

**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
«Анализ структурной устойчивости участка трубы из стали 12Х18Н9Т разнородного сварного узла паропровода энергетического котла»

УДК 621.186.3-034.1:621.791.05

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ5Б	Бреус Сергей Сергеевич		

Руководитель

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

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Бородин Юрий Викторович	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПГС и ПГУ	Заворин Александр Сергеевич	Д.Т.Н., профессор		

Томск – 2017 г.

Запланированные результаты обучения по ООП 13.04.03  
«Энергетическое машиностроение»

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
Универсальные компетенции		
Р1	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 EUR-ACE и FEANI
Р2	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 EUR-ACE и FEANI
Р3	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 EUR-ACE и FEANI
Р4	Способность и готовность проявлять в	Требования ФГОС ВО (ОК-1;

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте	ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п. 1.1.), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
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 EUR-ACE и FEANI
<b>Профессиональные компетенции</b>		
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 EUR-ACE и FEANI
P7	Способность и готовность ставить и решать инновационные задачи инженерного профиля, анализировать, искать и выработать 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 EUR-ACE и FEANI
P8	Способность и готовность проводить инновационные инженерные исследования, технические испытания и (или) сложные эксперименты, формулировать выводы в условиях	Требования ФГОС ВО (ОПК-1,2; ПК-4,5,6), Критерий 5 АИОР (п. 1.4, п. 1.6.), согласованный с

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	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	требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
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 EUR-ACE и FEANI
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 EUR-ACE и FEANI

**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 ПГС и ПГУ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись) \_\_\_\_\_ (Дата) Заворин А.С.  
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ5Б	Бреус Сергею Сергеевичу

Тема работы:

Анализ структурной устойчивости участка трубы из стали 12Х18Н9Т разнородного сварного узла паропровода энергетического котла
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	08.02.2017 г, №687/с
---	----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2017 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду; энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сварной узел экранной трубы теплогенератора энергетического котла.</li> <li>2. Энергетическая трубная жаростойкая, жаропрочная аустенитная сталь марки 12Х18Н9Т.</li> <li>3. Энергетическая трубная сталь марки 12Х18Н9Т после термоциклирования в состоянии, имитирующем эксплуатационные условия.</li> <li>4. Исследование процесса сопротивления термоциклическому влиянию.</li> </ol>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Введение (обоснование актуальности работы, постановка цели и задач исследования).</li> <li>2. Генезис внутренних напряжений</li> <li>3. Термовосстановление элементов энергетического оборудования и трубопроводов. Проблемы. Диагностика. Критерии</li> <li>4. Методика эксперимента</li> <li>5. Экспериментальные результаты. Обсуждение.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Грахова Елена Александровна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Бородин Юрий Викторович</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Реферат</p>	
<p>Введение</p>	
<p>Исследование структуры зон разнородных сварных соединений труб в паропроводе</p>	
<p>Заключение</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>13.03.2017 г.</p>
--	----------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент кафедры ПГС и ПГУ</p>	<p>Любимова Л.Л.</p>	<p>к.т.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5ВМ5Б</p>	<p>Бреус Сергей Сергеевич</p>		<p>14.03.2017 г.</p>

## Реферат

Диссертационная работа состоит из 160 страниц, 57 рисунков, 62 источников.

Ключевые слова: нержавеющая сталь, сварное соединение, термоциклирование, микротвёрдость, внутренние остаточные напряжения I рода, рентгенофазовый анализ, рентгенофлуоресцентный анализ.

Объект исследования – поперечные образцы из околошовной зоны (ОШЗ), зоны термического влияния сварки (ЗТВ), продольный образец из ЗТВ и ОШЗ.

Цель исследования: работа направлена на обеспечение прочностных и ресурсных характеристик критических зон сварного узла, предназначенного для теплогенератора энергетического котла и выполненного из разнородных сталей 12Х1МФ и 12Х18Н9Т.

Цель работы достигается выполнением следующих задач:

- а) исследованием распределения легирующих элементов в критических зонах сварного узла с применением микрорентгеноспектрального анализа;
- б) определением зональных напряжений в критических зонах сварного узла;
- в) установлением распределения микротвёрдости при термоциклировании;
- г) рентгенофазовым анализом критических зон сварного узла.

Для исследования применены методы рентгеноспектрального анализа с применением рентгенофлуоресцентного анализатора SKYRAY EDX 2800, рентгенофазового анализа с применением рентгеновского аппарата ДРОН-2.0 и микротвердомерии с применением микротвердомера ПМТ-3.

По результатам исследования сформулирована научная новизна, практическая значимость.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

ОШЗ – околосшовная зона

ЗТВ – зона термического влияния сварки;

ОЦК – объёмно-центрированная кубическая решётка;

ГЦК – гранецентрированная кубическая решётка;

КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;

МКК – межкристаллитная коррозия;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

РСА – рентгеноструктурный анализ;

РФА – рентгенофазовый анализ;

МЗГ – межзеренная граница;

(*hkl*) – индексы Миллера атомной плоскости;

$E$  – модуль нормальной упругости, МПа;

$d$  – средний размер кристаллита, Å ;

$a$  – параметр элементарной ячейки, Å ;

$\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, Å ;

$\theta$  – угол дифракции, град;

$T$  – температура, К;

$\sigma_I$  – макронапряжения I рода, МПа;

$\sigma_B$  – временное сопротивление, МПа;

$\sigma_{0.2}$  – условный предел текучести, МПа.



Введение.....	11
1 Структурные, физические, и термические особенности сталей 12Х1МФ и 12Х18Н9Т.....	13
2 Генезис внутренних структурных напряжений.....	15
2.1 Происхождение внутренних напряжений I-го рода.....	16
2.2 Происхождение внутренних напряжений II-го рода.....	17
2.3 Роль внутренних напряжений в проблемах прочности поверхностей нагрева котельного оборудования.....	17
2.4 Связь внутренних напряжений с микротвёрдостью, механическими характеристиками тепловых сталей и ресурсом.....	19
3 Термовосстановление элементов энергетического оборудования и трубопроводов. Проблемы. Диагностика. Критерии.....	22
4 Методика эксперимента.....	26
4.1 Материал. Образцы. Схема вырезки образцов.....	26
4.2 Рентгенофазовый анализ.....	29
4.3 Микротвердометрия.....	29
4.4 Методика исследований.....	30
5 Экспериментальные результаты. Обсуждение.....	36
5.1 Результаты рентгенофлюоресцентного анализа исходных образцов № 1 и № 2.....	36
5.2 Распределение макронапряжений в зависимости от температуры термоцикла.....	38
5.3 Распределение микротвёрдости при термоциклировании.....	54
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение.....	66
6.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала.....	66
6.2 Организация и планирование НИР.....	67

