

На правах рукописи

Ташлыков Александр Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Томский политехнический университет”

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Заворин А.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Басин Анатолий Сергеевич,
Институт теплофизики СО РАН (г. Новосибирск);

кандидат технических наук, доцент Федецкий Иван Иванович,
ООО «Сибтерм» (г. Томск).

Ведущая организация: ФГУП «Сибирский химический комбинат»
(г. Северск)

Защита диссертации состоится «13» ноября 2007 года в 15 часов
на заседании диссертационного совета К 212.269.04
в Томском политехническом университете по адресу:
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 4, ауд. 406.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке ГОУ ВПО “Томский политехнический университет”

Автореферат разослан «12» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. С. Заворин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В российской энергетике растет количество объектов, исчерпавших свой проектный, а в большинстве случаев и парковый ресурс. Считается, что используемые в пароперегревателях (ПП) трубы из сталей 12X18H10T, 12X1МФ, 15ХМ и др. плохо зарекомендовали себя в процессе эксплуатации в связи с низкой прокаливаемостью по глубине, склонностью к межкристаллитной и язвенно-питтинговой коррозии, графитизации, ползучести и внезапным хрупким разрушениям. Поэтому в процессе реновации оборудования тепловых электрических станций предлагается заменить для ПП трубные стали старого поколения на более перспективные материалы, например, на сталь Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш), которая в настоящее время проходит массовые испытания на ряде электростанций России и стран СНГ. Помимо внедрения новых материалов актуальны вопросы продления срока службы уже эксплуатируемого оборудования, а также прогнозирования длительного и остаточного ресурса. В этой связи чрезвычайно важной является задача исследования трубных элементов котлов с учетом факторов эксплуатационного термоциклического и механоциклического воздействия.

В настоящее время многие особенности разрушения до конца не выяснены, о чем свидетельствует большое количество аварий на магистральных трубопроводах, резервуарах, стальных конструкциях и т.п. Известные методики обследования труб энерготехнологического оборудования, не располагающие количественными показателями структурной прочности, не отличаются надежностью и достоверностью.

Требования к надежности работы энергооборудования, к достоверности оценки текущего состояния и прогнозов остаточного ресурса поверхностей нагрева вынуждают проводить дальнейшие исследования влияния термических и механических факторов эксплуатационного воздействия на структуру и свойства трубных поверхностей нагрева с разработкой и применением иных техники и методики эксперимента, с введением иных критериев оценки состояния материалов ответственных конструкций и узлов. Одним из таких критериев можно считать внутренние структурные напряжения. Анализ их функциональных зависимостей от условий эксплуатации отдельных трубных элементов предоставляет возможности для оперативного повышения надежности тепломеханического оборудования в целом.

Таким образом, актуальность темы обосновывается состоянием основных энергетических мощностей, необходимостью продления остаточного ресурса труб энергетических котлов и соответственной диагностики их текущего физического состояния, задачами грядущего перевооружения отрасли, среди которых выделена замена стали труб ПП на более перспективную. Тема диссертации соответствует основным направлениям научной деятельности Томского политехнического университета (направление «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объек-

тов») и находится в сфере приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ («Энергетика и энергосбережение»).

Цель работы: установление характеристик структурно-напряженного состояния стенки трубы из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш) и оценка их влияния на работоспособность элементов пароперегревателей.

Основные задачи исследования:

- 1) установление зависимости внутренних структурных напряжений от температуры и выявление характера изменения структурно-напряженного состояния при изменяющихся термических и механических нагрузках;
- 2) определение критериев склонности к трещинообразованию и роста структурной трещины в процессе механоциклического пластического деформирования стенки трубы;
- 3) установление температурной зависимости коэффициентов теплового расширения кристаллических решеток стенки трубы;

Научная новизна полученных результатов:

- 1) впервые получены экспериментальные данные, характеризующие изменения внутренних структурных напряжений при циклических термических и механических воздействиях на стенку трубы из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш);
- 2) экспериментальным путем с применением методики механического циклического нагружения по уширению линий рентгеновской дифракции определены базовые характеристики прочности и пластичности (σ_B , $\sigma_{0,2}$);
- 3) установлены аномальные скачкообразные изменения коэффициента линейных термических расширений кристаллических решеток для стенки трубы из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш).

Практическая значимость работы:

- 1) полученные зависимости внутренних структурных напряжений от температуры и внешнего механоциклического воздействия позволяют устанавливать безопасный диапазон температур эксплуатации, текущее физическое состояние, а также область применения и осуществлять подбор совместимых материалов для трубы из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш);
- 2) предложенные критерии склонности к трещинообразованию и условия роста структурной трещины могут быть использованы для разработки технических мероприятий по продлению ресурса труб.

Материалы исследования используются: для входного контроля трубной продукции в ЗАО «Росналадка» (г. Бийск), для диагностики труб поверхностей нагрева в ходе экспертизы опасных производственных объектов в РИКЦ «Котлонадзор» (г. Новосибирск), а также в учебном процессе по специальностям «Тепловые электрические станции», «Котло- и реакторостроение» в Томском политехническом университете.

Достоверность результатов обеспечивается применением прецизионных методов исследования, апробированных методик обработки экспериментальных результатов и анализом погрешностей эксперимента, сравнением с аналогичными исследованиями для широко используемых в энергетике марок стали (Ст.10, Ст.20, 12Х1МФ).

На защиту выносятся:

- 1) результаты экспериментальных исследований внутренних структурных напряжений материала труб из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш) при термических циклических нагружениях;
- 2) результаты экспериментальных исследований внутренних структурных напряжений материала труб из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш) при механических циклических нагружениях;
- 3) обоснование критериев диагностики текущего физического состояния и прогнозирования работоспособности материала труб для пароперегревателя из перспективной стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на: IV, V Всероссийском студенческом научно-практическом семинарах «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2002, 2003 г.г.); VIII, IX Всероссийских научно-технических конференциях «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2002, 2003 г.г.); IX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2003 г.); III семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (г. Барнаул, 2003 г.); на научных семинарах кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета (2002-2007 г.г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 17 печатных работ, среди которых 3 статьи в рецензируемом издании (список ВАК).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 4 приложений и списка литературы (66 наименований). Работа содержит 175 страниц, 25 таблиц и 29 рисунков.

Личное участие автора. Автором самостоятельно определены цели исследования и развиты методические положения экспериментальных исследований. Автор непосредственно участвовал в циклических температурных и механических испытаниях, в обработке экспериментальных результатов, а также провел анализ полученных результатов и сформулировал выводы. В обсуждении экспериментальных результатов и выводов принимали участие к.т.н. А. А. Макеев, к.т.н. Л.Л. Любимова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится анализ состояния российской энергетики в аспекте темы диссертационной работы и обосновывается актуальность проблемы продления работоспособности труб в условиях термической и механической усталости металла. Обосновывается выбор изделия из стали Ди-82-Ш (10Х9МФБ-Ш) как объекта исследования.

