

На правах рукописи

Мицун

НОШИН
Мария Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
С РАЗРАБОТКОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ
ИЗ СТАЛИ МАРКИ 10Х13Г12БС2Н2Д2 (ДИ59)**

Специальность 05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2017

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»).

Научный руководитель:

Богачев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник отделения материалов ОАО «ВТИ».

Официальные оппоненты:

Корнеев Алексей Евгеньевич – доктор технических наук, директор центра коллективного пользования – заведующий отделом физико-химических исследований металлов Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»);

Попов Александр Борисович – кандидат технических наук, главный эксперт по надёжности и ресурсу тепломеханического оборудования управления технической поддержки «Энел Россия».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Российской академии наук (ИНЭПХФ им. В.Л. Тальрозе РАН).

Защита состоится «1» июня 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 при ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14, ОАО «ВТИ».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.222.001.01,
доктор технических наук



Г. А. Рябов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно приказу РАО «ЕЭС России» № 142 от 29.03.2001 г., с целью повышения надёжности котлов для сжигания мазута и угля в течение ряда лет производилась частичная замена пароперегревателей из аустенитной хромоникелевой стали марки 12X18H12T на аустенитную хромомарганцевую сталь марки ДИ59 с повышенной жаростойкостью и жаропрочностью. Массовые повреждения конвективных и ширмовых пароперегревателей при гидравлическом испытании котла с естественной циркуляцией типа ТПЕ-216М нового угольного энергоблока № 3 на Харанорской ГРЭС в 2012 г. обусловили необходимость разработки для лабораторий металлов и отделов технической диагностики теплоэлектростанций инструкции по входному и эксплуатационному контролю пароперегревателей из стали марки ДИ59. Методика определения остаточного ресурса должна стать частью инструкции по эксплуатационному контролю. Поскольку пароперегреватели котлов ТЭС работают в условиях тепловой неравномерности, неравномерного разупрочнения и ползучести металла, методика должна базироваться на результатах исследования ресурсных характеристик стали марки ДИ59.

Харанорская ГРЭС – не единственная теплоэлектростанция, где используется сталь марки ДИ59. В 2014 г. введены в эксплуатацию новые угольные энергоблоки № 8, 9 с котлами с естественной циркуляцией типа ТПЕ-223 на Черепетской ГРЭС, в которых часть пароперегревателей выполнена из стали этой марки. Пароперегреватели из стали марки ДИ59 в течение длительного периода эксплуатируются в газомазутных и угольных прямоточных котлах со сверхкритическими параметрами пара, например, на Кармановской ГРЭС, Костромской ГРЭС, ТЭЦ-21, -22, -23, -25, -26 ПАО «Мосэнерго».

Существующая система диагностики пароперегревателей основывается на зависимости эквивалентной температуры эксплуатации от наработки и структурных превращений в металле и на зависимости предела длительной прочности металла от температуры и расчётного ресурса. Для стали марки

ДИ59 зависимость эквивалентной температуры не установлена, а зависимость предела длительной прочности нуждается в уточнении из-за недостаточного количества опытных данных в области рабочих напряжений.

Актуальность темы обусловлена отсутствием или невысокой достоверностью необходимых ресурсных характеристик для адекватного прогнозирования времени надёжной эксплуатации пароперегревателей из стали марки ДИ59.

Цель работы заключается в повышении надёжности котлов с пароперегревателями из стали марки ДИ59.

Исходя из цели работы и анализа состояния проблемы, были поставлены следующие **задачи**:

– проведение экспериментальных исследований ресурсных характеристик стали марки ДИ59, а именно:

химического состава, условий зарождения и роста σ -фазы,

предела длительной прочности при рабочих напряжениях в пароперегревателях;

– на основании проведённых исследований получение зависимостей:

для определения эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей по содержанию σ -фазы,

для расчёта предела длительной прочности и допускаемого напряжения в металле от температуры и времени эксплуатации;

– разработка методики определения остаточного ресурса пароперегревателей из стали марки ДИ59 по результатам исследования представительных вырезок из труб.

Научная новизна. Впервые установлены химический состав и связь содержания σ -фазы в стали марки ДИ59 с номером зерна, температурой, напряжением и временем эксплуатации. Получены новые данные по длительной прочности стали марки ДИ59 при рабочих напряжениях в пароперегревателях. Предложены зависимости для определения эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей из стали марки ДИ59 по содержанию σ -фазы

и расчёта предела длительной прочности и допускаемого напряжения в металле по эквивалентной температуре и времени эксплуатации. На основе полученных зависимостей разработана методика определения остаточного ресурса пароперегревателей из стали марки ДИ59 по результатам исследования представительных вырезок из труб.

Практическая значимость работы. Методика определения остаточного ресурса, как составная часть инструкции по эксплуатационному контролю пароперегревателей из стали марки ДИ59 внедрена в филиале «Харанорская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация» в 2014 г. и используется при разработке мероприятий для предотвращения повреждений труб и повышения надёжности котла типа ТПЕ-216М.

Востребованность работы подтверждена выполненным ОАО «ВТИ» научным договором «Услуги по разработке стандартов технической организации для нужд производственной деятельности «Интер РАО ЕЭС» № 1/861 от 12.07.2013 г.

Методология и методы исследования. В работе использованы стандартные методы металлографического анализа, высокотемпературных испытаний металла на старение и жаропрочность, сертифицированные методики измерений.

Основные положения, выносимые на защиту:

– результаты исследования химического состава, условий зарождения и роста σ -фазы в стали марки ДИ59, а также длительной прочности металла при рабочих напряжениях в пароперегревателях;

– разработанные зависимости для определения эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей из стали марки ДИ59 по содержанию σ -фазы;

– разработанные зависимости для расчёта предела длительной прочности и допускаемого напряжения в стали марки ДИ59 по эквивалентной температуре и времени эксплуатации;

– методика определения остаточного ресурса пароперегревателей из стали марки ДИ59 по результатам исследования представительных вырезок из труб.

