

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 сопротивления пластическому деформированию металла стенки экранной трубы теплогенератора после термоциклического старения»

УДК 621.774.02: 539.3: 621.1.002.5.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Юдин Виталий Александрович		

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
Доцент кафедры менеджмента	Попова Светлана Николаевна	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов Игорь Иванович	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 – 2016 г.

Планируемые результаты обучения по ООП

Код	Результат обучения
Универсальные компетенции	
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
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
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
P4	Способность и готовность проявлять в инновационной деятельности глубокие естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте
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
Профессиональные компетенции	
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
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
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
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
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

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
 _____ Заворин А.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Юдину Виталию Александровичу

Тема работы:

Исследование сопротивления пластическому деформированию металла стенки экранной трубы теплогенератора после термоциклического старения	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	03.02.16, № 715/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none"> Труба пароперегревателя парового котла Энергетическая трубная, жаростойкая, жаропрочная, аустенитная сталь марки Ди-59 Сталь после термоциклирования в состоянии, имитирующим эксплуатационные условия Исследование процесса пластического холодного циклического деформирования
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> Введение (Обоснование необходимости исследований трубной энергетической стали. Актуальность исследований, методика и средства исследований. Постановка цели и задач исследования). Обзор литературы по проблеме диагностики и оценки остаточного ресурса особо опасных производственных объектов. Обоснование методики и методов исследования. Экспериментальные результаты исследования. Обсуждения, выводы и заключения. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Социальная ответственность. Заключение, в т.ч. на иностранном языке.
Перечень графического материала (формата А1)	

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Романцов Игорь Иванович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Реферат	
1 Процессы, протекающие в конструкционных материалах при длительной эксплуатации	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	14.03.2016 г.
---	---------------

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
5ВМ4Б	Юдин Виталий Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
5ВМ4Б	Юдину Виталию 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	<i>Дрон 3,0 – 2280000 руб.;</i> <i>Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб.;</i> <i>Потенциометр – 5400 руб.;</i> <i>Милливольтметр – 2700 руб.</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	–
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	<i>Дополнительная зарплата – 10 %;</i> <i>Районный коэффициент – 30 %;</i> <i>Отчисления на социальные нужды – 27 %.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	–
2. Разработка устава научно-технического проекта	–
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	–
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	–

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Таблица состава и структуры длительности НИР
2. Таблица планирования НИР
3. Линейный и календарный график выполнения НИР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Попова Светлана Николаевна	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ВМ4Б	Юдин Виталий Александрович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 138 страниц, 59 рисунков, 22 таблиц, 91 источника и 2 приложений.

Ключевые слова: сталь, теплогенератор, термоциклирование, механическое циклическое деформирование, внутренние напряжения I и II рода, сопротивление деформированию.

Объектом исследования является аустенитная хроммарганцевая сталь Ди-59.

Цель работы – проведение комплекса лабораторных испытаний перспективной трубной энергетической стали Ди-59 методом форсированного искусственного старения термоциклированием с последующим механическим циклическим деформированием для установления рентгенодиагностических параметров сопротивления деформированию.

В процессе исследования проводился анализ сопротивления пластическому деформированию металла стенки экранной трубы теплогенератора из стали Ди-59 после термоциклического старения.

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

Область применения: осуществление входного и текущего контроля труб теплогенератора и участие в разработке энергетических жаропрочных сплавов для поверхностей нагрева.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

КРН – коррозионное растрескивание под напряжением;

МКК – межкристаллитная коррозия;

ТКК – транскристаллитная коррозия;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

РСА – рентгеноструктурный анализ;

РФА – рентгенофазовый анализ;

МЗГ – межзеренная граница;

(*hkl*) – индексы Миллера атомной плоскости;

E – модуль нормальной упругости, МПа;

G – модуль упругости при сдвиге, МПа;

μ – коэффициент Пуассона;

d – средний размер кристаллита, Å ;

a – параметр элементарной ячейки, Å ;

λ – длина волны рентгеновского излучения, Å ;

θ – угол дифракции, град;

$\theta_{ц.т}$ – центр тяжести дифракционного максимума, град;

ρ – плотность дислокаций, $1/\text{см}^2$;

$B_{0.5}$ – полуширина дифракционной линии, град;

$b_{0.5}$ – инструментальная полуширина, град;

T – температура, К;

β – общее физическое уширение дифракционной линии, рад;

m – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная дисперсностью, рад;

n – уширение – часть общего физического уширения дифракционной линии, обусловленная микронапряжениями, рад;

σ_I – макронапряжения I рода, МПа;

σ_{II} – микронапряжения II рода, МПа;

σ_B – временное сопротивление, МПа;

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

Оглавление	с.
Введение.....	11
1 Процессы, протекающие в конструкционных материалах при длительной эксплуатации.....	13
2 Физические методы исследования структуры и свойств.....	30
3 Методы исследования дефектообразования при монтаже, ремонте и эксплуатации.....	35
4 Прогнозирование остаточного ресурса	41
5 Обоснование метода исследований	44
6 Методика проведения эксперимента	55
7 Методика рентгенодиагностики.....	64
8 Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	68
9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	78
10 Социальная ответственность	84
Заключение	98
Список публикаций.....	100
Список использованной литературы	101
Приложение А Экспериментальные результаты.....	109
Приложение Б The processes occurring in the constructional materials during long term exploitation	121

Введение

Политика энергетической безопасности является составляющей национальной безопасности страны, в рамках которой предусматривается одновременное решение двух первоочередных проблем.

С одной стороны, одной из них является модернизация морально и физически устаревшей технологической базы на основе создания устойчивой национальной научно-технической и инновационной системы в сфере энергетики.

С другой стороны, стратегическим ориентиром долгосрочной государственной энергетической политики является максимально эффективное использование имеющегося потенциала энергетического сектора, повышение его надежности, безопасности, экономичности и экологичности и его дальнейшая реконструкция.

Реализация данного направления требует надежной оперативной диагностики с учетом научно-обоснованных оценок фактического состояния элементов оборудования. Поэтому создание основ прогнозирования ресурсных характеристик входит в число приоритетов и ориентиров в инновационной и научно-технической политике в энергетике.

Несмотря на то, что теплопередающие системы ТЭС и АЭС проектируются, реконструируются и диагностируются на основе отраслевых стандартов, совершенно очевидно, что их регламент не учитывает в полной мере сложных структурно-атомных процессов, мало изученных флуктуаций свойств материалов, проявляющихся возникновением внутренних структурных напряжений I и II рода, существенно влияющих на ресурсную стабильность. При этом многие особенности разрушения элементов и узлов оборудования котельной и реакторной техники до конца не выяснены.

Очевидно также, что существующие методики при анализе этих явлений не могут соизмерить вклад в процессы разрушения теплообменных конструкций остаточных внутренних напряжений, связанных со структурно-деградационными процессами, как и их перераспределение под воздействием механических и температурных условий, соответствующих высоким плотностям

тепловых потоков. По этим причинам при диагностике остаются без должного внимания и причинно-следственные связи между внутрискруктурными фазовыми изменениями и внутренними структурными остаточными напряжениями, с одной стороны разрушением и ресурсом, с другой стороны.

В этой связи представляется актуальной и перспективной разработка новых подходов к диагностике и прогнозированию ресурса работоспособности сталей и сплавов, отличающихся от известных и основанных на анализе структурно-напряженного состояния в процессе экспериментального моделирования реальных условий эксплуатации.

Цель работы заключается в проведении комплекса лабораторных испытаний перспективной трубной энергетической стали Ди-59, методом форсированного искусственного старения термоциклированием с последующим механическим циклическим деформированием для установления рентгенодиагностических параметров сопротивления деформированию (старения) как основы методологии индивидуальной диагностики.

Задачи исследования:

- установление влияния циклических силовых нагрузений на перераспределение внутренних структурных напряжений 1-го и 2-го рода в тонкостенных оболочечных элементах;

- установление влияния циклических силовых нагрузений на перераспределение легирующих элементов сплава.

1 Процессы, протекающие в конструкционных материалах при длительной эксплуатации

Представляется целесообразным вспомнить основные виды разрушений, которым подвергаются материалы тепломеханического оборудования в процессе длительной эксплуатации.

1.1 Коррозия

1.1.1 Классификация коррозии

Процессы коррозии в пароводяных трактах тепловых электрических станций (ТЭС) и других источниках теплоснабжения являются причиной регулярного обсуждения на отраслевом уровне проблем надежности котлов, парогенераторов и теплообменных труб. Создаваемые программы повышения надежности теплоэнергетического оборудования предусматривают мероприятия, направленные на совершенствование водно-химических режимов (ВХР), на выбор коррозионностойких сталей и сплавов, на контроль металла, а также на реконструктивные работы.

Анализ ситуации с коррозионными повреждениями позволяет констатировать, что основная причина повреждений трубопроводных систем и труб поверхностей нагрева (порядка 80 %) связана со структурными температурными отклонениями в материале стенок труб вследствие специфики их изготовления и условий эксплуатации, которые проявляют себя в виде коррозионных эффектов. Другими словами, причинами аварий рабочих элементов тепломеханического оборудования являются термомеханическая и коррозионная усталость металла, поскольку оборудование работает в условиях интенсивных механических и термических нагрузок.

Коррозия – это разрушение металлов или сплавов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с окружающей средой. Коррозионные процессы классифицируют следующим образом:

а) По виду коррозионных разрушений различают:

1) сплошную или равномерную коррозию, которая захватывает всю поверхность металла и приводит к одинаковому утонению стенок труб, узлов и деталей;

2) местную или неравномерную коррозию. Местная коррозия характеризуется локальными поражениями, оставляющими незатронутой значительную или подавляющую часть поверхности. В зависимости от степени локализации различают коррозионные пятна, язвы, точки (питтинг), сквозную коррозию. Чем больше степень локализации, тем опаснее коррозия, т.к. питтинг существенно уменьшает толщину стенки. К наиболее опасным видам местной коррозии относят межкристаллитную коррозию (МКК) и транскристаллитную коррозию (ТКК). МКК продвигается в глубь металла по границам зерен, ТКК рассекает металл трещиной через зерно. Перечисленные виды коррозионных разрушений, такие как МКК и ТКК представляются весьма опасными, т.к. их возникновение и развитие происходит скрытно с невозможностью диагностирования и прогнозирования момента внезапного разрушения металла конструкции;

3) избирательную коррозию, которой подвержены латунные сплавы на основе меди и цинка. Избирательная коррозия проявляется в обесцинкивании латуней, в результате потери цинка латунь становится хрупкой и латунные трубки легко ломаются, а толщина латунных труб уменьшается за очень короткое время.

б) По механизму реакций коррозию делят на:

1) химическую – это разъедание металла, обусловленное протеканием химических реакций между металлом и средой;

2) электрохимическую.

