

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Факультет «Материаловедения и металлургических технологий»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_/ Г.Г. Михайлов/  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

ОЦЕНКА МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ  
ПАРОПРОВОДОВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 22.03.02.2018.00.000 ПЗ ВКР

Руководитель работы, д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_/ С.В. Рущиц/  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Автор работы

студент группы П–447

\_\_\_\_\_/ У.С. Пшеницына/  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Нормоконтролер, д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_/ С.В. Рущиц/  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Факультет «Материаловедения и металлургических технологий»  
Кафедра «Материаловедение и физико-химия материалов»  
Специальность «Металловедение и термическая обработка металлов»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ ( Г.Г. Михайлов)  
\_\_\_\_\_ 2018 г.

ЗАДАНИЕ  
на выпускную квалификационную работу студента  
Пшеницына Ульяна Сергеевна

(Ф. И.О. полностью)

Группа П-447

- 1 Тема работы: Оценка микроповрежденности длительно работающих паропроводов
- 2 Утверждена приказом по университету от 04.04.2018г. №580
- 3 Срок сдачи студентом законченной работы 13.06.2018г.
- 4 Исходные данные к работе:
  - а) материалы производственной практики в ОАО «ИЦЭУ» филиал «УралВТИ»;
  - б) техническая литература по специальности.
- 5 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)
  1. Условия работы паропроводов и требования к сталям для их изготовления

2. Технология производства теплоустойчивых сталей и паропровода
3. Процессы, протекающие в трубопроводах при длительной высокотемпературной эксплуатации
4. Экспериментальная часть. Оценка микроповрежденности длительно работающего паропровода в условиях ползучести
6. Перечень графического материала
  - а) Презентация по результатам работы, оформленная в PowerPoint
7. Консультанты по работе, с указанием относящихся к ним разделов работы

Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		Задание выдал (консультант)	Задание принял (студент)
Условия работы паропроводов и требования к сталям для их изготовления	Рушиц С.В.		
Технология производства теплоустойчивых сталей паропровода	Рушиц С.В.		
Процессы, протекающие в трубопроводах при длительной высокотемпературной эксплуатации	Рушиц С.В.		
Экспериментальная часть. Оценка микроповрежденности длительно работающего паропровода в условиях ползучести	Рушиц С.В.		

8 Дата выдачи задания 9 апреля 2018 г.

Руководитель \_\_\_\_\_ С.В. Рушиц  
(подпись)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ У.С. Пшеницына  
(подпись студента)

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении руководителя
Составление плана работы	9.04.2018-20.04.2018	
Поиск и исследование литературы по теме выпускной работы	21.04.2018-28.04.2018	
Литературный обзор	29.04.2018-10.05.2018	
Написание вводного и заключительного этапов	11.05.2018-24.05.2018	
Подготовка доклада и графического материала	25.05.2018-28.05.2018	
Представление выпускной квалификационной работы на кафедру	13.06.2018	
Защита выпускной квалификационной работы	14.06.2018	

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ /Г.Г. Михайлов/

Руководитель работы \_\_\_\_\_ / С.В. Рушиц/

Студент \_\_\_\_\_ /У.С. Пшеницына/

## АННОТАЦИЯ

Пшеницына У.С.

Оценка микроповрежденности  
длительно работающих паропроводов. –  
Челябинск: ЮУрГУ, П – 447, 45 с.,  
14 ил., 13 табл., библиогр. список – 7 наим.,  
2 прил., 1 л.

В выпускной квалификационной работе рассмотрена оценка микроповрежденности длительно работающих паропроводов.

Работа включает обоснование выбора стали 12Х1МФ для паропровода, способ изготовления его элементов (прямых труб и гибов) и требований к ним. Приведена методика измерения остаточной деформации, овальности, приготовления шлифов для снятия оттиска на действующем паропроводе, определены методы и объемы контроля, критерии оценки состояния гибов после длительной эксплуатации. Построена диаграмма ползучести для гiba типоразмера 273x26 мм из стали 12Х1МФ на основе фактических результатов контроля металла. Оценена степень изменения микроструктуры, выявлены стадии разрушения и произведен анализ микроповрежденности от ползучести.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ПАРОПРОВОДОВ И ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛЯМ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	8
1.1 Общие сведения о теплоустойчивых сталях и область их применения.....	8
1.2 Химический состав стали 12Х1МФ.....	9
1.3 Влияние легирующих элементов на свойства стали марки 12Х1МФ.....	9
2 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ И ПАРОПРОВОДА.....	11
2.1 Технологические процессы выплавки стали.....	11
2.2 Производство бесшовных труб.....	12
2.3 Производство бесшовных гибов.....	16
2.4 Термическая обработка бесшовных труб и гибов.....	17
2.5 Требования к механическим свойствам деталей трубопровода из стали марки 12Х1МФ в состоянии поставки.....	19
2.6 Требования к размерам и предельным отклонениям труб и гибов.....	20
2.7 Требования к микроструктуре металла элементов паропровода в исходном состоянии.....	22
3 ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	25
3.1 Изменение структуры металла паропроводов.....	25
3.2 Ползучесть металла.....	26
3.2.1 Контроль ползучести элементов трубопровода.....	28
3.2.2 Контроль микроструктуры и микроповрежденности методом реплик.....	30
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. ОЦЕНКА МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО ПАРОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ.....	35
4.1 Цель исследования.....	35
4.2. Объект и методика исследования.....	35
4.3 Анализ результатов контроля и металлографического исследования.....	44
4.4 Выводы по работе.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	47

## ВВЕДЕНИЕ

Контроль повреждаемости металла трубных элементов паропроводов из-за накопления деформации ползучести является наиболее важным мероприятием для поддержания работоспособности оборудования.

Образование микронесплошностей по границам зерен является закономерным следствием деформации ползучести, накапливающейся с ростом времени нагружения. Значительная часть отечественного оборудования имеет наработку, превышающую 200 тыс. ч, и обнаружение микронесплошностей (пор ползучести) является обычной ситуацией. Поэтому необходимо организовывать контроль за состоянием металла высокотемпературных элементов, знать причины их появления, представлять стадии их развития, уметь оценивать их период, когда эксплуатация небезопасна. Выявить микроповрежденность обычными дефектоскопическими методами не представляется возможным, и требуется применение специальных методов оценки состояния металла, основным из которых является металлография. В работе содержится практическое применение этого метода, указаны объемы и сроки контроля металла элементов трубопровода.

# 1 УСЛОВИЯ РАБОТЫ ПАРОПРОВОДОВ И ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛЯМ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Трубопроводы современных тепловых электростанций (ТЭС) представляют собой сложную пространственную систему, состоящую из прямых труб, гибов, тройников, конических переходов и т.д. Способ соединения элементов трубопровода – сварка [6].

Паропроводы, транспортирующие пар от котла к турбинам, так называемые главные паропроводы ТЭС, работают в сложноподвижном состоянии, которые создают высокие параметры среды:

-температура эксплуатации таких трубопроводов достигает  $565^{\circ}\text{C}$  при давлении до 25 МПа.

Надежность паропроводов обеспечивается путем правильного выбора материалов, стабильности свойств материалов как результата отработанности и неизменности их производства и технологического цикла на заводе-изготовителе оборудования. [6].

## 1.1 Общие сведения о теплоустойчивых сталях и область их применения

Металл, работающий при таких условиях как высокая температура и давление, в процессе своей длительной эксплуатации имеет значительные структурные изменения, приводящие к его дальнейшей неработоспособности. Наиболее широкое распространение в энергетике для изготовления паропроводов получила сталь 12Х1МФ. Эта марка является низкоуглеродистой, низколегированной, теплоустойчивой, относящаяся к перлитному классу.

Теплоустойчивая сталь – это сталь, которая предназначена для изготовления деталей, работающих в нагруженном состоянии при температуре до  $600^{\circ}\text{C}$  в течение длительного времени.



1.2 Химический состав стали 12Х1МФ представлен ниже (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав марки стали, весовые %

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P
12Х1МФ	0,10-0,15	0,17-0,37	0,40-0,70	0,9-1,2	<0,25	0,25-0,35	0,15-0,30	<0,025	<0,025

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

### 1.3 Влияние легирующих элементов на свойства стали марки 12Х1МФ

Основными легирующими элементами в теплоустойчивой стали 12Х1МФ являются хром, молибден и ванадий. В соответствии с условиями длительной работы под напряжением при высоких температурах стали должны обладать сопротивлением ползучести, длительной прочностью, стабильностью структуры и свойств во времени, жаростойкостью. Эти свойства с учетом требуемой технологичности сталей обеспечивают введением Cr, Mo, V с массовой долей элементов, указанных в таблице 1.

Легирование теплоустойчивых сталей хромом (0,5 % и выше) улучшает окалиностойкость стали в процессе эксплуатации. Он способствует получению более устойчивой карбидной фазы, препятствует диффузии углерода в твердом растворе и затрудняет коагуляцию карбидов. Хром оказывает влияние на длительную прочность стали.

В стали 12Х1МФ основным элементом, упрочняющим феррит, является молибден. Молибден повышает температуру рекристаллизации железа, что способствует повышению его прочности и сопротивлению ползучести при повышенных температурах.

Ванадий связывает углерод в карбиды, затрудняя пластическую деформацию путем получения в структуре мелкодисперсных карбидов ванадия, а также препятствует миграции молибдена из твердого раствора в карбиды. Он благотворно влияет на сопротивлений ползучести и не уступает молибдену.

Также в стали присутствуют постоянные вредные примеси сера и фосфор, которые попадают в металл из руд.

