

На правах рукописи



ПОМАЗОВА АННА ВИКТОРОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 20**

Специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические  
системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Заворин Александр Сергеевич**

**Официальные оппоненты:** **Богачев Владимир Алексеевич**  
Доктор технических наук, Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», главный научный сотрудник отделения материалов

**Смирнов Александр Николаевич**  
Доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

**Ведущая организация:** ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»

Защита состоится 28 декабря 2017 г. в 09.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.269.13  
кандидат технических наук, доцент



А.С. Матвеев

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Одной из приоритетных задач, выделенной в «Основных положениях технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г.», является минимизация расходов на производство электроэнергии и тепла за счет внедрения передовых технологий и современного высокоэкономичного оборудования. Решить эту задачу невозможно без увеличения надежности основного тепломеханического оборудования. Наиболее повреждаемым элементом котельного оборудования являются трубы поверхностей нагрева. При этом для труб из стали 20 зафиксировано различное коррозионное состояние при идентичных условиях эксплуатации, несмотря на соответствие котельных труб требованиям ТУ 14-3Р-55-2001 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов» (введены и используются в теплоэнергетике с 2004 г.). Необходимость определения причин разной повреждаемости труб поверхностей нагрева и разработки методов улучшения эксплуатационных характеристик котельных сталей всегда были актуальными задачами, поскольку разная коррозионная повреждаемость приводит к демонтажу всего экрана, что значительно повышает станционные расходы. В последние годы эти задачи становятся все острее, поскольку физический износ теплогенерирующего оборудования большинства станций достигает 68 %, а способность всех труб сохранять работоспособность в течение расчетного срока службы является критерием надежной и экономичной эксплуатации. Так как основной причиной повреждения труб поверхностей нагрева котлов типа БКЗ-420-140 Омских ТЭЦ является развитие глубокой общей коррозии на наружной поверхности труб, повышение надежности элементов котельных агрегатов необходимо достигать за счет снижения интенсивности коррозионных процессов.

Снижение коррозионной активности среды (переработка и очистка энергетического топлива, ингибирование питательной воды), совершенствование топочных режимов, легирование сталей и др. увеличивает себестоимость электрической и тепловой энергии. Относительно простым (экономичным) и перспективным направлением повышения надежности теплоэнергетического оборудования является совершенствование характеристик микроструктуры, модификация которых влияет на эксплуатационные свойства углеродистых сталей. Для этого широко применяются и разрабатываются режимы термической обработки. Однако, несмотря на созданные научные предпосылки для решения задач комплексного повышения надежности трубных элементов, наличие противоречивых и немногочисленных мнений не позволяет выработать единый критериальный подход к характеристикам микроструктуры котельных сталей.

В связи с вышеизложенным представляет научный интерес исследование роли структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали 20. Наряду с этим актуальность практического приложения таких результатов состоит в поиске решения по формированию наиболее благоприятной микроструктуры и выявлению тем самым неиспользованных возможностей термообработки для повышения ресурса работы труб поверхностей нагрева. Тема работы соответствует приоритетному направлению развития науки, технологии и

техники в Российской Федерации (п.8 «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и критическим технологиям в Российской Федерации (п.27 «Технологии энергоэффективности производства и преобразования энергии на органическом топливе»).

**Цель диссертационной работы** заключается в обосновании увеличения ресурса работы экранных труб применительно к котлам типа БКЗ-420-140, работающим на экибастузском угле, за счет повышения коррозионной стойкости при изменении микроструктурных характеристик путем модификации режимов термической обработки.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1) выявление и систематизация типичных дефектов и повреждений труб экранной системы при сжигании экибастузского угля и причин разной коррозионной повреждаемости труб поверхностей нагрева, изготовленных из стали 20;

2) исследование микроструктурного, структурно-фазового и напряженного состояния, механических свойств, определяющих эксплуатационные свойства стали 20 и их изменение при многократной нормализации;

3) исследование коррозионной стойкости трубной стали в условиях, имитирующих среду газового тракта котла;

4) разработка рекомендаций по повышению коррозионной стойкости труб в условиях теплогенерирующих компаний.

**Методы исследований**: термическая обработка образцов в лабораторных условиях; лабораторные коррозионные испытания; аппаратное исследование состава и свойств с применением методов с высокой разрешающей способностью (рентгенофазовый анализ, растровая микроскопия и др.).

**Научная новизна**:

1) впервые для труб поверхностей нагрева из стали 20, эксплуатируемых при параметрах  $t < 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P \leq 15,5\text{ МПа}$ , установлено, что однородная сорбитообразная микроструктура повышает коррозионную стойкость на 40-50 %;

2) выработан критериальный подход к характеристикам микроструктуры на основе взаимосвязи скорости коррозии и фактора разноточности, определяющий антикоррозионные свойства;

3) получены новые экспериментальные данные о том, что циклическая нормализация, проведенная при разных температурах в диапазоне 900-950 °С, приводит к формированию значительно различающегося микроструктурного, структурно-фазового и напряженного состояния;

4) установлено влияние температуры нормализации и количества ее циклов на характер формирующихся коррозионных отложений;

5) на основе исследования параметров циклической нормализации рекомендован новый режим термической обработки стали 20 – двукратная нормализация при 920 °С, который эффективно замедляет коррозию на наружной поверхности котельных труб.

### **Защищаемые положения:**

– большое различие в характеристиках однородности микроструктуры (фактор разнотерности отличается в 3,5 раза), уровня внутренних напряжений (~ 40 %) является причиной разной коррозионной повреждаемости труб, изготовленных из стали 20;

– скорость коррозии трубных образцов из стали 20 в среде, имитирующей состав продуктов сгорания экибастузских углей, обратно пропорциональна увеличению фактора разнотерности (степени однородности микроструктуры);

– однородная феррито-перлитная микроструктура, формируемая в условиях двукратной нормализации при 920 °С, обеспечивает ровный и плотный слой продуктов коррозии, имеющий хорошую адгезионную связь с поверхностью металла и защищающий ее от взаимодействия с рабочей средой;

– двукратная нормализация при 920 °С влияет на увеличение ресурса труб поверхностей нагрева за счет формирования сорбитообразной структуры с фактором разнотерности, равным 0,5;

– рекомендованный режим, представляющий собой два цикла нормализации при 920 °С, обеспечивает повышение коррозионной стойкости малоуглеродистой стали 20 при сохранении требуемых для котельных труб механических свойств.

### **Достоверность научных положений** подтверждается:

– применением современных методов исследований с высокой разрешающей способностью (растровая электронная микроскопия, рентгеновский микроанализ, рентгенофазовый анализ и др.);

– соответствием основных положений физическим процессам, не противоречащим существующим данным о закономерностях формирования различных структур при термообработке;

– сопоставлением полученных научных результатов с данными других исследований;

– многократной проверкой результатов теоретического и экспериментального исследования, статистической обработкой результатов измерений.

### **Практическая значимость:**

– разработаны рекомендации по термической обработке труб поверхностей нагрева для эффективного увеличения коррозионной стойкости котельных труб, с возможностью ее проведения в условиях тепловой электростанции;

– разработан и запатентован способ термической обработки труб из стали 20, повышающий эксплуатационные свойства поверхностей нагрева (патент № 2580256 «Способ повышения коррозионной стойкости труб из малоуглеродистых сталей»);

– применение предложенного режима термической обработки в технологии производства или предмонтажной подготовки котельных труб позволит увеличить рабочий ресурс за счет повышения уровня коррозионной стойкости, что, в свою очередь, приведет к значительному ресурсосбережению;

– результаты выполненных исследований используются в энергосервисном предприятии ООО «КВАРЦ Групп», экспертной компании ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», генерирующем предприятии энергетики (СП ТЭЦ-5 АО «ТГК-11») и получили положительную оценку Фонда «Энергия без границ», определяющего направления развития электроэнергетики Группы компаний «Интер РАО», включены в образовательную практику по направлению «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V международной молодёжной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г.Томск, 2014 г.), Международной научной конференции "Современные техника и технологии" (г.Томск, 2015 г.), XXI Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (г.Омск, 2015 г.), III Научно-практическая конференция ООО «КВАРЦ Групп» (г.Москва, 2015 г.), Международной конференции: «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г.Казань, 2015 г.), XVI Уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (г.Екатеринбург, 2015 г.), III Научно-практической конференции Группы «Интер РАО» «Создание условий импортозамещения – ключевой фактор повышения эффективности, экологичности и устойчивости бизнеса» (г.Москва, 2015 г.), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (г.Томск, 2016 г.), II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (г.Омск, 2016 г.), Международной молодёжной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г.Томск, 2017 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение энергоэффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения» (г.Омск, 2017 г.).