в) По типу коррозионной среды выделяют:

1) газовую коррозию под действием горячих газов;

2) пароводяную – под действием высокоперегретого пара;

3) водородную – наблюдается в парогенераторах при наличии свободного водорода.

г) По характеру дополнительных воздействий, которым металл подвергается одновременно с действием коррозионной среды. Здесь различают:

1) коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) или коррозионную усталость. Такие виды повреждений возникают в зонах действия остаточных деформаций, растягивающих или изгибающих нагрузок, термических напряжений. Этот вид коррозии может наблюдаться и без видимых продуктов коррозии и приводит к транскристаллитному растрескиванию металла;

2) коррозионная эрозия – определяется как разрушение металла в результате одновременного воздействия коррозионной среды и абразивных факторов;

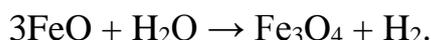
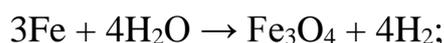
3) кавитационная коррозия – возникает под воздействием микрогидравлических ударов при кавитационных режимах обтекания металла агрессивной средой;

4) фреттинг-коррозия – возникает в местах контакта плотно сжатых деталей, если в результате вибраций между ними возникает смещение сдвига.

Отдельно можно выделить щелевую коррозию, протекающую в щелях и зазорах; контактную, обусловленную сочленением разнородных металлов; подшламовую коррозию, протекающую под отложениями шлама.

1.1.2 Коррозия стали в перегретом паре

Взаимодействие в системе Fe – H₂O протекает по реакциям:



При отсутствии в перегретом паре кислорода, как следует из этих уравнений, реакции идут с образованием на поверхности Fe₃O₄ и FeO. При наличии в перегретом паре кислорода возможно образование гематита Fe₂O₃.

Считается, что коррозия в паре при температуре 570 °С протекает как химическая. Полагается, что при более низких температурах, в том числе и при предельной температуре перегрева пара 545 °С, коррозия носит электрохимический характер.

1.1.3 Внешние факторы, влияющие на коррозию

К ним относят факторы, связанные с коррозионной средой – ее составом, величиной pH, температурой, скоростью движения электролита и облучением.

Одним из основных факторов влияния на процесс коррозии является температура. Отмечается, что коррозия всех материалов растет с повышением температуры. Это может быть связано с ползучестью сталей в условиях высоких температур и повреждаемостью металла порами ползучести.

Считается, что при наличии перепадов температур растворимым анодом становится более нагретый участок металла.

1.1.4 Внутренние факторы, влияющие на коррозию

К внутренним факторам относят состав и структуру сплава, состояние поверхности, наличие механических напряжений.

Неоднородность структуры стали определяется наличием зерен и границ зерен, где границы зерна могут вести себя как анод. Состав сплава и степень его легирования определяют структуру сплава, наличие в нем интерметаллидов, карбидов, сульфидов и других фаз, обладающих различной структурой, различными электрохимическими и физическими свойствами, различными термическими расширениями, что способствует образованию локальных микрогальванических элементов и интенсифицирует коррозионные процессы.

На коррозионную стойкость материалов влияет и состояние их поверхности. Механическая неоднородность поверхности может быть устранена полированием, отмечается, что полировка снижает коррозионные потери. Неоднородность поверхности может быть вызвана контактом двух разнородных металлов, например, Fe–Cu, локальной деформацией, наклепом, неравномерными полями механических напряжений, где более напряженные участки работают как анод.

1.1.5 Коррозионное растрескивание под напряжением

Одной из серьезных проблем энергомашиностроения является предупреждение возникновения и развития в процессе эксплуатации межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением (МКК, КРН) сталей как основного конструкционного материала ТЭС.

Коррозионное растрескивание – это межзеренное растрескивание, происходящее в результате одновременного воздействия коррозионной среды, статических внешних или внутренних напряжений или возрастающих внешних механических напряжений [1,2].

КРН имеет следующие основные признаки:

- трещина имеет хрупкий характер без утонения стенки;
- появление трещин от поверхности, соприкасающейся с агрессивной средой;
- по месту разрушения в трещине наблюдаются две зоны – одна темного цвета, другая – обычного цвета свежего излома;
- трещины носят межкристаллитный, транскристаллитный и смешанный характер, но концентрируются на отдельных участках, перпендикулярных действующему растягивающему напряжению [1].

Коррозионное растрескивание металла труб под напряжением на АЭС составляет более 30 % от всего количества дефектов [3].

1.1.6 Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия – один из сложных видов коррозии с точки зрения ее обнаружения методами технической диагностики [4]. При этом скорость растворения по границам зерен превышает скорость растворения самого зерна. Коррозия подобного вида приводит к катастрофическим разрушениям.

Как и для коррозионного растрескивания под напряжением, для объяснения причин возникновения межкристаллитной коррозии созданы и создаются множество гипотез, в той или иной степени объясняющих весьма ограниченный круг наблюдаемых при этом виде разрушения явлений. Вполне можно констатировать отсутствие единого мнения по этому поводу.

МКК и ТКК отличаются от коррозионного растрескивания тем, что эти виды разрушений распространяются равномерно по поверхности металла, протекают со стороны агрессивной среды и не связываются с приложенными напряжениями. По мнению других исследователей, межкристаллитная коррозия все же сопровождается напряжениями [5] (рис. 1.1).

Все эти виды разрушений опасны вследствие мгновенного раскрытия стенки трубы без каких-либо признаков и видимых причин.



Рисунок 1.1 – Проявления межкристаллитной коррозии на внутренней поверхности трубы пароперегревателя котла БКЗ-220-100-4

В связи с актуальностью проблемы механизмы и причины КРН являются предметом многочисленных исследований, но и до настоящего времени не существует ни единой общепризнанной теории этого явления, ни механизма прогнозирования и предотвращения этих катастрофических видов разрушения.

1.1.7 Коррозионная усталость

Растрескивание металла приводит к возникновению коррозионно-усталостной трещины. Нюансы отличия коррозионной усталости от КРН сводятся к тому, что на поверхности металла могут появляться питтинги, язвины, точки, локализованные плоскости скольжения в зернах металла. Еще одно отличие коррозионной усталости от КРН в том, что этот вид коррозии может протекать не только в водных средах, а и в других средах: в химических средах, конденсатах продуктов сгорания и т.д. [4]

Коррозионная усталость является причиной внезапных разрушений вибрирующих металлических конструкций причем при нагрузках, ниже предела выносливости (рис. 1.2, 1.3, 1.4).

На основании многих исследований можно сказать, что не существует единого механизма этого процесса и основополагающего признака его возникновения.



Рисунок 1.2 – Коррозионное растрескивание. Поперечный разрыв трубы пароперегревателя



Рисунок 1.3 – Коррозионное растрескивание. Продольный разрыв барабана котла



Рисунок 1.4 – Хрупкое повреждение трубы магистральной трещиной

1.2 Усталость металлов

Усталость – это появление трещин и полное разрушение под действием повторно-переменных напряжений. [4].

Различают знакопеременность и многократность нагружения. При знакопеременных нагрузках усталость развивается быстрее.

Опасность усталостного разрушения заключается в низкой величине разрушающего напряжения, в резком влиянии всевозможных надрезов, напряжений, в менее пластичном строении излома (рис. 1.5, 1.6, 1.7).

Опасность усталостных разрушений заключается также в том, что усталостные разрушения протекают при напряжениях ниже пределов прочности, пределов упругости, пределов текучести [4].



Рисунок 1.5 – Грань хрупкого излома в результате коррозионной усталости котла БКЗ-220-100-4

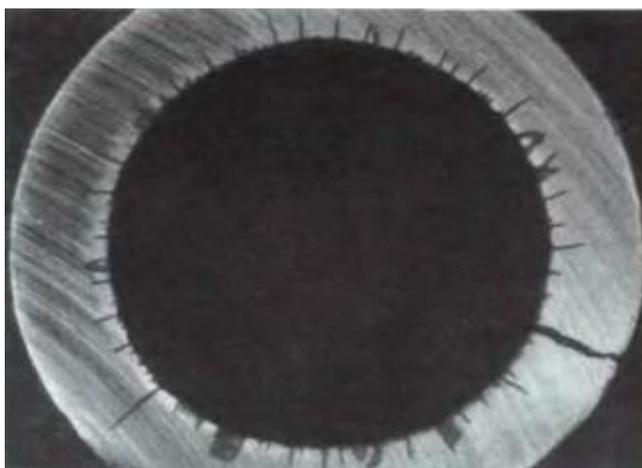


Рисунок 1.6 – Сеть усталостных продольных трещин, возникших в результате колебания внутреннего давления котла БКЗ-220-100-4



Рисунок 1.7 – Поперечные трещины вследствие усталости, начинающиеся на внутренней поверхности трубы пароперегревателя котла БКЗ-220-100-4

Проблема усталости существует более 150 лет и в результате интенсивных исследований, проведенных материаловедцами, химиками, математиками, физиками, к настоящему времени было достигнуто лишь только более глубокое понимание самой проблемы, связанной с влиянием микроструктуры, коррозионной среды, размера зерна, уровня приложенных напряжений, концентраторов напряжений, температуры и т.д. на закономерности и скорость роста усталостных трещин.

Для установления способности материала противостоять усталости определяют предел выносливости по кривым усталости Веллера [6, 7].

Предел выносливости – наибольшее максимальное напряжение, не вызывающее разрушение при очень большом числе циклов. Этот предел может быть установлен лишь для материалов, имеющих горизонтальный участок (рис. 1.8).

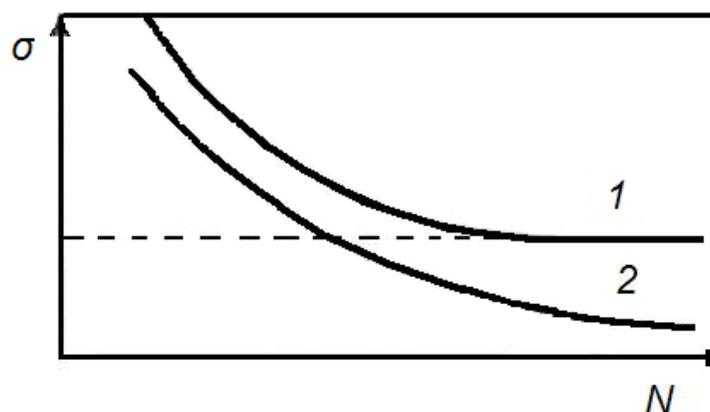


Рисунок 1.8 – Кривые усталости:

1 – невысокие температуры; 2 – повышенные температуры

Большая роль усталостной прочности связана в настоящее время с выработкой расчетного ресурса и с необходимостью продления срока дальнейшей эксплуатации.

Здесь также существует немаловажный нюанс: материал с более высокой прочностью вовсе не обладает более высокой усталостной прочностью.