Сера – вредная примесь, вызывающая красноломкость стали - хрупкость при горячей обработке давлением. В стали находится в виде сульфидов. От красноломкости сталь предохраняет марганец, который связывает серу в сульфид.

Устраняя красноломкость, сульфид  $MnS$ , так же, как и другие неметаллические включения (оксиды, нитриды и т.п.), служат концентраторами напряжений, снижают пластичность и вязкость сталей.

Фосфор – вредная примесь, которая вызывает хладноломкость – снижение вязкости по мере понижения температуры. Сильное охрупчивающее действие фосфора выражается в повышении порога хладноломкости, каждая 0,01% P повышает порог хладноломкости на  $25^{\circ}C$ .

## 2 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ И ПАРОПРОВОДА

### 2.1 Технологические процессы выплавки стали

Выплавка металла начинается с загрузки всех необходимых компонентов. Одним из таких компонентов является лом. Стальной лом загружают в количестве 25-27% от массы металлической шихты. Загрузку ведут через отверстие горловины конвертера одним-двумя совками под углом 45 градусов, чтоб загружаемые куски лома скользили по футеровке, а не падали сверху, разрушая ее. Этот процесс длится от 2 до 4 минут.

Следующим немаловажным этапом является заливка чугуна. Чугун заливают с помощью мостового крана из заливочного ковша (объем ковша до 300 т и более) так же в наклонный конвертер. Длительность от 2 до 3 минут.

После заливки чугуна конвертер поворачивают в вертикальное рабочее положение, вводят сверху фурму и включают подачу кислорода, начиная продувку. Фурму в начале продувки для ускорения шлакообразования устанавливают в повышенном положении (до 4,8 м от уровня ванны в спокойном состоянии), а через 2–4 минуты ее опускают до оптимального уровня (1,0–2,5 м в зависимости от вместимости конвертера и особенностей технологии).

Продувка до получения заданного содержания углерода в металле длится 2–18 минут. Она тем больше, чем меньше принятая в том или ином цехе интенсивность подачи кислорода в пределах  $2,5-5 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$ .

Продувку необходимо закончить в тот момент, когда углерод будет окислен до нужного в выплавляемой марки стали содержания. В нашем случае содержание углерода должно составлять 0,12%. К этому времени металл должен быть нагрет до требуемой температуры, а фосфор и сера удалены до допустимых для данной марки стали переделов.

Окончив продувку, из конвертера выводят фурму, а конвертер поворачивают в горизонтальное положение. Через горловину конвертера отбирают пробу металла, посылая ее на анализ, и замеряют температуру термопарой погружения. Если по

результатам анализа и замера температуры параметры металла соответствуют заданным, плавку выпускают. В случае несоответствия проводят корректирующие операции: при избыточном содержании углерода проводят кратковременную додувку для его окисления; при недостаточной температуре делают додувку при повышенном положении фурмы, что вызывает окисление железа с выделением тепла, нагревающего ванну; при излишне высокой температуре в конвертер вводят охладители - легковесный лом, руду, известняк, известь и т.п., делая выдержку после их ввода в течении 3–4 минуты. По окончании корректировочных операций плавку выпускают. На отбор и анализ проб затрачивается 2–3 минуты; корректировочные операции вызывают дополнительные простои конвертера поэтому нежелательны.

Металл выпускают в сталеразливочный ковш через летку без шлака. Это достигается благодаря тому, что в наклонном конвертере, у летки располагается более тяжелый металл, препятствующий попаданию в нее находящегося сверху шлака. Такой выпуск исключает перемешивание металла со шлаком в ковше и переход из шлака в металл фосфора FeO. Выпуск длится 3–7 минут.

Слив шлака в шлаковый ковш ведут через горловину, наклоняя конвертер в противоположную от летки сторону (слив через летку недопустим, так как шлак будет растворять футеровку летки). Слив шлака длится 2–3 минуты. Общая продолжительность плавки в 100–350 т конвертерах составляет 40–50 минут.

## 2.2 Производство бесшовных труб

Одним из предназначений стали 12Х1МФ является ее использование для изготовления труб для паровых котлов и трубопроводов с температурой эксплуатации в диапазоне 540...580 градусов.

Трубы представляют из себя металлопродукт из стали круглого сечения.

В данной работе рассмотрим трубы стальные бесшовные, изготовленные по ТУ 14-3р-55-2001 из марки стали 12Х1МФ типоразмера 273x26 мм. [2].

Изготовление труб начинается с отливок-заготовок, отличающихся своей формой. В качестве заготовок для производства бесшовных труб используют круглые и граненные слитки, а также катаные заготовки. Процесс прокатки состоит из двух основных операций: прошивки отверстия в заготовке и прокатки прошитой заготовки. Прошивка осуществляется на прошивочном стане. Прошивные станы по типу рабочих валков подразделяют на прошивные станы с бочкообразными валками (валковые), дисковыми валками (дисковые) и с грибовидными валками (грибовидные). [6].

Валки прошивного стана установлены под углом  $9 \dots 14^\circ$  друг к другу. Заготовка продавливается через оправку, а из-за растягивающих напряжений, создаваемых вращающимися валками, происходит течение металла от центра слитка и за счет этого без больших усилий происходит прошивка отверстия (рисунок 1).

Далее проводится прокатка полученной гильзы тоже на оправке, в результате уменьшаются внутренний и наружный диаметры и увеличивается длина заготовки (рисунок 2). Прокатку выполняют за два прохода с поворотом трубы на  $90^\circ$ . Получают трубу диаметром свыше 57 мм. На третьем этапе получения трубы дальнейшее уменьшение их диаметров ведут в непрерывных станах уже без оправки. Производство бесшовных труб осуществляется на трубопрокатных агрегатах, представляющих собой комплекс машин и механизмов, предназначенных для получения бесшовных труб горячей прокаткой, их транспортирования, горячей и холодной отделки, складирования, упаковки и т. п. (рисунок 3). Таким образом, в состав трубопрокатного агрегата кроме прошивных, раскатных, редуционных (расширительных) станов входят нагревательные печи, обкатные и калибровочные станы, правильные станы, трубообрезные и трубонарезные станки и другое оборудование, необходимое для выполнения всех предусмотренных технологических операций.

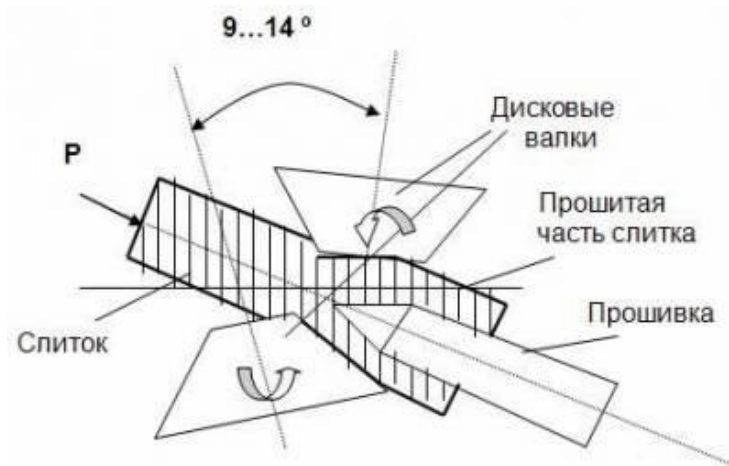


Рисунок 1 – Схема прошивки слитка

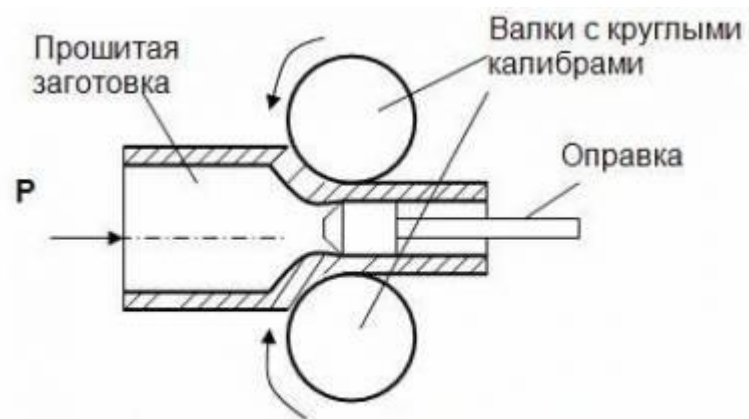


Рисунок 2 – Схема прокатки прошитой заготовки на оправке



Рисунок 3 – Общая схема производства бесшовных труб

1 – измерение длины заготовки; 2 – нагрев заготовки в печи с шагающими балками; 3 – гидросбив окалины; 4 – резка заготовки; 5 – подогрев печи в термостате; 6 – прошивка заготовки на пресс-прошивном стане; 7 – раскатка гильзы на стане–элонгаторе; 8 – прокатка на непрерывном стане с удерживаемой оправкой; 9 – прокатка на калибровочном стане и извлечение оправки; 10 – охлаждение; 11 – обрезка концов и резка на мерные длины; 12 – холодная правка

### 2.3 Производство бесшовных гибов

Основными элементами трубопроводов являются гибы. Гибы трубопроводов изготавливаются путем гибки прямых труб, изготовленных по ТУ 14-ЗР-55-2001, на специальных трубогибочных станках. В последние годы на котлостроительных заводах применяются станки для гибки труб с использованием индукционного нагрева током высокой частоты с использованием машинного генератора. Схема работы такого трубогибочного станка показана на рисунке 4. [6].

