мкм,

где  $0,76$  – диагональ отпечатка, лб;

$30,5$  – цена деления барабана микротвердомера ПМТ-3 [3], мкм.

$$H_v = 9,81 \cdot \frac{1854 \cdot 100}{23,18^2} = 3384,95 \text{ МПа (345,05 кг/мм}^2\text{)}.$$

Измерение параметра элементарной ячейки при термоциклировании выполнено на рентгеновском аппарате ДРОН-2.0 с применением медного антикатада с длиной волны  $\lambda = 1,54178 \text{ \AA}$ .

Параметр кристаллической кубической решётки для  $\alpha$ -фазы по дифракционной линии (110) и для  $\gamma$ -фазы по дифракционной линии (111) определялся в соответствии с выражением [13]:

$$a = d \cdot \sqrt{H^2 + K^2 + L^2} = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \sqrt{H^2 + K^2 + L^2},$$

где  $a$  – параметр элементарной ячейки;  
 $d$  – межплоскостное расстояние;  
 $H, K, L$  – индексы Миллера дифракционной линии;  
 $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, Å;  
 $\theta$  – угол дифракции, определяемый по положению «центра тяжести» дифракционной линии  $\theta_{ц.т.}$ .

В качестве эталонных значений  $a_0$  приняты параметры элементарных ячеек из зон 2 и 17 (рис. 5.2), наиболее удалённых как от сварного шва, так и от мест торцевания. При этом следует различать фазу  $\alpha$ -Fe для исходной трубы из стали 12X1МФ, фазу  $\alpha$ -Fe, полученную из аустенита в процессе операции сварки (высоких нагревов), и фазу  $\gamma$ -Fe для исходной трубы из стали 12X18Н9Т.

Для них получены следующие значения:

- для  $\alpha$ -Fe у стали 12X1МФ  $a_0 = 2,875$  Å;
- для  $\alpha$ -Fe, полученную в стали марки 12X18Н9Т после высокого нагрева при сварке  $a_0 = 2,882$  Å;
- для  $\gamma$ -Fe у стали марки 12X18Н9Т  $a_0 = 3,599$  Å.

Зональные напряжения  $\sigma_I$  определялись методом РФА в соответствии с законом Гука по выражению [14]:

$$\sigma_I = \frac{\Delta a}{a} \cdot E = \frac{a_0 - a_i}{a_0} \cdot E,$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости, МПа;  
 $a_i, a_0$  – соответственно текущее значение параметра элементарной ячейки и значение параметра элементарной ячейки эталона, Å.

Модуль нормальной упругости для сварного соединения равен  $E = 205000$  МПа при температуре измерения  $t = 20$  °С [15].

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5BM5A	Кавун Дмитрию Александровичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ПГС и ПГУ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Энергетическое машиностроение

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Дрон 2.0 – 2280000 руб. Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб., Потенциометр – 5400 руб., Милливольтметр – 2700 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	–
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Дополнительная зарплата – 10 %; Районный коэффициент – 30 %; Отчисления на социальные нужды – 27 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Инициализация проекта Определение потенциальных потребителей
2. Разработка устава научно-технического проекта	Разработка устава не требуется
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Планирование работ по проекту Формирование сметы проекта
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение ресурсной и экономической эффективности исследования

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Таблица 1 – Состав и структура длительности НИР
2. Таблица 2 – Планирование НИР
3. Таблица 3 – Основная заработная плата участников НИР
4. Таблица 4 – Линейный график НИР
5. Таблица 5 – Календарный план-график выполнения НИР
6. Таблица 6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры МЕН	Грахова Елена Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5BM5A	Кавун Дмитрий Александрович		

## 7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение

Темой проекта является исследование сварного соединения, выполненного из сталей 12X1МФ и 12X18Н9Т для паропровода энергетического котла.

Настоящий проект посвящен одной из актуальнейших проблем тепловой энергетики – обеспечению длительной и надежной эксплуатации сварных элементов энергетических паропроводов.

Результаты данного исследования могут широко применяться для прогнозирования, а также оценки продления срока службы сварных соединений элементов трубопроводов и отдельных конструкций, применяемых в котельных агрегатах в целом.

Цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» – определение разрабатываемого проекта, оценка его эффективности, разработка поэтапного проведения исследования, расчёт её себестоимости, а также определение финансовой, ресурсной, экономической эффективности результатов исследования.