Кроме того, кривые усталости снимают в стационарных режимах, совершенно далеких от реальных условий эксплуатации, где стационарные режимы если и бывают, то являются большой редкостью. Следовательно, фактор доверия к такого рода кривым может оцениваться этими обстоятельствами.

1.3 Термическая усталость

Эксплуатация современного теплотехнического оборудования происходит в условиях высоких механических нагрузок и тепловых потоков, характеризующихся цикличностью воздействия. В этой связи конструкционные материалы испытывают не только механическую усталость, но и термическую усталость.

Под термической усталостью понимают разрушения от знакопеременных термических нагрузок, происходящие в материале под действием многократного изменения температуры вследствие циклического изменения термических структурных напряжений. Циклический характер тепловых режимов эксплуатации паросиловых установок приводит к возникновению градиентов температур до 150 °С. Появление термических напряжений обусловлено градиентами температур и различиями теплофизических и механических характеристик, коэффициентов линейных термических расширений, модулей упругости и теплопроводности, структурных составляющих сплава [8, 9].

Термическая усталость при работе теплоэнергетического оборудования как правило проявляется в сочетании с повреждениями от знакопеременных механических нагрузок – внутреннего давления, внешних воздействий, вибраций и т.д., что приводит к малоцикловому разрушению.

Методики испытаний материалов на термическую усталость представляют собой циклический нагрев до максимальной температуры T_2 и

охлаждение до минимальной температуры T_1 жестко закрепленного стержня, в результате чего он испытывает деформацию растяжения – сжатия [9].

Результатом многократных деформаций растяжения – сжатия является термическая усталость. Варианты теплового воздействия многообразны, что связано со спецификой условий работы материалов в теплоэнергетике, и включают:

- постепенное однократное изменение температуры с возникновением явления ползучести;
- циклическое изменение температуры, приводящее к термической усталости и ползучести;
- термический удар с большими градиентами температур, приводящий или к пластическим деформациям, или к хрупким разрушениям малопластичных материалов.

Суммарная упругопластическая деформация e , упругая e_y и пластическая e_{nl} составляющие связаны между собой зависимостью [9]:

$$e = \alpha(T_2 - T_1) = e_y + e_{nl} = \Delta\sigma/E + e_{nl},$$

где α – коэффициент линейного термического расширения в интервале температур $(T_2 - T_1)$;

E – модуль нормальной упругости.

В качестве основного параметра при определении термической усталости принимают суммарную температурную деформацию за цикл. Оценка долговечности производится по числу циклов изменения температуры до разрушения – количественные испытания. Максимальная температура при испытаниях на термическую усталость обычно принимается равной температуре эксплуатации. Кроме того, применяют и качественные испытания на термоусталость, целью которых является определение числа циклов до появления первых термоусталостных трещин.

Констатируются следующие основные факторы термической усталости [9]:

- высокий уровень статических напряжений от внутреннего давления;
- воздействие коррозионной среды;
- термоциклическая деформация при сложнапряженном состоянии;

- наблюдается зернограничное проскальзывание;
- наблюдается деформация и сдвиговые процессы внутри зерна;
- происходит дробление зерен;
- обнаруживается фрагментация зерен – в старом зерне образуются новые зерна с возникновением большеугловых границ;
- изменяются характеристики прочности и пластичности;
- изменяется фазовый состав;
- изменяется относительная плотность;
- изменение микротвердости, что указывает на упрочнение тела зерна;
- кривые микротвердости имеют максимум, после чего микротвердость снижается.

Таким образом, природа образования повреждений при термоциклических нагрузках сложна и мало изучена, в частности констатируется, что исследования структуры материала при термоусталости определяют только частные признаки, не дающие общей картины разрушения.

До настоящего времени отсутствуют прямые методы измерения и оценки повреждаемости материала. Структурные признаки термоусталости изучают при варьировании одного из трех основных параметров – температуры t , размаха деформации $\Delta\varepsilon$, длительности цикла $\tau_{ц}$. Полагается, что некомплексное исследование влияния этих трех основных факторов и отсутствие единой точки зрения на характер разрушения при термоусталости затрудняют анализ причин разрушения.

Таким образом, термическая усталость – весьма сложный недостаточно изученный процесс, принципиально отличающийся от механической малоцикловой усталости, а разрушения при термической усталости могут быть обусловлены как ползучестью, так и усталостью: при постоянной температуре в материале развиваются повреждения, свойственные ползучести; циклические температурные напряжения вызывают повреждения, характерные для усталости.

1.4 Графитизация

Типичной особенностью в структуре металла паропроводов после длительной эксплуатации, является графитизация. Общепринятый взгляд на это явление, как на весьма опасное, приводящее к понижению механических свойств и к хрупким разрушениям [10] (рис. 1.9, 1.10).

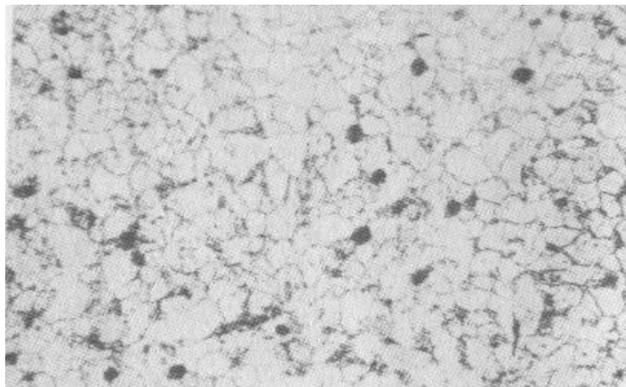


Рисунок 1.9 – Первый балл графитизации

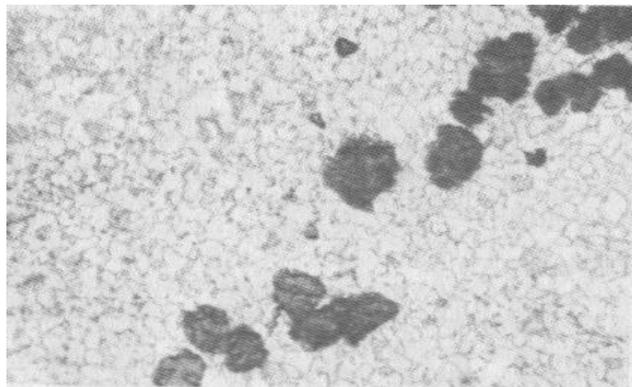


Рисунок 1.10 – Третий балл графитизации

Полагалось, что графитизация паропроводов связана с влиянием алюминия – если при выплавке был применен алюминий, то такая сталь была весьма склонна к последующей графитизации. Однако позднее было доказано отсутствие четкой зависимости влияния алюминия на графитизацию, кроме того, не удалось установить влияния и каких-то других факторов на этот процесс, тогда как участки паропроводов при наличии 3-го балла графитизации подлежат удалению из паропровода [10, 11].

1.5 Ползучесть

Проблема обеспечения надежной и безопасной эксплуатации основных элементов котлов и паропроводов (трубопроводов, барабанов, коллекторов и т.д.) чрезвычайно обострилась на этапе перехода энергетики России на повышенные параметры пара: 10, 14, 25 МПа, 540–560 °С. За этот период при эксплуатации котлов большой мощности на повышенные параметры резко возросла и повреждаемость всех элементов котла, работающих в условиях

ползучести. Разрушения наблюдались при сроке службы, значительно меньшем нормативного (100 тыс.ч).

В этой связи развитие энергетики сталкивается с проблемой создания жаропрочных материалов.

Жаропрочность определяется [12, 13]:

- прочностью межатомных связей;
- внутренней структурой, которая обеспечивает высокое сопротивление движению дислокаций;
- состоянием границ зерен.

В паровых котельных агрегатах элементы тепломеханического оборудования работают в условиях значительных нагревов при высоких механических нагрузках, т.е. в условиях ползучести (рис. 1.11, 1.12, 1.13). Ползучесть – это процесс нарастания деформаций при постоянном напряжении или напряжении, меняющемся по определенному закону, т.е. при растяжении, кручении, сжатии и т.д. [12].



Рисунок 1.11 – Структура металла у места разрушения с повышенной пластичностью: субзерна вытянуты в направлении деформации

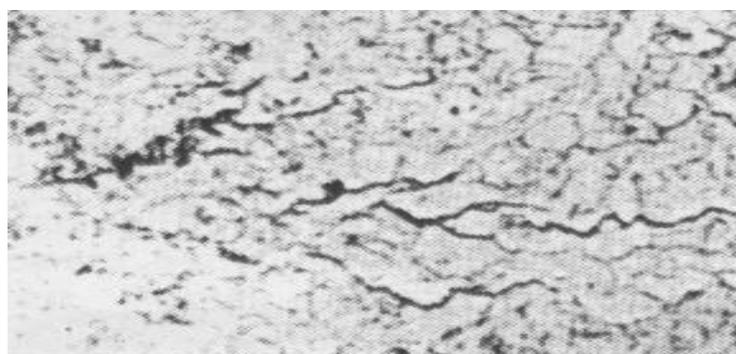


Рисунок 1.12 – Ускоренное развитие ползучести: развитие микротрещин ползучести

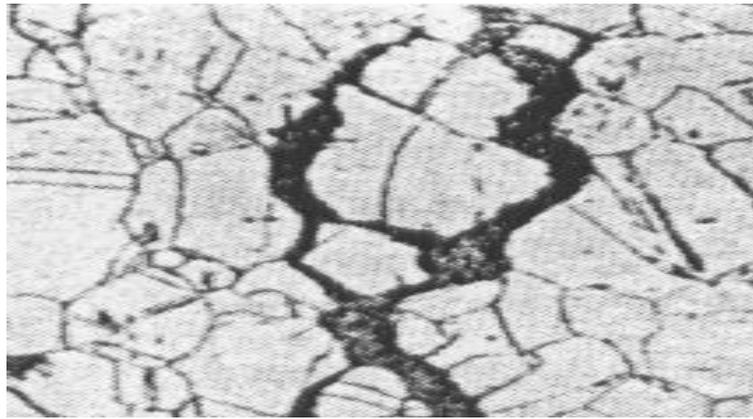


Рисунок 1.13 – Ускоренное развитие ползучести: развитие трещин

В условиях ползучести требование к жаропрочности особенно актуально, так как материалы тепловой энергетики должны выдерживать механические нагрузки в пределах допустимых деформаций. И хотя в реальных эксплуатационных условиях явление ползучести протекает при очень сложных нагружениях, процесс деформации во времени описывается так называемой классической кривой ползучести, представленной в осях «деформация – время» (рис. 1.14).