В первой главе приведены сведения об основных видах повреждаемости труб поверхностей нагрева, дается обзор основных гипотез коррозионного растрескивания и сведений о влиянии микроструктурных характеристик на коррозионные и прочностные свойства сталей, включая существующие представле-

ния о механизме хрупких разрушений. Охарактеризованы основные физические методы исследований структуры и свойств вещества.

Показано, что имеющиеся результаты не дают целостной картины протекания всех видов усталостных явлений, не устанавливают надежно диагностические структурные признаки, провоцирующие, например, межкристаллитную коррозию, транскристаллитную коррозию, коррозионное растрескивание под напряжением. Соответственно не выработаны показатели для надежного прогнозирования поведения трубного изделия под различными эксплуатационными воздействиями. Показано, что вопросам диагностики напряженного состояния стали в части определения критериев разрушения не уделяется особого внимания. Вместе с тем из обзора следует, что прочностные свойства связываются с высокими уровнями внутренних остаточных напряжений. Следовательно, информация об изменениях напряженного состояния должна быть предметом научных исследований, основой прогнозирования и определения режимов длительной эксплуатации. Обзором установлено, что применяемые методы анализа микроструктуры относятся к разрушающим и что в арсенале используемых средств не получил должного распространения метод высокотемпературной рентгенографии. На основании обзора литературы по проблемам долговечности, работоспособности и термической усталости сформулированы цель и задачи исследований, обоснован выбор рентгеновского метода для определения структурных изменений.

Во второй главе представлена методика исследования, включающая циклические механические и термические испытания образцов пароперегревательной трубы, сопровождаемые регистрацией структурных изменений с применением метода рентгенографии и высокотемпературной рентгенометрии, дано описание техники эксперимента.

Методика термических испытаний заключалась в организации форсированного искусственного старения образца трубы методом термоциклирования.

Термоциклические испытания проведены при давлении $\sim 1,3 \cdot 10^3$ Па с целью исключения окислительных реакций. Использовался образец, изготовленный из прямого участка трубы в виде шлифа размером $15 \times 20 \times 3$ мм. Образец испытывался на рентгеновском аппарате Дрон-0,5 с применением высокотемпературной дифрактометрической установки УВД-2000 и рентгеновской трубки с молибденовым анодом и длиной волны $\lambda_{\text{Каср.}} = 0,71069$ Å. Использование жесткого молибденового излучения позволяло осуществлять сканирование образца в широком диапазоне углов дифракции, обеспечивало получение дифракционной картины не только от поверхностных слоев образца, но и от объема и увеличивало точность определения параметра элементарной ячейки.

Сущность выполнения термоциклирования состояла в следующем. При достижении вакуума в рабочем объеме высокотемпературной дифрактометрической приставки производился подъем температуры от 12°C (температура охлаждающей воды) до температуры испытаний. Диапазон температур испытаний в одном макроцикле составлял от 12 до 700°C с шагом подъема температуры в каждом составляющем его микроцикле порядка $30 \dots 100^\circ\text{C}$ при длительности

микроцикла 24 ч. При рабочей температуре испытаний после достижения стационарного температурного состояния в микроцикле осуществлялось рентгенографирование образца. В дальнейшем образец, испытываемый под термической нагрузкой, называется «горячим». После рентгено съемки «горячего» образца установка расхолаживалась до температуры охлаждающей воды и осуществлялась рентгено съемка «холодного» образца. Всего было выполнено 3 макроцикла. Вторым макроцикл заканчивался аустенизацией стали с последующим $\gamma \rightarrow \alpha$ переходом.

В результате реализации термоциклирования и рентгенодиагностики устанавливались следующие характеристики: $a_{гор}$ и $a_{хол}$ – параметр элементарной ячейки для «горячего» и «холодного» образца в зависимости от температуры; α – мгновенный коэффициент линейных термических расширений кристаллической решетки; σ_I , σ_{II} – внутренние структурные напряжения первого и второго рода в зависимости от температуры по ниже приведенным выражениям.

$$\alpha = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{хол}} \cdot \frac{1}{a_{i-1}},$$

где a_i – параметр элементарной ячейки при температуре t_i ; a_{i-1} – параметр элементарной ячейки холодного металла предыдущего термоцикла; $t_{хол}$ – всегда 12 °С (температура охлаждающей воды); t_i – рабочая температура микроцикла.

$$\sigma_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{a_{i+1}} \cdot E, \quad (1)$$

где a_{i+1} – параметр элементарной ячейки горячего образца при рабочей температуре t_{i+1} ; a_i – параметр элементарной ячейки горячего образца при температуре предыдущего микроцикла; E – модуль нормальной упругости.

$$\sigma_{II} = \frac{n_2}{4 \cdot \operatorname{tg} \theta_2} \cdot E, \quad (2)$$

где θ – угол дифракции; n_2 – часть уширения дифракционной линии, ответственного за микронапряжения.

Плотность дислокаций (ρ , 1/см²) оценивается по выражению:

$$\rho = 3/D^2, \quad (3)$$

где D – размер кристаллитов, см.

Методика механических испытаний для исследования структурно-напряженного состояния при пластическом механическом нагружении стенки трубы сводилась к организации процесса форсированного искусственного старения образца в ходе холодного циклического деформирования гидравлическим прессом с возрастающей нагрузкой в каждом очередном цикле деформирования.

После каждого цикла нагружения производилась рентгено съемка исследуемого образца на рентгеновском аппарате ДРОН-3,0 с использованием монохроматизированного медного излучения трубки с длиной волны $\lambda_{CuK\beta}=1,39217$ Å. Анализ внутренних остаточных напряжений выполнен по методике, позволяющей определить уширения дифракционных линий (111) и (220) (метод Уоррена) по выражениям (1 – 3).

Длина структурной трещины рассчитывалась на основании:

$$l_{кр} = \left(\frac{0,1 \cdot E \sqrt{a}}{2 \cdot \sigma_y} \right)^2 = \frac{0,01 \cdot E^2 \cdot a}{4 \cdot \sigma_y^2},$$

где E – модуль нормальной упругости; a – период кристаллической решетки; σ_y – внутренние напряжения.

В третьей главе приведены основные экспериментальные результаты и оценена погрешность измерений.