6.3	Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал.....	67
6.4	Смета затрат на НИР.....	69
6.5	Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности результатов исследования.....	73
7	Социальная ответственность.....	78
7.1	Производственная безопасность.....	78
7.2	Экологическая безопасность.....	89
7.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	92
7.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	93
	Заключение.....	95
	Список опубликованных работ по теме диссертации.....	96
	Список использованных источников.....	97
	Приложение А.....	103
	Приложение Б.....	111
	Приложение В.....	112

## Введение

Вопросы надёжности работы теплоэнергетического оборудования и оценки его технического состояния с целью последующего прогнозирования работоспособности и ресурса относятся к числу наиболее актуальных в энергетике [1–3]. Надёжная работа поверхностей нагрева парогенераторов и котлов обеспечивается гарантированными конструктивными и режимными параметрами эксплуатации, проведением подготовительных термических операций на этапе монтажа и пусконаладочных работ [4, 5].

Ресурс во многом определяется структурной однородностью поверхностей нагрева, которая может изменяться в процессе транспортировки, хранения и эксплуатации в условиях развития механизмов деградации за счёт усталости металлов, теплового старения, коррозии, эрозии, образования и развития микротрещин [6].

Контроль структурной неоднородности труб позволяет производить оценку степени локализованности дефектов, а восстановление физических свойств металла труб по данным диагностики обеспечивает его дальнейшую эксплуатацию без повреждений [7].

Огромную роль приобретает качество труб и технологии их изготовления. Отмечается [1] и мн. др., что 80...85 % вынужденных остановов котлов ТЭС связано с повреждениями трубных поверхностей нагрева.

Трубы, из которых изготавливают поверхности нагрева, в состоянии поставки из-за сложной технологической цепи их обработки волочением, прокаткой, отжигом и т. д. приобретают анизотропию свойств, обусловленную гетерогенностью и несплошностью структуры, что обеспечивает разброс величин механических характеристик по длине трубы и толщине стенки.

Основными конструкционными материалами для изготовления пароперегревателей котлов СКД в России, включая их сварочные узлы, являются аустенитные стали 12Х18Н9Т и стали перлитного класса 12Х1МФ. Рассчитанные на ресурс работы порядка 300 тыс.ч., они разрушаются по разным причинам гораздо раньше [8]. Сварные соединения наряду с гибами

относятся к наиболее часто повреждаемым элементам паропроводов теплоэнергоустановок [9]. Характерным состоянием для сварных соединений является наличие химических, структурных, механических и геометрических неоднородностей, являющихся концентратором напряжений [10]. Одной из существенных причин преждевременных разрушений может выступать ускорение структурной деградации стали в результате циклических механических и температурных градиентов [11]. Структурные превращения оказывают особенно негативное влияние на сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. При проведении технического диагностирования сварных соединений на основании ряда отраслевых научно-технических документов предусматривается исследование состава, структуры и свойств металла.

Известно, что температура относится к основным факторам влияния на узлы тепломеханического оборудования, т.к. почти все структурные превращения являются термоактивированными.

В этой связи исследование структуры материала при термических нагрузках в опасных зонах сварного узла остаётся актуальной задачей.

Цель исследования: работа направлена на обеспечение прочностных и ресурсных характеристик критических зон сварного узла, предназначенного для теплогенератора энергетического котла и выполненного из разнородных сталей 12X1МФ и 12X18Н9Т.

Цель работы достигается выполнением следующих задач:

- а) исследованием распределения легирующих элементов в критических зонах сварного узла с применением микрорентгеноспектрального анализа;
- б) определением зональных напряжений в критических зонах сварного узла;
- в) установлением распределения микротвёрдости при термоциклировании;
- г) рентгенофазовым анализом критических зон сварного узла.

# 1 Структурные, физические и термические особенности сталей 12Х1МФ и 12Х18Н9Т

Перлитная сталь 12Х1МФ широко используется в пароперегревателях, трубопроводах высокого и сверхвысокого давлений для весьма длительной службы при температурах до 585 °С и представляет собой жаропрочный низколегированный сплав на основе железа с повышенными жароустойчивыми характеристиками. Основные характеристики прочности и пластичности (при  $t = 20$  °С): предел прочности  $\sigma_s = 520$  МПа, предел пластичности  $\sigma_{0,2} = 330$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 25$  %, относительное сужение  $\psi = 67$  % [12].

При использовании изделий из этого сплава, при температуре свыше 600 °С, на поверхности появляется окалина. Данная марка стали может поставляться как в необработанном, так и обработанном термически виде.

Свариваемость этой марки стали можно обозначить как ограниченно свариваемую или трудносвариваемую. Это означает, что перед началом работ необходимо провести термическую обработку нагревом изделия до 100–110 °С (для ограниченно свариваемой) или до 200–300 °С (для трудносвариваемой), после чего необходимо провести термическую обработку и отжиг.

Сталь 12Х18Н9Т – сталь коррозионно-стойкая, жаропрочная и жаростойкая аустенитного класса. Применяется для изготовления теплообменников, деталей печной арматуры, поковок энергетического оборудования, деталей выхлопных систем, крепежа с рабочей температурой до 600 °С. Жаростойкий материал для печей с рабочей температурой до 600 °С [13]. Основные характеристики прочности и пластичности (при  $t = 20$  °С):  $\sigma_s = 560$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 230$  МПа,  $\delta = 46$  %,  $\psi = 66$  % [12].

С увеличением температуры коэффициент теплопроводности стали 12Х18Н9Т увеличивается. Свариваемость у данной стали не имеет ограничений.

Проблема сварных швов из разнородных сталей сводится к тому, что свариваемые материалы имеют различные химические, механические,

физические и теплофизические характеристики. Сварной узел сам по себе представляет проблемную конструкцию, а перечисленные особенности узлов из разнородных сталей усугубляют решение проблемы надёжности оборудования, включающего сварные узлы.

Характерной особенностью сварных узлов, в том числе и из разнородных сталей является резкая неоднородность свойств в критически важных зонах узла – околошовной зоне и в зоне термического влияния сварки. Эти обстоятельства делают актуальной работу по исследованию структурной устойчивости зон сварного узла и, кроме того, актуализируют совершенствование применяемых методов диагностики и систем эксплуатационного контроля.