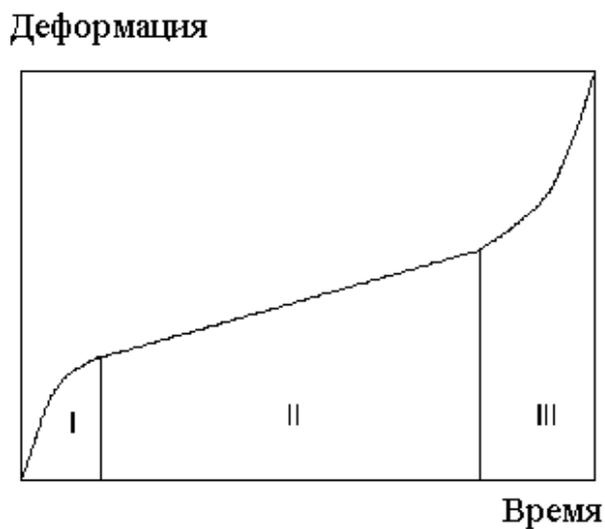


Рисунок 1.14 – Характерные области ползучести: I – начальная стадия; II – установившаяся ползучесть; III – разрушение

В общем случае кривая описывается тремя характерными участками: на начальной стадии I скорость ползучести затухает во времени, что связывают с деформационным упрочнением – наклепом. При высоких температурах наклеп сменяется отдыхом – возвратом. Когда скорости этих процессов выравниваются,

наступает вторая стадия ползучести; на участке II скорость ползучести принимается постоянной, хотя это серьезное допущение; участок III называется стадией ускоренной ползучести, заканчивающейся разрушением. Разрушение развивается постепенно вследствие накопления повреждаемости в виде пор ползучести, которые преобразуются в трещины ползучести.

В основу физических механизмов разрушения материалов при ползучести положены те же самые процессы, которые протекают при пластичности: это вязкое течение в металлах, когда их температура близка к температуре плавления, и процессы движения дислокаций. Микроструктурные повреждения в трубах тепловоспринимающих элементов и трубопроводных систем при ползучести проявятся порообразованием и коррозионными явлениями.

Динамика накопления пористости в металле за счет ползучести в процессе длительной эксплуатации приведена на рисунке 1.15 [14].

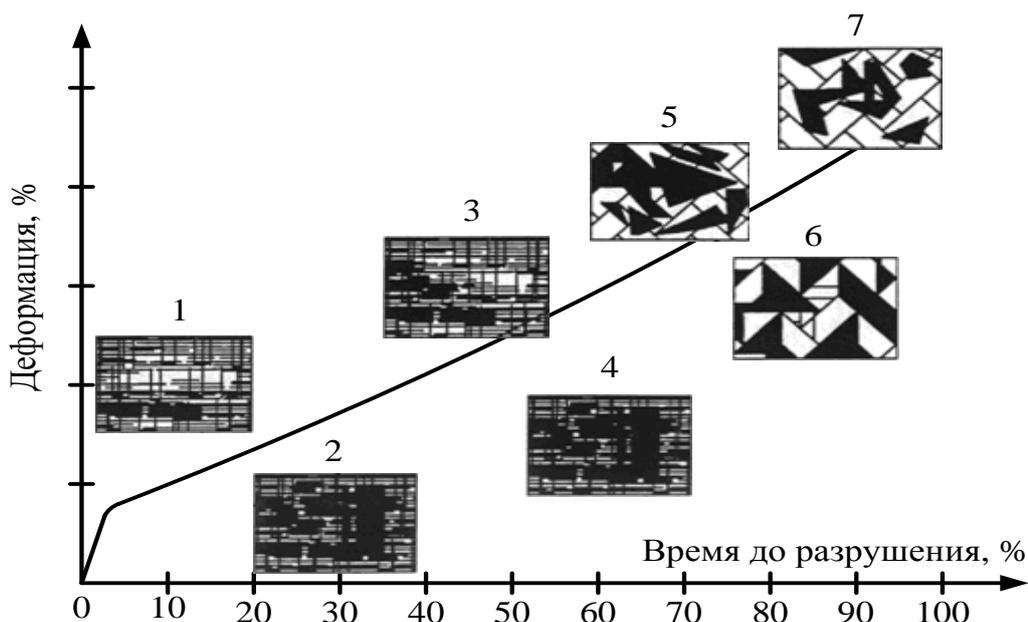


Рисунок 1.15 – Характер повреждаемости стали порами ползучести по мере исчерпания ресурса: 1–7 – баллы повреждаемости

Сегодня можно с уверенностью сказать, что ползучесть зависит от многих факторов, главным из которых является изменение структуры. Структура изменяется постоянно в процессе длительной эксплуатации и в этом заключается главная трудность установления и трактовки кривой ползучести.

1.6. Релаксация

В классическом понимании релаксация – это падение напряжений, предварительно нагруженной и затем закрепленной жесткими связями, вызванной протеканием в ней ползучести.

Таким образом, релаксация – это частный случай ползучести [12].

С другой стороны, коэффициент интенсивности напряжения K_C , играющий в теории линейной механики разрушения фундаментальную роль, и предельное напряжение хрупкого разрушения σ_c могут быть представлены в виде [15]:

$$K_C = \sqrt{E \cdot (\gamma + \gamma_p)}, \sigma_c = \sqrt{\frac{E \cdot (\gamma + \gamma_p)}{\pi \cdot c}},$$

где E – модуль Юнга;

γ – удельная поверхностная энергия;

γ_p – энергия, рассеиваемая в процессе пластической деформации, связанной с развитием трещин;

c – длина трещины.

Откуда следует, что падение напряжения σ_c связано с ростом трещины c , т.е. возникновение трещины является релаксационным процессом [16, 17].

2 Физические методы исследования структуры и свойств

Методы физического анализа структуры и свойств веществ можно условно разделить на следующие группы:

- методы исследования макроструктуры;
- методы исследования микроструктуры;
- механические методы исследования свойств.

Они отличаются между собой кругом решаемых задач. Методы исследования макроструктуры применяются для контроля расслоения, волосовин, волокнистой структуры, строения сварного шва, контроля различных внутренних, поверхностных и других дефектов [20]. Макроанализ – констатирующий метод, позволяющий определять качество изделия после соответствующих операций: выплавки, разливки,ковки, прокатки и т.д. Контроль дефектов – трещины, пористость, флокены, внутренние разрывы, изломы наблюдаются на микрошлифах с применением микроскопов двух-трехкратного увеличения. К методам макроанализа относится также дефектоскопия, включающая комплекс методов неразрушающего контроля качества деталей малой (до 80 мм) и большой (250 мм) толщины с применением сверхжесткого излучения бетатронов. Для этих целей применяется рентгено- и гамма-дефектоскопия, радиодефектоскопия, инфракрасная, магнитная, электроиндуктивная, термоэлектрическая, трибоэлектрическая, электростатическая, ультразвуковая и капиллярная дефектоскопия [20, 21, 22, 23].

Методы исследования микроструктуры также разнообразны и имеют целью изучение фазового состава, морфологии фаз, химического состава фаз. Для этой цели применяются оптические и электронные микроскопы. Предметом исследований являются специально подготовленные образцы – микрошлифы. Подготовка образцов заключается в вырезке, шлифовании и полировании поверхности, травлении химическими реактивами [20, 21].

Подготовленный таким образом шлиф исследуется с помощью металлографического микроскопа при увеличении от 30–50 до 1500–2000 раз. Методы микроскопического исследования – метод косо́го освещения и в

поляризованном свете, темнопольного освещения, фазового и интерференционного контраста. Металлографическое микрофотографирование предусматривает изучение структуры непосредственно при нагреве и охлаждении подготовленного микрошлифа в высокотемпературных микроскопах [20, 21].

Задачами таких исследований являются исследования процессов рекристаллизации и роста зерен, фазовых превращений и т.д. При этом высокотемпературная микроскопия, как метод получения видимого изображения, сталкивается с рядом трудностей, т.к. испарение металла с поверхности и его конденсация на смотровом стекле существенно мешают наблюдению за объектом, особенно при его микрофотографировании или микрокиносъемке [21].

Недостаток метода – необходимость изготовления протравленных химическими реагентами микрошлифов. Созданные таким образом рельефы поверхности представляют собой результат химического взаимодействия структурных составляющих исследуемого материала с химическим реагентом. Все эти методы исследования микроструктуры по сравнению с другими, позволяющими наблюдать структуру вещества на атомном уровне, ближе к макроструктурным методам, т.к. металлография позволяет выявлять зернистую структуру для номеров зерен от 3 до 14 (от 0,0027 до 1 мм) [20].

Например, зернистая структура травленого шлифа, отснятого на оптическом микроскопе, представлена на рис. 2.1, 2.2.

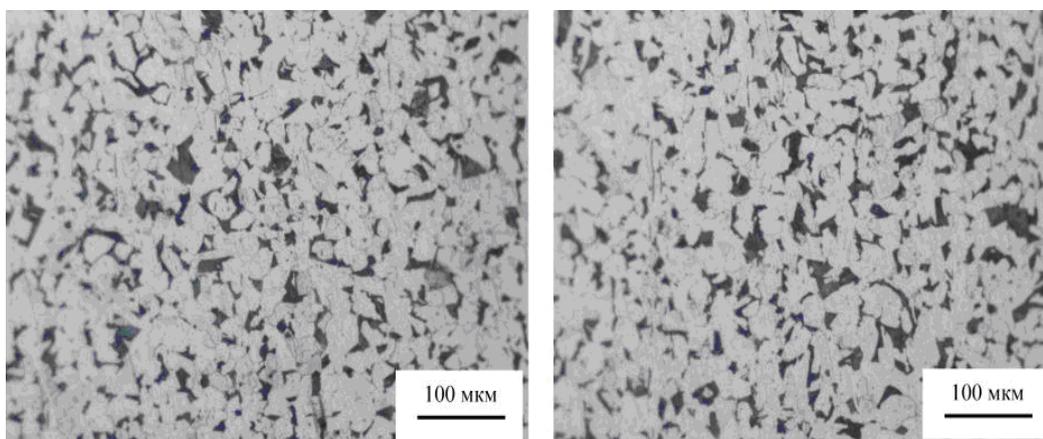


Рисунок 2.1 – Структура поверхности различных участков пробы (оптика)

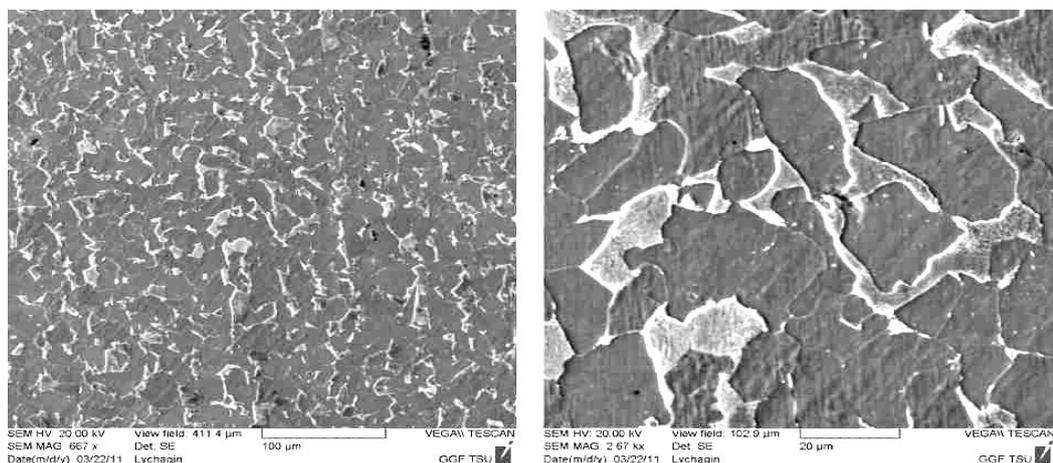


Рисунок 2.2 – Структура поверхности после травления, полученная на сканирующем электронном микроскопе

В числе микроскопических методов исследования микроструктуры метод ПЭМ (просвечивающая электронная микроскопия) обеспечивает разрешение до атомного уровня (0,1 нм) и может применяться для наблюдения за строением границ зерен и межфазных границ, дислокационной структуры, радиационных повреждений и т.д. Объект исследования – тонкая фольга, сложно изготавливаемая реплика с поверхности. Сам факт ее изготовления внесет изменения в реальную структуру металла и отразится на наблюдаемой топографии.