Труба 1 зажата в суппорте 2 и непрерывно перемещается слева направо в направляющих роликах 3. Нажимный ролик 4 перемещается в перпендикулярном направлении. Изгиб происходит по «слабому» сечению, нагретому индуктором 5 до температуры 850–950° С. Радиус гибки определяется перемещением нажимного ролика, а угол загиба — продольной подачей. При гибке этим способом узкая зона пластической деформации находится в окружении жестких ненагретых участков трубы, которые существенно ограничивают искажение поперечного сечения. Для получения правильной формы поперечного сечения ширина нагретой полосы должна поддерживаться в диапазоне (1,5–2,5) s. Ширина полосы нагрева ограничивается действием спреера – душирующей установки (за индуктором на горячую трубу направляются струи воды). В процессе пластического деформирования необходимо обеспечивать равномерный нагрев, иначе могут образоваться гофры или локальные деформации в виде сдвигов. Гибы, изготовленные на станках с нагревом ТВЧ с использованием спреерного водяного охлаждения должны подвергаться дополнительной термообработке (нормализация 950–980, отпуск 700–750) [5, 7].



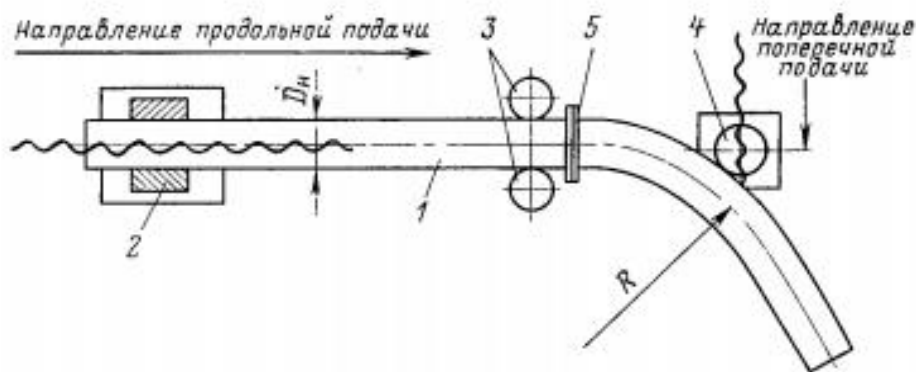


Рисунок 4 – Схема гибки трубы с индукционным нагревом током высокой частоты

#### 2.4 Термическая обработка бесшовных труб и гибов

Трубы и гибы должны поставляться в термически обработанном состоянии. Как прямые трубы после прокатки, так и гибы после гнутья ТВЧ подвергаются ТО заключающейся, в нормализации и последующем отпуске. Режим термической обработки указан в таблице 2 [2, 8].

Таблица 2 – Режим термической обработки труб из стали 12Х1МФ

Марка стали	Режим термической обработки
12Х1МФ	Нормализация при температуре 950-1030 °С, отпуск при температуре 700-750 °С с выдержкой 1-3 ч, охлаждение на воздухе. Допускается при нормализации применять ускоренное вентиляторное или воздушно - спрейерное охлаждение. Для труб с толщиной стенки более 15 мм при нормализации необходимо применение индивидуального охлаждения.

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

Нормализация – это вид термической обработки, при которой происходит нагрев в печи, выдержка и затем постепенное охлаждение на воздухе. Нормализация проходит выше точки  $A_3$  с учетом легирующих элементов. В нашем случае нормализация проходит выше точки  $A_3$  на 50...70 градусов, об этом свидетельствует наличие легирующих элементов в данной марке стали: Cr, Mo и V. При малых скоростях охлаждения (1, 3, 6 град/мин) превращение аустенита

происходит в феррито–перлитной области, которая ограничивается температурами критических точек  $A_3$  и  $A_1$ . Как правило, это охлаждение в печи при полном ее выключении. Область образования мартенсита соответствует наиболее высоким скоростям охлаждения – охлаждение в воде или масле. И промежуточная область находится между этими областями как по скорости охлаждения, так и по температуре. Превращение аустенита в феррито–перлитной области начинается с выделения феррита, после чего происходит образование перлита. При скорости  $V_{вкз} = 4,9$  град/мин для данного металла получается структура феррит и перлит (рисунок 5) [1].

Следующий процесс – это высокий отпуск при температуре 680–730 град. Металл работает при высоких температурах (540–580 град), соответственно, отпуск не может протекать при температуре ниже работающей. При таком отпуске окончательной структурой мы получаем сорбит отпуска. Он обеспечивает нашему изделию – трубе, высокую прочность в сочетании с высокой пластичностью. Именно такие свойства должны иметь длительно работающие паропроводы.

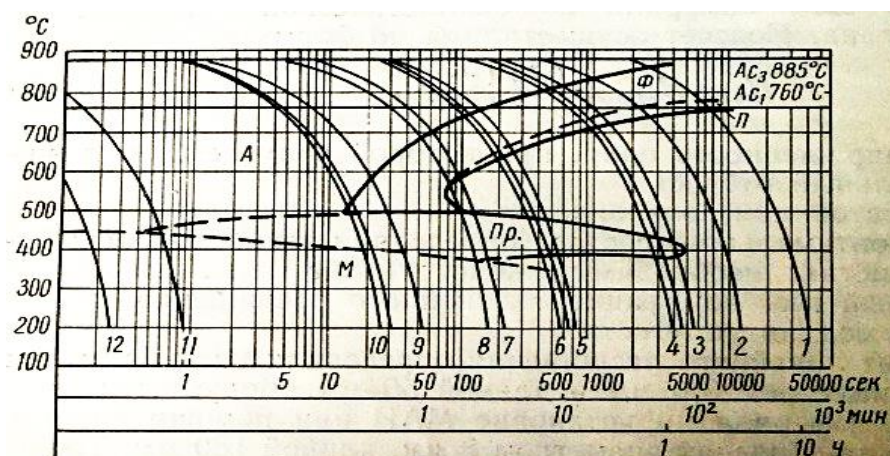


Рисунок 5 – Термокинетическая диаграмма стали 12Х1МФ. Скорости охлаждения, град/мин: 1 - 1; 2 - 3; 3 - 7; 4 - 10; 5 - 55; 6 - 70; 7 - 185; 8 - 230; 9 - 800; 10 - 1660; 11 - охлаждение в масле; 12 - в воде

## 2.5 Требования к механическим свойствам деталей трубопровода из стали марки 12Х1МФ в состоянии поставки

Требования к механическим свойствам металла труб при комнатной и повышенных температурах в исходном состоянии представлены в таблицах 3 и 4 [2, 8].

Таблица 3 - Механические свойства металла труб и гибов при комнатной температуре

Марка стали	Продольные образцы				
	Временное сопротивление $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup> (кгсм/см <sup>2</sup> )
12Х1МФ	441–637 (45–65)	274 (28)	21	55	59 (6)
Марка стали	Поперечные образцы				
	Временное сопротивление $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup> (кгсм/см <sup>2</sup> )
12Х1МФ	441–637 (45–65)	274 (28)	19	50	49 (5)

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

Таблица 4 – Значение пределов текучести при повышенных температурах и длительной прочности металла труб и гибов

Марка стали	Предел текучести, $\sigma_{0.2}$ , Н/мм <sup>2</sup> ,(кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее, при температуре испытания, °С										
	250			400				450			
12Х1МФ	-			216 (22)				206(21)			
	Предел длительной прочности, Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> ), При температуре испытания, °С, и продолжительности испытания, ч										
	450		500		550		600		650		700
	$10^5$	$2 \times 10^5$	$10^5$	$2 \times 10^5$	$10^5$	$2 \times 10^5$	$10^5$	$2 \times 10^5$	$10^5$	$2 \times 10^5$	$10^5$
-	-	167 (17,0)	135 (13,8)	97 (9,9)	82 (8,4)	55 (5,6)	45 (4,6)	-	-	-	

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

## 2.6 Требования к размерам и предельным отклонениям труб и гибов

Для труб с типоразмером 273x26 мм предъявляются следующие требования к предельным отклонениям наружного диаметра и толщины стенки (таблица 5 и 6).

Таблица 5 – Предельные отклонения наружного диаметра труб

Наружный диаметр	Предельные отклонения, %, при точности изготовления	
	обычной	повышенной
Горячедеформированные трубы		
От 245 до 325 мм	+1,25/ - 1,0	±0,9

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

Таблица 6 – Предельные отклонения толщины стенки труб

Наружный диаметр	Предельные отклонения, %, при точности изготовления	
	обычной	повышенной
Горячедеформированные трубы		
От 114 до 325 мм	+ 20,0	+ 15,0
	- 5,0	- 5,0

Источник: по данным ТУ 14-3Р-55-2001 [2]

В процессе гибки труб трубопроводов происходит утонение стенки трубы и труба приобретает дополнительную овальность. Происходит пластическое деформирование металла – на наружной частигиба металл растягивается, на внутренней – сжимается. Форма поперечного сечения представлена на рисунке 6 [6].

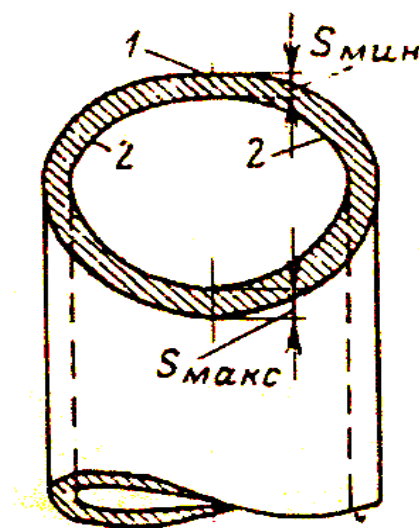


Рисунок 6 – Схема поперечного сечения гнущейся трубы

Одним из важных показателей эксплуатационной надежности гибов трубопроводов является их овальность. Она определяется по формуле (1):

$$a = \frac{2(D_{max}-D_{min})}{D_{max}+D_{min}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $D_{max}$  – наибольший наружный диаметры трубы в местегиба, в одном и том же контрольном сечении;

$D_{min}$  – наименьший наружный диаметры трубы в местегиба, в одном и том же контрольном сечении.