На рис. 1 и на рис. 2 представлены зависимости внутренних напряжений Π рода соответственно от плотности структурных дефектов при внешнем нагружении и от приложенной внешней нагрузки. Показано, что процессы упрочнения при нагружении, характеризуемые точками 1, 4, 7, 9 (рис. 2 А) и 1, 3, 7, 11 (рис. 2 Б), сменяются процессами разупрочнения (точки 2, 5, 8, 10, 13 на рис. 2 А и 2, 5, 9, 12, 13 на рис. 2 Б). Свойства внутренней и наружной поверхностей трубы проявляют структурную стабильность (рис. 1) и лимитируются зоной, находящейся между линиями разупрочнения и упрочнения (рис. 2). Они не подвержены глубокой релаксации внутренних напряжений, связываемой с возникновением структурного трещинообразования. Это показано на рис.. 3, 5 в виде зависимости длины внутризеренной и зональной трещины, возникающих при внешних разрушающих нагрузках. Можно видеть (рис.. 3, 5), что трещины, возникающие при внешнем нагружении, не склонны к развитию в широком диапазоне внешних нагрузок. В выполненном эксперименте (рис. 3) достигнута нагрузка на наружной стороне ~ 330 МПа, а на внутренней ~ 170 МПа. Перераспределение зональных напряжений в зависимости от нагрузки при циклическом деформировании показывает (рис. 4), что зональные напряжения при внешнем деформировании изменяются в диапазоне 10...390 МПа. При этом они не проявляют склонность к глубокой релаксации, достаточной для слияния микротрещин, что характеризует высокие упруго-пластические свойства стенки трубы.

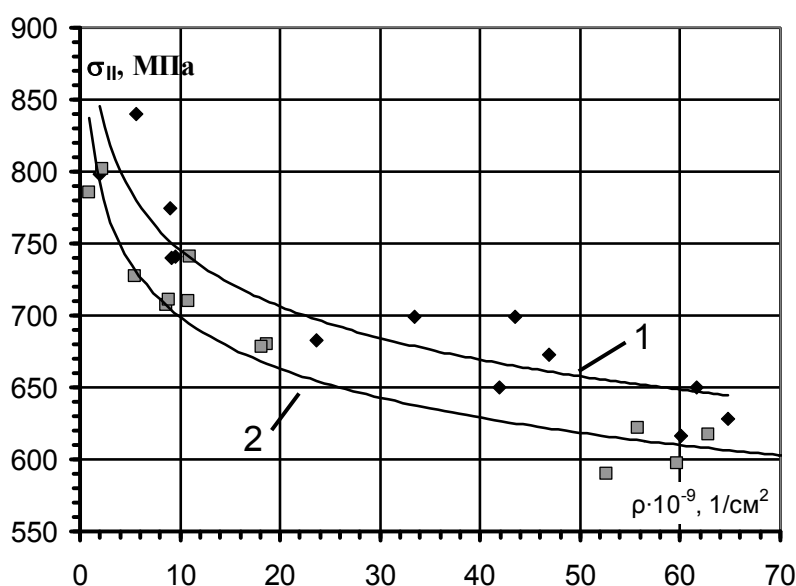
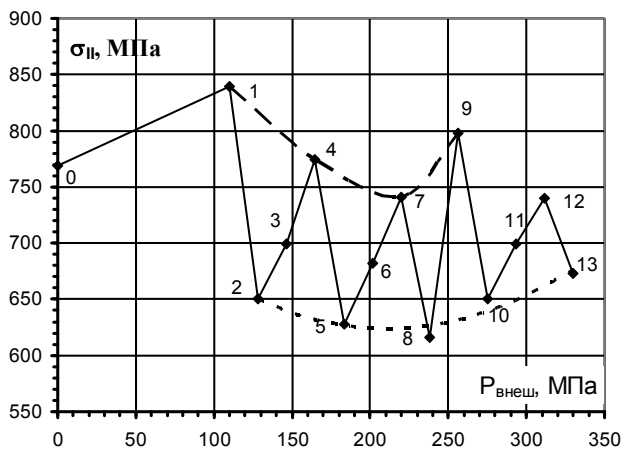
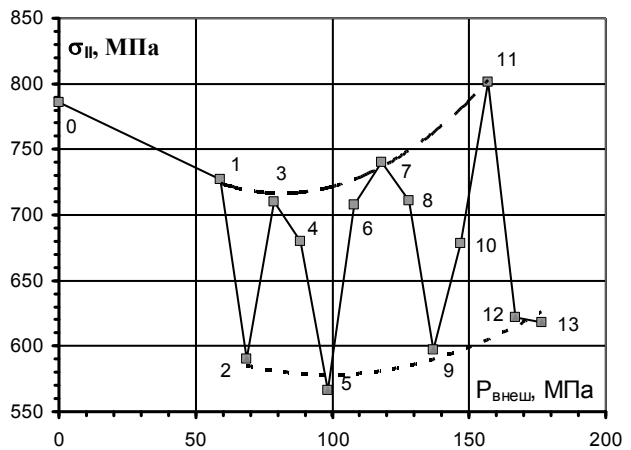


Рис. 1. Влияние циклического нагружения на распределение внутренних напряжений σ_{II} в зависимости от плотности дислокаций ρ в образце (сталь Ди-82-Ш): 1 – наружная сторона; 2 – внутренняя сторона



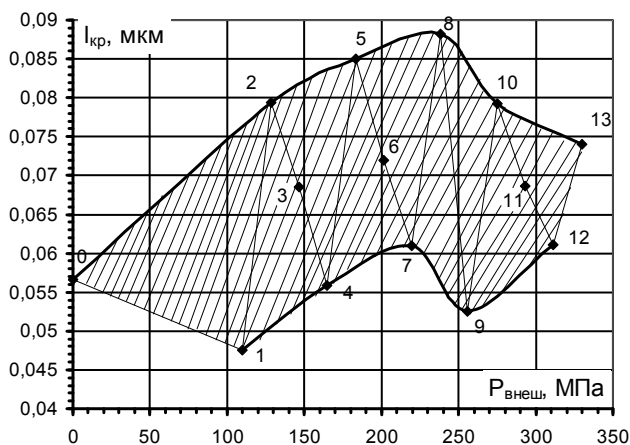
А)



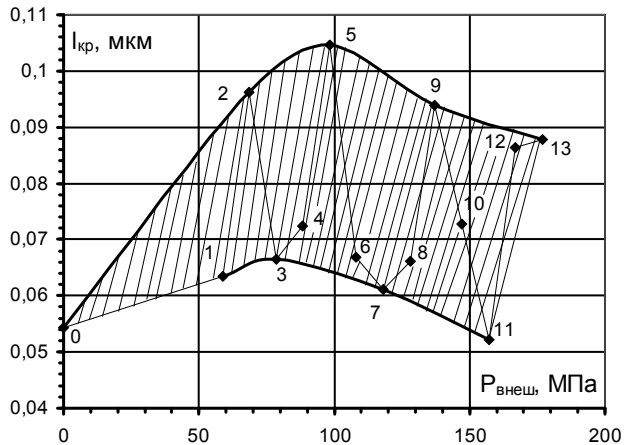
Б)

Рис. 2. Зависимость внутренних напряжений σ_{II} от внешней нагрузки образца трубы (сталь Ди-82-Ш): А – наружная сторона; Б – внутренняя сторона; линия разупрочнения при деформировании; — — — линия упрочнения при деформировании

На рис. 6 представлена зависимость величины коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток от температуры в трех термоциклах. Во всех трех термоциклах при нагреве до 200 °С наблюдаются аномальные скачки величины коэффициента линейных термических расширений кристаллических решеток, при дальнейшем увеличении температуры амплитуда изменения α уменьшается, коэффициенты линейных термических расширений кристаллических решеток соответствуют средним справочным значениям по результатам макродилатометрии для сталей – $(15...20) \cdot 10^{-6}$ 1/град. Отклонения от нормального хода зависимости $\alpha \sim f(t)$ наблюдаются: в первом термоцикле при 48 и 160 °С, во втором при 80...150 °С, в третьем термоцикле, который выполнен после аустенизации стали, при ~ 90...100 °С.