Личный вклад автора. Автор выполнил анализ состояния проблемы по теме диссертации. Эксперименты, интерпретация и обобщение полученных данных проведены автором самостоятельно или при его непосредственном участии совместно с коллегами по работе и научным руководителем.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов подтверждена современными экспериментальными методами исследования, применением при обобщении опытных данных фундаментальных физических законов и их математического описания, практическим подтверждением результатов исследований. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации. Разработанная методика апробирована на конвективном пароперегревателе высокого давления котла типа ТГМП-114 Костромской ГРЭС после длительной эксплуатации.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 14-й научно-технической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» (Москва, 2015 г.), Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (Москва, 2015 г.), III Международной Уральской научно-практической конференции «Обеспечение надёжности тепломеханического оборудования. Техническое диагностирование и экспертиза промышленной безопасности» (Челябинск, 2015 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в шести печатных работах, три из которых опубликованы в журнале, рекомендованном Высшей Аттестационной Комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка использованной литературы из 84 наименований, содержит 142 страницы машинописного текста, включая 41 рисунок и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе сделан анализ современного состояния исследований ресурсных характеристик аустенитных сталей пароперегревателей котлов ТЭС. Описаны преимущества и недостатки стали марки ДИ59 по сравнению со сталью марки 12Х18Н12Т. Выполнена оценка методики эксплуатационного контроля металла труб пароперегревателей из стали марки 12Х18Н12Т. Анализ состояния проблемы позволил сделать следующие выводы:

- пароперегреватели работают в условиях тепловой неравномерности, неравномерного разупрочнения и ползучести металла. Остаточный ресурс пароперегревателей зависит от наработки, эквивалентной температуры и напряжения в металле при эксплуатации;

- остаточный ресурс можно определить только по результатам лабораторного исследования металла представительных вырезок из труб, сделанных с учётом условий эксплуатации;

- эквивалентную температуру эксплуатации характеризует количество выделившейся σ -фазы в металле. Поведение σ -фазы изучено только в стали марки 12Х18Н12Т. Химический состав, условия зарождения и роста количества σ -фазы в стали марки ДИ59 не исследовались;

- наиболее полно изучена длительная прочность стали марки 12Х18Н12Т, в меньшей степени исследована длительная прочность стали марки ДИ59. Недостаточное количество опытных данных для стали марки ДИ59 в области рабочих напряжений не позволяет корректно оценить стандартный предел длительной прочности;

- методика определения остаточного ресурса по результатам исследования вырезок разработана только для пароперегревателей из стали марки 12Х18Н12Т, для стали марки ДИ59 она отсутствует.

Во второй главе представлены сведения о металле, методиках и оборудовании для исследования. В качестве объекта исследования были взяты промышленные пароперегревательные трубы из стали марки ДИ59 в состоянии поставки номинальным диаметром 32/24, 36/26 и 60/50 мм соответственно для ширмового пароперегревателя второй ступени (ШПП-2), конвективного пароперегревателя высокого давления (КППВД) и конвективного пароперегревателя низкого давления третьей ступени (КППНД-3) котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС. Металл был подвергнут высокотемпературному старению и испытанию на жаропрочность (ползучесть и длительную прочность).

Старение проведено в муфельных печах при температурах 585, 650 и 700 °С в течение 12000 ч. Использованы кольцевые образцы труб шириной 10 мм. Часть образцов периодически (через 500, 1000, 4000, 7000, 10000, 12000 ч) безвозвратно извлекали из печей для измерения содержания σ -фазы. Число испытанных образцов – 54. Отклонение температуры в зоне расположения образцов не более 0,5 %.

Испытания на ползучесть и длительную прочность проведены с помощью машин АТС 2330 СС-230. Использованы образцы длиной и шириной рабочей части соответственно 44,4 и 10 мм. Наружная и внутренняя поверхность образцов механически не обрабатывалась. Разность температур по длине образцов $\pm 0,1$ °С, погрешность приложенной нагрузки не более 0,5 %.

Испытание на ползучесть проведено при температуре 750 °С и напряжении в рабочей части 60 МПа. При деформации ползучести 0,17; 0,46; 1,1; 2,5 %, соответствовавшей долям исчерпания ресурса приблизительно 0,1; 0,3; 0,5; 0,7, образцы безвозвратно извлекали из машин для измерения содержания σ -фазы в рабочей и головной части образцов. Число испытанных образцов – 12.

Испытание на длительную прочность проведено при температурах 700 и 750 °С и напряжениях в рабочей части 40, 60, 80 МПа. Металл трубы номинальным диаметром 32/24 мм дополнительно испытан при напряжении 30 МПа. Максимальная длительность испытания составила 8590 ч, число испытанных образцов – 14.

Металлографический анализ проводился на нетравленных и травленных шлифах. Выделившаяся σ -фаза исследовалась при помощи оптического инвертированного микроскопа Leica DMI 5000M при 1000-кратном увеличении. Площадь частиц σ -фазы рассчитывалась методом графического интегрирования с использованием окуляра с квадратной сеткой, содержащей 80 узлов. Для обеспечения погрешности расчёта менее 10 %, в каждом шлифе изучено 50 полей зрения. Содержание σ -фазы определялось отношением площади частиц к площади шлифа.

Структурные превращения в стали марки ДИ59 исследовались на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Vega3LMH, а рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) – на СЭМ с помощью энергодисперсионной приставки X-Max-20.

Химический состав металла образцов из стали марки ДИ59 определялся спектральными методами. Применялось следующее оборудование:

- искровой оптико-эмиссионный спектрометр Q4 TASMAR;
- рентгенофлуоресцентный анализатор S1 Titan.

Твёрдость металла измерялась методом Виккерса с использованием прибора Wolpert-Wilson 450SVD.

В третьей главе изложены результаты исследования эволюции σ -фазы и обобщения с зависимостями для определения эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей из стали марки ДИ59.