Овальностьгиба не должна превышать 6%. Изменение формы трубы при гибке может привести к снижению прочности из-за утонения стенки.

## 2.7 Требования к микроструктуре металла элементов паропровода в исходном состоянии

В ТУ 14-3Р-55-2001 предъявляются требования к микроструктуре в исходном состоянии. Сдаточные и браковочные структуры регламентируются шкалами (рисунок 7 и 8).

Оптимальная структура этой стали в состоянии поставки должна содержать отпускаемый бейнит и перлит плюс феррит. Микроструктура стали 12Х1МФ по ТУ 14-3Р-55-2001, по которым осуществлялась поставка труб заводами-изготовителями, оценивается содержанием отпускаемого бейнита и перлита в количестве от 100 (1-й балл) до 15 % (5-й балл). Микроструктура металла трубы из стали 12Х1МФ не должна превышать 5 балла по шкале сдаточных структур (рисунок 7). [9].

Загрязненность труб неметаллическими включениями не должна превышать по сульфидам, оксидам и силикатами – 3,5 балла по ГОСТ 1778.

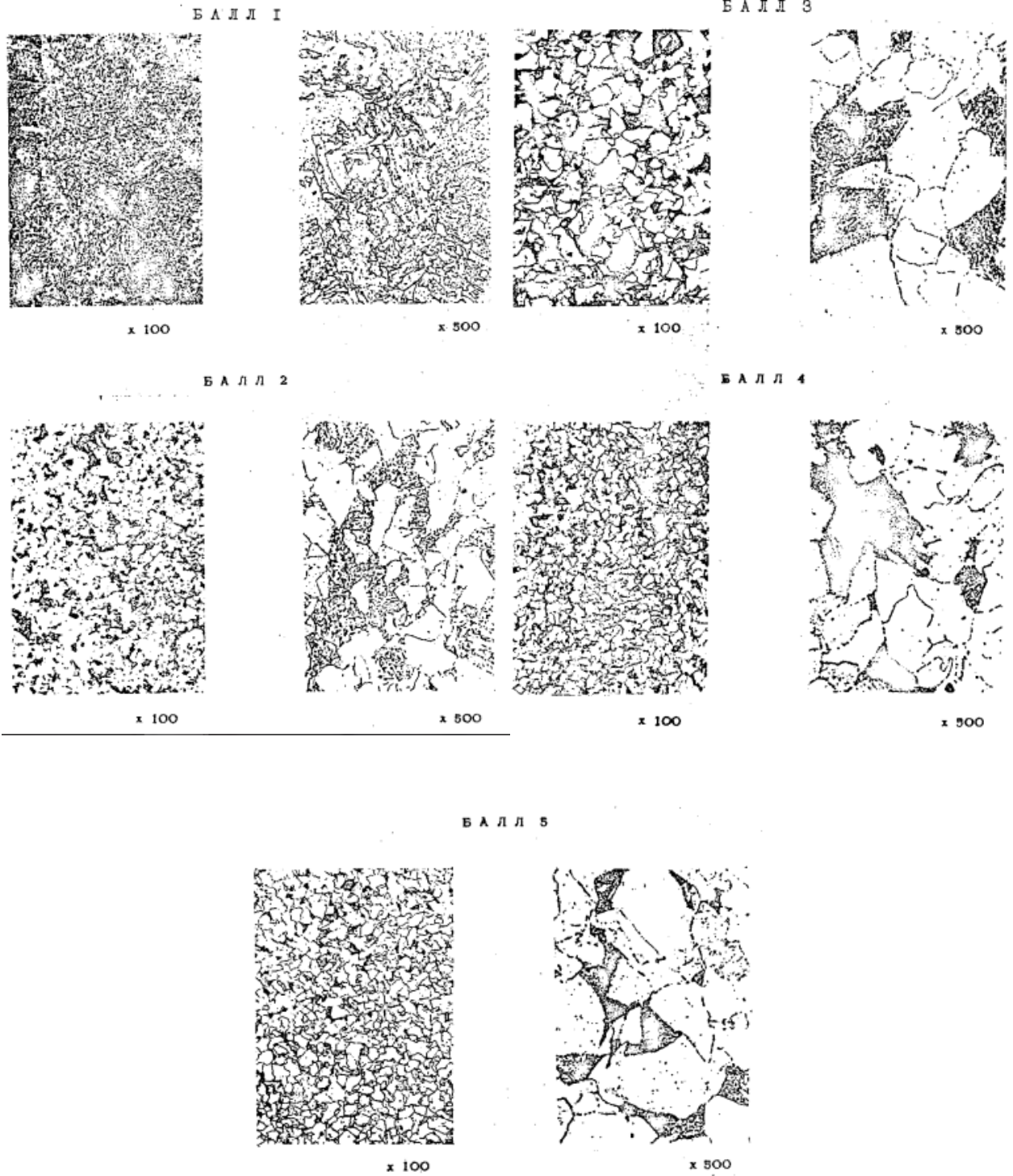


Рисунок 7 – Сдаточные микроструктуры металла труб из стали 12Х1МФ

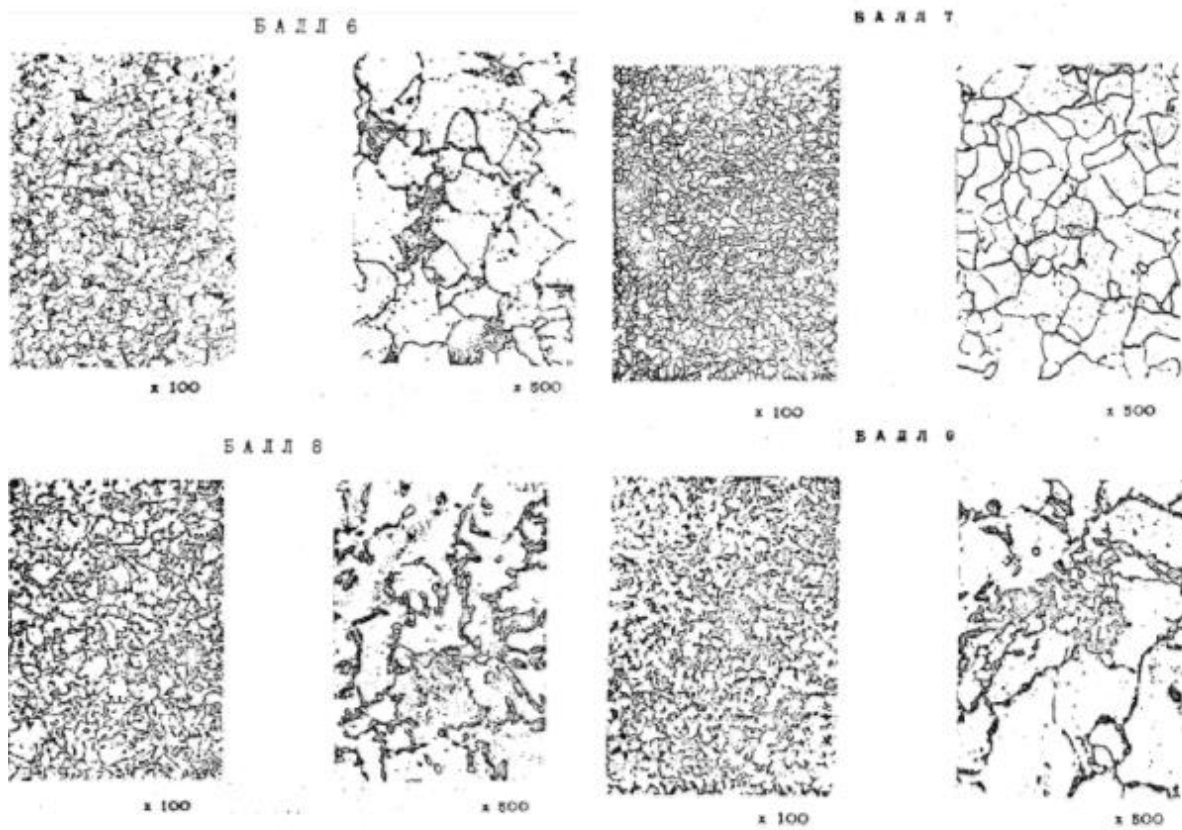


Рисунок 8 – Браковочные микроструктуры металла труб из стали 12Х1МФ



### 3 ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

#### 3.1 Изменение структуры металла паропроводов

В процессе длительной эксплуатации при высоких температурах структура металла элементов трубопроводов претерпевает изменения. [6,7].