**Публикации по теме работы:** основные результаты работы представлены в 15 опубликованных работах, среди которых 6 статей в рецензируемых изданиях из списка ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных результатов диссертаций, 2 из которых в журналах, включенных в международную базу данных цитирования Scopus, 1 патент на изобретение.

**Личный вклад автора** заключается: в совместном с научным руководителем определении цели и постановке задач исследований, самостоятельном планировании экспериментов и получении основного массива экспериментальных результатов, изложенных в диссертации, анализе полученных результатов, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке публикаций по теме диссертации. Экспериментальная часть выполнена с использованием оборудования лабораторий ЗАО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», кафедры «Парогенераторостроение и парогенераторные установки» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедры «Прикладная и медицинская физика»

ФГБОУ ВО «Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского», НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Руководство экспериментальной частью работы выполнено при участии кандидата физико-математических наук, доцента Пановой Т.В. Автор выражает благодарность Т.В. Пановой за консультационную помощь при проведении этих экспериментов.

**Структура и объем диссертации:** диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 154 наименований и двух приложений, изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 26 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность повышения коррозионной стойкости труб поверхностей нагрева котельных агрегатов ТЭС, сформулирована цель диссертационной работы. Дано описание научных положений, выносимых на защиту, обоснованы их новизна и практическая ценность.

**В первой главе** показано состояние исследований в области повышения надежности тепломеханического оборудования тепловых электрических станций, значительный вклад в которое внесли П.А. Антикайн, Т.Г. Березина, В.А. Богачев, Е.А. Гринь, В.Ф. Резинских и др.

Показано, что в основном весь контроль за состоянием труб поверхностей нагрева в процессе эксплуатации направлен на анализ состояния и последствий коррозионных процессов. Описаны и обобщены механизмы коррозии в условиях эксплуатации. Рассмотрено влияние эксплуатационных условий (температура, тепловое напряжение, состав среды, вид топлива) и внутренних факторов (состояние поверхности, химический состав, структура сталей) на течение коррозионных процессов. Показано влияние микроструктуры при термических и механических нагрузках на долговечность металла. Отмечены факты выявления разной повреждаемости соседних труб, изготовленных из стали 20 и подвергнутых термической нормализации согласно ТУ 14-3Р-55-2001. Рассмотрены пути повышения надежности и коррозионной стойкости, используемые для труб поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования. Установлено, что наиболее используемым и доступным технологическим способом формирования желательной микроструктуры является термическая нормализация.

Анализ данных, приведенных в этой главе, указывает на необходимость углубления исследований влияния параметров микроструктуры стали 20 на коррозионные свойства изготовленных из нее труб для поверхностей нагрева.

На основе проведенной систематизации и анализа сведений о состоянии проблемы увеличения рабочего ресурса котельных труб поставлены задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** рассматриваются характеристики исследуемых материалов, методические основы экспериментальных исследований и обработки результатов испытаний.

Для исследования приняты образцы с разной эксплуатационной историей:

группа 1 – поврежденные трубы, разрушенные с признаками коррозионных проявлений после различных сроков эксплуатации (198 образцов);

группа 2 – трубы полностью демонтированных панелей экранов после 127 тыс. часов эксплуатации (245 образцов);

группа 3 – сертифицированные бесшовные горячедеформированные трубы в состоянии заводской поставки без термообработки.

Виды испытаний и их последовательность для каждой группы образцов (рис.1) направлены на получение комплексной оценки совокупности механических, теплофизических, структурных характеристик, определяющих надежность и рабочий ресурс труб поверхностей нагрева.



Рисунок 1 – Схема (А) и виды (Б) испытаний образцов по группам труб

Методики эксперимента включали в себя:

1. Проведение многократной нормализации при расширенных температурных параметрах и циклах нормализации. Используемые режимы нормализации: температура 900, 910, 920, 930, 940, 950 °С, количество циклов от 1-го до 5-ти для каждой температуры. По методикам, указанным на рисунке 1Б, была испытана 31 партия образцов (включая образцы в состоянии заводской поставки).

2. Лабораторные коррозионные испытания в стационарных условиях заключались в выдержке образцов в модельной среде, имитирующей состав продуктов сгорания экибастузских углей. Испытуемый образец подвергали в течение определенного времени воздействию агрессивной среды, скорость коррозии каждого образца рассчитывалась как отношение потери массы образца к исходной площади его поверхности и времени испытания:

$$V_m = \frac{m_0 - m_i}{\tau}, \text{ где } V_m \text{ – скорость коррозии (скорость убыли массы), г/ч; } m_0 \text{ – исходная масса образцов, г; } m_i \text{ – масса образца после испытания, г; } \tau \text{ – время испытания, ч } (\tau_1=24 \text{ ч, } \tau_2=168 \text{ ч}).$$

Оценка коррозионных отложений, образовавшихся в агрессивном растворе, проводилась без их удаления непосредственно на образцах на микроскопе Neophot-2.

Определение типа коррозии, формы коррозионного поражения, распределения коррозионного поражения в исследуемых образцах из стали 20 проводилось металлографическим методом с помощью сравнения с

соответствующими типовыми формами, а также измерения глубины коррозионного поражения на металлографическом шлифе.

Для контроля изменения структурного состояния эксперимент сопровождали стандартизированные и гостированные методики, которые отвечают следующим требованиям: воспроизводимость, правильность, сходимость, что позволило сравнивать результаты анализа с другими исследованиями. Все полученные результаты так же сравнивали между собой по исследуемым группам образцов.

Выполненные серии экспериментов включали: морфологический анализ структурных составляющих стали, проведенный на металлографическом анализаторе фрагментов микроструктуры твердых тел "Ресурс С7", включающий в себя инвертированный микроскоп Olympus GF41 с программным обеспечением SIAMS Photolab по ГОСТ 8233-56, ГОСТ 5639-82, ГОСТ 5640-68, ГОСТ 1778-70, СТО 17230282.27.100.005-2008. Программа анализа микроструктуры позволяла в автоматическом режиме рассчитывать размер зерен феррита, соотношение феррита-перлита, количество и вид неметаллических включений, фактор разноразмерности и по полученным данным строить гистограммы распределения полученных величин. Расчет фактора разноразмерности проводился в программном комплексе по формуле:

$$F_z = \frac{f_{max} \cdot Z_{max}}{\sum f_i \cdot Z_i}$$
, где  $f_i, \%$  – доля зерна с определенным номером,  $f_{max}, \%$  – доля зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе,  $Z_i$  – номер зерна,  $Z_{max}$  – номер зерна, занимающего максимальную площадь на шлифе.

Механические испытания проводились соответственно на разрывной машине Р-5 по ГОСТ 10006-80, ГОСТ 1497-84. Оценка коррозионных отложений на микроскопе Neophot-2. Исследование структурно-фазового и напряженного состояния образцов проводилось с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М ( $\lambda_{Cu} = 1,54178 \text{ \AA}$ ) и растрового электронного микроскопа Zeiss SIGMA VP. Измерение локального химического состава было проведено методом EDS при помощи детектора X-Max и программного обеспечения INCA Oxford Instruments. Картины дифракции отраженных электронов были получены на приставке NKL NORDLYSS с программным обеспечением Channel 5. Нормализация проводилась в электропечи камерной СНОЛ-1,4.2,5.1,2/12,5-И1. Химический анализ проводился на оптическом эмиссионном спектрометре ДФС-500 по ГОСТ 18895-97.