Результаты качественного химического анализа металла трубы номинальным диаметром 60/50 мм после старения в течение 12000 ч при температуре 700 °С приведены на рисунке 1. Видно, что частицы σ -фазы представляют собой выделения неправильной формы и расположены по телу и границе зерна. Размер частиц в пограничной зоне больше из-за повышенного коэффициента диффузии. Частицы σ -фазы по сравнению с телом зерна обогащены ферритообразующими хромом и кремнием, обеднены железом, никелем и медью.

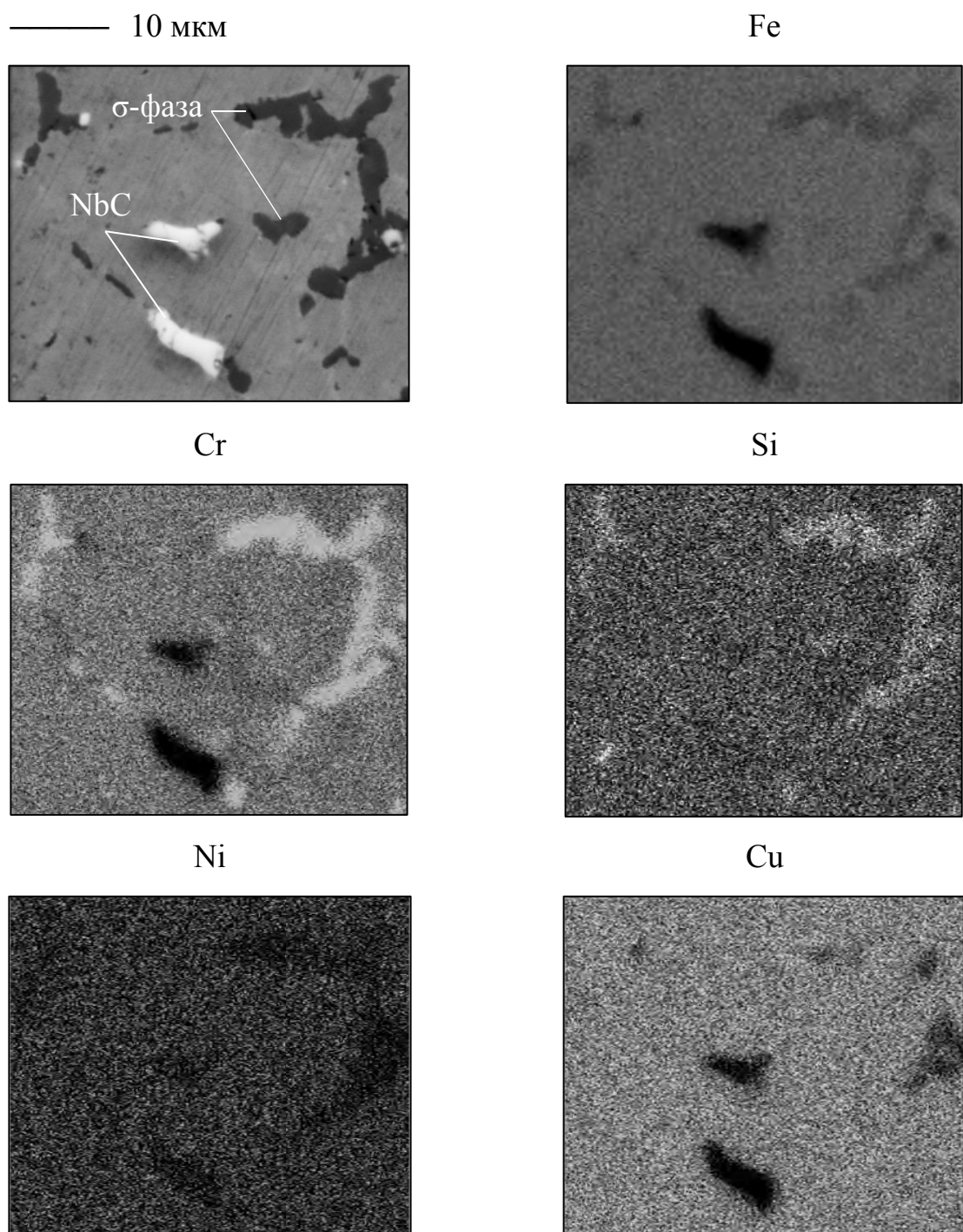
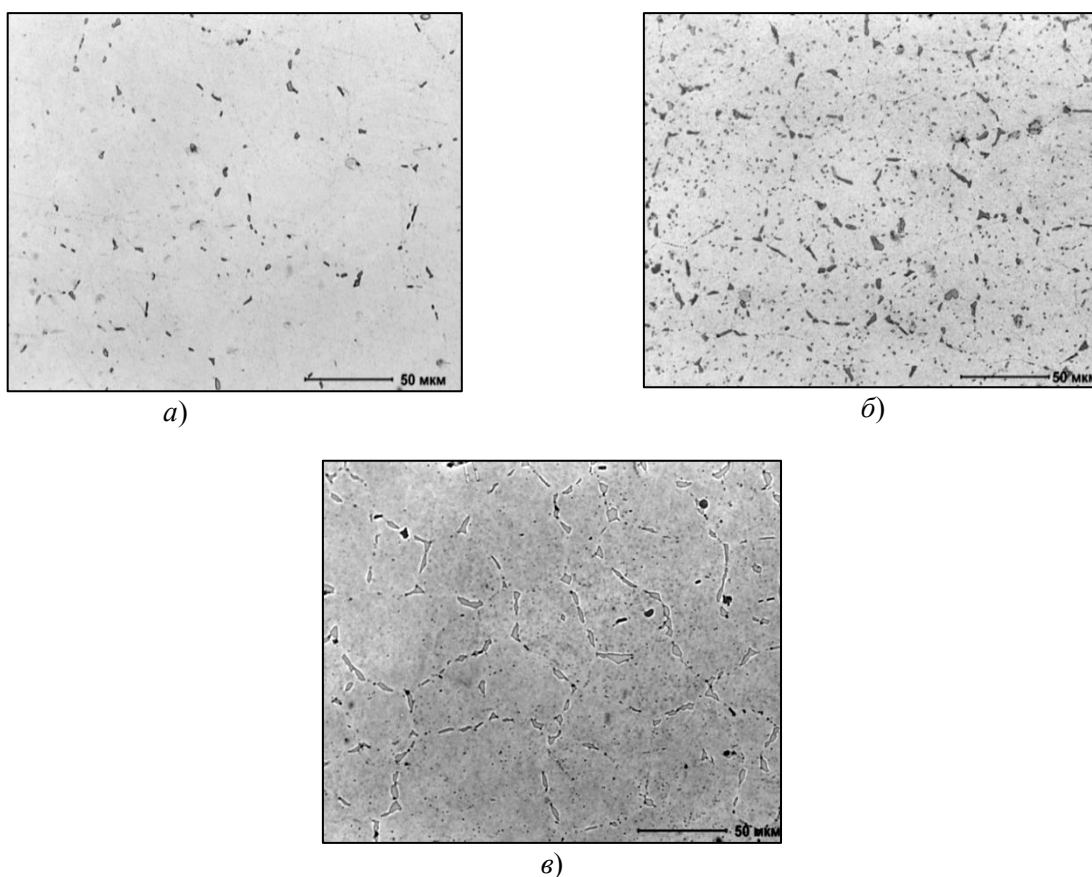