### 7.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала

Критериями технической эффективности совершенствования того или иного технологического процесса являются повышение потребительских свойств (точность, прочность, эксплуатационный ресурс и другие характеристики), получаемого в результате изделия. Критериями экономической эффективности могут быть как количественные характеристики (снижение затрат, повышение дохода, снижение трудоёмкости), так и качественные (повышение качества продукции, её конкурентоспособности и т.д.). Эффективная технологическая инновация должна основываться на оптимальном соотношении повышения технических и экономических характеристик процесса.

Обоснование технической эффективности технологической инновации основано на достижении оптимального сочетания факторов из каждой группы. В результате обеспечения качества сварного соединения обеспечиваются повышение надёжности конструкции (изделия), снижение уровня дефектов (брака) производства, а также повышение экономической эффективности производственного процесса через снижение трудоёмкости выполняемых работ, потребление ресурсов и увеличение производительности труда. При этом оптимальное сочетание технических характеристик должно учитывать экономическую эффективность технологической инновации, т.е. приводить к снижению общего уровня затрат на производство продукции и (или) к повышению доходов.

Сварное соединение является самым ответственным узлом паро- и трубопроводов котельного агрегата, но и самым потенциально-опасным элементом, определяющим работоспособность энергооборудования.

Соответственно, анализ средств диагностики качества сварного шва и послесварочной тепловой обработки (методы магнитной памяти, магнитопорошковой дефектоскопии, акустической эмиссии, микроструктурного анализа и др.) показывает, что существует необходимость совершенствовать методы диагностики, которые бы устанавливали связи между микроструктурным состоянием, внутренними напряжениями, накоплением структурной поврежденности за счет перераспределения структурных напряжений при механических и термических возмущениях и ресурсом.

Основными потребителями труб являются энергетические станции различной мощности, нефтеперерабатывающие предприятия (применение в установках различных видов крекинга, печах пиролиза) России, стран СНГ и ближнего зарубежья, котлостроительные заводы, водогрейные котельные.



## 7.2 Организация и планирование НИР

Планирование НИР – это процесс, включающий в себя составление перечня работ, которые необходимы для достижения поставленной задачи, при этом определяются участники каждой работы, устанавливается продолжительность работ в рабочих днях, а также строится и оптимизируется линейный график.

Таким образом, для выполнения НИР в срок при наименьших затратах средств, составляется план, в котором устанавливается число участников работы по этапам, т.е. определяется фронт работы. Количество участников должно быть максимально возможным по условиям выполнения того или иного этапа, с другой стороны, на каждом этапе должны принимать участие только те работники, которые действительно необходимы для проведения данного этапа в соответствии со своей специализацией.

## 7.3 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал

Прежде всего рассчитывается смета расходов, включающая в себя затраты на приобретение необходимого оборудования для проведения НИР и текущие расходы [21].

Затраты, которые образуют себестоимость работ, группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

- затраты на оплату труда;
- материальные затраты;
- амортизация основных фондов и нематериальных активов;
- отчисления на социальные нужды;
- прочие затраты.

Состав и структура длительности НИР представлены в таблице 1.1.

Таблица 7.1 – Состав и структура длительности НИР

Наименование работ	Продолжительность, %
1. Научно-теоретические исследования:	
Обоснование методики исследования	5
Разработка теоретической части темы	12
Подготовка к эксперименту	23
Экспериментальные работы	45
Анализ, выводы и предложения	10
Завершающий этап	5
Итого:	100
2. Экспериментальные работы:	
А) Изготовление образца из трубной стали;	5,5
Б) Съемка рентгенограммы	4,5
ИТОГО:	100

Для того, чтобы определить ожидаемое значение продолжительности работы применяют формулу, которая основана на использовании двух оценок:

$$t_{\text{ож.}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min}} + 2 \cdot t_{\text{max}}}{5},$$

где  $t_{\text{min}}$  – кратчайшая продолжительность работы;

$t_{\text{max}}$  – самая длительная продолжительность работы.