До эксплуатации структура низколегированной перлитной стали 12Х1МФ состоит из феррита и перлита. При эксплуатации паропроводов высоких параметров пара происходят изменения в строении как ферритной, так и перлитной составляющей. Рассмотрим начнем с анализа превращений, которые происходят в ферритных зернах перлитных жаропрочных сталей – наиболее мягкой и податливой структурной составляющей. Феррит упрочнен из-за растворения в нем углерода, молибдена, хрома и ванадия. В теле ферритных зерен имеются мелкодисперсные карбиды. Их роль особенно велика в упрочнении феррита хромомолибденованадиевых сталей. Мелкие карбиды, равномерно распределенные в ферритной матрице, затрудняют пластическую деформацию, так как препятствуют движению дислокаций. При коагуляции карбидов их количество уменьшается, а размеры увеличиваются. Препятствий для движения дислокаций становится меньше. Это явление в значительной степени объясняет изменение механических свойств перлитных сталей. В процессе эксплуатации ферритная матрица обедняется легирующими элементами из-за ухода их в карбидную фазу. Изменяется фазовый состав карбидов. Перлит также претерпевают изменения при эксплуатации стали в области высоких температур, пластинки цементита в зернах перлита жаропрочных сталей постепенно приобретают сферическую форму или приближаются к ней. Этот процесс называется сфероидизацией. Процесс начинается с деления пластинок цементита или сложных карбидов, входящих в состав перлита, на отдельные частицы, которые в дальнейшем принимают сферическую форму. Одновременно происходит объединение мелких карбидов в более крупные. По границам зерен появляется большое количество глобулярных карбидов. Границы утолщаются. Карбиды основных легирующих элементов –

молибдена, хрома и ванадия – более устойчивы против сфероидизации, чем цементит. Наибольшее влияние на скорость сфероидизации оказывает температура. Сфероидизация значительно увеличивает скорость ползучести стали.

### 3.2 Ползучесть металла

Основные элементы трубопроводов, работающие при температуре металла 450°C и выше подвержены явлению ползучести - накоплению пластической деформации во времени. Наиболее явно деформация ползучести наблюдается в гibaх, являющихся наиболее теплонапряженными элементами. Деформация ползучести ограничивает срок службы гибов по ряду причин. В частности, происходит уменьшение сечения трубы, и это способствует ее вязкому разрушению. А также ползучесть способствует появлению несплошностей по границам зерен, которые, увеличиваясь в размерах и количестве, способствует разрушению элементов трубопровода. [6, 7].

Увеличение количества межзеренных повреждений и их рост проходят в несколько стадий, которые отличаются по морфологическим признакам и обычно характеризуются баллами. С определенной стадией ползучести, как правило, может соотноситься соответствующий балл поврежденности. Скорость ползучести зависит от микроструктуры и условий нагружения.

На кривой ползучести наблюдаются три стадии изменения скорости деформации: начальная 1, установившаяся 2 и ускоренная 3 (рисунок 9).

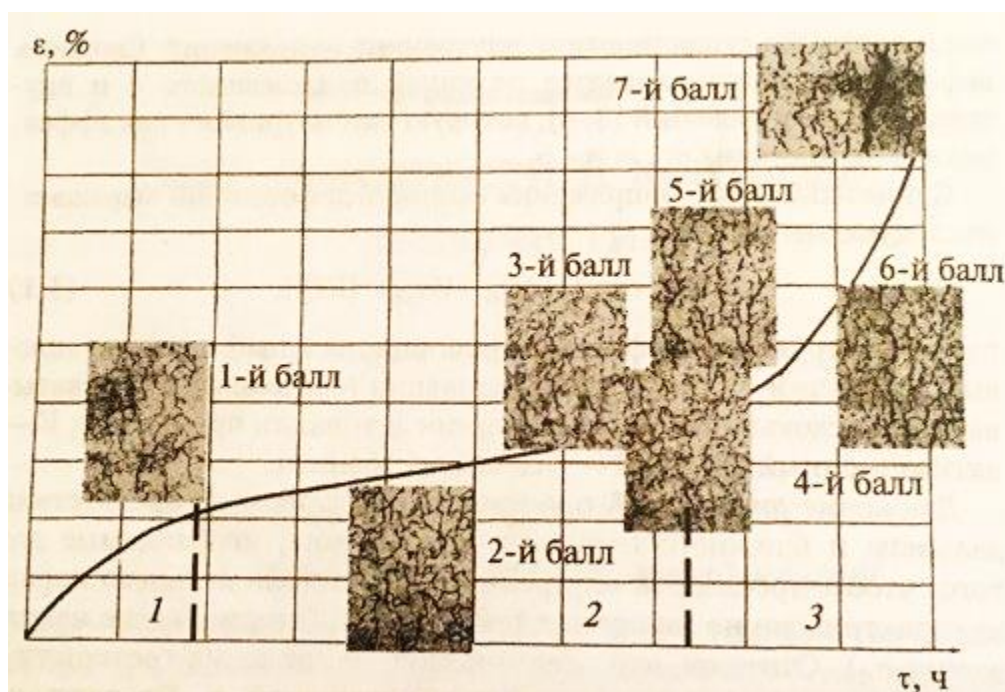


Рисунок 9 – Классическая кривая деформации ползучести и последовательность накопления поврежденности (стадии 1, 2, 3 соответственно) в стали 12X1МФ по мере исчерпанию ресурса

На первой начальной стадии ползучести эффективные напряжения, являющиеся разностью между внешними силами и внутренними локальными напряжениями сопротивления деформации, уменьшаются. Поэтому скорость ползучести уменьшается до наступления равновесия между этими процессами.

На второй стадии ползучести между процессами упрочнения и разупрочнения наступает равновесие. Механизмы деформации, действующие на второй стадии, во многом подобны наблюдающимся на первой стадии ползучести. Установившаяся ползучесть - это такой процесс, при котором значения внутреннего напряжения являются постоянными, размер субзерен не изменяется, но изменяется их относительное положение вследствие переползания или поперечного скольжения дислокаций, т.е. возврата. Эти факторы обуславливают скорость деформации ползучести. Ползучесть установившейся стадии обычно происходит при

изменяющейся структуре, и наблюдается равновесие между процессами упрочнения и разупрочнения (возврата), определяющими установившуюся стадию.

На первую и вторую стадии приходится, как правило, 50-75% всей долговечности. В этот период в металле происходят в основном наиболее существенные структурные изменения, влияющие на служебные характеристики металла: жаропрочность и трещиностойкость. Нарушение сплошности металла, обычно характеризующее баллами сплошности, в этот период незначительное и находится в начальной стадии.

На третьей стадии ползучести баланс между внутренними и внешними напряжениями достигается при все большем значении деформации, поэтому скорость ползучести увеличивается главным образом из-за более интенсивных процессов микрорелаксации и увеличение количества микронесплошностей.

### 3.2.1 Контроль ползучести элементов трубопровода.

Контроль за деформации элементов паропроводов является эффективным способом отслеживания состояния металла для обеспечения эксплуатационной надежности.

Оценка деформации ползучести является базовым видом контроля для элементов паропровода – прямых труб и гибов

Для оценки деформации ползучести труб осуществляют периодические измерения внешнего диаметра труб в определенном месте в течении длительного времени. Такие измерения должны проводится с большой аккуратностью, так как на них оказывают большое влияние различные внешние факторы, такие, как температура, средства измерения, квалификация персонала, место измерения и др., что может приводить к большому разбросу данных.

Остаточную деформацию ползучести паропровода измеряют микрометром с точностью до 0,05 мм по реперам (рисунок 10), устанавливаемым на прямых трубах длиной 500 мм и более, а также на гнутых отводах, имеющих прямые участки длиной не менее 500 мм. Измерения проводят на неработающем остывшем

паропроводе (температура не выше 50° С) и заносят в формуляр установленной формы. Установка реперов на трубы и нанесение на исполнительную схему-формуляр мест их расположение проводятся во время монтажа. Реперы на схеме должны иметь нумерацию, остающуюся постоянной в течении всего периода эксплуатации паропровода. Места расположения реперов должны быть отмечены указателями, выступающими над поверхность изоляции паропровода (рисунок 10).

Остаточная деформация ползучести от начала эксплуатации до n-го измерения, %, определяется по формуле (2):

$$\Delta \varepsilon_{\Pi} = \frac{D_i - D_{исх}}{D_{тр}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где  $D_i$ - диаметр трубы, измеренный по реперам при n-м измерении в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (горизонтальной  $D_z$ , вертикальной  $D_g$ ), мм;

$D_{исх}$  - исходный диаметр трубы, измеренный по реперам в исходном состоянии, мм;

$D_{тр}$ - наружный диаметр трубы, измеренный около реперов в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в исходном состоянии, мм.

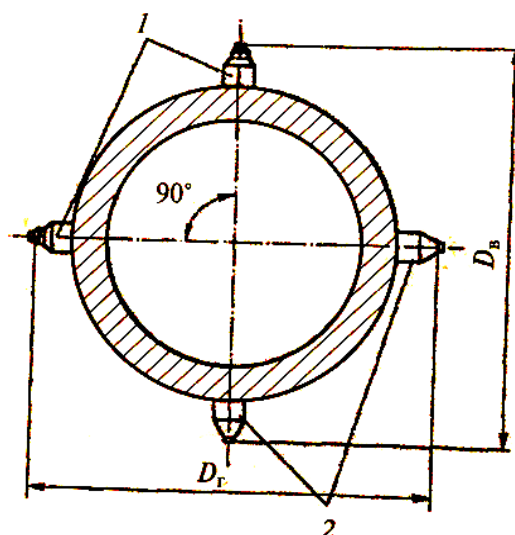


Рисунок 10 – Схема расположения реперов на трубе паропровода:

1, 2 – реперы; обозначение размеров:  $D_г$ - диаметр по горизонтали;  $D_в$ - диаметр по вертикали

В формулу подставляются значения измерений как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Наибольшее полученное значение принимается за расчетное.

При наличии значительной остаточной деформации ползучести (более половины допустимой) время дальнейшей эксплуатации в соответствии с действующими нормативными документами оценивается по различным показателям: состояние структуры и микрповрежденности, уровню кратковременной и длительной прочности и т.д.

Предельно-допустимые критерии деформации трубопроводов следующие: остаточная деформация ползучести не должна превышать 1,5% диаметра – для прямых труб из стали 12Х1МФ; 0,8% диаметра - для прямых участков гнутых труб (гибов) независимо от марки стали.