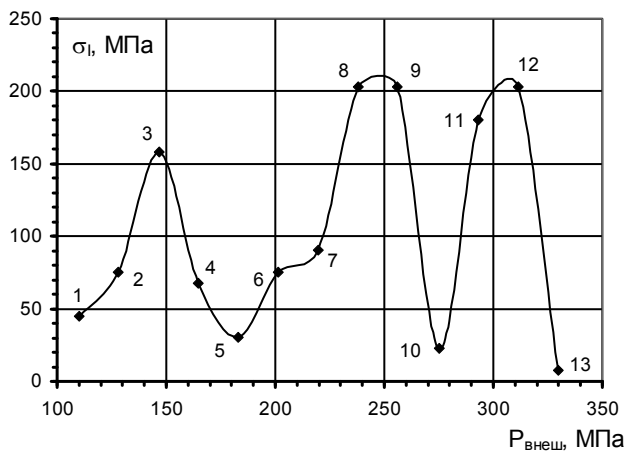


А)

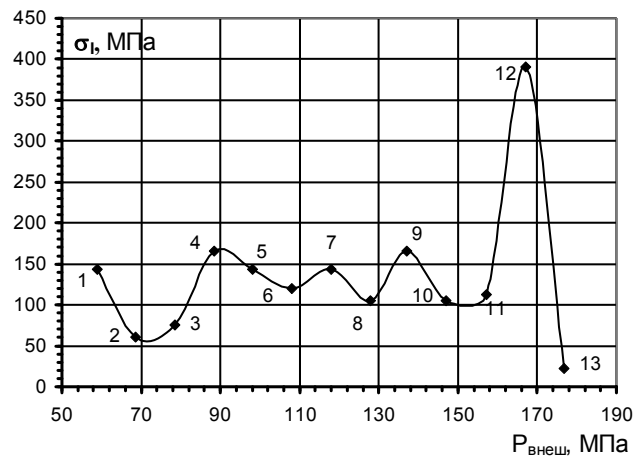


Б)

Рис. 3. Зависимость длины внутризеренных трещин $l_{кр}$ от внешней нагрузки образца трубы: А – наружная сторона; Б – внутренняя сторона

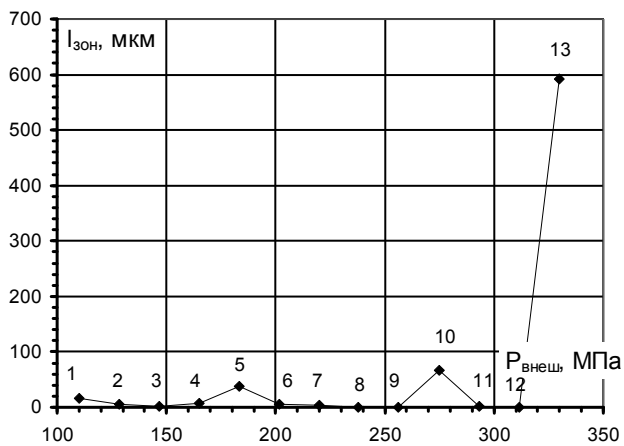


А)

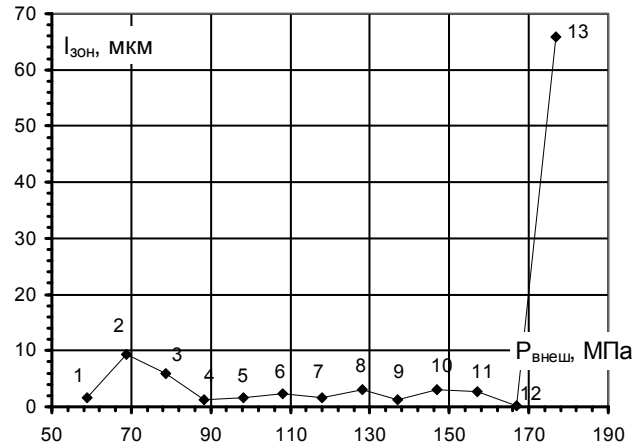


Б)

Рис. 4. Зависимость внутренних напряжений σ_I от внешней нагрузки образца трубы: А – наружная сторона; Б – внутренняя сторона



А)



Б)

Рис. 5. Зависимость длины зональной трещины $l_{\text{зон}}$ от внешней нагрузки образца трубы: А – наружная сторона; Б – внутренняя сторона

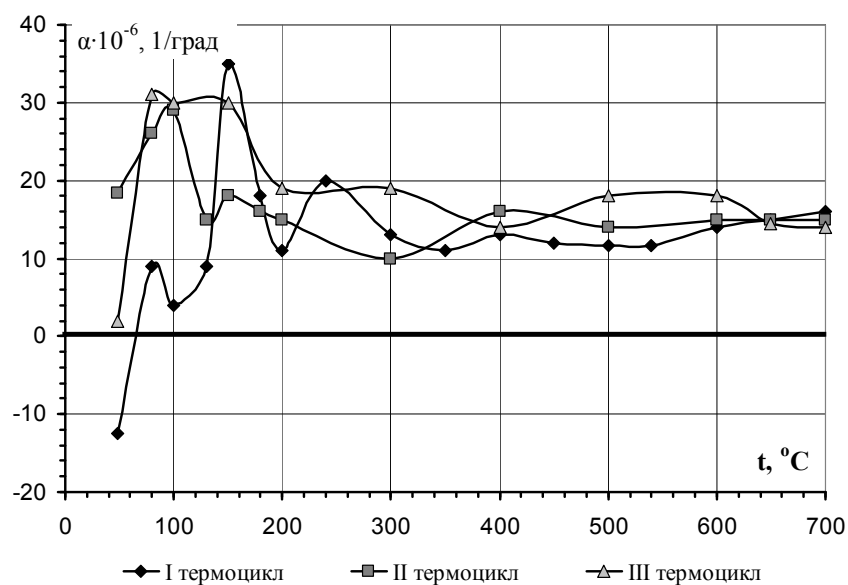


Рис. 6. Зависимость коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток α стенки трубы из стали Ди-82-III от температуры