**В третьей главе** приводятся результаты исследований повреждаемости труб поверхностей нагрева котлоагрегатов (группа 1) на примере тепловых электростанций АО «ТГК-11». Анализ послеаварийных исследований труб поверхностей нагрева котлов типа БКЗ-420-140 Омских ТЭЦ, работающих на экибастузских углях, проведенного за последние 10 лет с участием автора, позволил выделить основные проблемы эксплуатации. Дефекты, являющиеся причинами повреждения, могут возникать как на стадии изготовления и монтажа поверхностей нагрева, так и в процессе эксплуатации. Одной из причин разрушения котельных труб является неудовлетворительное качество металла,

имеющего даже в состоянии поставки поверхностные или внутренние дефекты, остатки которых сохраняются в трубах после всех технологических операций.

Проанализировано 198 образцов с разрушениями с 15 котлов, что позволило выявить и систематизировать коррозионные повреждения труб экранной системы котлов Омских ТЭЦ (рис.2).

Проведена оценка микроструктурных особенностей и свойств поврежденных элементов при различных механизмах разрушения. Результаты исследования показали, что коррозионные повреждения, протекающие по одному и тому же механизму, наблюдаются в трубах после различной наработки в идентичных условиях эксплуатации. При этом во всех рассмотренных случаях все контролируемые по ТУ 14-ЗР-55-2001 показатели материала труб соответствуют требованиям. Обнаружено, что одним из главных зафиксированных отличий между такими образцами являются характеристики микроструктуры.

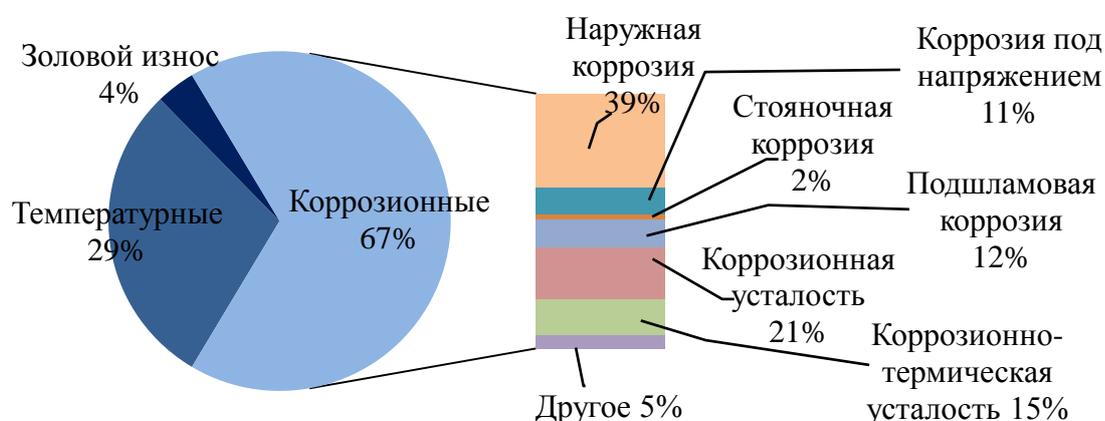


Рисунок 2 – Вклад различных факторов в повреждаемость котельных труб

Результаты исследования демонтированных экранных труб после 127 тыс. часов эксплуатации (вторая группа образцов в количестве 245) показали отсутствие заметного влияния места расположения трубы в тепловоспринимающей панели на скорость коррозии. Поскольку условия эксплуатации в пределах одной поверхности нагрева в одинаковых сечениях мало отличаются, то допустимо различие в скоростях коррозии связать только со структурными параметрами. Для более подробного исследования были взяты 30 образцов (формуляр заднего экрана (8-13 панели) с указанием мест вырезки исследованных образцов представлены на рис.3). Проведенные испытания (химический анализ, механические испытания на растяжение, визуально-измерительный контроль и металлографические исследования) показали, что характеристики всех исследованных труб находятся в пределах требования ТУ 14-ЗР-55-2001. Зависимости между скоростью коррозии и количественным содержанием элементов в исследуемых образцах не выявлено, а влияние коррозионно-активных неметаллических включений так же не является доминирующим.

После режима однократной нормализации при 920-950 °С структура стали должна состоять из феррита и перлита, такая структура обеспечивает требуемый комплекс механических свойств труб. Тем не менее металлографический анализ

показал, что несмотря на одинаковые режимы термообработки труб поверхностей нагрева, микроструктуры труб отличаются значительно (по причинам, которые рассмотрены в главе 1). Примеры таких структур труб с поверхностями нагрева приведены на рис.4. Наблюдается разная форма цементита (образцы № 1, 3 – пластинчатый перлит с различной дисперсностью; образец № 2 – зернистый перлит). Дисперсность пластинчатого перлита меняется от 2 до 4 по ГОСТ 8233, т.е. межпластинчатое расстояние варьируется от 0,30 мкм до 0,60 мкм. Изменение номера зерна находится в диапазоне 7-12. В нескольких образцах наблюдается видманштеттовая структура (ферритные выделения в виде игол) (рис.4А) и полосчатость (рис.4В) значительного балла.

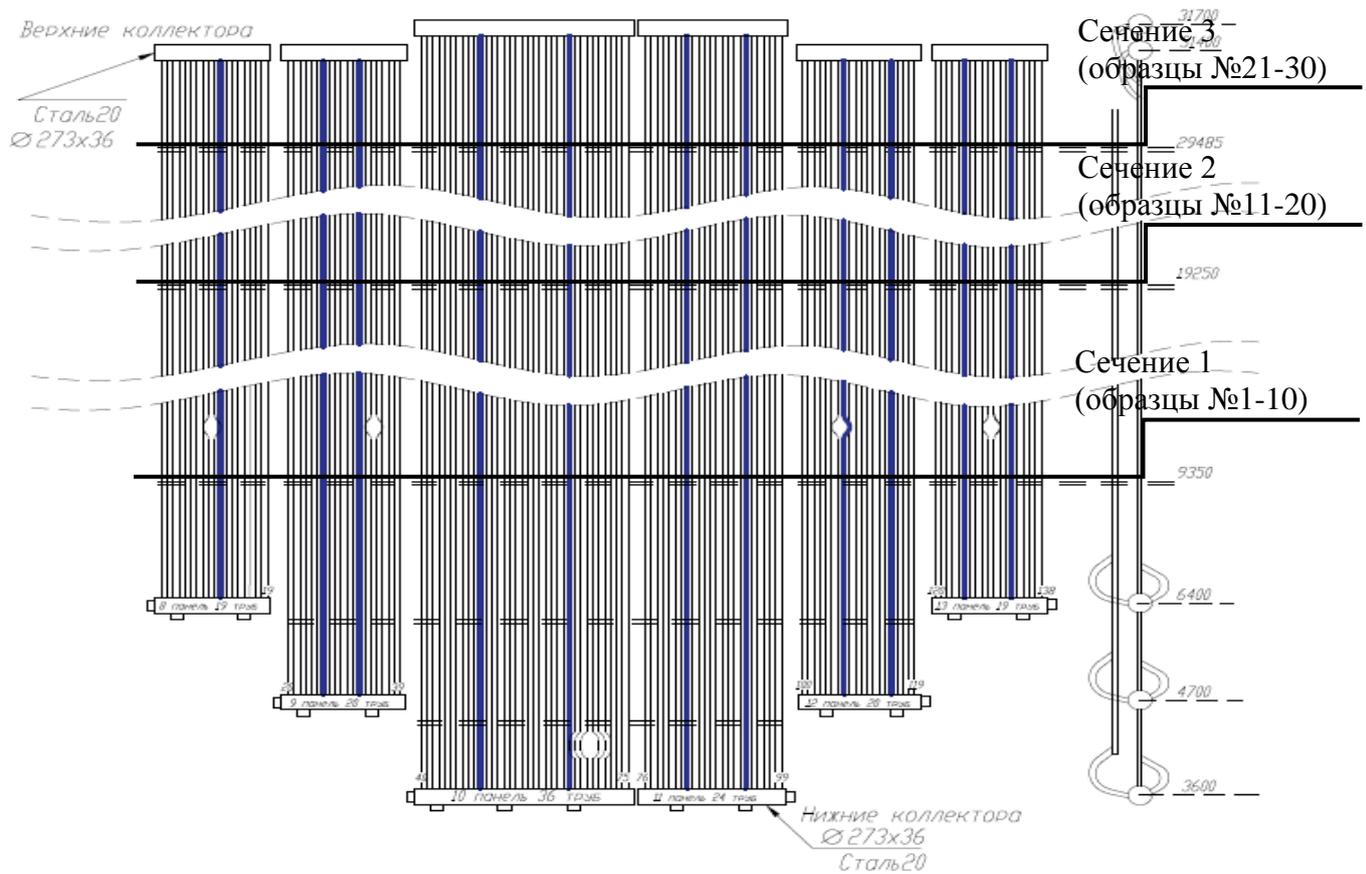


Рисунок 3 – Formular заднего экрана (8-13 панели) с указанием мест вырезки исследованных образцов (выделены синим)