## 2 Генезис внутренних структурных напряжений

Внутренними (остаточными) называются напряжения, уравнивающиеся внутри тела без приложения к нему внешних сил. Они существуют в теле независимо от внешних воздействий (силовых и температурных), возникают вследствие неоднородности линейных или объёмных деформаций в смежных объёмах тела и остаются в нём после удаления вызвавших их внешних причин [14, 15].

В соответствии с объёмами тел, в которых они возникают, различают макро-, микро- и субмикроскопические напряжения (напряжения первого, второго и третьего рода). Первые научные исследования по остаточным напряжениям принадлежат Родману (1857 г.), И. А. Умнову (1871 г.) и Н. В. Калакутскому (1887 г.), которые впервые предложили метод измерения внутренних напряжений [16]. Однако эти работы долгое время оставались незамеченными и только с 20-х годов прошлого века было обращено серьёзное внимание на изучение вопросов, связанных с внутренними напряжениями [14].

Вопросу «классификация и номенклатура внутренних напряжений» был посвящён доклад Е. Орована на Симпозиуме по внутренним напряжениям в металлах и сплавах (Лондон, 1948 г.), в котором определение внутренних напряжений отвечало понятию «внутреннего напряжения», введённому ещё Н.В. Калакутским.

Ещё в 30-е годы Н. Н. Давиденковым и Г. Заксом были начаты всесторонние исследования остаточных напряжений. Наиболее полная и точная классификация внутренних напряжений была предложена Н. Н. Давиденковым [17]. Согласно этой классификации внутренние напряжения могут быть трёх видов:

– напряжения первого рода или макронапряжения, уравнивающиеся в объёмах, соответствующих размерам изделия;

– напряжения второго рода – иначе кристаллитные или микронапряжения, уравнивающиеся в объёмах соответствующих

размерам кристаллитов. Эти напряжения определимы только рентгеновским методом по размытию (уширению) интерференционных линий на рентгенограмме;

– напряжения третьего рода, иначе искажения кристаллических решёток, уравнивающиеся в объёмах, соизмеримых с размерами элементарной ячейки. Эти искажения определяются также только рентгеновским методом – по ослаблению интенсивности линий высшего порядка отражений и по усилению диффузионного фона.

Так как напряжения уравниваются внутри тела, они не бывают одного знака.

## **2.1 Происхождение внутренних структурных напряжений I-го рода**

Внутренние напряжения I-го рода возникают меж отдельными зонами сечения и между разными частями детали. Чем больше градиент температур по сечению, образующийся при термообработке и находящийся в зависимости от скорости и равномерности остывания, размера детали и ряда иных обстоятельств, тем большего значения достигают внутренние напряжения I-го рода. Внутренние напряжения первого рода по-другому именуют макронапряжениями либо зональными напряжениями. Эти напряжения наиболее опасны в деталях конструкций, т.к., складываясь с внешними нагрузками при превышении в сумме напряжений пределы текучести материала, они приводят к разрушению, растрескиванию, короблению изделий. Кроме того, макронапряжения могут придавать металлу хрупкость и уменьшать его коррозионную прочность [17], вызывать преждевременное изменение структуры, уменьшать жаропрочность, снижать механические характеристики, приводить к разрушению металла сварных соединений [18] и т.д. В целом, эти напряжения относятся к зонам между зёрнами (межзёрные напряжения, т.е. зональные). Их возникновение определяется разнотекучестью материала, разбросом зёрен по ориентировкам, химической неоднородностью.



## **2.2 Происхождение внутренних структурных напряжений II-го рода**

Внутренние напряжения второго рода образуются внутри зерна между соседними кристаллитами (ОКР – областями когерентного рассеивания). Они возникают вследствие разных коэффициентов линейного расширения зёрен и разного химического состава. Так как внутренние напряжения II-го рода возникают между отдельными кристаллитами, их иногда называют структурными микронапряжениями. Но главное различие между макро- и микронапряжениями заключается в масштабном факторе, т.е. они определяют масштаб объекта, в котором они возникают.

## **2.3 Роль внутренних напряжений в проблемах прочности поверхностей нагрева котельного оборудования**

Если говорить о проблеме прочности, то нельзя не касаться вопросов внутренних напряжений, т.к. учёт их в ряде отраслей играет решающую роль. Эти вопросы важны с точки зрения диагностики, определения того, что под одним воздействием получается такое-то напряжение, под другим – другое напряжение. При этом необходимо не только уничтожать, парализовать эти напряжения, но добиваться, чтобы внутренние напряжения были полезны, т.е. исследовать вопросы упрочнения [19].

О прочности в своё время говорил ещё Галилей (1638 г.), который установил, что при растяжении или сжатии нагрузка разрушения  $P$  для данного материала зависит только от площади поперечного сечения  $F$ . Так появилась новая физическая величина – напряжение разрушения [20].

Физика разрушения как фундаментальная наука о прочности металлов возникла в конце 40-х годов XX века. Это было продиктовано острой необходимостью разработки научно обоснованных мер для предотвращения участвовавших катастрофических разрушений машин и сооружений. Раньше в области прочности и разрушения изделий учитывалась только классическая механика, основанная на постулатах однородного упруго-пластического твёрдого тела, без учёта внутренней структуры металла. Физика разрушения

учитывает также атомно-кристаллическое строение решётки металлов, наличие дефектов металлической решётки и законы взаимодействия этих дефектов с элементами внутренней структуры металла: границами зёрен, второй фазой, неметаллическими включениями и др [21].

Усталостная прочность деталей очень сильно зависит от величины, знака и глубины распространения внутренних напряжений поверхностного слоя. Многочисленными исследованиями установлено, что при наличии в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия предел выносливости детали повышается, а при наличии остаточных напряжений растяжения – снижается, причём остаточные напряжения сжатия в большей мере повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения. Для сталей повышенной твёрдости повышение предела усталости благодаря действию сжимающих напряжений достигает 50 %, а снижение его под действием растягивающих – 3 % [22].

К повышению прочности металла приводят целенаправленно изменения металлической структуры, в том числе – модифицирование сплава.

Внутренние напряжения первого и второго рода представляют собой в рентгенометрии сумму главных напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ . Этим самым получаемые результаты выгодно отличаются от результатов, получаемых по пяти существующим в настоящий момент теориям прочности, каждая из которых учитывает либо одно главное напряжение, либо сочетание двух главных напряжений.

Теории прочности используются для оценки прочности конструкций в случае плоского и объёмного напряжённых состояний. Суть теорий прочности заключается в том, что, определив главную причину разрушения материала (преимущественное влияние того или иного фактора), можно подобрать соответствующее эквивалентное напряжение при сложном напряжённом состоянии, а затем сопоставить его с простым одноосным растяжением [23].