Рисунок 1 – Электронное изображение микроструктуры и карты распределения химических элементов в металле трубы из стали марки ДИ59 после старения при 2000-кратном увеличении (СЭМ)

Исследование металла после старения при температурах 650 и 700 °С и испытания на жаропрочность показали, что химический состав матрицы остается неизменным; в пограничной зоне зёрен присутствуют карбиды, обогащённые ниобием, хромом, ниобием и хромом, ниобием и титаном; σ-фаза обогащена кремнием и хромом, обеднена железом, лишена ниобия; концентрации

углерода в теле зёрен и σ -фазе равны и соответствуют формуле стали; концентрация химических элементов в σ -фазе незначительно изменяется во времени; σ -фаза состоит исключительно из кремния, марганца, хрома и железа; химический состав σ -фазы в металле испытанных образцов и пароперегревательных труб после длительной эксплуатации одинаков и приблизительно соответствует формуле $Fe_{7,84}Cr_{4,21}Mn_{1,89}Si$.

При схожих параметрах испытания по росту содержания σ -фазы в металле трубы располагаются в следующем порядке: 36/26, 60/50, 32/24 мм. Поведение σ -фазы демонстрирует одинаковую закономерность: чем больше температура, напряжение и время испытания, тем больше содержание выделившейся фазы. Влияние напряжения на распределение и содержание σ -фазы показано на рисунке 2. Содержание σ -фазы зависит также от номера зерна [см. уравнение (14)].



a – после старения; *б* – после испытания на ползучесть при напряжении 29,4 МПа; *в* – после испытания на длительную прочность при напряжении 80 МПа.

Рисунок 2 – Распределение и содержание σ -фазы в стали марки ДИ59 при температуре 700 °С в течение приблизительно 4000 ч, 1000-кратное увеличение (оптика)

Количество выделившейся σ -фазы в металле c_σ , % однозначно характеризует вклад условий эксплуатации в структурные превращения в аустенитных сталях. Установлено, что рост содержания σ -фазы во времени описывается параболическим порядка $\frac{1}{2}$ законом, в котором вклад температуры учитывается с помощью уравнения Аррениуса, а вклад напряжения – с помощью соотношения для энергии активации диффузии при ползучести.

Опытные данные по содержанию σ -фазы в металле трубы номинальным диаметром 60/50 мм из стали марки ДИ59 со средним пределом длительной прочности и содержанием вторичных фаз аппроксимированы уравнениями

для старения в интервале температур 585–650 °С

$$c_\sigma = 1,45 \cdot 10^{10} \sqrt{\exp\left(-\frac{404750}{RT}\right)\tau}, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная равная 8,314 Дж/(моль · К);

T – абсолютная температура испытания, К;

τ – время испытания, ч;

для старения в интервале температур 650–700 °С

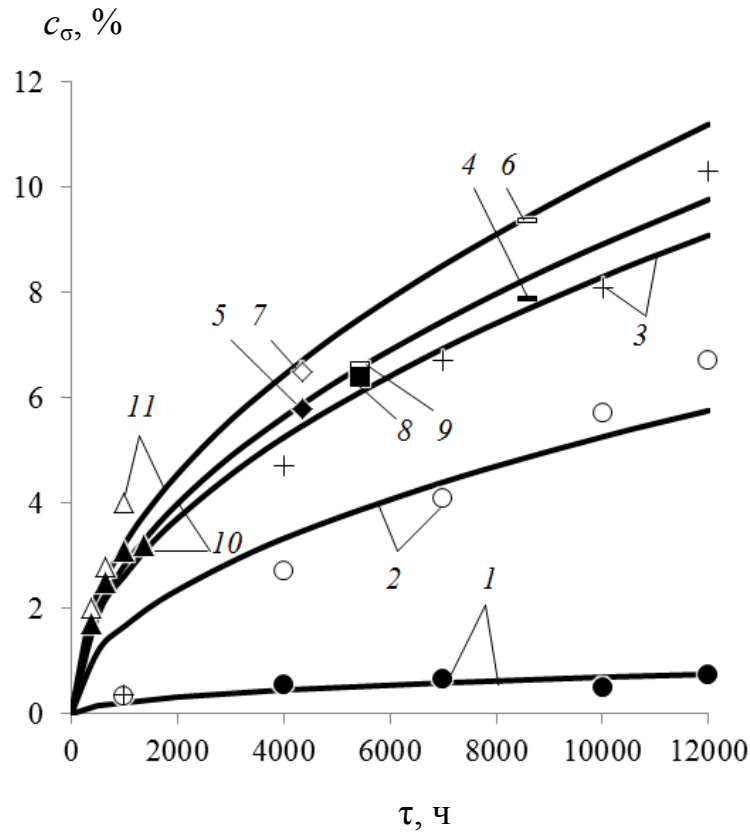
$$c_\sigma = 982 \sqrt{\exp\left(-\frac{151200}{RT}\right)\tau}; \quad (2)$$

для ползучести в интервале температур 700–750 °С

$$c_\sigma = 0,083 \sqrt{\exp(0,00695\sigma)\tau}, \quad (3)$$

где σ – напряжение испытания, МПа.