Планирование НИР представлено в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Планирование НИР

Наименование работ	Продолжительность работ, дни			Исполнитель
	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{ож}}$	
Постановка задач	1	1	1	Руководитель группы
Ознакомление с литературой	7	14	10	Инженер
Анализ исходной информации	6	8	7	Инженер
Наладка оборудования	7	14	10	Техник, лаборант
Наработка оборудования на отказ, устранение неисправностей	7	7	7	Техник, лаборант
Эксперимент	45	55	49	Лаборант
Обработка результатов	14	20	16	Лаборант
Обработка результатов	14	20	16	Программист
Анализ результатов, выводы	5	7	6	Инженер
ИТОГО:	106	146	122	

Основная заработная плата участников НИР представлена в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Основная заработная плата участников НИР

Наименование работ	Трудоемкость, чел. Дни					Дневная ставка, руб.	Суммарная заработная плата, руб.
	Руководитель	Инженер	Техник	Лаборант	Программист		
Постановка задач	1					300	300
Ознакомление с литературой		10				175	1750
Анализ исходной информации		7				175	1225
Наладка оборудования			10	10		175 150	1750 1500
Наработка на отказ, устранение неисправностей			7	7		175 150	1225 1050
Эксперимент				49		150	7350
Обработка результатов				16		150	2400
Обработка результатов					16	175	2800
Анализ результатов, выводы		6				175	1050
ИТОГО	1	23	17	82	16	1950	22400

Линейный график показан в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Линейный график НИР

Должность	Дни												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Руководитель													
Инженер													
Техник													
Лаборант													
Программист													

Календарный план-график выполнения НИР представлен в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Календарный план-график выполнения НИР

Наименование работ	t <sub>ож</sub> , дни	Удельный вес		Дни													Должность
		%	Нарастающий, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
Постановка задач	1	0,82	0,82														Руководитель
Ознакомление с литературой	10	8,20	9,02														Инженер
Анализ исходной информации	7	5,74	14,76														Инженер
Наладка оборудования	10	8,20	22,96														Техник, лаборант
Наработка на отказ, устранение неисправностей	7	5,74	28,70														Техник, лаборант
Эксперимент	49	40,16	68,86														Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	81,97														Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	95,08														Программист
Анализ результатов, выводы	6	4,92	100														Инженер

Итого	122	100			
-------	-----	-----	--	--	--

### 7.3 Смета затрат на НИР

#### 7.3.1 Материальные затраты на оборудование:

Рентгеновский дифрактометр ДРОН-2 – 2280000 руб.

Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб.,

Потенциометр – 5400 руб.,

Милливольтметр – 2700 руб.

Итого:  $K_{\text{мат.зат}} = 3228100$  руб.

#### 7.3.2 Затраты на оплату труда

$$З_{\text{осн}} = 22400 \text{ руб.},$$

$$З_{\text{доп}} = 0,1 \cdot З_{\text{осн}} = 0,1 \cdot 22400 = 2240 \text{ руб.},$$

$$P_{\text{коэф.}} = 0,3 \cdot 22400 = 6720 \text{ руб.},$$

$$З_{\text{общ}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} + P_{\text{коэф.}} = 31360 \text{ руб.}$$

#### 7.3.3 Отчисления на социальные нужды

$$C_{\text{нужды}} = 0,27 \cdot З_{\text{общ}} = 8467,2 \text{ руб.}$$

#### 7.3.4 Амортизация основных фондов

$$\begin{aligned} U_{\text{аморт}} &= 0,11 \cdot K_{\text{мат.зат}} \cdot (\text{вр.экспл.обор.} + \text{вр. наладки}) = \\ &= 0,11 \cdot 3228100 \cdot 0,085 = 30182,74 \text{ руб.} \end{aligned}$$

#### 7.3.5 Прочие затраты

Оплата электрической и тепловой энергии, оплата за воду

$$U_{\text{электр.уст.}} = N_{\text{уст.}} \cdot t_{\text{вр.}} \cdot C_{\text{электр.}} = 5 \text{ кВт/час} \cdot 448 \text{ час} \cdot 2,93 \text{ руб.кВт/час} = 6563,2 \text{ руб.}$$

$$U_{\text{электр.освещ.}} = 0,6 \cdot 10 \cdot 82 \cdot 2,93 = 1441,56 \text{ руб.}$$

$$U_{\text{на тепло}} = 1061,54 \cdot 4 = 4246,16 \text{ руб.}$$

$$U_{\text{на воду}} = 183,5 \cdot 4 = 734 \text{ руб.}$$

#### 7.3.6 Командировочные расходы:

$$U_{\text{команд.}} = 0,12 \cdot З_{\text{общ}} = 0,12 \cdot 31360 = 3763,2 \text{ руб.}$$