Положительная роль внутренних напряжений является резервом прочности в машиностроении. Но в большинстве случаев они играют

отрицательную роль, т.к. далеко не всегда удаётся получить их благоприятное распределение по объёму изделия.

И. А. Одинг [24] отмечал, что при уменьшении дислокаций растёт сопротивляемость материала деформированию, которая является критерием прочности. Следовательно, внутренние напряжения, отражая сопротивляемость материала деформированию, являются критерием прочности и участвуют в формировании тех свойств, которые определяют его пригодность к службе под напряжением и температурой.

## **2.4 Связь внутренних напряжений с микротвёрдостью, механическими характеристиками тепловых сталей и ресурсом**

Рентгеновский дифракционный анализ «способен различать» структурные напряжения первого и второго рода, поэтому он применяется в работе как базовый метод исследования, который дополняется контрольными методами исследований, такими как микротвердометрия и микрорентгеноспектральный анализ.

Известно, что одним из количественных показателей механических свойств металлических материалов является микротвёрдость. Микротвёрдость представляет сопротивление материала упругому и пластическому деформированию при внедрении жёстким индентором (стальной шарик, алмаз) и обобщённо характеризует механическую прочность кристаллической решётки в условиях сложного и неоднородного объёмного напряжённого состояния [25].

К наиболее частым механическим характеристикам тепловых сталей можно отнести такие характеристики, как твёрдость, пределы прочности и упругости, ударная вязкость.

Так как происхождение внутренних напряжений связывается с неоднородностями структуры – зёрен и их ориентировок, границ зёрен, отдельных фрагментов, формирующих структурные напряжения, то и механические свойства различных участков поверхности будут различны [26].

Внутренние напряжения, возникающие при технологических процессах изготовления деталей (отливке, термической обработке, правке, сварке и т.п.), а также напряжения, появляющиеся в процессе эксплуатации, представляют не меньшую опасность, усугубляющуюся тем, что во многих случаях неизвестны величины и характер их распределения по сечению и объёму изделия. Существенное понижение прочности деталей нередко получается именно в результате действия этих напряжений, возникновение которых иногда связано лишь с незначительным нарушением технологического режима.

Обнаружить неблагоприятное распределение внутренних напряжений в деталях или пониженную твёрдость поверхностных слоёв часто затруднительно. Обычно эти дефекты не отражаются на твёрдости, измеряемой общепринятыми (по Роквеллу, Бринеллю) или специальными (микротвёрдость) методами. В первом случае на результатах твёрдости отражается влияние глубже расположенных слоёв, во втором разброс, связанный с различной твёрдостью отдельных составляющих микроструктуры, столь велик, что не позволяет сделать определённых выводов.

Известные методы прогнозирования и оценки остаточного ресурса мало учитывают влияние собственных внутренних напряжений, которые, складываясь с внешними нагрузками, могут привести к разрушению как сварной конструкции, так и изделия в целом.

В ряду факторов, практически не учитываемых в процессах деградации материалов трубно-оболочечных элементов, можно отметить внутренние структурные напряжения, которые тормозят движение дислокаций [27], затрудняя сдвиговые процессы. Но именно процессы скольжения и сдвиговой деформации являются основными при эксплуатации, создают зоны концентрации напряжений, в которых фактические напряжения достигают предела текучести и даже превышают его, и этими зонами определяется надёжность и ресурс оборудования [28].

Таким образом, актуальными остаются экспериментальные исследования, вносящие вклад в установление факторов, влияющих на

индивидуальный ресурс и работоспособность оборудования. В их ряду особый научный интерес представляет поведение внутренних структурных напряжений [29].

### **3 Термовосстановление элементов энергетического оборудования и трубопроводов. Проблемы. Диагностика. Критерии**

Большинство энергоустановок тепловых электростанций России исчерпало свой проектный ресурс в 100 тыс. ч [30]. В связи с этим необходимы научно-обоснованные технические решения по продлению срока службы энергооборудования, замене или реновации около 25 тыс. т только паропроводов. Увеличение срока службы и надёжности трубных изделий невозможно без обеспечения их качества, подтверждаемого диагностикой текущего состояния [31].

Известно, что по мере наработки энергетического оборудования происходит накопление повреждаемости и старение металла, работающего при высоких температурах в условиях ползучести, поэтому часто восстановление свойств труб поверхностей нагрева является актуальной задачей. Изучение опыта ведущих зарубежных и отечественных энергомашиностроительных фирм в области восстановительной термической обработки (ВТО) показывает, что эта технология в деталях до сих пор не проработана и не всегда даёт успешный результат.

Основными нормативно-техническими документами по ВТО являются:

- 1) РД 34.17.459-96. «Руководящие указания по восстановительной термической обработке элементов теплоэнергетического оборудования».
- 2) РД 34.131-96. «Технология восстановительной термической обработки паропроводов ТЭС перемещающимся индуктором».
- 3) РД 153-34.0-17.460-99. «Руководящие указания по проведению контроля технического состояния паропроводов из углеродистых сталей, эксплуатируемых при температуре 350 °С и выше, и восстановительной термической обработке их графитизированных сварных соединений».

По указанным технологиям восстановлено более 60 паропроводов общей протяжённостью «выше 20 км на различных ТЭС России, в том числе на

ТЭЦ-8, ТЭЦ-9, ТЭЦ-22, ТЭЦ-25 и ТЭЦ-26 АО «Мосэнерго», ТЭЦ-21 АО «Ленэнерго», Балаковской ТЭЦ-4 и др.

Без научно обоснованной оценки фактического состояния металла проведение ВТО может привести к ухудшению его свойств и даже к ускоренному разрушению (в случае пропуска микротрещин).

В этой связи оценка фактического состояния металла паропроводов до ВТО должна проводиться специализированными организациями в соответствии с критериями, определяющими возможность проведения ВТО, находящимися в СО 153-34.17.459-2003.

Второй, не менее важной, проблемой при проведении ВТО является выбор режима термической обработки. В настоящее время установлено, что в зависимости от характера состояния микроструктуры и степени микроповреждённости металла температура нормализации и время выдержки при этой температуре могут колебаться в широких пределах, а иногда приходится применять двукратных нагрев что усложняет проведение ВТО паропровода в целом, т.к. при двукратном нагреве могут ухудшиться свойства сварных соединений.

Исследование по выбору режимов восстановительной термической обработки показало, что металл, в котором выявлена микроповреждённость в 5–6 баллов по ОСТ 34-70-690-96, требует очень сложных режимов термической обработки. При этом нельзя гарантировать, что все накопленные в процессе эксплуатации дефекты исчезают, т.к. их оценка проводится в ограниченном объёме. Поэтому на практике ВТО проводится тогда, когда микроповреждённость не выше 4 баллов.