Результаты экспериментального исследования и аппроксимации показаны на рисунке 3. Среднее квадратичное отклонение измеренных значений c_σ от рассчитанных по уравнениям (1)–(3) составляет $\pm 14,6$ %. Из графиков функций (1)–(3) следует, что с увеличением температуры производная dc_σ/dT убывает и приближается к нулю в интервале 700–750 °С. В этой области температур получить надёжную зависимость для определения эквивалентной температуры эксплуатации не представляется возможным.



1, 2, 3 – результаты эксперимента и расчёта при 585 °С [уравнение (1)], 650 °С [уравнения (1) и (2)], 700 °С [уравнение (2)]; 4, 5, 6, 7 – опытные данные при 22,1; 29,4; 50 и 80 МПа соответственно и 700 °С; 8, 9 – опытные данные при 14,7 и 33,3 МПа соответственно и 750 °С; 10, 11 – результаты эксперимента и расчёта по уравнению (3) при 22,1 и 60 МПа соответственно и 750 °С.

Рисунок 3 – Зависимость содержания σ -фазы в металле трубы номинальным диаметром 60/50 мм от времени испытания

Из рисунка 3 также видно, что при температурах 650 и 700 °С в начальный период старения приблизительно до 1000 ч опытные данные расположены значительно ниже графиков функции (2). Это явление не обнаружено при испытании металла на ползучесть. Время, в течение которого скорость роста вторичных фаз достигает максимального значения, принято называть инкубационным периодом. Он вызван, как известно, повышенной энергией активации зарождения центров по сравнению с энергией активации роста. Следовательно, при температуре 585 °С и в начальный период при температурах 650 и 700 °С доминирует зарождение, при повышении температуры и за пределом 1000 ч – рост центров вторичных фаз. Напряжение при испытании на ползучесть снизило энергию активации и сократило инкубационный период. Пренебрежение коротким инкубационным периодом при 650 и 700 °С не повлияло принципно-

ально на результирующую зависимость для расчёта эквивалентной температуры эксплуатации.

С помощью уравнения (2) при 700 °С и уравнения (3) определена положительная константа в энергии активации ползучести. Это значение, равное 56, принято неизменным в диапазоне температур 585–700 °С. Из аппроксимаций (1) и (2) с поправками на ползучесть получены уравнения для расчёта эквивалентной температуры эксплуатации $T_{\text{экв}}$, К, пароперегревателей из стали марки ДИ59

в интервале 585–650 °С

$$T_{\text{экв}} = \frac{3,4\sigma - 24341}{\ln\left(\frac{c_{\sigma}}{\tau^{0,5}}\right) - 23,4}; \quad (4)$$

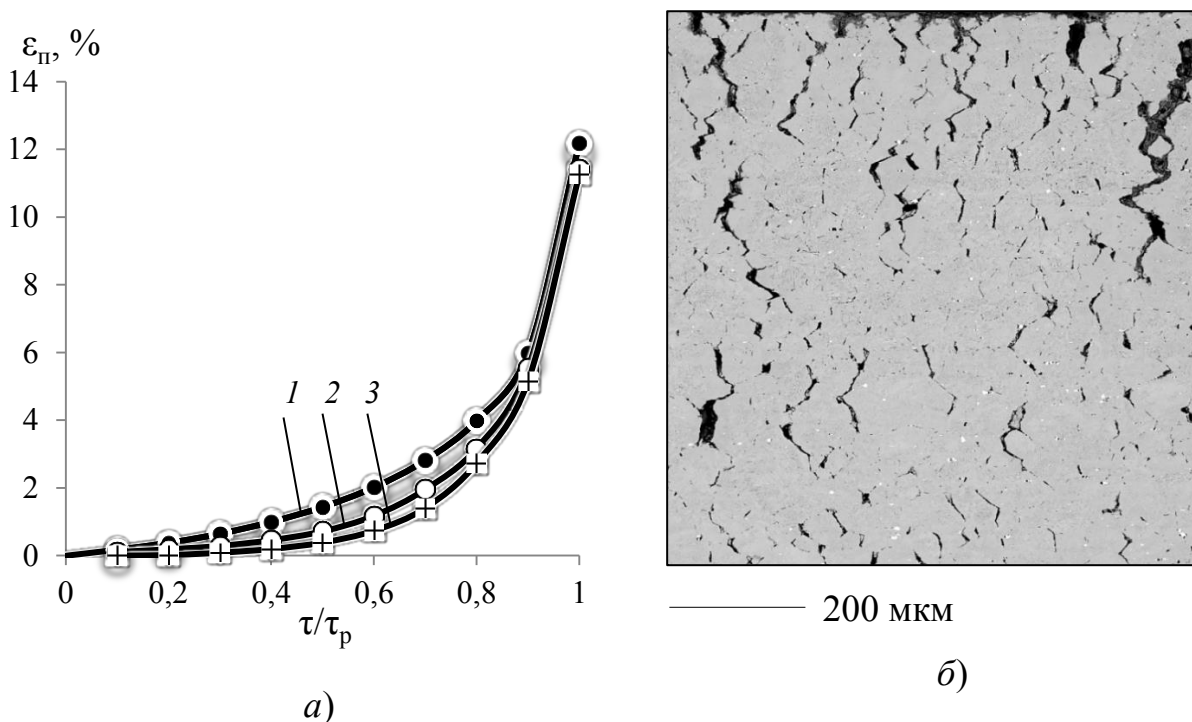
в интервале 650–700 °С

$$T_{\text{экв}} = \frac{3,4\sigma - 9093}{\ln\left(\frac{c_{\sigma}}{\tau^{0,5}}\right) - 6,89}. \quad (5)$$

Так как предельная температура наружной поверхности труб из стали марки ДИ59 равна 650 °С, в разрабатываемой методике для пароперегревателей уравнение (4) является основным, а уравнение (5) – дополнительным.