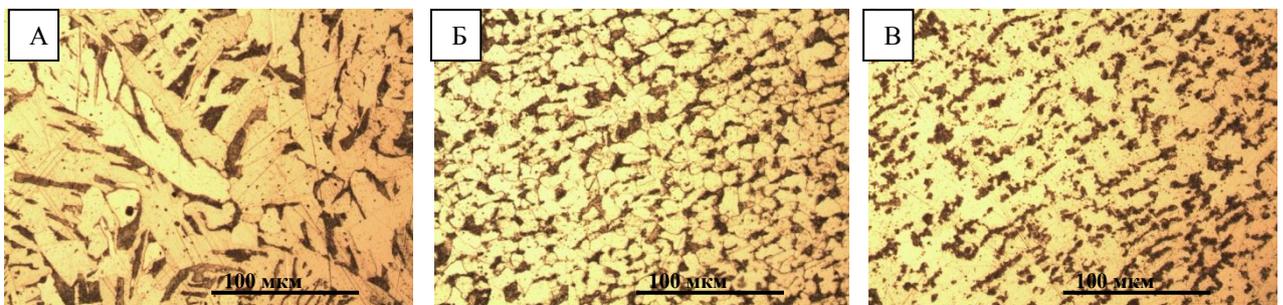


Рисунок 4 – Микроструктура труб №1(А), №2(Б), №3(В) поверхности нагрева

Зависимость скорости коррозии от среднего диаметра зерна (рис.5) для трех групп (по плотности коррозионно-активных неметаллических включений

(КАНВ)) показывает, что в каждой группе между параметрами существует слабая корреляционная связь, которая устанавливает только общую тенденцию (направление) зависимости скорости коррозии от среднего диаметра зерна и свидетельствует, что размер зерна не является единственно определяющим фактором влияющим на скорость коррозии металла на наружной поверхности труб поверхностей нагрева.

Установлено (рис.6), что решающую роль в изменении скорости коррозии наружной поверхности котельных труб играет разноразмерность микроструктуры (с увеличением фактора разноразмерности и однородности зерен скорость коррозии уменьшается). При этом следует отметить, что любой вид неоднородности (по составу, электропроводности и напряжению отдельных участков, наличию примесей) может приводить к увеличению скорости коррозии, однако их влияние как микродефектов значительно более низкое, чем влияние разноразмерности.

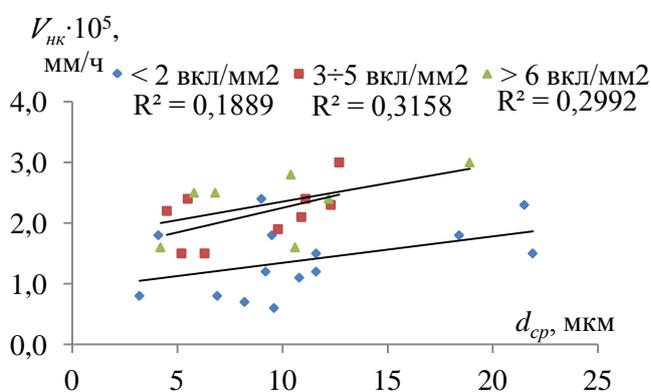


Рисунок 5 – Зависимость скорости коррозии от среднего диаметра зерна (по плотности КАНВ)

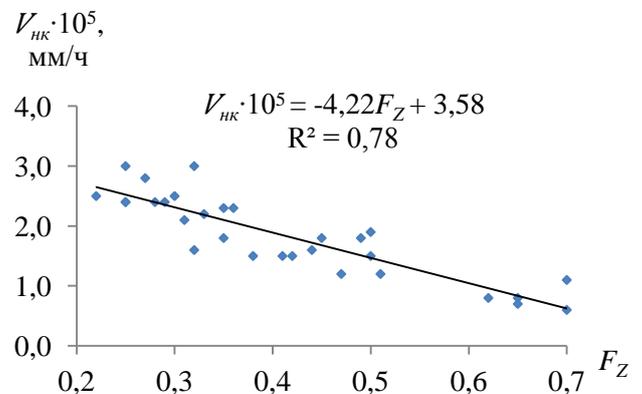


Рисунок 6 – Зависимость скорости коррозии от значения фактора разноразмерности экранных труб

Анализ микроструктуры поврежденных труб, разрушенных после различных сроков эксплуатации, подтвердил изложенные выше положения о влиянии фактора разноразмерности на скорость наружной коррозии.

На наружной поверхности обнаружены дефекты типа раскатанной корочки, представляющие собой частичное отслоение металла (рис.7А), присутствует обезуглерожженный слой, межкристаллитные трещины (рис.7Б). На внутренней поверхности трубы обнаружены технологические дефекты в виде канавок с закругленным дном, сопровождающиеся изменением структуры (рис.7В). Наличие дефектов поверхности может служить началом зарождения трещин при термоциклировании, способствовать развитию коррозионных процессов, развитая поверхность труб является предпосылкой для скопления на ней отложений, трудноудаляемых при эксплуатации теплообменного оборудования. Вблизи наружной поверхности по всей окружности трубы микроструктура состоит из неравноосных зерен феррита и перекристаллизованного перлита (рис.7А,Б). В остальных исследуемых участках микроструктура состоит из равновесного феррита и перлита. Глубина дефектов не превышает допустимой величины по требованиям технических условий и не является основанием для отбраковки.

По результатам измерения микротвердости наблюдается структурная неоднородность (рис.8А) и перепад размерных параметров микроструктуры по толщине стенки трубы в состоянии поставки (рис.8Б), что указывает на наличие градиента температуры и скорости охлаждения в производстве труб. Образовавшийся структурный градиент приводит к существенным изменениям скорости развития повреждения.

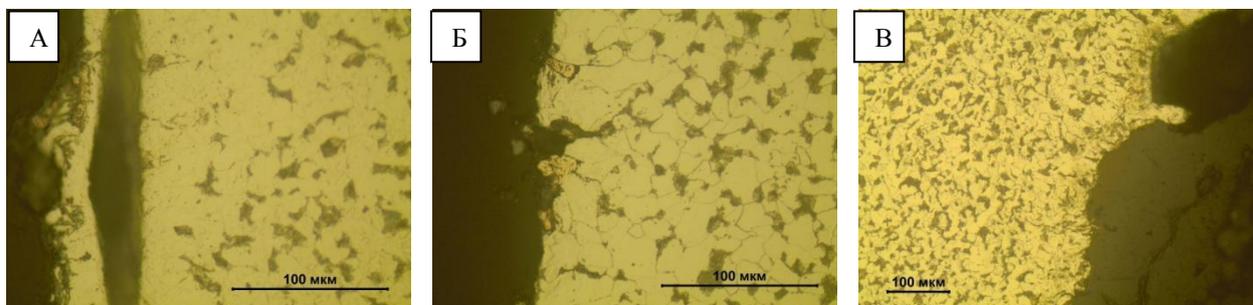


Рисунок 7 – Дефекты типа раскатанной корочки (А), межкристаллитные трещины (Б), канавки (В)