Окончательный выбор температуры нагрева при нормализации, количества циклов нагрева, длительности выдержки при этой температуре осуществляется с учётом показателей неразрушающего контроля и степени микроповреждённости.

Не менее важным является выбор скорости нагрева металла при проведении ВТО.

Недопустимо превышение скорости нагрева, указанной в Руководящих указаниях по восстановительной термообработке элементов теплоэнергетического оборудования. Следует учитывать также, что при нагреве на поверхности труб образуется окалина – как на наружной, так и на внутренней поверхности, что, в свою очередь, требует проведения мероприятий по её удалению, чтобы избежать уноса окалины в турбину и вследствие этого повышенного износа её деталей.

Действующие материалы по восстановительной термообработке (соответствующие руководящие документы и указания) детально проработаны и являются весьма актуальными в связи со старением значительной части энергетического оборудования и исчерпанием расчётного ресурса.

Определённые трудности могут возникнуть и в процессе контрольно-диагностических операций, выполняемых после ВТО, а также при оценке качества выполнения ВТО. Детальный перечень требований по выполнению необходимых работ после ВТО изложен в (1). На практике организации, проводящие работы по ВТО, не всегда учитывают указанные требования. Наиболее часто нарушается требование по проведению испытаний металла на длительную прочность, необходимых для оценки ресурса паропроводов после проведения ВТО.

Не всегда достаточно полно проводятся разработки по опорно-подвесной системе.

Основная часть работ и выпущенных директивных документов посвящена ВТО паропроводов – при недостаточной проработке ВТО жаропрочных элементов и корпусных деталей ЦВД, а также РВД турбин, определяющих парковый ресурс энергоблоков и, соответственно, сроков их замены (начала работ по техническому перевооружению).

Для определения возможности проведения ВТО ниже представлен ряд критериев:

а) в гйбах паропровода, подвергаемого ВТО, не должно быть недопустимых дефектов, выявленных визуальным контролем и



неразрушающей дефектоскопией, согласно действующей нормативной документации;

б) сварные соединения паропроводов, оценённые согласно действующим нормативным документам первым баллом, не подвергаются ВТО и подлежат переварке;

в) сварные соединения паропроводов из стали 20 с выделениями графита, оценённые баллом 4 (по шкале Д) нормативного документа, ВТО не подлежат и должны быть переварены;

г) прямые трубы не должны иметь недопустимых дефектов, перечисленных в технических условиях, по которым они изготавливались. Прямые трубы длиной менее 500 мм могут не подвергаться ВТО при условии, что их остаточный ресурс не меньше ресурса паропровода после ВТО;

д) как правило, не подвергаются ВТО:

1) трубы и их сварные соединения из сталей 12Х1МФ, 15ХМ, 12МХ, имеющие карбидные выделения размером более 15 мкм в сочетании с поврежденностью 2 балла и более (шкалы К) нормативного документа;

2) трубы из стали 15Х1М1Ф, имеющие карбидные выделения размером 7 мкм и более в сочетании с поврежденностью 2 балла и более (шкалы К) нормативного документа. Сварные соединения из стали 15Х1М1Ф ВТО не подвергаются.

## 4 Методика эксперимента

### 4.1 Материал. Образцы. Схемы вырезки образцов

Объектом исследования являлся участок пароперегревателя энергетического парового котла, состоящий из сваренных (ручной электродуговой сваркой) между собой двух труб (каждая длиной 181,5 мм и 182 мм, диаметром 32 мм и толщиной стенки 5 мм). Поперечный сварной шов соединял два разнородных материала. Одна труба выполнена из перлитной стали 12Х1МФ, а другая – из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Использование таких сложных сварных соединений в энергетике обусловлено как условиями работы (высокие температуры стенки трубы), так и экономическими соображениями. Научное значение сводится к исследованиям термической совместимости разнородных материалов [32].

Для 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. 4.1, 4.2).

Плоскость, ближайшая к оси трубы, принята за внутреннюю поверхность (рис. 4.1). Плоскость, расположенная на расстоянии 2,14 мм от наружной поверхности (почти в центре стенки трубы), названа наружной (рис. 4.1). Изготовленные образцы позволили исследовать 20 зон (рис. 4.2), в том числе: сварной шов, область около шва и зону термического влияния сварки (ЗТВ). Результаты данного исследования представлены в [32].

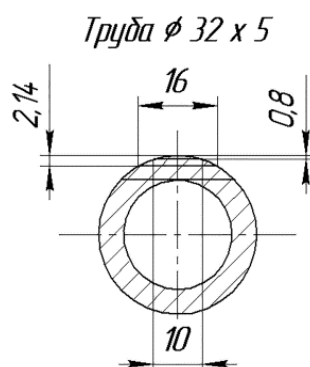


Рисунок 4.1 – Разрез трубы с указанием плоскостей резов при подготовке образцов

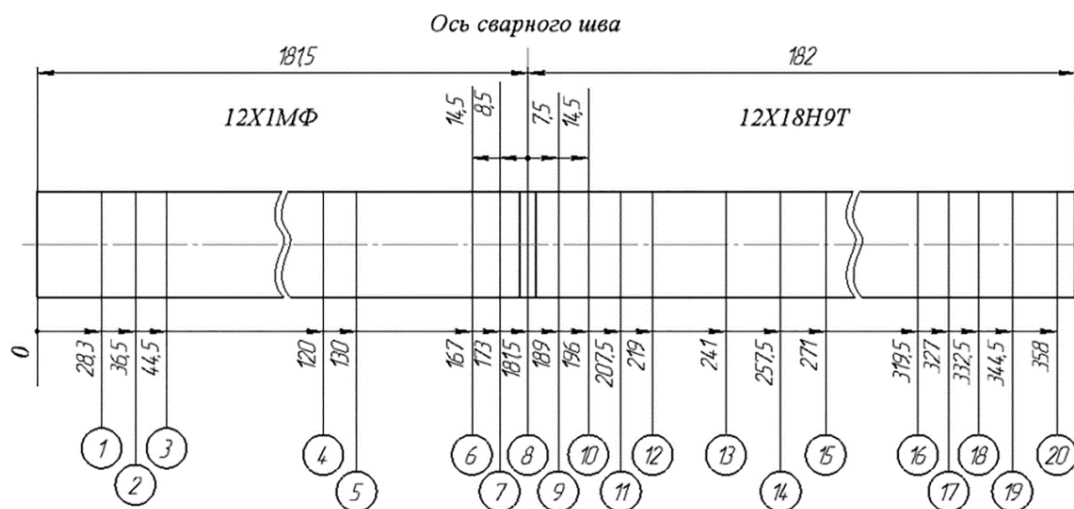


Рисунок 4.2 – Исследуемый участок трубопровода с указанием позиций анализируемых зон

На рисунке 4.3 представлена схема сварного узла с характерными для него критическими зонами, возникающими в процессе сварки. В настоящей работе участок 2 и 3 (рис. 4.3) назван околошовной зоной (ОШЗ). Участок нормализации 4 и участок неполной перекристаллизации 5 (рис. 4.3) названы в работе зоной термического влияния сварки (ЗТВ).