### 3.2.2 Контроль микроструктуры и микрповрежденности методом реплик

При достижении остаточной деформации более половины допустимой для оценки фактического состояния и накопления микрповрежденности от

ползучести выполняется металлографическое исследование гибов и труб методом реплик.

Метод определения микроструктуры металла – метод реплик, заключающийся в снятии оттиска с исследуемой поверхности, позволяет в лабораторных условиях установить величину зерен, строение зерна и его границ, наличие выделений карбидов, микропор ползучести и т.д. Этот метод имеет ряд преимуществ перед разрушающим контролем: позволяет изготавливать шлифы непосредственно на элементах трубопровода, не нарушает целостности и не снижает запаса прочности детали, а также не требует замены элемента.

### 3.2.2.1 Выбор зон для исследования на гихах

На поверхности гиха по линии внешнего обвода выбираются три участка для приготовления реплик, учитывая его месторасположение и результаты измерительного контроля (УЗТ, овальность). Следует избегать мест с явно выраженными механическими повреждениями (вмятины, язвины и др.).

Один участок выбирается в районе вершины гиха (растянутая зона в точке с минимальной толщиной стенки) и два – в области переходов от гнутой части к прямому участку трубы.

### 3.2.2.2 Методика изготовления шлифа для снятия оттиска

При подготовке элемента для металлографического исследования удаление окалины и грубая зачистка поверхности является процессом первичной подготовки поверхности.

Размер подготовленного участка для реплики должен быть не менее 30х30 мм.

Шлифование поверхности включает следующие этапы:

- шлифование шлифовальными кругами разной зернистости из шлифшкурки, нейлонами или войлоками.

Шлифование ведется в одном направлении перемещением круга вдоль поверхности. Затем при смене шлифовальных дисков направление шлифования

меняется на 90 градусов и процедура шлифования повторяется до полного удаления поперечных рисок.

После каждого этапа поверхность должна быть плоской и однородной (равномерно покрыта рисками, соответствующими зернистости круга).

Полирование осуществляется нейлоновым или войлочным кругом без определенной направленности к поверхности шлифа с использованием алмазной пасты. При полировке шлифа необходимо обеспечивать равномерный контакт с полируемой поверхностью.

После первого полирования поверхность шлифа очищается ватным тампоном, смоченным в спирте, затем проводится первое травление шлифа. Количество травлений и последующей переполіровкой шлифа (полное удаление протравленного слоя) производится 7-8 раз (для выявления микроструктуры и пор ползучести) и 4-5 раз (для выявления микроструктуры).

Травление производится протиранием полированной поверхности ватным тампоном, смоченным в реактиве (для выявления микроструктуры металла углеродистых сталей и сталей перлитного класса используется, как правило, реактив – 4%-ный раствор  $\text{HNO}_3$  в этиловом спирте).

Время травления определяется опытным путем, зависит от степени травимости материала и составляет от 0,5 до 2 минут.

Остатки реактива с поверхности шлифа снимаются спиртом, поверхность просушивается до полного испарения спирта.

После изготовления первой реплики ее качество рекомендуется проконтролировать на оптическом переносном или стационарном микроскопе для корректировки время травления шлифа (при доступности и технической возможности).

Для приготовления реплики применяется пленка на диацетатцеллюлозной или триацетатцеллюлозной основах (возможно использование засвеченной или проявленной стандартной фотопленки для цветной печати любой чувствительности). На блестящую поверхность пленки размером 30x20 мм

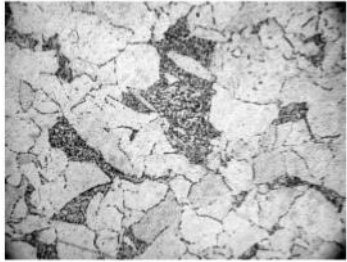

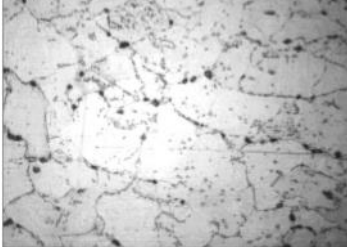
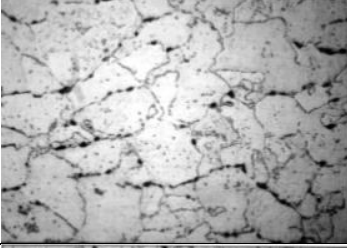
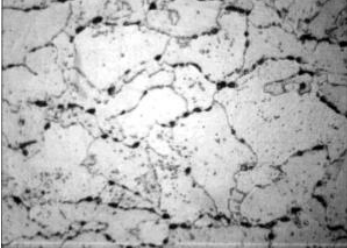
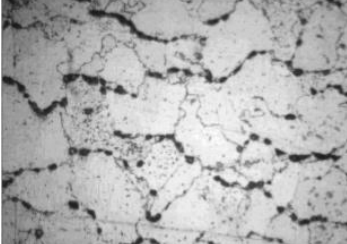


распылителем равномерно наносится ацетон. После этого пленка с небольшим усилием плотно прижимается к шлифу и удерживается в таком положении в течение 5–10 секунд. Затем пленка подсыхает на шлифе 5–20 секунд (в зависимости от температуры металла).

Реплика осторожно отклеивается от шлифа и сразу же, во избежание коробления, приклеивается обратной стороной к стеклянной пластинке, оборачивается калькой, прижимается второй стеклянной пластиной при помощи канцелярской скрепки (создание эффекта прессы для выравнивания поверхности пленки при высыхании). Рекомендуется двух – трехкратное снятие реплик с одного шлифа после каждого дотравливания (равномерное увеличение времени травления относительно первого травления). Срок хранения реплик неограничен.

Исследование и фотографирование микроструктуры, полученной на репликах, производится в лабораторных условиях на оптическом микроскопе при стандартных увеличениях в 100, 500 и 1000 раз.

Таблица 7 – Шкала микроповрежденности

Особенности микроструктуры	Характер микроповрежденности	Плотность пор	Балл микроповрежденности
	Поры отсутствуют		1
	Единичные поры	До 300 пор/мм	2
	Множественные поры	До 700 пор/мм	3
	Цепочки пор	До 1000 пор/мм	4
	Микротрещины	До 2000 пор/мм	5
	Микротрещины	До 3000 пор/мм	6

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. ОЦЕНКА МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО ПАРОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Методика оценки микроповрежденности применена к действующему паропроводу, а именно к длительно работающему (в течение 350 тыс. ч или 44 лет), при номинальных параметрах рабочей среды 540°С и 10 Мпа, гиба (типоразмер 273x26 мм) главного паропровода ТЭС.

Фактические результаты контроля, начиная с исходных значений и до наработки 350 тыс. ч (до 2017 г.) гиба были получены экспериментальным путем с участием целого ряда специалистов: технических специалистов ТЭС (в части замеров остаточной деформации, овальности), научных работников и специалистов ОАО «Инженерный центр энергетики Урала» филиал «УралВТИ» (в части металлографических исследований, оценки микроповрежденности металла методом реплик и анализа результатов всех экспериментальных данных), в том числе с участием инженера, которым с 2015 по 2017 гг. являлась студентка, выполнившая данную работу [10].

##### 4.1 Цель исследования

Целью работы оценки микроповрежденности длительно работающего элемента паропровода, а именно гиба, является:

- проведение анализа состояния реально работающего гиба;
- оценка возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации.

##### 4.2. Объект и методика исследования

Рассмотрим практическое применение методики оценки микроповрежденности металла гиба главного паропровода типоразмера 273x26 мм, изготовленного по ТУ 14-3Р-55-2001 и СТО ЦКТИ 321.05-2009 [2, 8], отработавшего 350 тыс. ч с начала эксплуатации в составе трубопровода, предназначенного для транспортировки пара.

Элементы трубопроводов, работающие в условиях ползучести (при температуре выше 450° С), имеют расчетный срок службы или парковый ресурс, исчисляемый в часах.

Парковый ресурс – это наработка однотипных по конструкции, маркам стали и условиям эксплуатации элементов теплоэнергетического оборудования, в пределах которой обеспечивается их безаварийная работа при соблюдении требований действующей нормативной документации.

Парковый ресурс определяют расчетным путем в зависимости от марки стали и типоразмера элементов (гибов) паропровода, исходной овальности гибов, номинальных параметров эксплуатации (давление и температура), условий нагружения.

До начала применения определяется парковый ресурс трубопровода, который указан в действующей НТД [3, 4].

В таблице 8 представлен парковый ресурс трубопровода типоразмера 273x26 из стали 12Х1МФ.

Таблица 8 – Основные сведения о гйбе и его парковом ресурсе

Марка стали	Типоразмер паропровода, мм			Номинальные параметры пара		Парковый ресурс основных элементов паропроводов, тыс. ч		Парковый ресурс паропровода в целом, тыс. ч
	Дн	S	R	T, °C	P, МПа	Прямые трубы	Гйбы труб	
12Х1МФ	273	26	1000	540	10	300	250	250

Схема трубопровода представлена на рисунке (рисунок 11).