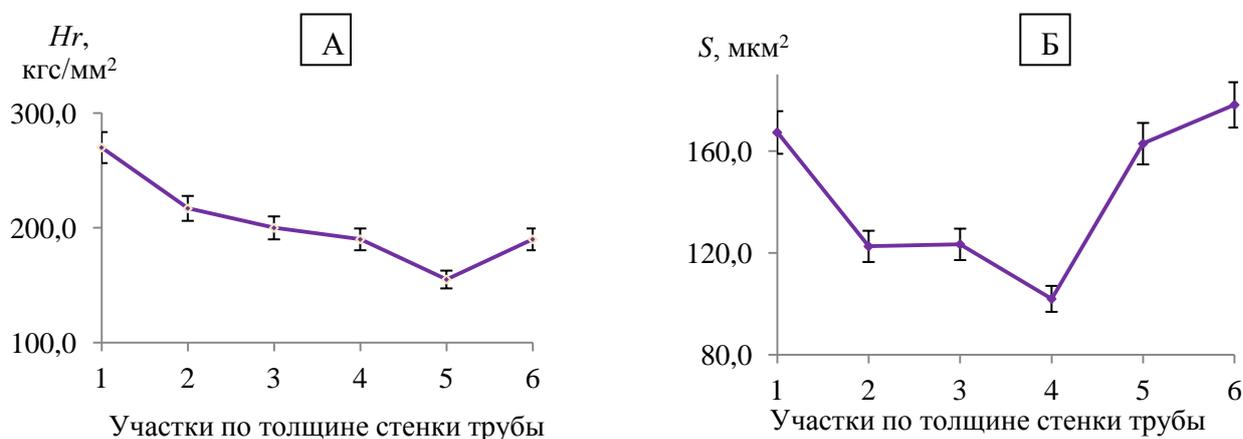


Рисунок 8 – Изменение микротвердости (А) и средней площади зерен (Б) по толщине стенки трубы

Таким образом, в трубах в состоянии поставки обнаружены дефекты, которые, с одной стороны, находятся в рамках требований технических условий на поставку, а с другой стороны, уже достигли половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб.

На основе исследований в этой главе сделаны следующие промежуточные выводы.

– До 80 % аварийных остановов котлов Омских ТЭЦ связано с повреждениями теплообменных труб, большая часть которых (~ 39 %) произошла из-за развития процессов коррозии на наружной поверхности.

– Качественное различие эксплуатационных свойств трубной стали связано с характеристиками микроструктуры. На скорость коррозии наружной поверхности труб поверхностей нагрева наиболее значительное влияние оказывает фактор разнотерности: чем выше данный параметр (соответственно выше однородность зеренной структуры), тем ниже наблюдаемая скорость коррозии.

– Обнаруженные дефекты в трубах в состоянии поставки могут достигать половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. Поэтому структурный градиент можно рассматривать как фактор существенных изменений скорости развития повреждения.

– Установлено, что регламентированный режим термообработки не исключает формирования структур со значительной разнородностью. Характеристики микроструктуры труб, имеющих идентичный химический состав, варьируются в широком интервале. Так, было обнаружено, что структура перлита может быть пластинчатой, зернистой, смешанного типа, а в некоторых случаях не полностью сформированной и со значительной сфероидизацией и дисперсностью, при этом зерно феррита меняется в диапазоне 7-12 номера.

Результаты, представленные в главе 3, показали, что для практических целей безаварийной эксплуатации и продления срока службы тепловоспринимающих элементов, изготовленных из стали 20, следует проводить дополнительные мероприятия, улучшающие эксплуатационные свойства труб поверхностей нагрева. Это обусловлено прежде всего тем, что в новых трубах уже обнаруживается неравномерность распределения дефектов по поверхности трубы, структурная неоднородность и разнородность, что вызывает неравномерность прочностных и эксплуатационных свойств, и, в конечном счете, способствует нарушению надежности работы трубных систем. Закономерным направлением поиска увеличения рабочего ресурса труб являются дополнительные к действующим техническим условиям режимы термообработки, которые могли бы улучшать однородность зеренной структуры.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования влияние многократной нормализации на физико-механические и коррозионные свойства металла труб. Дано обоснование используемых параметров нормализации: при расширенном температурном диапазоне ( $t_{\text{норм}}=900-950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и циклах (от одного до пяти) с целью выравнивания размеров зерен феррита в стали 20 и повышения за счет этого коррозионной стойкости труб поверхностей нагрева.

Рентгенофазовый анализ показал, что в исходном состоянии и после всех видов термической обработки структура стали 20 является феррито-перлитной. Относительная объемная доля ферритной фазы составляет 68,6-85,4 %, перлитной – 14,6-31,4 %. В процессе циклической термообработки при граничных температурах нормализации 900 и 950 °C наблюдается значительное изменение содержания феррита, тогда как в интервале 910-940 °C существенного изменения в составе фаз не обнаружено.

Дифрактограммы образцов в исходном состоянии и подвергнутых регламентированной термообработке в одном цикле, представлены на рис.9. Анализ положения, формы и изменения интенсивности дифракционных пиков показал, что с увеличением температуры нормализации до 930 °C включительно происходит уменьшение дифракционных пиков, их сдвиг в сторону больших углов и сужение. Начиная с 940 °C происходит увеличение интенсивности дифракционных пиков, их сдвиг в сторону меньших углов и уширение. Подобные изменения свидетельствуют о перераспределении легирующих элементов в

процессе термообработки и увеличении микродеформаций, вызываемых при образовании дефектов кристаллического строения.

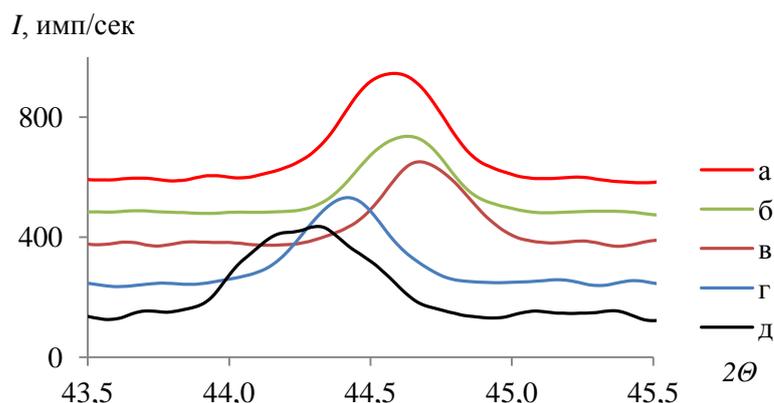


Рисунок 9 –Участок дифрактограмм образцов после различных режимов термообработки (после однократного режима при: а – 950 °С, б – 940 °С, в – 930 °С, г – 920 °С; д – в состоянии заводской поставки)

Электронно-микроскопический анализ показал, что в исходном состоянии структура состоит из феррита и тонкопластинчатого перлита. Средняя площадь зерен феррита составляет 84,7 мкм<sup>2</sup>. Цементит располагается в основном в перлитных зернах в виде тонких пластинок. Межпластинчатое расстояние составляет 0,34 мкм, толщина цементитных пластинок - 0,14 мкм (рис.10А). Установлено, что циклы многократной структурной перекристаллизации при 900-950 °С приводят к уменьшению объемной доли перлитных колоний, при этом двукратный цикл нормализации при температуре 900-930 °С приводит к уменьшению межпластинчатого расстояния и толщины пластинок цементита (табл.1), перлит становится сорбитообразным, микроструктура становится равновесной, выравниваются и измельчаются размеры зерен (рис.10Б). Вследствие фазовой перекристаллизации при 940-950 °С значительная часть цементита из разрушенных перлитных зерен выделилась по границам ферритных зерен, образовав там прослойки. Этот процесс является опасным для пластичности и прочности стали, поскольку разрушение обычно происходит по межфазным границам цементит-феррит. При двукратном цикле при температуре 950 °С эти параметры превышают исходный размер, наблюдается ярко выраженная грубая видманштеттовская структура (рис.10В).

Таблица 1 – Величина относительного изменения ( $r_i/r_{исх}$ ) размерных параметров перлита при однократной и двукратной нормализации при различных температурах

$r_i/r_{исх}$	Температура нормализации, °С	Количество циклов	Температура нормализации, °С						
			900	910	920	930	940	950	
Межпластинчатое расстояние	1	1	1,90	0,89	1,11	1,19	1,49	1,52	
	2	2	1,52	0,31	0,44	0,45	0,54	1,02	
Толщина цементитных пластинок	1	1	2,21	1,47	1,15	1,47	1,47	2,21	
	2	2	2,06	0,65	0,41	0,44	0,50	1,38	

Контролируемые параметры микроструктуры соответствуют требованиям нормативно-технических документов на трубы поверхностей нагрева (табл.2) в режимах термообработки кроме тех, в микроструктуре которых наблюдался видманштетт недопустимого по ГОСТ 5640 и ТУ 14-3Р-55-2001 балла.