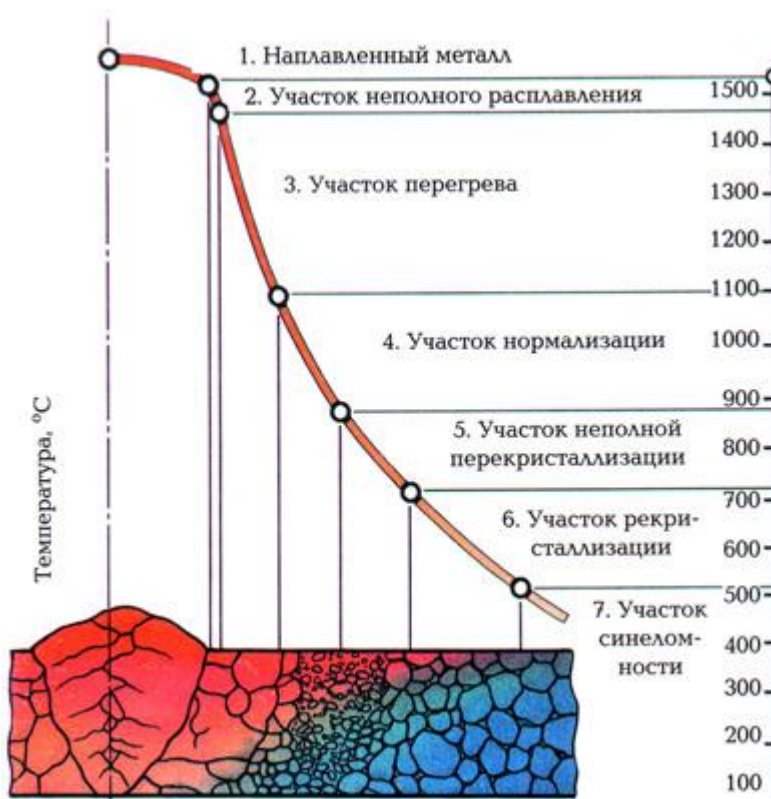


Рисунок 4.3 – Схема сварного узла

В данной работе исследованию подвергалась сталь аустенитного класса 12X18H9T, а именно исследованию подвергались следующие образцы, схема вырезки которых показана на рисунке 4.4:

- образец № 1 из околошовной зоны;
- образец № 2 из зоны термического влияния сварки;
- продольный образец № 3, охватывающий ОШЗ и ЗТВ из стали 12X18H9T.

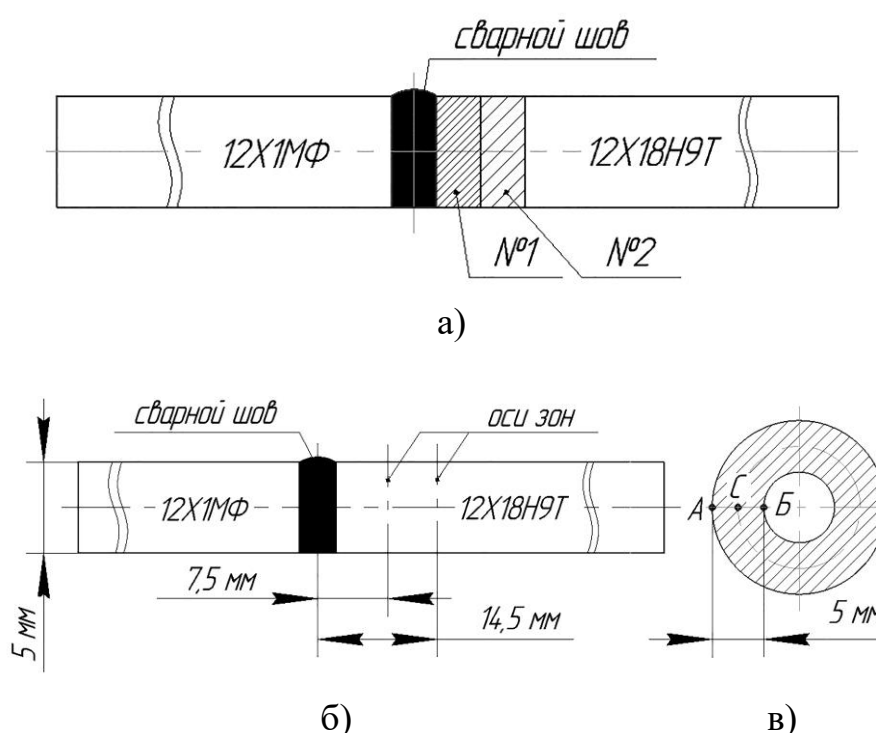


Рисунок 4.4 – Схема вырезки образцов:

- а – участки исследования (№ 1 – образец из ОШЗ, № 2 – образец из ЗТВ);
- б – продольный образец № 3 (сталь 12X18H9T);
- в – АС, БС – направления измерения микротвёрдости по толщине стенки трубы.

Все образцы были обработаны шлифовальными инструментами, для обеспечения параллельных плоскостей, т.к. по условиям рентгеносъёмки требуется, чтобы образцы № 1 и № 2 имели плоскость, параллельную плоскости гониометра, а также для образца № 3 необходима плоская поверхность для определения микротвёрдости.

Химический состав данной стали по ГОСТ 5632-72 (по массе) приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 12Х18Н9Т (по массе)

С, %	Ni, %	Cr, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Ti, %	Fe, %
≤ 0,12	8–9,5	17–19	≤ 2	≤ 0,8	≤ 0,02	≤ 0,035	5·С–0,8	–

#### 4.2 Рентгенофазовый анализ

Среди всех методов, позволяющих изучать фазовый состав стальных изделий, метод рентгенофазового анализа (РФА) занимает особое место. Одной из основных задач, решаемых 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 [33].