Температурный эквивалент приведённого напряжения 50,4; 43,4; 15,1 МПа в металле труб ШПП-2, КППВД и КППНД-3 котла типа ТПЕ-216М при 600 °С равен 6, 5 и 2 °С соответственно. Отдавая должное исследованию граничной диффузии в стали марки 12Х18Н12Т и высоко оценивая его результат, следует тем не менее констатировать, что отсутствие напряжения и номера зерна в зависимости для расчёта эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей было вызвано, по-видимому, погрешностью эксперимента.

В четвертой главе изложены результаты исследования длительной прочности металла и обобщения с зависимостями для расчёта предела длительной прочности и допускаемого напряжения в стали марки ДИ59.



1, 2, 3 – трубы номинальным диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм соответственно; а – графики зависимости относительной деформации ползучести от доли исчерпания ресурса; б – микроструктура и трещины ползучести в зоне разрушения при 1000-кратном увеличении (СЭМ).

Рисунок 4 – Результаты испытания стали марки ДИ59 на длительную прочность при 80 МПа и 750 °С

Графики зависимости относительной деформации ползучести $\varepsilon_{п}$ стали марки ДИ59 от доли исчерпания ресурса τ/τ_p и микроструктура металла в зоне разрушения образцов показаны на рисунке 4. Видно, что первая и вторая стадии ползучести металла отсутствуют, скорость ползучести постоянно возрастает во времени. Если более точно, то продолжительность первой стадии оказалась не более 0,02 времени до разрушения. Все образцы разрушились со значительной деформацией на уровне 12 %. Трещины ползучести начинаются на наружной поверхности образцов и распространяются по границам зёрен. Разрушение является типичным при исчерпании длительной прочности металла.

Современный подход к обобщению опытных данных по пределу длительной прочности металла заключается в определении зависимости напряжения испытания σ от параметров долговечности $P(\tau_p, T)$, предложенных Ларсоном – Миллером и И.И. Труниным. Аппроксимирующее уравнение должно базироваться на элементах подобия и адекватно прогнозировать поведение металла в неисследованной области напряжений и температур эксплуатации.

Результаты обработки данных для стали марки ДИ59 показали, что при напряжении 80 МПа и температурах 700 и 750 °С отношение значений первого параметра находится в интервале от 1,012 до 1,017; а второго параметра от 0,997 до 1,004. Параметр И.И. Трунина в общем правильно характеризует влияние температуры на время до разрушения металла. Опытные данные по пределу длительной прочности стали марки ДИ59 при температурах 700 и 750 °С и напряжениях в интервале от 30 до 80 МПа аппроксимированы усреднённым уравнением

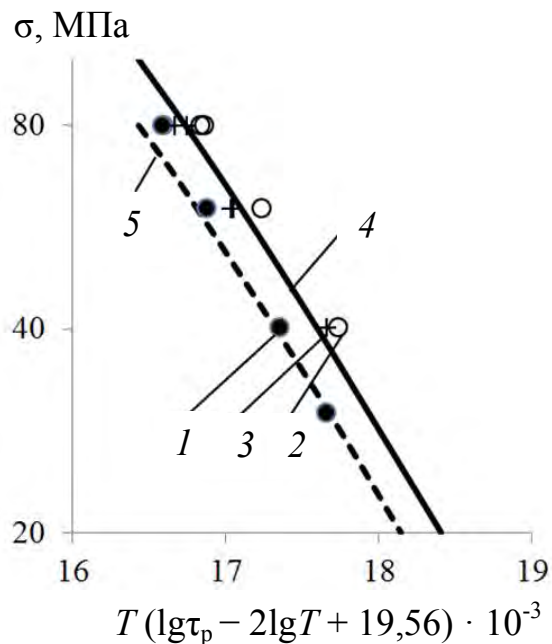
$$T(\lg \tau_p - 2 \lg T + 19,56) = 21593 - 2400 \lg \sigma - 3,6 \sigma, \quad (6)$$

где τ_p – время до разрушения, ч.

Результаты испытаний оказались на 20–30 % ниже данных стандарта для стали марки ДИ59 и близки к данным для стали марки 12Х18Н12Т. Максимальное отклонение экспериментальных значений предела длительной прочности металла труб номинальным диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм от рассчитанных по уравнению (6) составляет не более 20 %. Этот факт даёт основание принять коэффициент запаса 1,25. Уравнение для расчёта среднего по трубам допускаемого напряжения в металле $[\sigma]$ имеет вид

$$T(\lg \tau_p - 2 \lg T + 19,56) = 21360 - 2400 \lg [\sigma] - 4,5 [\sigma]. \quad (7)$$

Графики зависимости среднего по трубам и с отклонением на 20 % в сторону уменьшения предела длительной прочности стали марки ДИ59 приведены на рисунке 5, из которого следует, что по росту предела длительной прочности стали марки ДИ59 трубы располагаются в следующем порядке: 32/24, 60/50, 36/26 мм. В главе 3 показано, что по увеличению содержания σ -фазы в металле эти трубы располагаются в обратном порядке. Причина такой зависимости не заключается в непосредственном влиянии структурных превращений на разупрочнение, а определяется предысторией металла (номером зерна, содержанием ниобия).



1, 2, 3 – трубы номинальным диаметром 32/24, 36/26, 60/50 мм соответственно; 4, 5 – результаты расчёта по уравнениям (6) и (7).