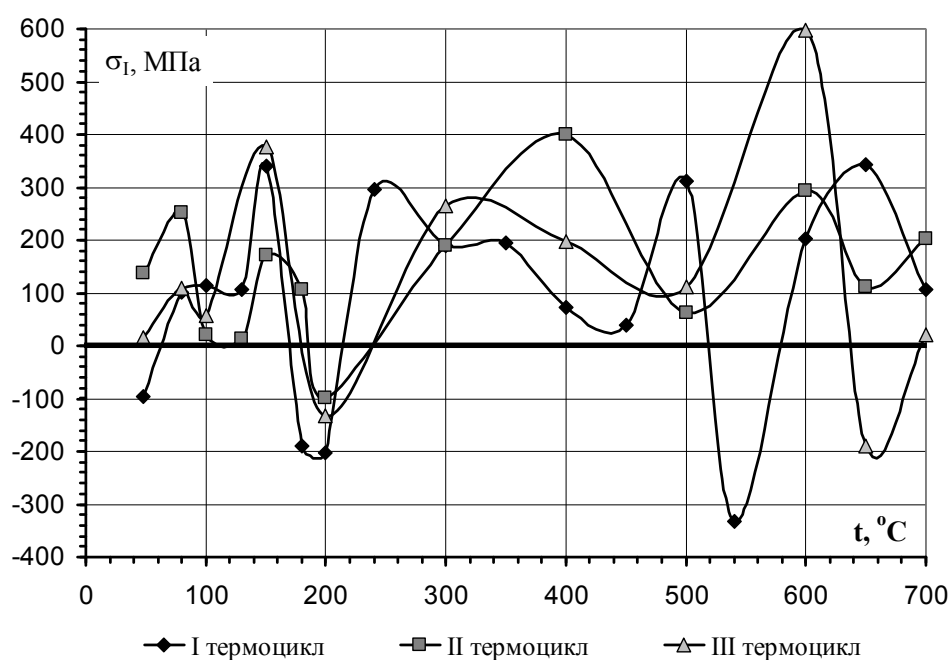


Рис. 7. Зависимость внутренних зональных макронапряжений I рода альфа-фазы образца трубы из стали Ди-82-Ш от температуры

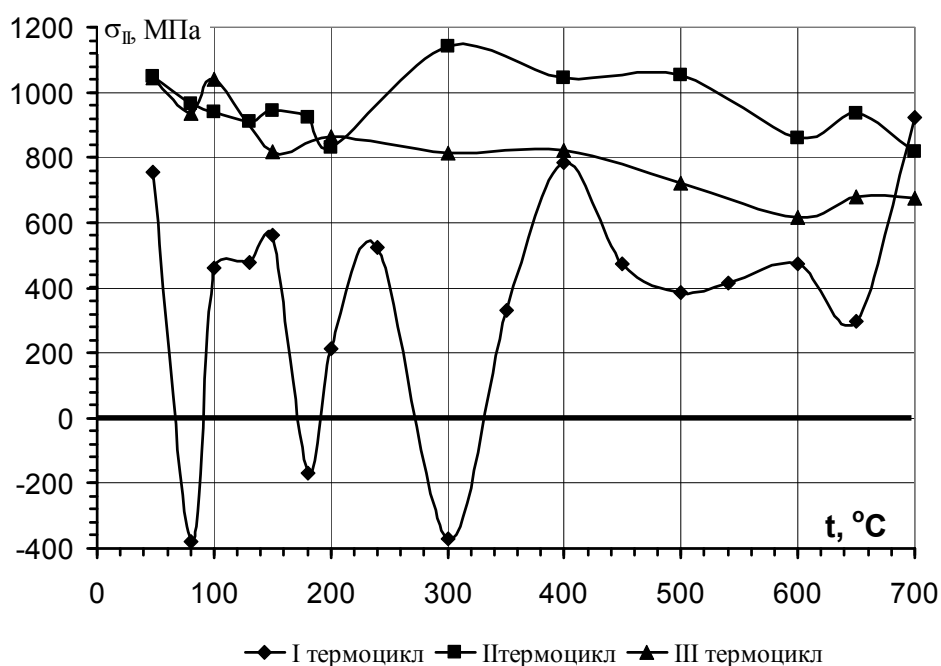


Рис. 8. Зависимость внутренних микронапряжений II рода альфа-фазы образца трубы из стали Ди-82-Ш от температуры

Изменения зональных и внутризеренных напряжений в трех термоциклах представлены на рис. 7 и 8.

С целью установления возможностей проведения восстановительной термической обработки (ВТО) для продления ресурса труб ПП после второго термоцикла была проведена аустенизация. Как видно из рис. 6 – 8, аустенизация приводит к изменению соотношения между прочностью зерен и межзеренных границ, в частности, к снижению внутренних напряжений II рода с 1000 до 800

МПа (рис. 8) и увеличению внутренних макронапряжений I рода. Например, для эксплуатационной температуры $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ σ_I увеличивается с 300 до 600 МПа). Аустенизация не приводит к устранению аномальных линейных термических расширений кристаллических решеток (рис. 6). На этих результатах показано, что ВТО, часто применяемая для продления ресурса труб и не всегда приводящая к однозначным результатам может эффективно контролироваться методом рентгеновской дифракции.

В четвертой главе приведен анализ полученных экспериментальных результатов по свойствам трубного изделия из стали Ди-82-Ш при внешнем холодном деформировании и термоциклировании в сравнении с результатами аналогичных исследований свойств образцов трубы из стали 12Х1МФ.

Показано, что количественные экспериментальные зависимости внутренних напряжений II рода от плотности структурных дефектов, представленные на рис. 1, соответствуют качественным кривым И.А. Одингга и А.А. Бочвара, согласно которым наибольшее сопротивление пластическому деформированию должен оказывать материал с очень малой плотностью структурных дефектов. По мере увеличения плотности структурных дефектов ρ сопротивление пластическому деформированию уменьшается до критического значения $\rho_{кр}$. При достижении этой плотности дислокаций сопротивление пластическому деформированию вновь увеличивается за счет взаимодействия силовых полей дислокаций. Таким образом реальные свойства материала (пластичность и прочность) характеризуются определенной точкой на кривых Одингга-Бочвара. Экспериментально показано (рис. 1), что механические свойства стенки трубы из стали Ди-82-Ш для внутренней и наружной поверхности трубы отличаются незначительно и выявляют базовые характеристики материала: временное сопротивление разрыву σ_B при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (левая верхняя часть графика на рис. 1 и линия упрочнения на рис. 2), составляющее порядка 800...850 МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ при $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (правая нижняя часть кривой на рис. 1 и линия разупрочнения на рис. 2), равный 600...650 МПа. Полученные методом рентгенографии экспериментальные результаты σ_B и $\sigma_{0,2}$ соответствуют справочным значениям для аналогичных трубных сталей мартенсито-ферритного класса, установленным по иным методикам (например, для трубы размером 30x6 мм из стали 18Х12ВМБФР при $t = 20^{\circ}\text{C}$ $\sigma_B = 820$ МПа, а $\sigma_{0,2} = 640$ МПа). Свойства стенки трубы и текущее физическое состояние материала характеризуются экспериментальными кривыми (рис. 1) и лимитируются зоной, находящейся между кривыми упрочнения и разупрочнения (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что значения внутренних напряжений II рода (внутризеренные) на наружной стороне трубы, соответствующие линии упрочнения (точки 1, 4, 7, 9 на рис. 2 А), усредненная величина которых равна 800 МПа, и на внутренней стороне трубы (точки 1, 3, 7, 11 на рис. 2 Б), равные 750 МПа, являются наиболее опасными с точки зрения возникновения внутриструктурной пористости при внешних нагрузках, совпадающих по направлению с действующими внутренними напряжениями. Это обусловлено релаксацией последних, сопровождающейся при нагружении стенки трубы внутризеренным тре-