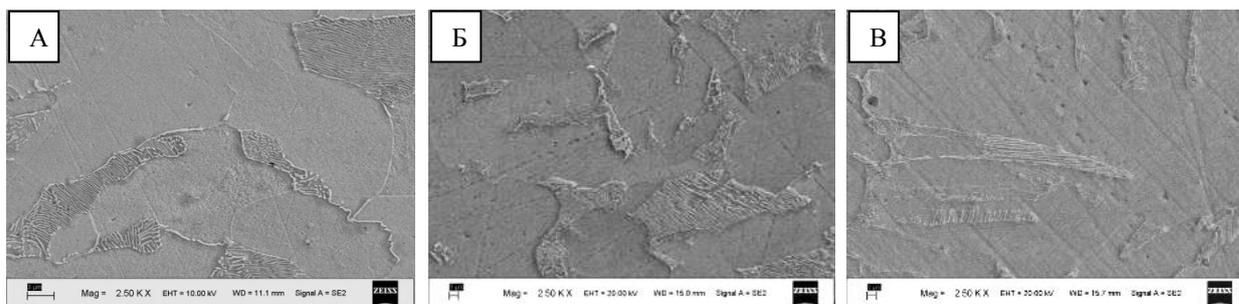


Рисунок 10 – Микроструктура при увеличении  $\times 2500$  в образце трубной заготовки в исходном состоянии (А), после двукратной нормализации при  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Б) и при  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  (В)

Таблица 2 – Соответствие контролируемых параметров микроструктуры требованиям НТД на трубы поверхностей нагрева («+» – удовлетворяет требованиям НТД, «-» – не удовлетворяет требованиям НТД)

Количество циклов	Температура нормализации, $^{\circ}\text{C}$					
	900	910	920	930	940	950
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	-
3	+	+	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-	-
5	+	-	-	-	-	-

Установлено, что первый цикл нормализации во всем исследованном температурном интервале приводит к увеличению степени однородности микроструктуры (рис.11). Второй цикл нормализации при температурах –  $900$ ,  $910$ ,  $920$ ,  $930$ ,  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  так же способствует увеличению фактора разнотерности. После третьего цикла нагрева-охлаждения наблюдается снижение фактора разнотерности, исключение составляет образец, подвергнутый нормализации при  $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Четвертый и пятый цикл нормализации не оказывают значительного влияния на однородность зеренной структуры. Установлено, что наиболее эффективными режимами, уменьшающими разнотерность микроструктуры, являются режим двукратной нормализации при температуре  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $930\text{ }^{\circ}\text{C}$  и однократный режим при  $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом максимального значения  $0,49$  фактор разнотерности достигает при двукратной нормализации при температуре  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Наименее однородная микроструктура и соответственно минимальное значение фактора разнотерности –  $0,14$  наблюдается после трехкратной структурной перекристаллизации при  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Энергодисперсионный анализ показал, что циклы многократной структурной перекристаллизации при  $900$ - $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводят так же и к изменению концентраций раскислителей в фазах. Известно, что кремний, растворяясь в феррите, повышает прочность, но ухудшает стойкость против коррозии. Наименьшая концентрация кремния зафиксирована после двукратной нормализации при  $920\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $0,18\%$  вес, что должно положительно сказаться на антикоррозионных свойствах.

Результаты испытаний на статическое растяжение при комнатной температуре показали, что по мере увеличения температуры термообработки и количества циклов, механические свойства ухудшаются. По мере увеличения

количества циклов и температуры нормализации разрушение образцов при испытании становится хрупким, что связано с формированием видманштеттовой структуры, характеризующейся пониженными характеристиками пластичности. Изменение механических свойств образцов после двукратной нормализации при 920 °С приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Предел прочности ( $\sigma_B$ ), предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ), относительное сужение ( $\psi$ ) образцов

Режим термообработки	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Исходное состояние трубной заготовки	54,2±0,8	48,1±0,7	26,8±0,5	48,1±0,7
Двукратная нормализация при 920 °С	46,5±0,7	33,7±0,5	32,4±0,5	69,2±1,0
Требования ТУ 14-ЗР-55-2001	42,0-56,0	≥22,0	≥24,0	≥45,0

Реализуемые режимы термической обработки приводят к изменениям механических свойств и микроструктурных характеристик и могут быть связаны с изменением объема элементарной ячейки стали 20 (рис.12) и характера формирующихся остаточных напряжений (рис.13). Таким образом, установлено, что в трубах, термообработанных в рекомендованном ТУ температурном интервале 920-950 °С, формируется феррит с разным объемом элементарной ячейки и различным уровнем внутренних напряжений металла, что может приводить к отличиям в уровне эксплуатационных (коррозионных) свойств.

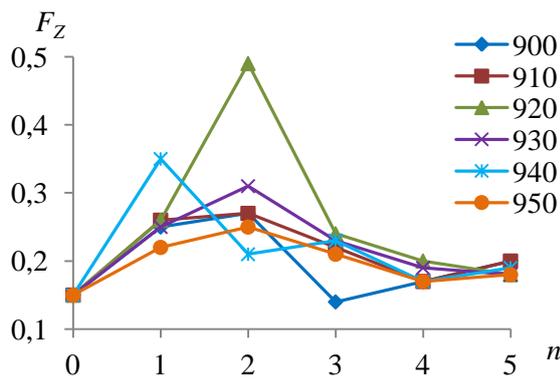


Рисунок 11 – Зависимость фактора разноразмерности от параметров нормализации

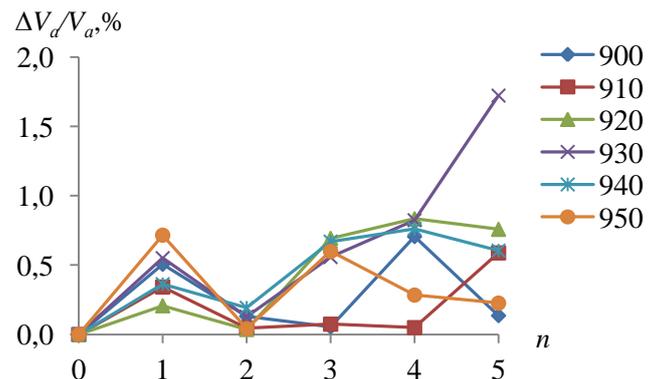


Рисунок 12 – Относительная деформация кристаллической решетки феррита в зависимости от параметров нормализации

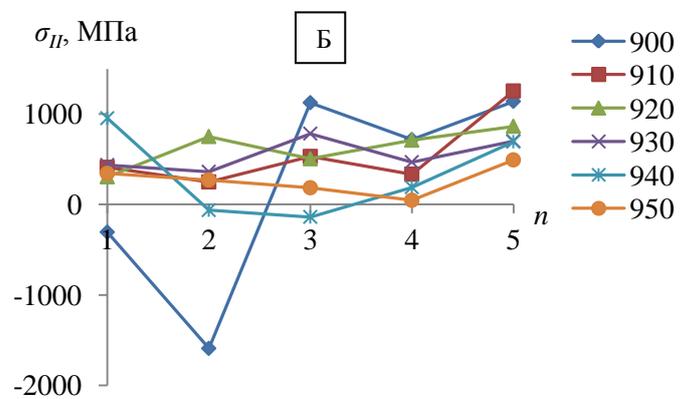
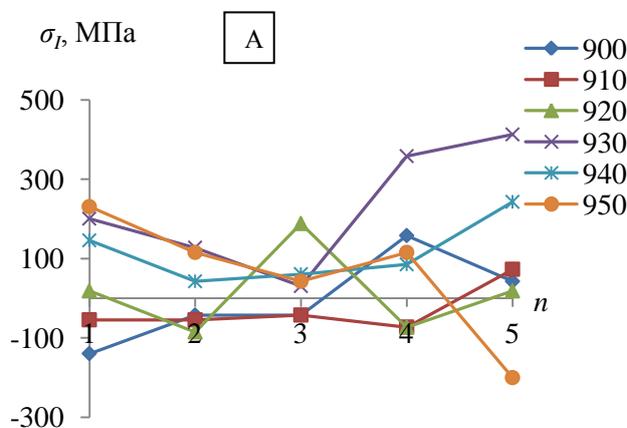


Рисунок 13 – Напряжения первого (А) и второго (Б) рода в зависимости от количества циклов нормализации при различных температурах

Обнаружено увеличение характеристик пластичности (не выходящее за рамки требований ТУ), что, по-видимому, связано с полученным значением плотности дислокаций. При режиме двукратной нормализации при 920 °С наблюдаются минимальные искажения объема решетки феррита и сжимающие остаточные напряжения.