Поэтому необходимо применение новых методов неразрушающего контроля, для проведения которых не требуется предварительной подготовки поверхности – травления, изготовления шлифов и реплик, когда требуется объяснение свойств реальных металлов, которые зависят от исходной структуры, которую следует изучать без повреждений, вносимых путем изготовления реплик и травления [24].

Как дополнение к ПЭМ в металловедении используется метод РЭМ (растровой электронной микроскопии), позволяющий получать изображение объекта исследований, которым также является специально подготовленный шлиф. Результат исследований – микрофотография (фрактография) поверхности исследуемой фольги.

Какой бы ценной ни была информация, полученная с применением этих методов, всегда трудно установить, наблюдается ли реальная деформация искажений или реальный дефект, или включение, либо они внесены при

изготовлении, каков вес искажений в полученном изображении, связанный с несовершенством сканирования электронным зондом и электронной оптики, деформацией фотоматериалов, юстировкой, сферичностью электронно-лучевой трубки и т.п.

К числу электронно-зондовых методов, кроме РЭМ, относят микрорентгеноспектральный анализ и Оже-микроскопию, основанные на взаимодействии первичного излучения с веществом и анализе вторичного излучения. Эти методы относительно новые и с ними связывается всплеск интереса к исследованию физики поверхностных явлений [22].

Методов, основанных на указанном принципе, уже насчитывается несколько десятков, из них наибольшее распространение получили Оже-спектроскопия и автоионная микроскопия (метод атомного разрешения 0,2–0,3 нм).

При использовании метода автоионной микроскопии образцом для исследования является тонкое, заточенное травлением острие из исследуемого материала. В основу положены явления десорбции полем или испарение полем, ионизация полем постороннего газа (гелий, неон, водород). На экране наблюдается изображение кристаллических граней поверхности острия с увеличением 10^6 (разрешение 0,2–0,3 нм), так что различаются отдельные атомы, вакансии, границы зерен, дислокации. Этот метод бесспорно относится к микроструктурным и в сочетании с масс-спектрометром – к методам химического анализа [22]. Образец разрушается как в процессе подготовки, так и в процессе анализа.

Метод Оже-спектроскопии также является методом химического анализа поверхности. Ядерный гамма-резонанс (ЯГР) также является спектральным методом с разрешающей способностью, превосходящей все известные в измерительной технике [22, 23].

С точки зрения металловедческих задач ЯГР дает информацию о магнитной структуре, электронном распределении, упорядочении, тепловых колебаниях в решетке. Методы спектроскопии (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс и ферромагнитный резонанс) позволяют

определять температуры Нееля (для антиферромагнетиков) и точку Кюри (для ферромагнетиков).

Стереология как метод количественной металлографии, изучает объект в виде шлифа, реплики, фольги, монослоя частиц или поверхность излома. Резка, шлифовка при подготовке образца, вырыв частиц при шлифовании, глубокое травление, замазывание частиц одной фазы частицами другой фазы являются источниками трудно оценимой погрешности при анализе структуры.

Методы механических испытаний позволяют получать сведения о механических свойствах металлов и широко освещены в литературе.

К физическим методам исследования относятся методы измерения теплопроводности, дифференциальный термический анализ, измерения плотности, твердости, термических расширений, электрических и магнитных свойств, метод рентгеноструктурного анализа (РСА).

Следует отметить важность диагностики микроротких трещин, на период жизни которых приходится основной ресурс оборудования. Подавляющая часть разрушений начинается на поверхности или в поверхностных слоях. Это связано с тем, что в этих зонах действующие напряжения превышают σ_v материала. Поэтому для выявления механики разрушения необходимы исследования особенностей разрушения поверхностного слоя, что накладывает определенные требования к используемой для этих целей экспериментальной технике. Так, методы рентгеноструктурного анализа [25], экзоэлектронной [26] и акустической эмиссии [27] позволяют зафиксировать момент зарождения микроструктурных трещин. Методом голографии могут быть установлены трещины длиной не менее 10 мкм [28]. При использовании высокочастотного тока, концентрирующегося в поверхностных слоях, методом падения потенциала можно оценивать скорость роста трещины [29]. Методом атомно-силовой микроскопии можно исследовать пространственную геометрию малых трещин [30]. Однако такое исследование, в особенности взаимодействие малой трещины с границами зерен, является сложной задачей даже для растровой электронной микроскопии (РЭМ) [31].

3 Методы исследования дефектообразования при монтаже, ремонте и эксплуатации

Производство работ по изготовлению, монтажу, ремонту и контролю трубопроводов, коллекторов пароперегревателя, испарителя, экономайзера, программа технического диагностирования основных элементов паровых котлов на ТЭС регламентируется такими нормативными документами как «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей», «Правила устройства безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды», «Правилами производства и приемки работ. Технологическое оборудование» и др. [32, 33, 34, 35]. В соответствии с этими документами предусматривается следующий объем контроля качества стальных материалов (листовая сталь, поковки, штамповки, прокат, трубы, сварные соединения):

- визуальный и измерительный;
- радиографический и ультразвуковой;
- капиллярный и магнитопорошковый;
- стилоскопирование;
- измерение твердости;
- механические, металлографические исследования;
- испытания на межкристаллитную коррозию;
- гидравлические испытания.

3.1 Предварительный контроль

Предварительный контроль осуществляется, в основном, путем визуальной проверки и предусматривает проверку на отсутствие внешних дефектов [36]. В отдельных случаях проверяются механические свойства металла, химический состав, склонность к межкристаллитной коррозии. В случае необходимости отдельные детали оборудования и трубопроводов могут подвергаться другим видам контроля, кроме визуального – радиографическому, ультразвуковой дефектоскопии.

При выполнении монтажных и сварочных работ должен выполняться контроль за технологическими параметрами сварки, термообработки (температура и скорость ее изменения), испытания герметичности и качества сварных соединений неразрушающими методами, контроль чистоты внутренних поверхностей трубопроводов [37, 38].

Сварные соединения подвергаются контролю различными методами: внешнему осмотру, капиллярной дефектоскопии, магнитно-порошковой дефектоскопии, радиографическому контролю, ультразвуковому контролю, механическим испытаниям, металлографическим исследованиям и испытанию на межкристаллитную коррозию, а также контролю на герметичность. Методы и объем контроля каждым методом устанавливаются нормативно-технической документацией.

Внешнему осмотру подвергаются все сварные соединения и зона термического влияния сварки. Внешним осмотрам сварных швов выявляются поверхностные дефекты металла и сварных швов, деформации конструкций. Внешний осмотр выявляет наружные дефекты – трещины, наплывы и подрезы, поры и шламовые включения, непровары и другие дефекты. Внешний осмотр проводят невооруженным глазом, а в сомнительных местах лупой с 4–7-кратным увеличением.

3.2 Спектральный анализ

Спектральному анализу – стилоскопированию – подвергается металл шва для установления соответствия металла и присадочных материалов требованиям чертежей, ТУ и нормативных документов. Обязательному стилоскопированию подвергаются все вновь устанавливаемые детали энергетического оборудования, предназначенные для работы при температуре выше 450 °С, а также все детали и материалы, которые по проекту должны быть выполнены из легированной стали (кремнемарганцовистой, хромомолибденовой, хромомолибденованадиевой). Объем стилоскопирования устанавливается в соответствии с требованиями РТМ-1с [39].

В случае получения неудовлетворительных результатов стилоскопирования проводится повторный анализ тех же сварных соединений на удвоенном количестве точек (участков). При неудовлетворительных результатах повторного контроля производится спектральный или химический анализ деталей и металла шва, результаты которого считаются окончательными.

3.3 Радиографический контроль

Радиографический контроль сварных соединений с использованием ионизирующих излучений проводится для выявления внутренних дефектов сварного шва и околошовной зоны (трещин, непроваров, пор, шлаковых или вольфрамовых включений) [39, 40, 41, 42].

При проведении радиографического контроля дефекты на снимках выглядят как темные пятна (поры, включения) и искривленные линии (трещины или непровары) и т.д. [43].

3.4 Акустический неразрушающий контроль (ультразвуковая дефектоскопия)

Ультразвуковая дефектоскопия – метод контроля, основанный на исследовании распространения ультразвуковых волн, представляющих собой механические колебания низкой частоты (0,2–10 МГц). При наличии на пути распространения колебаний дефектов нарушается нормальный процесс распространения, вызывая отражение волны, что фиксируется приемником дефектоскопа.

Оценку качества сварных соединений по результатам ультразвуковой дефектоскопии проводят в соответствии с существующими нормами.

3.5 Магнитопорошковая дефектоскопия

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) основана на способности ферромагнитных частиц, находящихся в магнитном поле, ориентироваться в

направлении поля и скапливаться в местах наибольшей плотности магнитного потока рассеяния в зоне расположения дефектов [44, 45, 46].

3.6 Капиллярная дефектоскопия

Капиллярная дефектоскопия является одним из методов неразрушающего контроля, обнаруживающим дефекты, выходящие на поверхность, применяемым при монтаже оборудования АЭС. [47,48,49].

Различают методы цветной и люминесцентной дефектоскопии. Контролируемая поверхность сварного шва и околошовной зоны покрывается слоем индикаторной жидкости и выдерживается в течение 10–15 мин. За это время часть жидкости затекает в полости дефектов, выходящие на контролируемую поверхность. Оставшаяся на поверхности жидкость удаляется. После осушки поверхность покрывается проявителем, вытягивающим из полостей дефектов оставшуюся в них индикаторную жидкость. При контроле цветным методом в местах поверхностных дефектов на белом слое проявителя будут ясно видны красные следы индикатора, по которым определяется характер дефектов.