щинообразованием, что следует из рис. 3 А (точки 2, 5, 8, 10, 13) и рис. 3 Б (точки 2, 5, 9, 13). Образующиеся внутризеренные микротрещины незначительны по величине и составляют порядка 0,08...0,1 мкм. Такого размера трещины обычно отмечаются на этапе неустановившейся стадии ползучести трубных изделий, когда они обладают способностью тормозиться на препятствиях (на границах зерен).

Одним из критериев склонности материалов к опасным и внезапно наступающим хрупким разрушениям является отношение $\sigma_b / \sigma_{0,2}$, т.к. в хрупких материалах предел прочности σ_b равен пределу текучести, а в пластичных $\sigma_b < \sigma_{0,2}$. В частности, для некоторых марок сталей это отношение может быть высоким, а сталь обладает склонностью к хрупким разрушениям, при соотношении $\sigma_b / \sigma_{0,2} = 0,88$ (аустенитно-марганцовистая сталь 110 Г13Л). Подобная склонность у стали Ди-59 обнаруживается уже при соотношении $\sigma_b / \sigma_{0,2} = 0,67$. По полученным экспериментальным результатам установлено, что данная характеристика индивидуальна для каждой марки стали, а по выявленным значениям $\sigma_{0,2}$ и σ_b для Ди-82-Ш определено, что при соотношении $\sigma_b / \sigma_{0,2} = 0,76$ материал стенки трубы не обнаруживает признаков слияния микротрещин в магистральные.

На наружной стороне трубы внутренние напряжения σ_i изменяются в диапазоне значений 10...210 МПа (рис. 4 А). Худшие условия эксплуатации для наружной стороны достигаются при величине зональных напряжений 10...20 МПа (точки 10, 13 на рис. 4 А) и внешних нагрузках порядка 180...330 МПа. При этом образуются межзеренные трещины размером до 600 мкм (точка 13 на рис. 4 А). Для внутренней стороны трубы величина внешней нагрузки, при которой образуются трещины порядка 65 мкм, составляет 180 МПа. Это соответствует 6 баллу размера зерна, равному при этом 50...60 мкм. Известно, что на третьей стадии ползучести в момент исчерпанию ресурса паропроводов в нем развиваются поры диаметром до 3 мкм, а разрушение изделия происходит путем их объединения по границам зерен в магистральные трещины. Таким образом, из рис. 5 следует, что при глубине релаксации внутренних напряжений I рода (зональных) 10 МПа возникает опасность потери работоспособности ПП за счет слияния межзеренных трещин в магистральную.

На рис. 6 показаны данные о термических расширениях кристаллических решеток, которые слабо представлены в литературе для котельных сталей. Коэффициент линейных термических расширений кристаллических решеток в первом термоцикле имеет отрицательное значение при $t=48^\circ\text{C}$ и при дальнейшем нагреве до 150°C зависимость $\alpha = f(t)$ носит аномальный характер. Скачку термических деформаций соответствует значение $\alpha = 35 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Во втором термоцикле аномалия α наблюдается при $t=100^\circ\text{C}$ ($\alpha=29 \cdot 10^{-6}$ 1/град), в третьем термоцикле – в диапазоне температур $80...150^\circ\text{C}$ ($\alpha \sim 30 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Во всех трех термоциклах значения коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток после 200°C соответствуют справочным значениям, полученным по результатам макродилатометрии. Анализ публикаций (в особенности по термическому поведению конструкционных материалов ядерных

реакторов) со сведениями по макродилотометрии показывает, что температуры, при которых установлены аномальные удлинения и распухаемость, совпадают с температурами опасного снижения механических свойств (прочность и пластичность) и эксплуатационной надежности. Это позволяет предполагать, что при наличии температурных градиентов, при переменных нагрузках и т.д. аномалии термических деформаций кристаллических решеток будут приводить к явлениям термической усталости стенки паропроводов и ПП.

Напряжения I рода (рис. 7) в процессе термоциклирования изменяются в трех термоциклах от растягивающих до сжимающих, проходя через полную релаксацию напряжений, опасную ползучестью и формоизменением труб. Явления взаимодействия процессов упрочнения и разупрочнения приводят к термической усталости и сокращению ресурса труб ПП.

Напряжения II рода (рис. 8) в первом термоцикле носят знакопеременный характер, что приводит к упрочнению зерна во втором термоцикле (порядка 1000 МПа). Аустенизация образца стенки трубы после второго термоцикла привела к уменьшению кристаллитных напряжений на 200 МПа (рис. 8) при эксплуатационной температуре 600 °С и к увеличению прочности межзеренных границ с 300 до 600 МПа (рис. 6). Это указывает, что путем фазовой перекристаллизации можно достигать требуемого соотношения свойств по прочности зерен и межзеренных границ.

Сравнение результатов термоциклирования образцов материалов стенки трубы из стали Ди-82-Ш и 12Х1МФ, полученных одним инструментально-методическим аппаратом, представлено на рис.. 9, 10, 11.