#### 4.3 Микротвердометрия

Микротвёрдость весьма чувствительна к изменению структуры металла. При сварке, нагревах, 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 [34].

#### 4.4 Методика исследований

Методика исследований заключалась:

- а) в микрорентгеноспектральном анализе для исходных образцов № 1 и № 2;
- б) в определении зональных напряжений для исходных образцов № 1 и № 2;
- в) в определении микротвёрдости для исходного образца № 3;
- г) в термоциклировании образцов № 1, № 2, № 3 с определением:
  - 1) микротвёрдости образца № 3 в зависимости от температуры термоцикла;
  - 2) зональных напряжений в образцах № 1 и № 2 в зависимости от температуры термоцикла.

Основным методическим приёмом при исследованиях было термоциклирование исходных образцов. Термоциклирование имитировало процесс форсированного старения образцов и их термическую усталость. Данный приём позволяет при исследовании аномалий в металлах вскрыть особые температурные точки, где отмечаются фазовые переходы первого и второго рода [35, 36, 37].

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 [35, 38, 39].

Термоциклирование стали 12Х18Н9Т проводилось с помощью электропечи СУОЛ-0,4.4/12-М2, где температура измерялась вольфрам-рениевой термопарой (ВР-20). Термоциклирование производилось в диапазоне температур 100–1000 °С с шагом повышения температуры 100 °С в каждом цикле нагрева. Выдержка образцов в печи составляла 1,5 ч. После печь отключалась, и образцы остывали вместе с печью до комнатной температуры. Затем снова образцы нагревались и т.д. После каждого нагрева проводилась шлифовка всех образцов. Это делается для того, чтобы убрать окислы и убрать от предыдущего эксперимента (на образце № 3) отпечатки индентора, оставшиеся после измерения микротвёрдости.

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

Спектральный анализ произведён с использованием рентгенофлюоресцентного спектрометра EDX 2800 EDXRF SPECTROMETR на основе измерения спектров характеристического излучения химических элементов в исследуемых образцах № 1 и № 2. 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.

Общий вид рентгенофлюоресцентного спектрометра EDX 2800 EDXRF SPECTROMETR представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Общий вид экспериментальной установки EDX 2800 EDXRF SPECTROMETER для спектрального анализа

Микротвёрдость анализировалась с применением микротвердомера ПМТ-3 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 [34]. Измерения производились по толщине стенки трубы по направлению от внешней поверхности к внутренней.

Общий вид микротвердомера ПМТ-3 представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Общий вид экспериментальной установки микротвердомера ПМТ-3 для измерения микротвёрдости



Микротвёрдость определяют на плоской полированной чистой поверхности. При приготовлении образца № 3 особое внимание уделялось на недопустимость нагрева исследуемой поверхности, т.к. 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 [34]. Измерение твёрдости по методу Виккерса показано на рисунке 4.7.

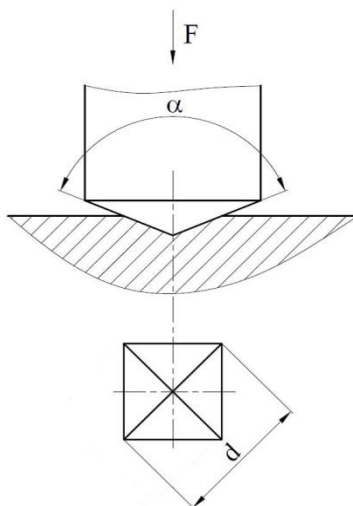


Рисунок 4.7 – Измерение твёрдости по методу Виккерса

Значение микротвёрдости вычислялось в соответствии с выражением [40]:

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

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, мкм [40].

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

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

Общий вид рентгеновского дифрактометра ДРОН-2.0 представлен на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Общий вид экспериментальной установки рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0

Параметр кристаллической кубической решётки для  $\alpha$ -фазы по дифракционной линии (110) и для  $\gamma$ -фазы по дифракционной линии (111) определялся в соответствии с выражением [41]:

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

где  $a$  – параметр элементарной ячейки;

$d$  – межплоскостное расстояние;

$H, K, L$  – индексы Миллера дифракционной линии;

$\lambda$  – длина волны излучения рентгена,  $\text{\AA}$ ;

$\theta$  – угол дифракции.

В качестве эталонных значений  $a_0$  приняты параметры элементарных ячеек из зон 2 и 17 (рис. 4.2), 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  $a_0 = 2,875 \text{ \AA}$ ;

– для  $\alpha$ -Fe, полученную в стали марки 12X18Н9Т после высокого нагрева при сварке  $a_0 = 2,882 \text{ \AA}$ ;

– для  $\gamma$ -Fe у стали марки 12X18Н9Т  $a_0 = 3,599 \text{ \AA}$ .

Зональные напряжения определялись методом РФА в соответствии с законом Гука по выражению [42]:

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

где  $\sigma_i$  – напряжение первого рода, МПа;

$E$  – модуль нормальной упругости, МПа;

$a_i, a_0$  – соответственно текущее значение параметра элементарной ячейки и значение параметра элементарной ячейки эталона,  $\text{\AA}$ .

Модуль нормальной упругости стали 12X18Н9Т равен  $E = 214000 \text{ МПа}$  при температуре измерения  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  [12].

## **5 Экспериментальные результаты. Обсуждение**

**5.1 Результаты рентгенофлуоресцентного анализа исходных образцов № 1 и № 2**

**5.2 Распределение макронапряжений в зависимости от температуры термоцикла**

**5.3 Распределение микротвёрдости при термоциклировании**

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ВМ5Б	Бреус Сергею Сергеевичу

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

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Дрон 2,0 – 2280000 руб. Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб., Потенциометр – 5400 руб., Милливольтметр – 2700 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	–
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Дополнительная зарплата – 10 %; Районный коэффициент – 30 %; Отчисления на социальные нужды – 27%.

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

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

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

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

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ВМ5Б	Бреус Сергей Сергеевич		

## **6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, ресурсосбережение**

Темой магистерской диссертации является анализ структурной устойчивости участка трубы из стали 12X18Н9Т разнородного сварного узла паропровода энергетического котла.

Целью экономической части данной научно-исследовательской работы (НИР) является расчёт её себестоимости.

### **6.1 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.

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, например, ТКЗ «Красный котельщик».

## **6.2 Организация и планирование НИР**

Планирование НИР заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи, определении участников каждой работы, установлении продолжительности работ в рабочих днях, построении линейного графика и его оптимизации [54].

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

## **6.3 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал**

Рассчитывается смета расходов, включающая затраты на приобретение необходимого оборудования для проведения НИР и текущие расходы [54].