3.7 Разрушающие методы контроля

Разрушающие методы контроля включают определение твердости металла шва, испытания механических свойств, металлографические исследования и исследования на стойкость против межкристаллитной коррозии.

Определение твердости металла проводится для проверки качества термической обработки сварных соединений или качества подогрева в случае приварки штуцеров (труб) к коллекторам из хромомолибденованадиевой стали без последующей термообработки. Твердость устанавливается по методу Бринелля по ГОСТ 9012-59 (ИСО/Р 79-73), Виккерса или Роквелла.

Замеру твердости в соответствии с РТМ-Ис подлежат поверхности сварных швов труб.

3.8 Испытания механических свойств

Испытания механических свойств производятся для сварных соединений и наплавленного металла по ГОСТ 8817-82 и включают испытания на статическое растяжение, на статический изгиб или на сплющивание, на ударный изгиб с надрезом образца по оси шва.

Требуемый объем испытаний сварных образцов (количество контрольных сварных соединений) на механические свойства устанавливается в соответствии с [39] и [42].

Из каждого стыкового соединения (контрольного или производственного стыка) изготавливаются и испытываются два образца на растяжение, два образца на статический изгиб и три образца на ударный изгиб (с надрезом по центру шва).

Испытание на ударную вязкость не является обязательным для ТЭС – для элементов котлов с $P_{\text{раб}} \leq 100$ кгс/см² и $t_{\text{раб}} \leq 450$ °С и трубопроводов пара и горячей воды 2–4 категорий, трубопроводов системы регулирования турбины, трубопроводов горючего газа, мазутопроводов, маслопроводов, а также для всех сварных соединений с толщиной стенки труб менее 12 мм.

3.9 Металлографические исследования

Металлографические исследования проводятся для определения физической сплошности сварного шва и микроструктуры зон сварного соединения [39, 42, 50].

3.10 Испытание на стойкость против межкристаллитной коррозии

Испытание проводится для установления коррозионной стойкости сварных соединений (и наплавки) из аустенитной стали, работающих в коррозионных средах [51,44].

Специальные сварные образцы с высокой чистотой поверхности (не ниже 7 класса) кипятят в водном растворе медного купороса и серной кислоты в

присутствии медной стружки в течение 24 ч и после промывки и сушки подвергают статическому изгибу на угол 90° . В заключение проводится визуальный осмотр поверхности образца в зоне изгиба с применением лупы 8–10-кратного увеличения. Отсутствие поперечных трещин на образце со стороны растянутого волокна указывает на стойкость сварного соединения против межкристаллитной коррозии [51, 44].

3.11 Контроль герметичности

Контроль осуществляется для выявления сквозных дефектов сварных соединений и металлов, трещин, непроваров, прожогов и т.д. [43].

Используемые методы – масспектрометрический, галоидный, опрессовка газом, испытания вакуум-камерой [43].

4 Прогнозирование остаточного ресурса

Каждый из перечисленных процессов, суть которых изложена выше, являются частью общей проблемы оценки работоспособности.

Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода базируется на результатах обследования технического состояния, исследования механических свойств и микроструктуры металла, оценки фактической нагруженности основных несущих элементов трубопровода и гидравлического испытания пробным давлением.

Прогнозирование остаточного ресурса производится только для трубопровода, техническое состояние которого по результатам обследования и исследования механических свойств и структуры металла оценивается как удовлетворительное.

Тенденции продления ресурса оборудования вызывают необходимость совершенствования техники определения остаточного срока службы [52].

Однако, рассмотренные методы оценки остаточного ресурса и текущего физического состояния не дают однозначных результатов без расчетов на прочность.

Остаточный ресурс элементов трубопроводов определяется для того, чтобы установить максимально допустимое количество часов наработки, после которого элемент подлежит замене, и сводится к установлению временного интервала перехода от второй, установившейся стадии, к третьей стадии ускоренного разупрочнения металла паропроводов.

Методика расчётов на прочность и нормы предыдущего поколения, приведенная в [53] и [54], предусматривает выполнение расчётов в прямом и обратном порядке. При прямом порядке расчётов определяется номинальная или допустимая толщина стенки по заданному или принятому расчётному давлению, при обратном порядке расчёта определяется величина допустимого давления по фактической или номинальной толщине стенки. Обратный порядок расчёта может быть назван контрольным расчётом.

В общем случае при конструкторском расчёте прочности (в прямом порядке) цилиндрических деталей, работающих под внутренним давлением и ослабленными отверстиями, задачами расчёта являются:

- обоснованный выбор марки стали;
- грамотное расположение отверстий и расчёт наибольшего диаметра неукреплённого отверстия d_0 (решение вопроса о необходимости укрепления отверстий);
- расчёт номинальной толщины стенки s ;
- расчёт допустимого давления при проведении гидравлических испытаний $[p]_h$ и сравнение его значения с пробным давлением при гидравлическом испытании p .

При конструкторском расчёте цилиндрических деталей без отверстий вторая задача отсутствует. Кроме того, нормы [53, 54] охватывают большое количество других деталей и их составляющих (доньшки, днища, отводы, тройники, цилиндрические детали с не радиальными отверстиями и т.д.).

В целом же при продлении ресурса расчёт на прочность является составляющей диагностики технического состояния оборудования, а сама по себе методика расчёта прочности не учитывает деградацию структуры после эксплуатации, но нормы [53] используются совместно с многочисленными нормативными документами, в которых это обстоятельство уже пытаются учесть (микротрещины, балльность структуры, твёрдость и т.д.).

Разрушение в процессе ползучести происходит постепенно. Накопившиеся повреждения в металле влекут за собой процессы зарождения и роста несплошностей (пор). Первые поры обычно образуются задолго до разрушения. Наиболее характерный механизм образования пор в теплоустойчивых сталях – зернограничное проскальзывание. Поры образуются преимущественно по границам ферритных зерен, в плоскости, перпендикулярной действию растягивающих напряжений.

Изменения, происходящие в микроструктуре металла, включают не только зернограничные явления, но фазовые и полиморфные превращения, обычно сопровождающиеся снижением характеристик кратковременной и

длительной прочности, сопротивления ползучести. Характер снижения значений каждой характеристики индивидуален и зависит от многих факторов.

Многофакторность структурно-деградационных процессов и их влияние на прочностные и ресурсные характеристики трубных изделий из сталей и сплавов в полной мере не изучены, а необходимость предвидеть направления развития этих процессов требует при прогнозировании введения в рассмотрение таких структурных параметров материала, которые однозначно определяют его текущее физическое состояние и способны предсказывать на этой основе его индивидуальный ресурс.

В качестве таких параметров могут быть применены структурные напряжения, роль которых в настоящее время или недооценивается, или не учитывается в связи с отсутствием экспериментальных данных по этому вопросу.

5 Обоснование метода исследований

5.1 Общие сведения о структуре границ зерен

В процессе длительной эксплуатации в металле конструкций наблюдаются существенные структурные изменения. Они проявляются, в том числе, в изменениях границ зерен с перемещением и разориентировкой блоков относительно друг друга. Как отмечается [55–61] и др., именно границы зерен определяют деформацию при ползучести и прочностные свойства материала. Границы зерен, занимая значительный объем материала и отличаясь по своей структуре и свойствам от основного твердого раствора, определяют все основные свойства материала, в том числе и прочностные [55, 63]. Они служат препятствиями для распространения пластической деформации от зерна к зерну, а их влияние проявляется в увеличении сопротивления пластической деформации: чем крупнее зерно, тем меньше протяженность межзеренных границ, тем выше сопротивление материала ползучести [55, 62].

Очевидно, что роль границ в формировании прочностных характеристик материала велика. Поэтому границы зерен рассматриваются как важные структурные составляющие материала [55, 56, 60, 63] и как отдельные зернограницные фазы, подобные границе раздела двух фаз [59].

5.2 Межзеренные границы в процессах повреждаемости конструкционных материалов

Технические материалы, конструкционные стали и сплавы содержат в своем составе различные примеси, в том числе и специальные, что сильно повлияет на идеализированное представление о структуре гипотетической усредненной межзеренной границы.

Несмотря на значительный объем исследований в направлении понимания устройства границ в физических представлениях об их структуре имеется больше вопросов, чем ответов. Современная теория так и не дает ответа на основной вопрос применительно к большеугловым границам – о свойствах

границ зерен, определяемых характеристиками поликристаллов. Неясна структура границ, зернограницные фазовые переходы, явления переноса массы в границах, ощущается недостаток экспериментальных данных о структуре границ и их подвижности в термических и механических превращениях. Среди опубликованных материалов нет ни одной гипотезы, которая исчерпывающим образом объясняла бы зернограницные свойства реальных материалов. Отмечается [57, 61], что границы зёрен способны превратить пластичный монокристалл в хрупкий поликристалл, а диффузия вдоль границ зёрен происходит настолько быстро, что границы могут переносить потоки массы больше, чем сами зёрна. Следовательно, границы играют огромную роль в процессах диффузии и теплопроводности и являются градиентными структурами.

В основу представлений о процессах в межзёрнных и внутризёрнных границах закладывается положение об аномальных диффузионных эффектах, на несколько порядков более активных вдоль границ, влияющих на ползучесть, спекание, рекристаллизацию и растворение примесей значительнее, чем в поперечном направлении [57]. Процессы переноса массы в межзёрнных границах описываются диффузионным уравнением Фика по аналогии с уравнением теплопроводности, на решении которого в различных температурных условиях построена современная теория.

Природа дефектов, влияющих на зернограницный массоперенос, установлена частично и является предметом исследований, т.к. требуется подробно изучать диффузию по границам зерен в широком интервале температур на хорошо аттестованных границах. Теоретические расчеты и косвенные свидетельства подтвердили вакансионный механизм диффузии по границам зерен. Причем энергия образования вакансий в границе различна на разных местах, но всегда меньше, чем в решетке, т.е. вакансии в границах образуются легче, чем в объеме [57]. Миграция вакансий происходит преимущественно вдоль оси разориентации. Таким образом, многие процессы массопереноса в поликристаллических материалах контролируются диффузией вакансий по любым границам.

Важное с практической точки зрения явление ползучести технических

материалов может также происходить или за счет движения дислокаций, или за счет диффузии вакансий под действием напряжения.

Движущая сила диффузии – разность концентрации вакансий – возникает под действием напряжений. Растягивающие напряжения приводят к повышению, а сжимающие – к понижению концентрации вакансий, поэтому в образцах при сжатии возникает поток вакансий, направленных из растянутых в сжатые области, а поток массы в противоположном направлении. При этом трещины и поры закрываются, структура материала уплотняется, образуется наклёп.

Считается установленным, что в кристаллических материалах основной массоперенос определяется диффузионным механизмом движения вакансий в межзёренных границах [57].