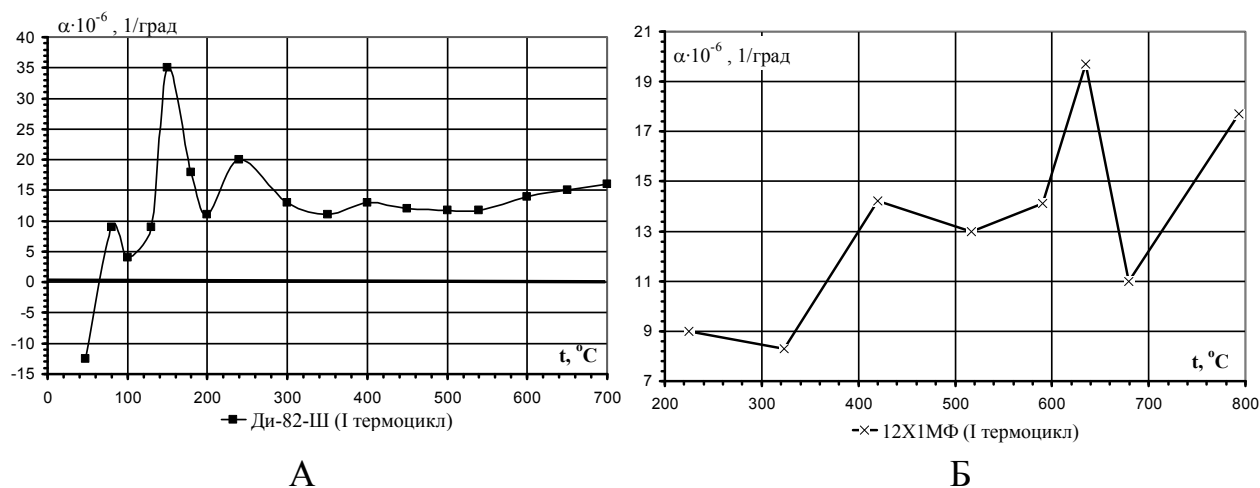


Рис. 9. Зависимость коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток альфа-фазы для пароперегревательных труб из сталей Ди-82-Ш (А) и 12Х1МФ (Б)

Сравнительный анализ поведения коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток в области рабочих температур (580...600 °С) позволяет констатировать следующее.

Сталь Ди-82-Ш в этом диапазоне температур не испытывает аномальных скачков термических деформаций кристаллических решеток, а коэффициент линейных термических расширений кристаллических решеток колеблется в интервале $13...15 \cdot 10^{-6}$ 1/град в широком диапазоне температур от 500 до 700 °С.

Для стали 12Х1МФ при этой же температуре коэффициент линейных термических расширений кристаллических решеток равен $13,8 \cdot 10^{-6}$ 1/град, что соответствует справочному значению α при этой температуре, но находится в области ярко выраженного λ -аномального скачка термических деформаций. При градиентах температур порядка ± 25 °С α будет меняться в широком интервале значений от $13 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ 1/град, что приведет к термической усталости и снижению ресурса трубы ПП. Согласно рис. 9 Б приемлемой температурой эксплуатации для стали 12Х1МФ может быть температура порядка 500...520 °С, т.к. в окрестности этой температуры коэффициенты линейных термических расширений кристаллических решеток изменяются в узком интервале значений – от $13 \cdot 10^{-6}$ до $14 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

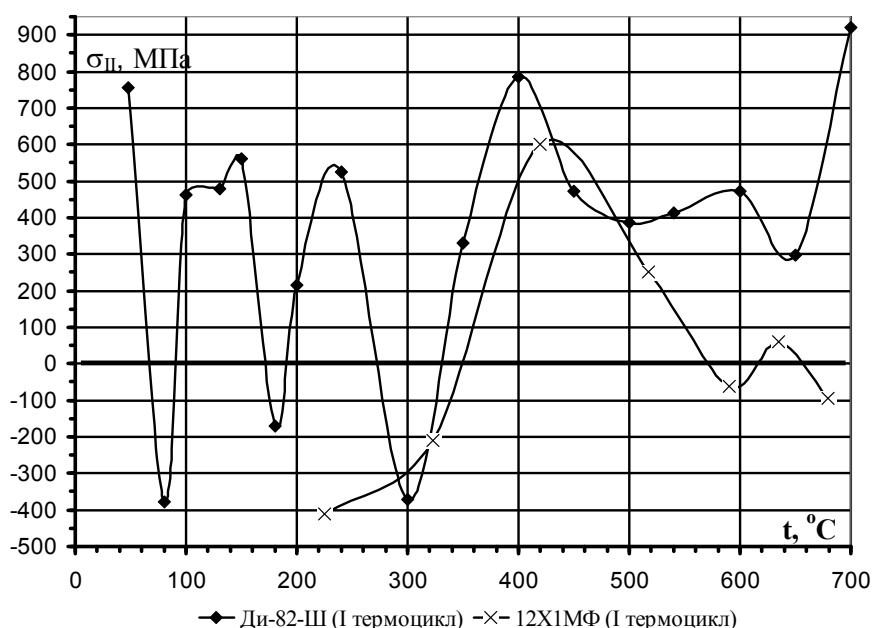


Рис. 10. Зависимость внутренних напряжений II рода в первом термоцикле для труб из сталей Ди-82-III и 12Х1МФ

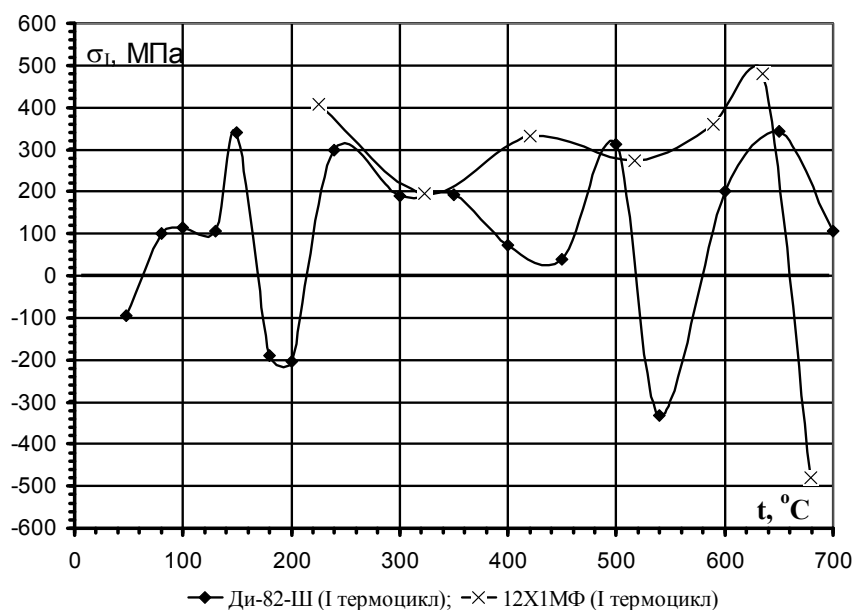


Рис. 11. Зависимость внутренних напряжений I рода в первом термоцикле для труб из сталей Ди-82-III и 12Х1МФ

Анализ поведения внутренних структурных напряжений второго рода при термических нагрузках (рис.10) показывает, что в области температур 580...600 °С внутренние напряжения в стенке трубы из стали 12Х1МФ близки к нулю, что обусловит повышенную ползучесть, повреждаемость порами ползучести, увеличение структурных дефектов и декорирование свободных поверхностей графитом (графитизацию). В качестве рабочей для стали 12Х1МФ может быть рекомендована температура 520 °С. Прочность зерен в стали Ди-82-Ш в том же диапазоне температур составляет 480 МПа, внутренние напряжения не релаксируют при повышении температуры от 450 до 700 °С, обнаруживая стабильность прочностных свойств зерен.