При проведении лабораторных коррозионных испытаний установлено, что наиболее низкая скорость коррозии свойственна образцам, подвергнутым нормализации при  $t_{\text{норм}} \geq 920$  °С и выше (рис.14). Аналогичные результаты получаются и при увеличении времени коррозионных испытаний. Наименьшая скорость коррозии наблюдается при двукратной нормализации при 920 °С. Установлено, что при режиме двукратной нормализации при  $\tau_1$  (24 часа) снижение этой величины составляет 38 % от исходного значения, при увеличении времени испытания до  $\tau_2$  (168 часов) скорость коррозии уменьшается на 51 %. После третьего цикла нормализации эта величина уменьшается на 23 % и 35 %, после четвертого – на 16 % и 29 %, после пятого – на 7 % и 20 % для времени испытания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  соответственно. Наибольшая эффективность двукратной нормализации при увеличении времени испытания указывает на хорошую адгезионную связь продуктов коррозии с поверхностью испытуемого металла. Снижение скорости коррозии при этом объясняется пассивирующими свойствами образовавшихся продуктов коррозии, более равномерно распределенных на сформировавшейся однородной зеренной структуре.

Влияние разноточности микроструктуры на скорость коррозии показывает рис.15, где представлены данные по образцам, показавшим удовлетворительные результаты по механическим и микроструктурным характеристикам. Анализ корреляционных зависимостей показывает, что влияние степени однородности микроструктуры на коррозионную стойкость образцов является доминирующим. Скорость коррозии уменьшается с увеличением степени однородности зеренной структуры.

Возможные причины установленного эффекта могут быть связаны с тем, что равные по размерам зерна формируют равновесную, менее напряженную структуру. Неравновесная структура характеризуется наличием в ней соседствующих крупных и мелких зерен, из-за чего возникают дополнительные напряжения, которые являются причиной образования микрогальванического элемента, необходимого для протекания электрохимической реакции. Кроме того, растягивающие напряжения разрывают хрупкие оксидные пленки на краях трещины, обеспечивая доступ коррозионных реагентов к анодной поверхности. Вышеприведенная интерпретация экспериментальных результатов свидетельствует о существенной зависимости коррозионных характеристик от размерных параметров зерен. Лучшие антикоррозионные свойства зафиксированы в образце после двукратной нормализации при 920 °С, фактор разноточности которого равен 0,5. На поверхности этого образца в результате коррозионных испытаний формируются пологие коррозионные язвы глубиной до 21,1 мкм (рис.16Б). На поверхностях образцов стали 20 в исходном состоянии зафиксировано формирование коррозионных язв глубиной до 47,3 мкм (рис.16А).

На поверхности образцов после двукратной нормализации при 930 °С обнаружены межкристаллитные трещины, развивающиеся от коррозионных язвин, глубиной 58,2 мкм (рис.16В). На этой стадии возможно возникновение хрупких разрушений оставшегося сечения при напряжениях, превышающих предел прочности.

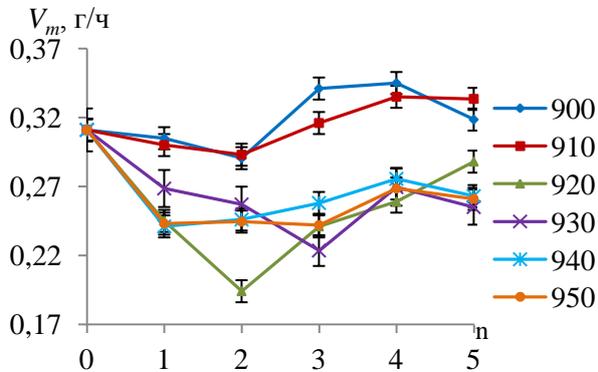


Рисунок 14 – Зависимость скорости коррозии от количества циклов при различных параметрах нормализации ( $\tau_I=24$  часа)

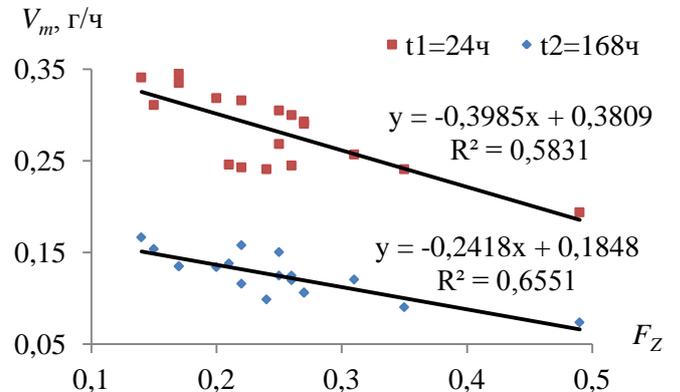


Рисунок 15 – Зависимость скорости коррозии от фактора разности зернистости при разном времени испытания

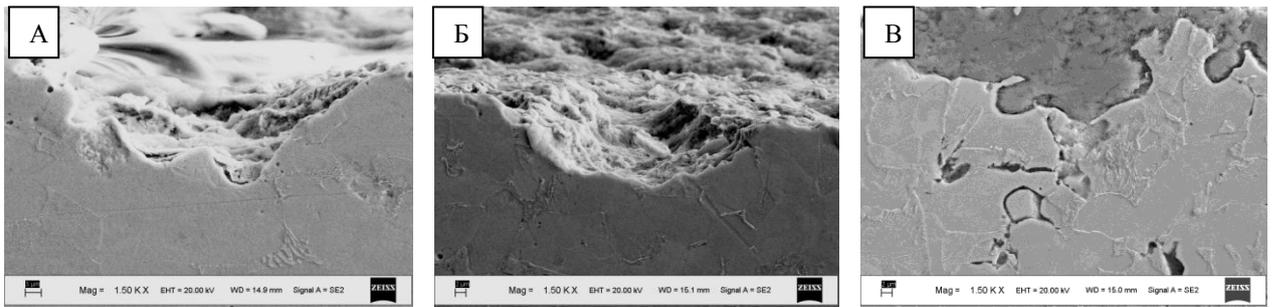


Рисунок 16 – Поверхности образцов после коррозионных испытаний ( $\tau_I=24$  часа):  
А – в состоянии заводской поставки, Б – после двукратной нормализации (920 °С),  
В – образец после двукратной нормализации (930 °С)

Проведенное сравнение регламентированного однократного режима нормализации и двукратного режима с повышенной степенью структурной однородности ( $t_{\text{норм}}=920$  °С) показало, что разница в скоростях коррозии достигает 35 %.

Проведена приблизительная оценка увеличения ресурса труб после двукратной нормализации при 920 °С, который оказался на ~ 30 % выше, чем у труб, подвергнутых регламентируемой термообработке по ТУ 14-3Р-55-2001:

$$\frac{pD_n}{2[\sigma] + p} = s_n - |\delta| - h$$

, где  $p$  – давление теплоносителя, МПа;  $D_n$ ,  $s_n$  – номинальный наружный диаметр и толщина стенки труб соответственно, мм;  
 $[\sigma]$  – номинальное допускаемое напряжение в металле, МПа;  $\delta$  – отрицательное предельное отклонение толщины стенки трубы, мм;  $h$  – глубина коррозии на наружной и внутренней поверхности труб, мм.

Примерный расчет по проекту цеха термической обработки для нужд АО «ТГК-11», реализующего режим двукратной нормализации труб поверхностей нагрева при 920 °С, позволил оценить принципиальную возможность его применения. Организация такого цеха термообработки позволит обеспечивать ТЭЦ трубами поверхностей нагрева с повышенными коррозионными свойствами.