В работах [59, 62] также отмечается, что границы зерен играют двойственную роль. Они являются не только барьером распространению трещин, но и во многих случаях облегчают процесс их образования и распространения.

Так как границы представляются отдельной фазой материала, то процесс формирования и изменения границ не приостанавливается за период эксплуатации, а продолжается в зависимости от температуры и времени, подвержен релаксационным явлениям и ползучести. Кристаллизация происходит безостановочно, так же как в структуре металла непрерывно происходят фазовые превращения, сопровождается ростом зерна на счёт поглощения матричного материала, межзёренная граница постепенно вырождается, становится неоднородной, и концентрация примесных элементов в межзёренной границе увеличивается. При этом величина внутренних напряжений с течением времени нарастает, приближаясь к пределу временной прочности σ_v , твёрдость материала увеличивается. Приложение внешней нагрузки ускоряет процессы увеличения размеров зерна, твёрдости и прочности, пластические свойства понижаются, возникают явления наклепа. Внутреннее давление в трубах парогенераторов и оболочках твэлов ядерных реакторов создает сложнапряженное состояние в структуре, способствующее нарастанию растягивающих структурных напряжений, которые могут превысить

σ_v , вызвать разрыв зерна и появление структурных пор, которые в процессе ползучести трансформируются в сетку поперечных трещин, останавливающихся на границах зёрен. Поперечные трещины могут сливаться между собой, преодолевая сопротивление межзёренных границ, разрушение трубы происходит в поперечном сечении без видимых признаков пластической деформации.

Продольные трещины возникают в раскristализованном материале в межзёренных границах, возникают внезапно как следствие накопления внутренних напряжений, могут быстро распространяться вдоль трубы на значительные расстояния, труба раскрывается. Чаще всего в материалах труб наблюдается объединённый механизм, сопровождающийся возникновением структурных трещин и их преобразованием в поры, ползучестью и локализованным пластическим разрывом с отдулинами, располагающимися примерно на одинаковом расстоянии вдоль трубы.

Таким образом, многие процессы, протекающие в металле или сплаве в условиях эксплуатации, такие как фазовые превращения, рекристаллизация, ползучесть и др., определяются диффузионными явлениями. Скорость диффузии и перенос массы по границам зерен протекает намного быстрее объемной диффузии, а диффузионный механизм движения вакансий в межзёренных границах определяют растягивающие и сжимающие внутрискрутурные напряжения. В этой связи структурные напряжения, влияющие на формирование межзёренных границ, межзёренные границы, их атомное строение и диффузионные характеристики играют существенную роль в формировании эксплуатационных свойств конструкционных материалов.

5.3 Роль структурных напряжений в ресурсных характеристиках

Существующие в большом многообразии методы и методики исследования структуры по-прежнему не решают проблему технической диагностики стальных конструкций, не делают различия между двумя основными видами разрушения – вязким и хрупким, не выявляют многие особенности разрушения, не устанавливают базовый структурный признак,

отвечающий за растрескивание по границам зерен или сквозь зерно с образованием магистральной трещины, или разрушений смешанного характера.

Принимая во внимание, что надежность металла зависит от степени структурных изменений, вопросам диагностики напряженного состояния при определении критериев разрушения должно уделяться особое внимание. На данном этапе, когда наиболее достоверным критерием повреждаемости металла является выявление порообразования, микроскопические исследования шлифов и реплик сводятся к формальному анализу микроструктуры, позволяющему определять следующие локальные диагностические характеристики состояния стали:

- средний размер зерна;
- плотность распределения и средний размер карбидных включений;
- концентрацию и средний размер пор;
- распределение и средние размеры зональных и магистральных микротрещин.

Высокая степень локальности выявления структурных характеристик вынуждает применять методы статистической обработки результатов, которые не могут служить объективным критерием оценки дальнейшего развития повреждаемости в условиях температурного нагружения или показателем качества проведения термической восстановительной обработки стальных труб.

Методы рентгеноструктурного (РСА) и рентгенофазового анализа (РФА) состояния металла стенок труб паровых котлов позволяют оценивать усредненные структурные характеристики состояния стали с участка площадью порядка 70–100 мм², что на 5–6 порядков превышает поле зрения микроскопа, исследовать температурные структурные изменения непосредственно при температурах превращений и при этом определять собственные внутренние механические напряжения. Информация об изменениях напряженного состояния металла является предметом научных исследований, основой прогнозирования и определения режимов длительной эксплуатации.

Остаточными (внутренними) 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 объемных деформаций в смежных объемах тела и остаются в нем после удаления вызвавших их внешних причин [64, 65].

В соответствии с объемами 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), И. А. Умнову (1871) и Н. В. Калакутскому (1887), которые впервые предложили метод измерения остаточных напряжений [6]. Однако эти работы долгое время оставались незамеченными и только с 20-х годов прошлого века было обращено серьезное внимание на изучение вопросов, связанных с остаточными напряжениями [64].

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

Необходимые условия возникновения остаточных напряжений – появление неоднородности деформированного состояния в различных точках тела без внешней нагрузки. Эта неоднородность может быть вызвана самыми различными причинами: неоднородным тепловым расширением или сжатием при неравномерном нагреве или охлаждении тела, фазовыми превращениями, приводящими к неоднородным объемным изменениям (закалка, затвердевание, охлаждение после сварки и т.д.), неоднородной пластической деформацией и т.д., т.е. возникновением градиентных структур или условий.

Наиболее полная и точная классификация остаточных напряжений была предложена Н. Н. Давиденковым [66]:

– напряжения первого рода или макронапряжения, уравнивающиеся в объемах, соответствующих размерам изделия. Эти напряжения возникают вследствие неоднородности силового (неоднородная пластическая деформация), температурного (неравномерное охлаждение или нагрев) или материального (например, неравномерность концентрации) поля внутри тела. Они могут быть

определены рентгеновским методом по смещению интерференционных линий на рентгенограмме.

– напряжения второго рода – иначе кристаллитные или микронапряжения, уравнивающиеся в объемах соответствующих размерам кристаллитов. Эти напряжения определяемы только рентгеновским методом по размытию (уширению) интерференционных линий на рентгенограмме.

– напряжения третьего рода, иначе искажения кристаллических решеток, уравнивающиеся в объемах, 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.

Остаточные напряжения I рода, или макронапряжения, если они имеются в изделии, могут быть вредными для него. В зависимости от величины остаточных напряжений в различных участках изделия оно начинает упруго деформироваться, то есть в нем появляется коробление. Это явление особенно характерно для крупных изделий. Остаточные напряжения, складываясь с напряжениями, возникшими от внешних сил, могут изменять эксплуатационную прочность изделий. С этой точки зрения они могут быть как полезными, так и вредными: они могут вычитаться или складываться с напряжениями, вызванными внешними силами. Кроме того, макронапряжения могут придавать металлу хрупкость и уменьшать его коррозионную прочность [66], вызывать преждевременное изменение структуры, уменьшать жаропрочность, снижать механические характеристики, приводить к разрушению металла сварных соединений [67] и т.д.

В стенке трубы или в месте сварки в целом существует система напряжений – от рабочего давления, от температурной неравномерности, от остаточных напряжений, кроме того, существует система изгибающих напряжений от самокомпенсации. При колебаниях температуры в стенке трубы будут возникать циклические изменения всех действующих напряжений.

Суммарные напряжения от всех составляющих в локализованных участках могут превзойти предел текучести, что повлечет за собой трещинообразование с последующим накоплением остаточных деформаций. Рабочие напряжения, температурные градиенты, изгибающие напряжения – все это приведет к перераспределению внутренних структурных напряжений.

Остаточные внутрискруктурные напряжения могут служить и самостоятельной причиной образования трещин и разрушения материалов, например, в сварных швах или зонах термического влияния сварки [68]. Кроме того, как отмечалось, они приводят к короблению, формоизменению и изменению размеров деталей и конструкций, овальности трубопроводов.

Срок службы поверхностей нагрева теплообменных аппаратов часто оказывается меньше расчетного ресурса именно из-за недооценки влияния внутрискруктурных напряжений в стенках стальных труб на показатели длительной прочности.

Имея обоснованные представления о характере возникновения, распределения и влияния внутрискруктурных напряжений на ползучесть, механические и теплофизические свойства материала стенки трубы, можно прогнозировать температурные диапазоны безопасной эксплуатации в условиях упрочнения, определить предельную величину теплонапряженности и скорости подъема температуры, выделить температурный диапазон (амплитуду) и скорость изменения температуры термоциклирования, принимать обоснованные решения на параметры и продолжительность опрессовок в процессе механических и тепловых испытаний поверхностей нагрева, добиваться упрочнения в режиме кратковременного повышения давления при установленных температурах рабочей жидкости в гидравлических испытаниях.

5.4 Техника эксперимента

5.4.1 Экспериментальная рентгеновская дифрактометрическая установка ДРОН-3,0

Экспериментальная установка построена на основе серийных промышленных блоков (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Рентгеновский дифрактометр ДРОН-3,0

В установке ДРОН-3,0 используется монохроматическое излучение, источником которого является рентгеновская трубка. Питание трубки осуществляется от источника рентгеновского излучения ИРИС-6. Измерение углового положения дифракционных отражений осуществляется гониометрическим устройством ГУР-8, которое устанавливается на жесткой плите. На этой же плите расположен узел рентгеновской трубки с необходимыми юстировочными регулировками.

Дифрагированное излучение от исследуемого образца через систему щелей Соллера, аналитическую щель, находящуюся на фокусирующей окружности и ограничивающую пучок в вертикальном направлении, попадает в детектор, в котором кванты рентгеновского излучения преобразуются в электрические импульсы.

Импульсы поступают в устройство, электронно-вычислительное унифицированное УЭВУ-М1-2, усиливаются и подаются в одноканальный дискриминатор, который может ограничивать импульсы как по нижнему, так и по верхнему и нижнему уровням, т.е. пропускает лишь импульсы, соответствующие энергии квантов характеристического излучения.

После дискриминатора импульсы могут быть направлены в интенсиметр, где измеряется скорость счета, и в пересчетное устройство, в котором производится счет импульсов за выбранный промежуток времени (метод

таймера) или считывается время, за которое набрано определенное количество импульсов (метод набора постоянного числа импульсов). Управление гониометром производится с панели блока автоматического управления (БАУ).

Вывод результатов измерения скорости счета осуществляется на прямо показывающий прибор интенсиметра и самопишущий потенциометр КСП-4.

Блок автоматического управления (БАУ) предназначен для задания режимов работы, управления электронно-вычислительным устройством и гониометром. Блок автоматического управления работает в четырех режимах: а – запись диаграммы; б – регистрация по точкам; в – интегральный; г – измерение фона.

В блоке автоматического управления производится счет текущего угла по сигналам из гониометра ГУР-8. Информация о величине угла подается в электронно-вычислительное устройство УЭВУ-М1-2.