Сопоставление поведения внутренних структурных напряжений I рода (рис. 11) показывает, что для трубы из стали 12Х1МФ при $t = 580...600$ °С $\sigma_I = 350$ МПа, что превосходит σ_v (справочное значение временного сопротивления разрушению для этой стали равно $\sigma_v = 230$ МПа при $t=600$ °С), и при растягивающих внешних нагрузках приведет к зональному трещинообразованию и транскристаллитной коррозии. Для стали Ди-82-Ш $\sigma_I = 200$ МПа, а при изменении температуры до 700 °С изменяется по схеме 200→340→100 МПа. При уменьшении температуры до 550 °С σ_I переходит в область сжимающих напряжений, что уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений и повышает усталостную прочность металла.

ВЫВОДЫ

1. По результатам холодного циклического деформирования установлено, что экспериментальная кривая зависимости внутренних напряжений от плотности дислокаций в стенке трубы из стали Ди-82-Ш выявляет характер изменения структурно-напряженного состояния при механических нагрузках, подтверждая тем самым гипотезу И.А. Одингга о взаимосвязи сопротивления деформированию с плотностью структурных дефектов. Полученная закономерность связана с базовыми механическими характеристиками σ_v , $\sigma_{0,2}$, а совокупность перечисленных данных позволяет оценивать текущее физическое состояние и прогнозировать поведение стенки трубы пароперегревателя при механических нагрузках.
2. Экспериментальные кривые зависимости внутренних структурных напряжений I и II рода от внешней нагрузки позволяют рассчитывать длину зональных и кристаллитных трещин стенки трубы при механическом нагружении, а по установленным рентгенометрическим критериям – прогнозировать склонность к внутризеренному и межзеренному трещинообразованию.
3. Расчетно-экспериментальное установление условий роста структурной трещины в процессе механоциклического пластического деформирования стенки котельной трубы является основой прогнозирования работоспособности и совместно с результатами термоциклирования – основой выработки мероприятий по продлению ресурса поверхности нагрева.

4. По результатам термоциклирования установлены зависимости внутренних структурных напряжений I и II рода от температуры и определен безопасный температурный диапазон стенки трубы при эксплуатации пароперегревателя, составляющий 500...700 °С.
5. По результатам термоциклирования экспериментально доказано, что с целью продления работоспособности труб пароперегревателя требуется проведение предварительной термической обработки труб аустенизацией в течение суток (при данной толщине стенки трубы) при температуре 700 °С.
6. На основе термоциклирования определена температурная зависимость коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток стенки трубы и установлены аномальные изменения коэффициентов линейных термических расширений кристаллических решеток, являющиеся характеристиками структурно-напряженного состояния и зависящие от процесса термоциклического отжига: в первом термоцикле аномальные скачки термических деформаций наблюдаются при температурах 48, 150 °С, во втором – при 100 °С, в третьем – от 80 до 150 °С.
7. По результатам рентгенодилатометрических исследований и на основе сравнения их со свойствами достаточно испытанных в эксплуатации трубных сталей (12Х1МФ) подтверждена высокая надежность труб из стали Ди-82-Ш в широком диапазоне изменяющихся термических и механических нагрузок.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях

1. Ташлыков А. А. Исследование влияния циклического нагружения на распределение внутренних напряжений труб паровых котлов // Труды четвертого Всероссийского студенческого научно-практического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – С 94 – 96.
2. Рентгеновские исследования структурно-напряженного состояния в образцах стали 10 / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков и др. // Материалы докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – С. 102 – 105.
3. Аномалии термических линейных расширений в стали 10 / Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков и др. // Материалы докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – С. 105 – 108.
4. Рентгеновские исследования внутренних микронапряжений в образце стали 10 при термических циклических нагрузках / А.А. Макеев, А.С. Заворин, А.А. Ташлыков и др. // Материалы докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2002. – С. 108 – 110.
5. Рентгенометрия аномальных температурных расширений энергетических сталей / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков и др. //

Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306, №2, – С. 78 – 84.

6. Ташлыков А.А., Почуев В.Ф. Влияние факторов микроструктурной повреждаемости на опрессовку стальных труб // Материалы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 192 – 196.
7. Ташлыков А. А., Щетинин В. А. Исследование структурного трещинообразования в трубных сталях энергетических котлов // Труды пятого Всероссийского студенческого научно-практического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во. ТПУ, 2003. – С 98 – 101.
8. Экспериментальное обоснование рентгенодиагностики восстановления труб поверхностей нагрева / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков и др. // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты: Сборник научных трудов / Под. ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Вып.8. – С. 242 – 248.
9. Ташлыков А.А., Почуев В.Ф. Рентгенометрическое выявление признаков разупрочнения котельных сталей // Ползуновский вестник, 2004, № 1. – С.168 – 171.
10. Lyubimova L.L, Tashlykov A.A. Roentgenometrical detection of weakening pipe steel signs // The ninth International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientist “Modern Techniques and Technologies” (MTT`2003). – Tomsk, TPU, 2003. – P. 49 – 51.
11. Изменение внутренних напряжений в стенках труб паровых котлов при пластическом деформировании / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков и др. // IV семинар ВУЗов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. – Владивосток: 2005. – С. 35.
12. Рентгенодилатометрические температурные исследования внутренних напряжений стенок труб паровых котлов / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков и др. // IV семинар ВУЗов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. – Владивосток: 2005. – С. 44.
13. Влияние структурной неоднородности металла на язвенную коррозию труб паровых котлов / А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков и др. // IV семинар ВУЗов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике. – Владивосток: 2005. – С. 45.
14. Механоциклические исследования образцов труб перспективной стали Ди-82-Ш для пароперегревателей энергетических котлов / А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев и др. // Материалы докладов одиннадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 236.
15. Микродилатометрические исследования образцов труб энергетических котлов из новой стали Ди-82-Ш / А.С. Заворин, А.А. Ташлыков, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев и др. // Материалы докладов одиннадцатой Всероссийской на-

учно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 233.

16. Рентгенодилатометрические температурные исследования стенки котельной трубы / А.С. Заворин, А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, №5, стр. 103 – 106.
17. Изменение внутренних напряжений в сечениях котельных труб при пластическом деформировании / Л.Л. Любимова, А.А. Ташлыков, А.А. Макеев, А.И. Артамонцев // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Том 309. – №6. – С. 114 – 119.

Подписано к печати «10» октября 2007.

Формат 60 x 84 / 16 . Бумага офсетная.

Плоская печать. Усл. печ.л. _____.

Уч.- изд. л. _____ Тираж _____ экз.

Заказ № _____. Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.08.94 .

Типография, 634034, Томск, пр. Ленина, 30.