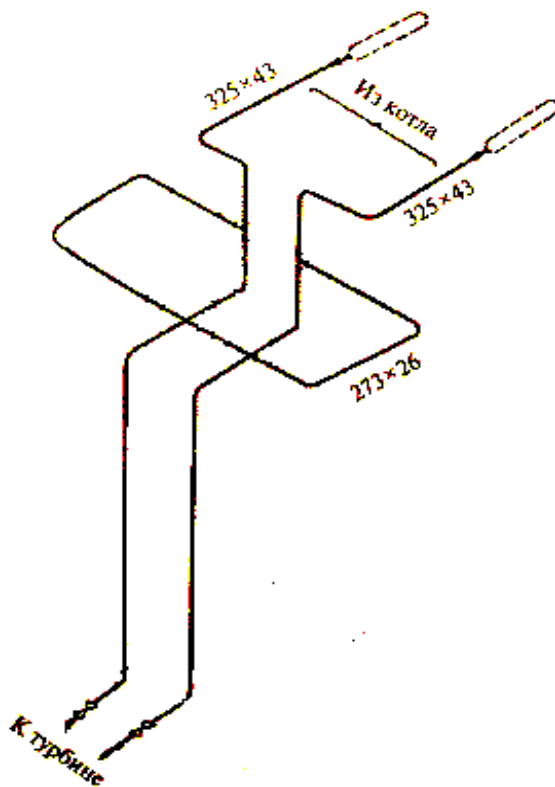


Рисунок 11 - Схема главного паропровода ТЭС  
(цифры показывают диаметр и толщину труб)

Паропровод состоит из основных элементов – прямых труб и гибов. Гибы изготовлены методом ТВЧ (подробное описание способа изготовления гива изложено в разделе 2).

В целях обеспечения надежной и безопасной работы трубопровода в пределах паркового ресурса и после его отработки определяются сроки и методы контроля за состоянием металла, которые регламентированы в действующей НТД [3, 4, 6]. Это обеспечивает периодический контроль (осуществляется в пределах паркового ресурса через определенные интервалы времени, установленные НТД) и контроль металла после выработки паркового ресурса.

Для элементов паропровода, имеющих эксплуатационные параметры (таблица 8), объемы, методы и периодичность контроля указаны в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Объемы и методы периодического контроля гибов

Объект контроля	Расчетные параметры среды	Метод контроля	Объем контроля	Периодичность проведения контроля
Гибы паропроводов из стали 12Х1МФ	500°С и выше	Измерение остаточной деформации	гибы - 100%	Каждые 50 тыс. ч; каждые 25 тыс. ч при достижении остаточной деформации более половины допустимого значения (более 0,4%)
		МР	гибы	При достижении остаточной деформации более половины допустимого значения (более 0,4%)

Таблица 10 – Объемы и методы контроля гибов после выработки паркового ресурса

Объект контроля	Расчетные параметры среды	Метод контроля	Объем контроля
Гнутые участки (гибы) паропроводов из стали 12Х1МФ	500°С и выше	Измерение остаточной деформации	Гибы - 100%
		Определение овальности	Гибы - 100%
		ВК, МПК, УЗК, УЗТ	Гибы - 100%
		Оценка микроповрежденности	Не менее 3 гибов с максимальной остаточной деформацией или с максимальным уровнем температур; при выявлении овальности менее 2% или уменьшение ее вдвое от исходной
<p>Примечание:</p> <p>1. ВК (визуальный контроль), МПК (магнитопорошковый контроль), УЗК (ультразвуковой контроль) – методы дефектоскопического контроля, позволяющие выявить поверхностные и внутренние макродефекты, при наличии которых эксплуатация гибов недопустима; УЗТ (ультразвуковая толщинометрия) – позволяет выявить гиб с наименьшей толщиной стенки.</p>			

В соответствии с требованиями действующих НТД для гига трубопровода типоразмера 273х26 из стали 12Х1МФ выполнялся периодический контроль и

контроль после выработки паркового ресурса, объем которых указан в таблице 9 и 10.

Критерии оценки состояния гибов (согласно НТД) представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Критерии оценки состояния гибов

Оценочные критерии	Величина оценочного критерия
Остаточная деформация	Не более 0,8% для прямых участков гнутых труб (гибов)
Овальность гибов	Не менее 1,5% (за исключением гибов, изготовленных нагревом ТВЧ с осевым пожатием).
микрповрежденность	При исследовании на оптическом микроскопе при 500-кратном увеличении микрповрежденность должна быть не выше 4-балла по стандартной шкале микрповрежденности (таблица 7)

Результаты выполненного контроля за все время эксплуатации гива указан в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты контроля гива за весь срок его эксплуатации

Периодический контроль гибов	Контроль после выработки паркового ресурса											
	0	50	100	150	200	225	250	275	300	325	350	
Наработка элементов часах												
Максимальная остаточная деформация, %	-	0,12	0,26	0,34	0,41	0,45	0,54	0,61	0,70	0,77	0,81	
Овальность, %	2	—	—	—	—	—	1,8	1,8	1,75	1,54	1,5	
Минимальная $S_{ст}$ в растянутой зоне	—	—	—	—	—	—	25,6	25,3	25,0	25,0	24,8	

Способ измерения остаточной деформации ползучести, овальности гибов и формулы 1 и 2, применяемые для расчета этих параметров подробно изложены в пунктах 2.6 и 3.2.1 данной работы.

Исходная овальность гива, изготовленного методом ТВЧ составляла 2%. При наработке 350 тыс. ч овальность изменилась на 25% и составила 1,5%.

Периодический контроль гива заключался в измерении остаточной деформации ползучести каждые 50 тыс. ч эксплуатации. При наработке в 200 тыс. ч (до выработки паркового ресурса), остаточная деформация ползучести превысила

половину допустимого значения 0,8% и составила 0,41%. В связи с чем, периодический контроль остаточной деформации в совокупности с металлографическим исследованием (на предмет оценки изменений микроструктуры и накопления микроповрежденности металла), производился с последующим интервалом каждые 25 тыс. ч на основании требований действующей НТД (таблица 12).

К моменту наработки гйба в 350 тыс. ч (что значительно превышает парковый ресурс), остаточная деформация ползучести превысила допустимое значение 0,8% и составила 0,81%.

Исходная структура гйба, указанная в паспорте трубопровода, соответствовала 3 баллу шкалы сдаточных структур (рисунок 7).

Сведения о зонах и методах исследования, результатах оценки фактического состояния и микроповрежденности гйба после длительной эксплуатации представлены в таблицах 13 и 14.

Таблица 13 – Сведения о зонах и методах исследования гйба

Исследуемый элемент котла	Типоразмер, мм	Зона исследования	Метод металлографического исследования
Гйб	Ø273x26	В растянутой зоне гйба с минимальной толщиной стенки по результатам УЗТ (рисунок 12)	Метод реплик (МР) (подробное описание способа изготовления указано в подразделе 3.2.2)



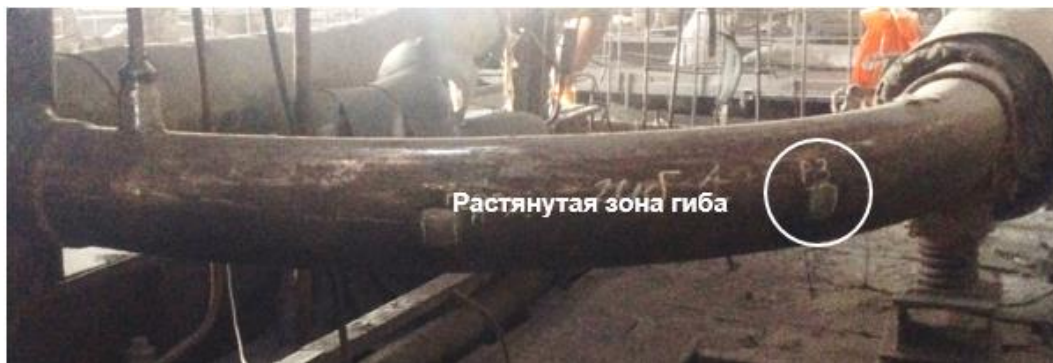


Рисунок 12 – Гиб паропровода  
(типоразмер 273х26 мм, сталь 12Х1МФ).

Общий вид, зона приготовления реплики для металлографического исследования

Таблица 14 – Результаты фактического состояния металла гибо

Исследуемый элемент паропровода	Наработка гибо на момент исследования, тыс. ч	Особенности микроструктуры	Оценка микроповрежденности металла согласно шкалы микроповрежденности сталей перлитного класса (таблица 7)
Гиб	200	Структура металла представляет собой феррито—карбидную смесь с наличием большого количества укрупненных обособленных структурно-свободных сфероидов цементита, расположенных по границам зерен феррита и преимущественным мелкодисперсным карбидным распределением по телу ферритных зерен	Балл 2 (единичные поры ползучести, расположенные по границам зерен) (рисунок 13)
	225		Балл 3 (множественные поры ползучести ползучести, рисунок 13)
	250		Балл 4 (множественные цепочки пор ползучести, рисунок 13)
	275		Балл 6 (слившиеся цепочки и микротрещины ползучести)
	300		
	325	Структура металла феррито-карбидная, сформировавшаяся в результате длительной высокотемпературной эксплуатации вследствие полной сфероидизации упрочняющей составляющей. Границы зерен упрочняющей составляющей отсутствуют, укрупненные сфероиды цементита сосредоточены преимущественно по границам зерен феррита	