Источник рентгеновского излучения ИРИС-6 питается от однофазной сети переменного тока частотой 50 Гц напряжением 220 В. Питание на рентгеновскую трубку, расположенную в кожухе дифрактометрической стойки, подается от источника рентгеновского излучения по высоковольтному кабелю. Включение высокого напряжения индицируется лампой, расположенной на кожухе стойки. Питание блока детектирования осуществляется от выпрямителя стабилизированного высоковольтного, расположенного в стойке УЭВУ-М1-2.

Анод рентгеновской трубки и генератор источника рентгеновского излучения ИРИС-6 охлаждается проточной водопроводной водой с расходом не менее 3 л/мин при температуре воды не выше 20 °С.

5.4.2 Установка для рентгенофлуоресцентного анализа EDX 2800

Общий вид спектрометра рентгенофлуоресцентного EDX 2800 EDXRF SPECTROMETR представлен на рисунке 5.2. Спектрометр рентгенофлуоресцентный предназначен для контроля элементного состава твердых и жидких сред, порошков и пленок. Принцип работы спектрометров основан на измерении интенсивности рентгеновского флуоресцентного излучения, испускаемого атомами анализируемой пробы при ее облучении с помощью рентгеновской трубки.



Рисунок 5.2 – Общий вид экспериментальной установки EDX 2800 EDXRF SPECTROMETER для спектрального анализа

В материалах, используемых для детектирования рентгеновского излучения, под воздействием рентгеновских лучей возникают импульсы. Амплитуда этих импульсов пропорциональна энергии воздействующих рентгеновских квантов. Регистрируя амплитуду импульсов, получают информацию об энергии рентгеновских квантов. Число рентгеновских квантов за время измерения, например, импульсы за секунду, называются интенсивностью излучения и содержит, в первом приближении, информацию о концентрации излучающего элемента в пробе.

Для регистрации квантов рентгеновского излучения в энергодисперсионных спектрометрах используется полупроводниковый детектор, охлаждаемый методом Пельтье. Прибор оснащен встроенной видеокамерой, что позволяет локализовать участок измерения до 500 мкм с целью оценки распределения содержания элементов в образце.

С помощью программного обеспечения реализуется полная автоматизация анализа с представлением результатов в виде таблиц, графиков и спектров. Идентификация элементов производится на основе эталонного банка данных. Диапазон измерения массовой доли от 10^{-4} до 100 процентов. Максимальное число элементов, определяемых в пробе – 24.

6 Методика проведения эксперимента

6.1 Материал для исследований

Для определения зависимости распределения внутренних напряжений в металле от циклического нагружения при холодном циклическом деформировании в качестве выбрана аустенитная хроммарганцевая сталь Ди-59, которая проходит апробирование в составе поверхностей нагрева теплогенератора. Химический состав данной стали по ГОСТ 5632-72 (по массе) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали Ди-59 (по массе)

C, %	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	–

Образец для исследований изготовлен из «свежей» трубы диаметром 32 x 6 мм и обработан шлифовальными инструментами, для обеспечения параллельных плоскостей, так как по условиям рентгено съемки требуется, чтобы образец имел плоскость, параллельную плоскости гониометра. В результате, образец принял вид, показанный на рисунке 6.1, с размерами, указанными на рисунке 6.2.

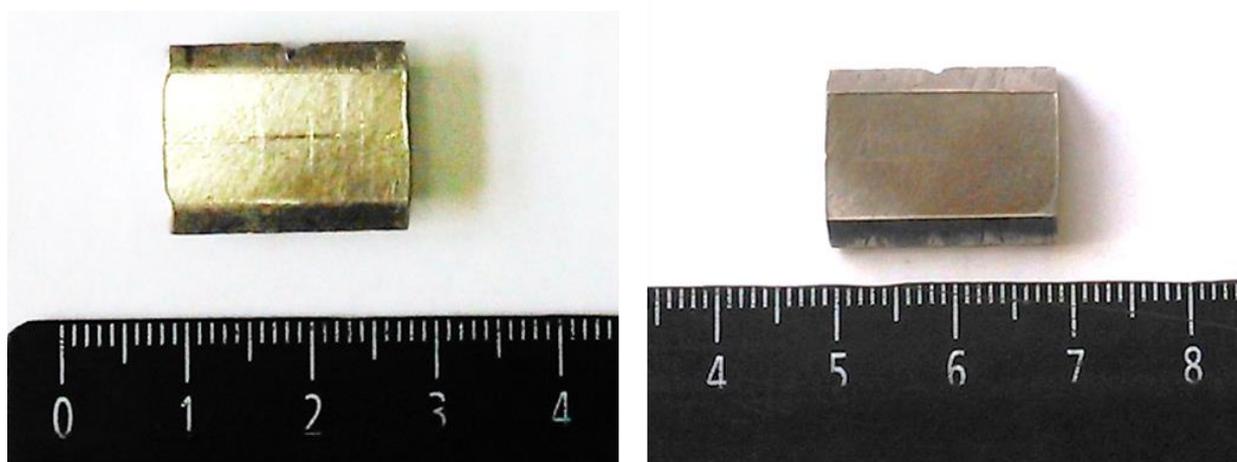


Рисунок 6.1 – Образец трубы из стали Ди-59 (наружная и внутренняя стороны соответственно)

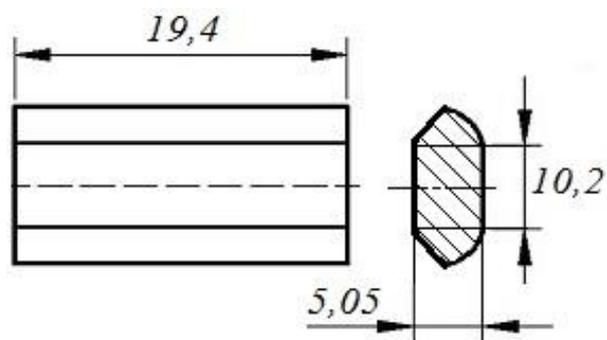


Рисунок 6.2 – Размеры подготовленного образца трубы из стали Ди-59

Исследуемый образец предварительно подвергался форсированному термоциклированию для проявления критериальных признаков старения.

9 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью экономической части данной научно-исследовательской работы является расчёт ее себестоимости. Для достижения этой цели необходимо решить несколько задач:

- спланировать работы по НИР;
- рассчитать основную заработную плату участников, социальные отчисления, амортизацию и прочие затраты;
- рассчитать себестоимость НИР.

9.1 Организация и планирование НИР

Планирование работы заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи, определении участников каждой работы, установлении продолжительности работ в рабочих днях, построении линейного или сетевого графика и его оптимизации [88].

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.

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_{min} – кратчайшая продолжительность работы;

t_{max} – самая длительная продолжительность работы.

9.2 Обоснование потребности в инвестициях в основной капитал

Рассчитывается смета расходов, включающая затраты на приобретение необходимого оборудования для проведения НИР и текущие расходы [88].

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 2.

Планирование НИР представлено в таблице 3.

Затраты на оплату труда приведены в таблице 4.

Линейный график и календарный план-график выполнения НИР показан в таблице 5 и 6 соответственно.

Таблица 2 – 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) Съёмка рентгенограммы	3,5
27 точек	
ИТОГО:	100

Таблица 3 – Планирование НИР

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

Таблица 4 – Основная заработная плата участников НИР

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

Таблица 5 – Линейный график НИР

Должность	Дни												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Руководитель	[График: Руководитель занят с дня 10 по день 130]												
Инженер	[График: Инженер занят с дня 10 по день 20 и с дня 120 по день 130]												
Техник	[График: Техник занят с дня 20 по день 40]												
Лаборант	[График: Лаборант занят с дня 20 по день 100]												
Программист	[График: Программист занят с дня 110 по день 120]												

Таблица 6 – Календарный план-график выполнения НИР

Наименование работ	t _{ож} , 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	[График: Постановка задач с дня 10 по день 10]													Руководитель
Ознакомление с литературой	10	8,20	9,02	[График: Ознакомление с литературой с дня 10 по день 20]													Инженер
Анализ исходной информации	7	5,74	14,76	[График: Анализ исходной информации с дня 20 по день 27]													Инженер
Наладка оборудования	10	8,20	22,96	[График: Наладка оборудования с дня 27 по день 37]													Техник, лаборант
Наработка на отказ, устранение неисправностей	7	5,74	28,70	[График: Наработка на отказ с дня 37 по день 44]													Техник, лаборант
Эксперимент	49	40,16	68,86	[График: Эксперимент с дня 44 по день 93]													Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	81,97	[График: Обработка результатов с дня 93 по день 109]													Лаборант
Обработка результатов	16	13,11	95,08	[График: Обработка результатов с дня 109 по день 125]													Программист
Анализ результатов, выводы	6	4,92	100	[График: Анализ результатов с дня 125 по день 131]													Инженер
Итого	122	100		[График: Итого с дня 10 по день 131]													

9.3 Смета затрат на НИР

9.3.1 Материальные затраты:

Дрон 3.0 – 2280000 руб.,

Высоковольтный источник питания (ВИП) – 940000 руб.,

Потенциометр – 5400 руб.,

Милливольтметр – 2700 руб.,

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

9.3.2 Затраты на оплату труда

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

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

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

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

9.3.3 Отчисления на социальные нужды

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

9.3.4 Амортизация основных фондов

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

9.3.5 Прочие затраты

Оплата электрической и тепловой энергии, оплата за воду

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

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

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

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

9.3.6 Командировочные расходы:

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

9.3.7 Представительские расходы

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

9.3.8 Затраты на обеспечение нормальных условий труда и ТБ

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

9.3.9 Расходы, связанные с управлением производством

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

9.3.10 Себестоимость по НИР

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

9.4 Вывод по финансовому менеджменту

В результате расчета себестоимости научно-исследовательской работы была 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 Юдин В.А. Основы рентгенодиагностики остаточных напряжений труб паровых котлов / В.А. Юдин; науч. рук. Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5–9 октября 2015 г.: в 2 т. –Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – [С. 200–202].

2 Юдин В.А. Сравнение результатов рентгенометрических и металлографических исследований приповерхностной неоднородности состава аустенитной жаропрочной трубной стали для пароперегревателей / В.А. Юдин; науч. рук. Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5–9 октября 2015 г.: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – [С. 203–206].

3 Сёмушкин В.П. Использование современных методов трехмерного моделирования при конструировании котельных агрегатов / В.П. Сёмушкин, В.А. Юдин; науч. рук. С.А. Хаустов // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5–9 октября 2015 г.: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – Т. 1. – [С. 164–166].

4 Юдин В.А., Илясова А.С. Исследование сопротивления экранной трубы упругопластическому деформированию после нагружения термоциклами // I (XVI) Всероссийская научно-технической конференции студентов и магистрантов «Молодая мысль – развитию энергетики», Братск, март 2016 г. (принята в печать).