Расчет ресурсосбережения на примере теплогенерирующих компаний г. Омска, которые выступают потенциальным заказчиком рассмотренных работ, показал, что предложенный режим является достаточно простым, доступным и реализуемым в условиях тепловой электростанции способом.

Основными результатами проведенных исследований в этой главе являются следующие:

– При режиме двукратной нормализации при 920 °С формируется сорбитообразная структура с минимальной величиной относительной деформации кристаллической ячейки феррита, с повышенной однородностью микроструктуры, что увеличивает коррозионную стойкость углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, на 40-50% при варьировании времени испытания от 24 до 170 часов.

– Трехкратное увеличение фактора разнотекстности позволяет при этом режиме термообработки сократить глубину межкристаллитных трещин в 1,5 раза (с 31,7 мкм до 21,1 мкм).

– На поверхности образцов труб стали 20, прошедших двукратную нормализацию при 920 °С, при коррозионных испытаниях формируется относительно ровный и плотный слой продуктов коррозии, имеющий достаточно хорошую адгезионную связь с поверхностью металла.

– Использование режима двукратной нормализации при 920 °С позволит существенно увеличить срок эксплуатации тепловоспринимающих элементов котлов за счет увеличения коррозионной стойкости.

– Рекомендуемый режим двукратной нормализации при 920 °С, обеспечивающий повышение коррозионной стойкости труб из малоуглеродистой стали 20, является достаточно простым, доступным и реализуемым в условиях тепловой электростанции способом. Проект по созданию цеха термической обработки является экономически выгодным и для реализующей его компании, и для теплогенерирующих компаний.

### **Выводы**

1. Основной причиной повреждения экранных труб (~ 39 %) котлов Омских ТЭЦ является коррозия на наружной поверхности. Коррозионные повреждения, протекающие по одному и тому же механизму, наблюдаются в трубах после различной наработки в идентичных условиях эксплуатации.

2. Нестабильность эксплуатационных (коррозионных) свойств в трубах, изготовленных из стали 20, связана с формированием перлита с разной морфологией пластин, феррита с отличающимися объемами элементарной ячейки и с различным уровнем внутренних напряжений металла.

3. В трубах в состоянии поставки зафиксированы дефекты, которые, с одной стороны, находятся в рамках требований технических условий на поставку, а, с другой стороны, уже достигли половины браковочного уровня для эксплуатируемых труб. В трубной стали в состоянии поставки обнаружен перепад размерных параметров микроструктуры. Образовавшийся структурный градиент приводит к существенным изменениям скорости развития повреждения.

4. Установлено, что оптимальным режимом термообработки для труб из углеродистой стали 20, применяемой в теплоэнергетике для изготовления труб поверхностей нагрева, является режим двукратной нормализации при 920 °С, повышающий однородность микроструктуры и увеличивающий коррозионную стойкость изделий.

5. Предложенный режим нормализации обеспечивает минимальные искажения объема решетки феррита, формируются сорбитообразный перлит и сжимающие остаточные напряжения, зафиксирована минимальная растворимость кремния. Глубина межкристаллитных трещин образцов, прошедших двукратную нормализацию при 920 °С, сокращается в 1,5 раза (с 32 мкм до 21 мкм), на поверхности образцов после коррозионных испытаний формируется относительно ровный и плотный слой продуктов коррозии, имеющий достаточно хорошую адгезионную связь с поверхностью металла.

6. Установлена взаимосвязь между скоростью коррозии и фактором разнотерности – скорость коррозии уменьшается с увеличением фактора разнотерности. Обнаруженное при этом увеличение характеристик пластичности (не выходящее за рамки требований технических условий) и образование менее опасных коррозионных язв при двукратной нормализации при 920 °С коррелирует с формированием однородной сорбитообразной зеренной микроструктуры. Расчетное увеличение ресурса труб по результатам эксперимента составляет ~ 30 %.

7. Расчетом показана возможность создания цеха термической обработки для нужд АО «ТГК-11», который будет экономически выгоден и реализуем в условиях теплогенерирующих компаний.

#### **Работы, опубликованные по теме диссертации:**

*В изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. **Помазова, А.В.** Влияние разнотерности структуры на коррозионную стойкость наружной поверхности труб из углеродистой стали 20, применяемых в теплоэнергетике / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия», 2014. – т. 14, № 4. – С. 37–44.
2. **Помазова, А.В.** Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. № 5. – С. 15-21.
3. **Помазова, А.В.** Исследование влияния циклической нормализации на структурно-фазовое состояние стали 20 / А.В. Помазова, Т.В. Панова // Известия ВУЗов. Физика. – 2015г. – Т. 58, №7/2. – С.137-141.
4. **Помазова, А.В.** Влияние многократной структурной перекристаллизации стали 20 на коррозионную стойкость труб поверхностей нагрева / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Теплоэнергетика. – 2015. – № 4. – С. 26-31.
5. **Помазова, А.В.** Взаимосвязь теплопроводности дефектных структур котельных труб со стойкостью к коррозионно-термической усталости / А.В. Помазова, А.С. Загорин, А.И. Артамонцев, Т.В. Панова // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2017. – № 10(4). – С. 557-571.

*Индексируемые Scopus:*

6. **Pomazova, A.V.** Effect of Repeated Structural Recrystallization of Grade 20 Steel on Corrosion Resistance of Pipes of Heating Surfaces / A.V. Pomazova, T.V. Panova, G.I. Gering // Thermal Engineering. – 2015. –№4. – pp. 255-259.

7. **Помазова, А.В.** Особенности микроструктурной неоднородности материала котельных труб из стали 20 в состоянии заводской поставки / А.В. Помазова, А.И. Артамонцев, А.С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2016. – Т. 327. – № 11. – С.68-75.

*В рецензируемых изданиях и сборниках трудов конференций:*

8. **Помазова, А.В.** Роль факторов формы зеренной структуры в электрохимической коррозии котельных труб, изготовленных из углеродистой стали 20 / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – №3. – С. 68-71.

9. **Помазова, А.В.** Оценка влияния размера зерна углеродистой стали 20 на коррозионную стойкость котельных труб в условиях эксплуатации / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии: материалы VI международной заочной научно-практической конференции. – Москва: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. – С. 41-51.

10. **Помазова, А.В.** Роль структурных факторов в повышении коррозионной стойкости трубной стали при циклической термообработке / А.В. Помазова, Т.В. Панова, Г.И. Геринг // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. науч.- техн. конф., Т.2. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 225-229.

11. **Помазова, А.В.** Исследование влияния циклической нормализации на структурно-фазовое состояние стали 20 / А.В. Помазова // Сборник тезисов, материалы Двадцать первой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-21, Омск): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург – Омск: издательство АСФ России, 2015. – С. 534-536.

12. **Помазова, А.В.** Анализ остаточных напряжений в стали 20 при циклической нормализации / А.В. Помазова, Т.В. Панова // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 144-146.

13. **Помазова, А.В.** Влияние многократной нормализации на теплопроводность поверхности нагрева теплоэнергетических котлов / А.В. Помазова, Т.В. Панова // IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: сборник материалов докладов / в 4 т. Т.1. – Казань: казан. Гос. Энерг. Ун-т, 2015. – С. 273-280.

14. **Помазова, А.В.** Анализ структурных характеристик как основа повышения надежности поверхности нагрева котлов / А.В. Помазова, Т.В. Панова // Уральская школа молодых металловедов: сборник материалов и докладов XVI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 7-11 декабря 2015 г.). В 2 ч. Ч.1. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С.228-231.

15. **Помазова, А.В.** Исследование микроструктурной и поверхностной неоднородности новых котельных труб / А.В. Помазова // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 125-130.

16. **Помазова, А.В.** Обоснование внедрения способа термической обработки, обеспечивающего повышение коррозионной стойкости труб поверхностей нагрева / А.В. Помазова, А.С. Заворин // Повышение энергоэффективности объектов теплоэнергетики и систем теплоснабжения: Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2017. – С. 166-172.

*Патенты:*

17. Патент 2580256 RU. Способ повышения коррозионной стойкости труб из малоуглеродистых сталей / **Помазова А.В.**, Панова Т.В., Геринг Г.И. Заявлено 20.11.2014; Опубликовано 10.04.2016 Бюл. № 10 – 10 с.: ил.