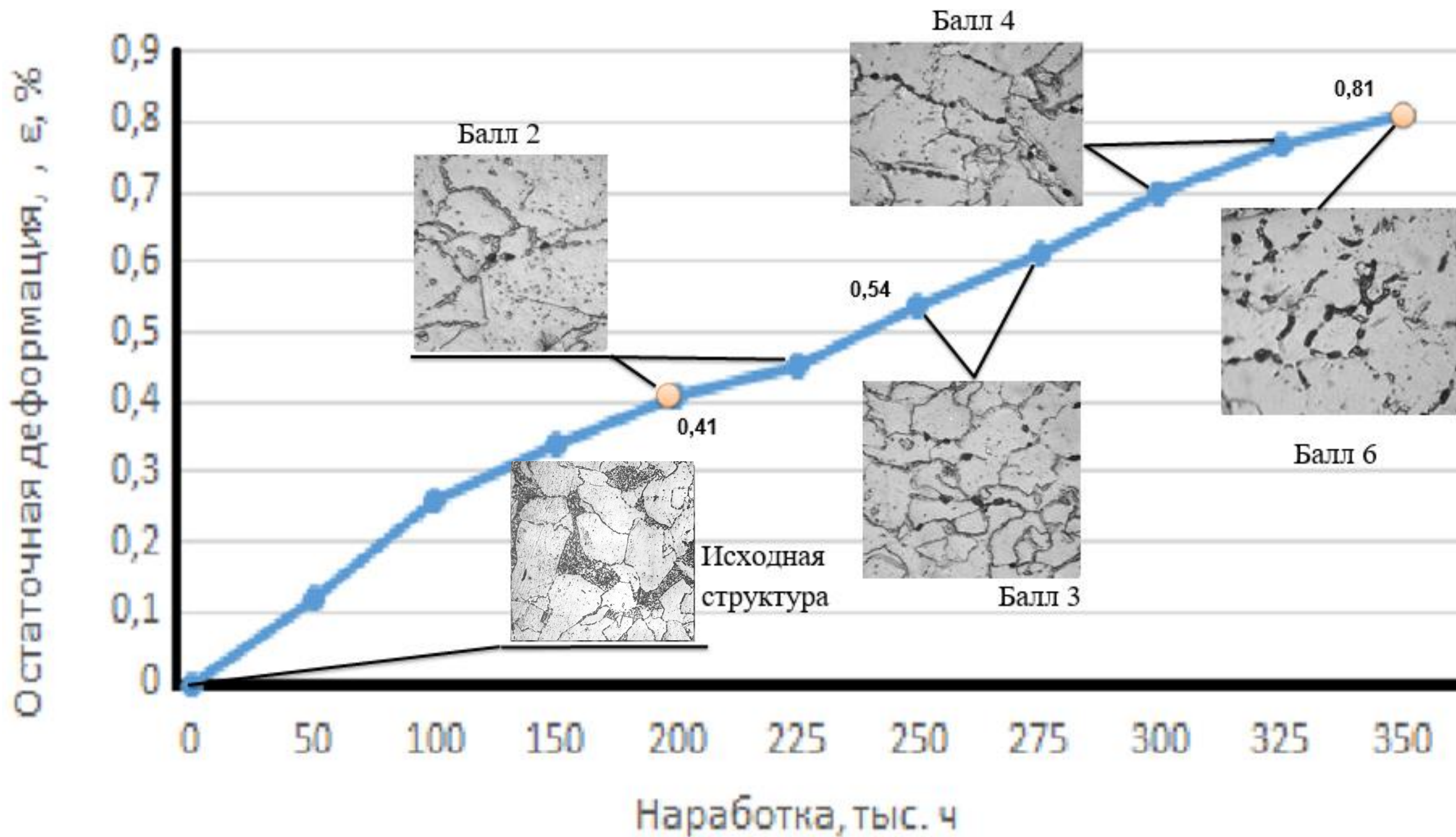


Рисунок 13 – Зависимость остаточной деформации (баллы 2,3,4,6 шкалы микроповрежденности сталей перлитного класса)

### 4.3 Анализ результатов контроля и металлографического исследования

По результатам измерения остаточной деформации и оценки фактического состояния металла гйба можно констатировать следующее:

– остаточная деформация ползучести превысила половину установленного критерия до истечения паркового ресурса гйба (250 тыс. ч) при наработке 200 тыс. ч, затем измерялась периодически и при наработке, равной 350 тыс. ч, остаточная деформация составила 0,81%, что превышает предельно установленное значение 0,8% согласно действующей НТД (таблица 11) [2,7].

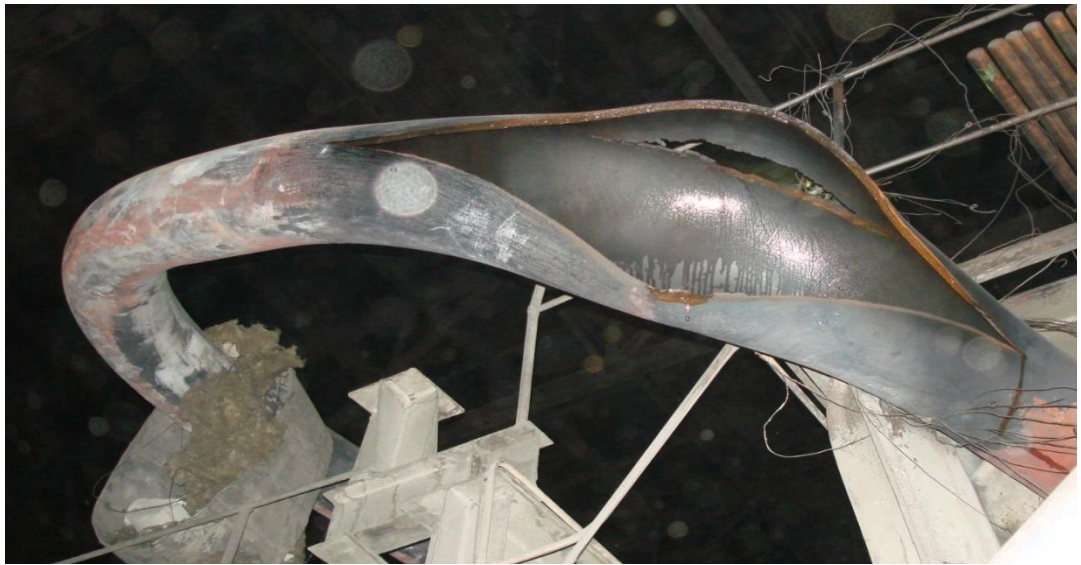
– контроль микроповрежденности металла так же выполнялся периодически. В момент начала контроля при наработке в 200 тыс. ч была выявлена микроповрежденность на уровне единичных пор ползучести (2 балл по шкале микроповрежденности (таблица 7)), и при наработке в 350 тыс. ч (за интервал времени 150 тыс. ч) микроповрежденность металла гйба достигла критического уровня (6 балл по шкале микроповрежденности (таблица 7)) с присутствием в структуре микротрещин и множественных цепочек пор, что превышает предельно допустимый для дальнейшей эксплуатации 4 балл (таблица 7).

### 4.4 Выводы по работе

1. Выявлена прямая зависимость между измерениями остаточной деформации и накоплением микроповрежденности по механизму ползучести за определенные интервалы времени для исследуемого гйба (рисунок 13).

2. Эксплуатация гйба, имеющего в микроструктуре микротрещины, согласно НТД, является недопустимой.

3. Одним из основных критериев оценки состояния длительно работающего металла гйба является металлографическое исследование, при котором возможно выявлять дефекты на микроуровне для прогнозирования ресурса его последующей эксплуатации и предотвращения разрушения элементов трубопроводов (рисунок 14).



а



б

Рисунок 14 – Гиб паропровода, разрушенный по механизму ползучести:  
а – общий видгиба; б – макротрещины ползучести в сопровождении  
микротрещин и множественных цепочек пор в микроструктуре разрушенного  
гиба, x100

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема обеспечения надёжной работы трубопроводов с каждым годом становится всё более актуальной, так как их старение во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения.

В данной дипломной работе уделяется внимание изготовлению элементов трубопровода и контролю этих элементов в процессе эксплуатации.

Длительность надёжной работы паропроводов зависит от химического состава, исходной структуры, свойств металла элементов и условий их эксплуатации.

Протекание ползучести обуславливается напряжением, температурой и временем.

Проведенная работа показала, что с течением времени при воздействии напряжений и температуры в материале происходят значительные структурные изменения, которые приводят к необратимым процессам – деградации микроструктуры и накоплению микроповрежденности по механизму ползучести. Дальнейшее развитие этих процессов в этих же условиях эксплуатации приводит к разрушению элементов паропроводов. В связи с чем необходимо качественно (с наименьшими погрешностями) проводить систематический контроль за ростом остаточных деформаций, осуществлять контроль за состоянием материала, выполнять дефектоскопический контроль.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ланская, К.А. Жаропрочные стали / К.А. Ланская. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
2. ТУ 14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия. – Введ. 2001-21-09.
3. СТО 34-70-690-96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. – Введ. 199-23-07
4. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продления срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. – Москва: Государственное унитарное предприятие «Научно–технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 128 с.
5. ОСТ 34-70-690-96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. – Введ. 199-23-07
6. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов / П.А. Антикайн. – М.: Энергосервис, 2001. – 440 с.
7. Гладштейн, В.И. Микроповреждаемость металла высокотемпературных деталей энергооборудования / В.И. Гладштейн. – М.: Машиностроение, 2014. – 364 с.
8. СТО ЦКТИ 10.003-2007. Трубопроводы пара горячей воды тепловых станций. Общие технические требования к изготовлению. – Санкт-Петербург: 2010. – 107 с.
9. Лоскутов С.А. Оптимизация структуры и свойств длительно работающего металла паропроводов из стали 12Х1МФ восстановительной термической обработкой / С.А. Лоскутов, Ю.Д. Корягин, Ю.А. Букин. – Челябинск: Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», том 14, № 4, 2014
10. «Отчет о результатах технического диагностирования главного паропровода ТЭС и определения возможности его дальнейшей эксплуатации», ОАО «ИЦЭУ» филиал «УралВТИ», 2017. – 48 с.