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

- материальные затраты;
- затраты на оплату труда;
- отчисления на социальные нужды;

- амортизация основных фондов и нематериальных активов;
- прочие затраты.

Состав и структура длительности НИР представлены в таблице 6.1.

Планирование НИР представлено в таблице 6.2.

Основная заработная плата участников НИР представлена в таблице 6.3.

Линейный график и календарный план-график выполнения НИР показаны в таблице 6.4 и 6.5 соответственно.

Таблица 6.1 – Состав и структура длительности НИР

Наименование работ	Продолжительность, %
1. Научно-теоретические исследования:	
Обоснование методики исследования	5
Разработка теоретической части темы	11
Подготовка к эксперименту	24
Экспериментальные работы	45
Анализ, выводы и предложения	10
Завершающий этап	5
Итого:	100
2. Экспериментальные работы:	
а) Изготовление образцов из трубной стали;	3,5
б) Съёмка рентгенограмм	6,5
ИТОГО:	100

Для определения ожидаемого значения продолжительности работы применяют формулу, основанную 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.



Таблица 6.2 – 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
<b>ИТОГО:</b>	<b>106</b>	<b>146</b>	<b>122</b>	

Таблица 6.3 – 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
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>17</b>	<b>82</b>	<b>16</b>	<b>1950</b>	<b>22400</b>

Таблица 6.4 – Линейный график НИР

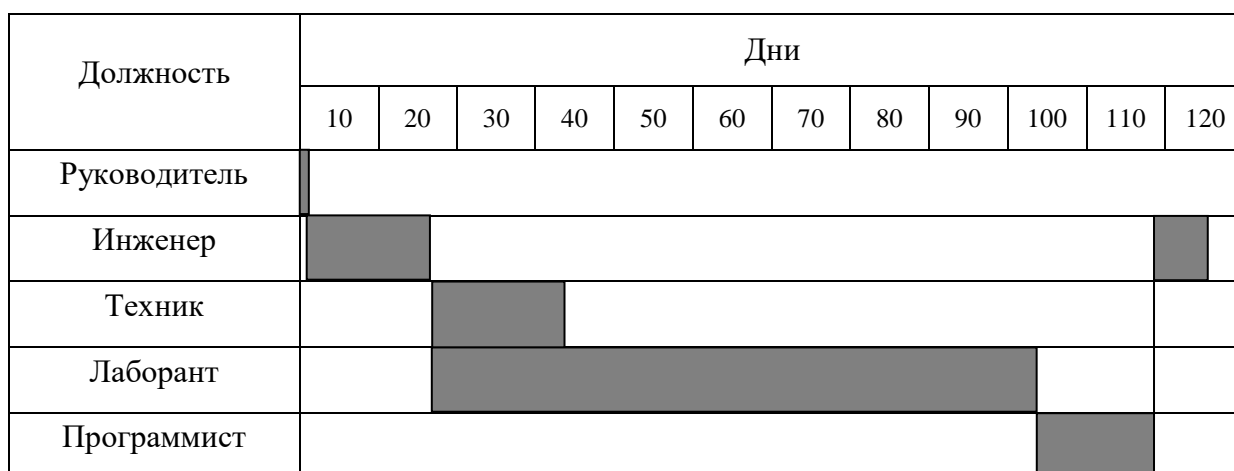


Таблица 6.5 – Календарный план-график выполнения НИР

Наименование работ	t <sub>ож</sub> , дни	Удельный вес		Дни 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130	Должность
		%	Нарастающий, %		
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			

## 6.4 Смета затрат на НИР

### 6.4.1 Материальные затраты:

Дрон 2.0 – 2280000 руб.

Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб.,

Потенциометр – 5400 руб.,

Милливольтметр – 2700 руб.

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

#### 6.4.2 Затраты на оплату труда

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

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

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

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

#### 6.4.3 Отчисления на социальные нужды

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

#### 6.4.4 Амортизация основных фондов

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

#### 6.4.5 Прочие затраты

Оплата электрической и тепловой энергии, оплата за воду

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

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

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

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

#### 6.4.6 Командировочные расходы:

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

#### 6.4.7 Представительские расходы

$$U_{\text{предст.}}=0,02 \cdot (З_{\text{общ}}+C_{\text{нужды}}+U_{\text{аморт.}})= \\ =0,02 \cdot (31360 + 8467,2 + 30182,74) = 1400,20 \text{ руб.}$$

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

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

#### 6.4.9 Расходы, связанные с управлением

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

#### 6.4.10 Себестоимость по НИР

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

### 6.5 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.

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 6.6.

Таблица 6.6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

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

Как видно из таблицы 6.6 самый низкий интегральный показатель ресурсоэффективности при проведение натурного эксперимента. Для дальнейших расчётов будут использованы показатели соединения 12X1МФ с 12X18Н9Т и 12X18Н9Т (справочные данные).

Интегральный показатель эффективности соединения 12X1МФ с 12X18Н9Т и 12X18Н9Т (справочные данные) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

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

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

Сравнительная эффективность проекта определяется по формуле:

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

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 12X1MФ с 12X18H9T и 12X18H9T (справочные данные), то соединение 12X1MФ с 12X18H9T на 1,294 эффективнее 12X18H9T (справочные данные).

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.

## **7 Социальная ответственность**

### **7.1 Производственная безопасность**

### **7.2 Экологическая безопасность**

### **7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**



## **Заключение**

## Список опубликованных работ по теме диссертации

### Статья в научном журнале, входящая в БД SCOPUS

1. Lyubimova L.L., Fisenko R.N., Breus S.S., Tabakaev R.B. The Investigation of Structure Heterogeneous Joint Welds in Pipelines (Article number 01059) // MATEC Web of Conferences. – 2016 – Vol. 72, № 6.

### Статьи, материалы конференций

2. Рентгенофазовый анализ сварного узла пароперегревателя / Р. Н. Фисенко [и др.] // Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции в 2 т., Томск, 2-4 декабря 2015. – Томск: СКАН, 2015. – Т. 1 – С. 296–300.

3. Методика исследования деформационной способности сварных соединений паропроводов / С.С. Бреус, Р.Н. Фисенко // Молодая мысль – развитию энергетики: материалы I (XVI) Всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов, Братск, 19–22 апреля 2016. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – С. 118–122.

4. Микротвердометрия зон разрушения композитного сварного узла / С.С. Бреус, Р.Н. Фисенко // Молодая мысль – развитию энергетики: материалы I (XVI) Всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов, Братск, 19–22 апреля 2016. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – С. 122–126.

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