Рисунок 5 – Зависимость предела длительной прочности и допускаемого напряжения в стали марки ДИ59 от параметра долговечности

В пятой главе изложена разработанная методика расчёта остаточного ресурса пароперегревательных труб из стали марки ДИ59 и результаты её апробации.

Остаточный ресурс пароперегревателей из стали марки ДИ59 рассчитывается с использованием паспортных данных котла, исходной информации о трубах и результатов лабораторного исследования представительных вырезок из труб каждые $5 \cdot 10^4$ ч эксплуатации. При наличии повреждений состояние вырезок следует изучать независимо от времени эксплуатации. Вырезки необходимо выполнять на основании данных контроля тепловой неравномерности пароперегревателей, например, с помощью магнитного ферритометра типа МФ-51НЦ АКASKAN.

Исследование вырезок включает следующие последовательные этапы: химический анализ металла, визуальный контроль, приготовление шлифов, металлографический анализ и измерительный контроль. Расчёт остаточного ресурса пароперегревательных труб по результатам изучения вырезок осуществляется аналитически в следующем порядке.

Средняя скорость общей коррозии металла $\bar{v}_{\text{кор}}$, мм/ч, рассчитывается по формулам

$$\bar{v}_{\text{кор}} = \frac{s_{\text{н}} - s_{\text{мин}}}{\tau_{\text{э}}}, \text{ если } s_{\text{макс}} \leq s_{\text{н}}; \quad (8)$$

$$\bar{v}_{\text{кор}} = \frac{s_{\text{макс}} - s_{\text{мин}}}{\tau_{\text{э}}}, \text{ если } s_{\text{макс}} > s_{\text{н}}; \quad (9)$$

где $s_{\text{макс}}$ – толщина стенки максимальная, мм;

$s_{\text{н}}$ – толщина стенки номинальная, мм;

$s_{\text{мин}}$ – толщина стенки минимальная, мм;

$\tau_{\text{э}}$ – время эксплуатации, ч.

Приведённые напряжения в металле труб с круглой формой сечения, нагруженных внутренним давлением пара, оцениваются с помощью уравнений в начале σ_0 , конце $\sigma_{\text{к}}$, середине $\sigma_{\text{ср}}$, эксплуатационного периода (МПа)

$$\sigma_0 = \frac{p}{2} \left(\frac{D_{\text{н}}}{s_{\text{н}}} - 1 \right), \text{ если } s_{\text{макс}} \leq s_{\text{н}}; \quad (10)$$

$$\sigma_0 = \frac{p}{2} \left(\frac{D_{\text{н}}}{s_{\text{макс}}} - 1 \right), \text{ если } s_{\text{макс}} > s_{\text{н}}; \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{p}{2} \left(\frac{d_{\text{макс}}}{s_{\text{мин}}} + 1 \right); \quad (12)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_{\text{к}}}{2}, \quad (13)$$

где p – избыточное давление пара на входе в пароперегреватель, МПа;

$D_{\text{н}}$ – диаметр наружный номинальный, мм;

$d_{\text{макс}}$ – диаметр внутренний максимальный, мм.

Коэффициент k_G , характеризующий вклад размера зерна в содержание σ -фазы, определяется по формуле

$$k_G = 1,66G^{-0,33}, \quad (14)$$

где G – номер зерна.

Эквивалентная температура эксплуатации в середине стенки $T_{\text{ЭКВ.С}}$, К, и наружной поверхности $T_{\text{ЭКВ.Н}}$, К, рассчитывается по уравнениям

$$T_{\text{ЭКВ.С}} = \frac{3,4\sigma_{\text{ср}} - 24341}{\ln\left(\frac{k_G c_{\sigma}}{\tau_{\text{э}}^{0,5}}\right) - 23,4}; \quad (15)$$

для необогреваемой зоны

$$T_{\text{ЭКВ.Н}} = T_{\text{ЭКВ.С}}; \quad (16)$$

для обогреваемой зоны конвективных пароперегревателей

$$T_{\text{ЭКВ.Н}} = T_{\text{ЭКВ.С}} + 10; \quad (17)$$

для обогреваемой зоны ширмовых пароперегревателей

$$T_{\text{ЭКВ.Н}} = T_{\text{ЭКВ.С}} + 15. \quad (18)$$

Рассчитывается время до разрушения $\tau_{\text{р.А}}$, ч, по уравнению (7) и параметрам $T_{\text{ЭКВ.Н}}$ и $\sigma_{\text{ср}}$, характеризующим пройденный период эксплуатации.

Доли использованного $P_{\text{исп}}$ и остаточного $P_{\text{ост}}$ ресурса надёжной эксплуатации определяются по уравнениям

$$P_{\text{исп}} = \frac{\tau_{\text{э}}}{\tau_{\text{р.А}}}; \quad (19)$$

$$P_{\text{ост}} = 0,8 - P_{\text{исп}}. \quad (20)$$

Если $P_{\text{ост}} \leq 0$, то ресурс надёжной эксплуатации исчерпан. Если $P_{\text{ост}} > 0$, то расчёт остаточного ресурса необходимо продолжить. Рассчитывается время до разрушения $\tau_{\text{р.Б}}$, ч, по уравнению (7) и параметрам $T_{\text{ЭКВ.Н}}$ и $\sigma_{\text{к}}$, характеризующим последующий период эксплуатации без учёта коррозии металла.