#### 7.3.7 Представительские расходы

$$U_{\text{предст.}} = 0,02 \cdot (З_{\text{общ}} + C_{\text{нужды}} + U_{\text{аморт.}}) =$$

$$=0,02 \cdot (31360 + 8467,2 + 30182,74) = 1400,20 \text{ руб.}$$

#### 7.3.8 Затраты на обеспечение нормальных условий труда и ТБ

$$З_{тб}=0,1 \cdot З_{общ}=0,1 \cdot 31360 = 3136 \text{ руб.}$$

#### 7.3.9 Расходы, связанные с управлением

$$Р_{упр.}=1,5 \cdot З_{общ}=1,5 \cdot 31360 = 47040 \text{ руб.}$$

#### 7.3.10 Себестоимость по НИР

$$\begin{aligned} С &= К_{\text{мат.зат.}} + З_{\text{общ}} + С_{\text{нужды}} + U_{\text{аморт.}} + U_{\text{электр.уст.}} + U_{\text{электр.освещ}} + \\ &+ U_{\text{на тепло}} + U_{\text{на воду}} + U_{\text{команд}} + U_{\text{предст}} + З_{\text{тб}} + Р_{\text{упр.}} = \\ &= 3228100 + 31360 + 8467,2 + 30182,74 + 6563,2 + 1441,56 + 4246,16 + \\ &+ 734 + 3763,2 + 1400,20 + 3136 + 47040 = 3366434,26 \text{ руб.} \end{aligned}$$

### 7.4 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности результатов исследования

При сравнительной оценке эффективности исследования рассмотрим интегральный показатель эффективности разработки. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности [21].

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}} = \frac{3228100}{3366434,26} = 0,959,$$

где  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p,$$

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a,$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$ ,  $b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путём по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

соединение 12X1МФ и 12X18Н9Т, 12X18Н9Т, 12X1МФ. Критерии	Весовой коэффициент параметра	соединение 12X1МФ с 12X18Н9Т	Натурный эксперимент	12X18Н9Т (справочные данные)	12X1МФ (справочные данные)
1. Физические свойства	0,1	4	3	3	3
2. Механические свойства	0,15	5	1	3	3
3. Длительная прочность	0,15	4	3	4	3
4. Ползучесть	0,20	4	3	3	3
5. Надёжность	0,25	5	5	4	3
ИТОГО	1	4,4	2,66	3,4	3

Из таблицы 7.6 видно, что самый низкий интегральный показатель ресурсоэффективности при проведении натурного эксперимента. Для



дальнейших расчётов будут использованы показатели соединения 12Х1МФ с 12Х18Н9Т и отдельно сталей 12Х18Н9Т и 12Х1МФ (справочные данные).

Интегральный показатель эффективности соединения 12Х1МФ с 12Х18Н9Т и сталей 12Х18Н9Т и 12Х1МФ в отдельности (справочные данные) определяется на основании интегрального финансового показателя и интегрального показателя ресурсоэффективности по формулам:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p} = \frac{4,4}{0,959} = 4,588 ,$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{3,4}{0,959} = 3,545 ,$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a} = \frac{3,0}{0,959} = 3,128 .$$

Сравнительная эффективность проекта определяется по формулам:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{4,588}{3,545} = 1,294 ,$$

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{4,588}{3,128} = 1,466 .$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{мэ}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{мэ}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В результате данного расчёта было выявлено, что, если сравнивать по интегральному показателю соединение 12Х1МФ с 12Х18Н9Т и стали марок 12Х18Н9Т и 12Х1МФ, то соединение 12Х1МФ с 12Х18Н9Т на 1,294 эффективнее 12Х18Н9Т и на 1,466 эффективнее 12Х1МФ.

В ходе работы был произведён расчёт себестоимости научно-исследовательской работы, проведена планировка выполнения работ, определены участники и построены линейные и календарные графики. В

конечном итоге себестоимость данной НИР определена и составляет 3366434,26 руб.

## Список публикаций

1 Кавун Д. А., Фисенко Р. Н. Методика исследований внутренних напряжений сварных соединений разнородных сталей // Молодая мысль – развитию энергетики: материалы I(XVI) Всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов, Братск, 19-22 Апреля 2016. - Братск: БрГУ, 2016 - С. 149-153.

2 Бреус С. С., Кавун Д. А., Рудаков Р. А. Методика исследования структурной устойчивости композитных сварных соединений // Молодая мысль – развитию энергетики: материалы I(XVI) Всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов, Братск, 19-22 Апреля 2016. - Братск: БрГУ, 2016 - С. 126-130