Максимальный остаточный ресурс эксплуатации $\tau_{\text{ост.макс}}$, ч, определяется с помощью уравнения

$$\tau_{\text{ост.макс}} = \tau_{\text{р.Б}} P_{\text{ост}}. \quad (21)$$

Задачу определения остаточного ресурса с учётом коррозии металла следует далее решать методом последовательных приближений. Выбирается значение остаточного ресурса $\tau_{\text{ост}} < \tau_{\text{ост.макс}}$ и рассчитывается минимальная

толщина стенки, а также конечное и среднее напряжение в металле в течение этого ресурса по уравнениям

$$s_{\text{мин}}^* = s_{\text{мин}} - \bar{v}_{\text{кор}} \tau_{\text{ост}}; \quad (22)$$

$$\sigma_{\text{к}}^* = \frac{p}{2} \left(\frac{d_{\text{макс}}}{s_{\text{мин}}^*} + 1 \right); \quad (23)$$

$$\sigma_{\text{ср}}^* = \frac{\sigma_{\text{к}} + \sigma_{\text{к}}^*}{2}. \quad (24)$$

Определяется время до разрушения $\tau_{\text{р.В}}$, ч, по уравнению (7) и параметрам $T_{\text{экв.н}}$ и $\sigma_{\text{ср}}^*$, характеризующим последующий эксплуатационный период, и остаточный ресурс эксплуатации $\tau_{\text{ост}}$, ч, с помощью уравнения

$$\tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{р.В}} P_{\text{ост}}. \quad (25)$$

Если выбранное значение $\tau_{\text{ост}}$ оказывается больше рассчитанного по уравнению (25), выбирается другое, более низкое значение $\tau_{\text{ост}}$ и расчёт выполняется в той же последовательности. Когда отношение выбранного к рассчитанному значению составляет 0,95–1, задача считается решённой, а выбранное значение $\tau_{\text{ост}}$ является остаточным ресурсом надёжной эксплуатации.

По полученным результатам расчёта эквивалентной температуры эксплуатации наружной поверхности и остаточного ресурса труб следует отметить следующее о состоянии пароперегревателя:

- если температура эксплуатации труб ниже 858 К (585 °С), то остаточный ресурс следует определять при 858 К;

- если ресурс надёжной эксплуатации труб не исчерпан, то следует продлить срок службы пароперегревателя на время, равное минимальному остаточному ресурсу;

- если температура эксплуатации труб больше 923 К (650 °С), то они остаточного ресурса не имеют, к эксплуатации не допускаются и подлежат замене;

- если ресурс надёжной эксплуатации пароперегревателя частично исчерпан, то следует заменить группу труб по данным магнитной ферритометрии;

– если ресурс надёжной эксплуатации труб исчерпан, но за прошедший период не было повреждений, то допускается временная эксплуатация пароперегревателя в течение срока, определённого по результатам испытания металла на длительную прочность в специализированной организации.

Результаты определения эквивалентной температуры эксплуатации 600 и 619 °С по содержанию σ -фазы в металле труб из стали марки ДИ59 после наработки 100078 и 176580 ч близки к данным термометрии 588 и 610 °С конвективного пароперегревателя высокого давления в базисном режиме работы котла типа ТГМП-114 энергоблока № 4 Костромской ГРЭС. Незначительное различие объясняется влиянием колебаний температуры на структурные превращения в металле. Так как данные термометрии в обогреваемой зоне получены полуэмпирическим путём, сравнение можно признать удовлетворительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые высокотемпературные испытания на старение, ползучесть и длительную прочность металла пароперегревательных труб из стали марки ДИ59 позволяют сделать следующие обоснованные выводы:

– получены полуэмпирические зависимости для определения эквивалентной температуры эксплуатации в интервале 585–700 °С по содержанию σ -фазы, характеризующему воздействию режима работы на структуру и свойства металла;

– получены зависимости предела длительной прочности и допускаемого напряжения от температуры и времени эксплуатации для расчёта времени до разрушения металла в области рабочих напряжений 30–80 МПа;

– разработана методика определения остаточного ресурса пароперегревателей по результатам исследования представительных вырезов из труб;

– обоснованность методики подтверждена апробацией на пароперегревателе после длительной эксплуатации;

– использование методики позволяет повысить надёжность котлов путём оценки фактического состояния пароперегревателей и выявления труб, исчерпавших ресурс надёжной эксплуатации.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Богачев, В.А.** Исследование предела длительной прочности стали марки ДИ59 пароперегревателей котла типа ТПЕ-216М Харанорской ГРЭС [Текст] / В.А. Богачев, Г.А. Урусова, М.А. Шумовская // Электрические станции. – 2014. – № 10. – С. 27–31.
2. **Богачев, В.А.** Разработка зависимости для определения эквивалентной температуры эксплуатации пароперегревателей из стали марки ДИ59 [Текст] / В.А. Богачев, Г.А. Урусова, М.А. Шумовская // Электрические станции. – 2015. – № 3. – С. 12–18.
3. **Богачев, В.А.** Методика определения остаточного ресурса пароперегревателей из стали марки ДИ59 [Текст] / В.А. Богачев, В.В. Светушков, М.А. Шумовская [и др.] // Электрические станции. – 2015. – № 5. – С. 16–20.
4. **Пьянов, А.А.** Принципы эксплуатационного контроля пароперегревателей из аустенитной хромомарганцевой стали марки ДИ59 [Текст] / А.А. Пьянов, М.А. Шумовская // Неделя металлов в Москве, 10 – 13 ноября 2015 г.: сборник трудов конференций. – М.: АО АХК ВНИИМЕТМАШ, 2016. – С. 61–69.
5. **Богачев, В.А.** Основы контроля тепловой неравномерности, определения эквивалентной температуры эксплуатации и остаточного ресурса пароперегревателей из аустенитной хромомарганцевой стали марки ДИ59 [Текст] / В.А. Богачев, Т.П. Пшеченкова, М.А. Шумовская [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: сборник материалов и докладов международной конференции, Москва, 17 – 20 ноября 2015 г. – М.: МЭИ, 2015. – С. 145–158.
6. **Богачев, В.А.** Ресурсные характеристики аустенитной хромомарганцевой стали марки ДИ59 [Текст] / В.А. Богачев, Т.П. Пшеченкова, М.А. Шумовская [и др.] // Обеспечение надёжности теплоэнергетического оборудования. Техническое диагностирование и экспертиза промышленной безопасности: материалы III Международной Уральской научно-практической конференции, Челябинск, 02 – 04 декабря 2015 г. – Челябинск: Цицеро, 2016. – С. 58–63.