

Ф. А. Хромченко

**ДИАГНОСТИКА
ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ
РЕСУРСА
ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС
(Справочные материалы)**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Вниманию специалистов

Вышли в свет следующие выпуски

«Библиотечки электротехника»:

Иноземцев Е. К. **Восстановление работоспособности роторов высоковольтных электродвигателей (части 1 и 2).**

Соловьев А. Л. **Защита генераторов малой и средней мощности терминалами «Сириус-ГС».**

Трофимов В. М. **Выбор и проверка надежности функционирования устройств выпрямленного оперативного тока подстанций: БПТ-1002, БПНС (УПНС-М).**

Хромченко Ф. А. **Сварочные технологии ремонта элементов трубопроводов (справочные материалы).**

Шмурьев В. Я. **Реле времени полупроводниковые.**

Захаров О. Г., Козлов В. Н. **Цифровые устройства центральной сигнализации (части 1 и 2).**

Беляев А. В. **Вторичная коммутация в распределительных устройствах, оснащенных цифровыми РЗА (части 1 и 2).**

Киреева Э. А., Цырук С. А. **Измерительные трансформаторы тока и напряжения с литой изоляцией (справочные материалы, части 1 и 2).**

Алексеев Б. А. **Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии.**

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ»**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Подписной индекс «Библиотечки электротехника» —
приложения к журналу «Энергетик»

88983

**Адрес редакции
журнала «Энергетик»:**

115280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (495) 675-19-06.

E-mail: energetick@mail.ru

Библиотечка электротехника

Приложение к журналу «Энергетик»

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 3 (135)

Ф. А. Хромченко

ДИАГНОСТИКА ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС

(Справочные материалы)

Москва

НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик»

2010

УДК 621.186.83
ББК 31.37
Х 94

Главный редактор журнала «Энергетик» А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

«Библиотечки электротехника»

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, В. И. Пуляев, А. И. Таджикибаев, Ю. В. Усачев

Хромченко Ф. А.

Х94 Диагностика для продления ресурса трубопроводов
(Справочные материалы). — М.: НТФ «Энергопрогресс»,
2010. — 80 с., ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 3 (135)].

Рассмотрены организационные и методические особенности проведения диагностирования элементов трубопроводных систем (прямых и гнутых труб, сварных соединений, тройников-врезок, конусных переходов) для принятия решений о возможности, условиях и сроках безопасной дальнейшей эксплуатации трубопроводов после выработки ими назначенного ресурса.

Даны характеристики методов неразрушающего и разрушающего контроля для диагностирования трубопроводов. Приведены нормативные требования по оценке качества обследуемых элементов трубопроводов. Рассмотрены процедуры расчёта на прочность и критерии оценки работоспособности элементов трубопроводных систем для подтверждения назначаемых сроков остаточного ресурса трубопроводов.

Приведены примеры анализа результатов обследования, расчётов на прочность и подготовки заключений промышленной безопасности.

Для эксплуатационного и другого технического персонала.

Предисловие

Эксплуатация трубопроводных систем на стареющих ТЭС характеризуется следующими особенностями:

- длительной наработкой, которая по отдельным трубопроводам достигает 300 — 500 тыс. ч. Расчётный срок службы выработан примерно на 90 % трубопроводов, что приводит к заметному износу (старению) металла;
- периодическими повреждениями элементов трубопроводов, в первую очередь сварных соединений и отводов (гибов, штампосварных и литых колен), что вызывает в отдельных случаях аварийные остановки энергетического оборудования;
- действием комплексных причин, вызывающих преждевременные повреждения. К ним относятся эксплуатационные факторы (рабочая среда, высокие температуры и давление, длительность наработки); конструкционные факторы (концентраторы напряжений); технологические факторы (дефекты сварочного и литейного происхождения, термообработки, проката). Повреждения при длительной эксплуатации развиваются по механизмам ползучести, усталости, коррозии, коррозионной усталости, графитизации металла.

Перечисленные особенности следует учитывать при диагностировании, которое должны проводить высококвалифицированные аттестованные специалисты по контролю, расчётам на прочность и экспертизе результатов обследования по промышленной безопасности особо опасных объектов.

Необходимыми и обязательными условиями качественного диагностирования являются:

- выполнение чёткой и своевременной организации в проведении работ по обследованию трубопроводов (подготовки технических данных по трассировке трубопровода, типоразмерам и материалу элементов, результатам эксплуатационного контроля, информации по фактическим условиям эксплуатации и других данных);

- обеспечение высокой эффективности применяемых методов контроля (оснащённости современными приборами и аппаратурой) при обследовании трубопроводов;
- применение и совершенствование современных методов расчёта на прочность и структурных методов (по фактическому состоянию металла — микроповреждённости) для корректной оценки остаточного ресурса элементов трубопровода;
- проведение мониторинга для накопления, анализа и выдачи объективных данных по фактическим параметрам эксплуатации, необходимых для диагностирования трубопроводов;
- проведение эксплуатационного контроля до выработки назначенного ресурса в строгом соответствии с нормативными требованиями.

Брошюра будет полезна работникам эксплуатации и ремонтных предприятий, инженерно-техническому персоналу, специалистам неразрушающих методов контроля, инженерам-металловедам, экспертам в их практической деятельности по повышению надёжности и долговечности трубопроводов тепловых электростанций.

**Замечания и пожелания по брошюре
просьба направлять по адресу:
115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.
Редакция журнала “Энергетик”**

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Нормативные и технические требования

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При продлении срока службы трубопроводов I — IV категорий руководствуются основными требованиями отраслевых нормативно-технических документов СО 153-34.17.470—2003 и СО 153-34.17.464—2003 (табл. 1.1). Общие положения стандартов заключаются в следующем:

- контроль металла трубопроводов при диагностировании проводится по выработке установленного срока службы и после аварии;
- срок службы трубопровода устанавливается организацией-изготовителем и указывается в паспорте трубопровода.

Таблица 1.1. Классификация трубопроводов согласно ПБ 10-573-03

Категория трубопроводов	Группа	Рабочие параметры среды	
		температура, °С	давление, МПа (кгс/см ²)
I	1	Свыше 560	Не ограничено
	2	Свыше 520 до 560	—«—
	3	Свыше 450 до 520	—«—
	4	До 450	Более 8,0 (80)
II	1	Свыше 350 до 450	До 8,0 (80)
	2	До 350	Более 4,0 (40) до 8,0 (80)
III	1	Свыше 250 до 350	До 4,0 (40)
	2	До 250	Более 1,6 (16) до 4,0 (40)
IV		Свыше 115 до 250	Более 0,07 (0,7) до 1,6 (16)

Примечание. Если значения параметров среды находятся в разных категориях, то трубопровод следует отнести к категории, соответствующей максимальному значению параметра среды.

Для паропроводов I категории с наружным диаметром $D_n > 75$ мм (стали 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф), эксплуатирующихся при температуре пара $t > 450$ °С, расчётный срок службы составляет 100 (или 200) тыс. ч. Парковый ресурс регламентирован согласно РД 10-577-03 и характеризуется сроками от 100 до 400 тыс. ч в зависимости от типоразмера и материала трубных элементов (прямых труб, гибов), а также параметров пара (давления, температуры).

Для трубопроводов II – IV категорий сроки службы (при отсутствии указаний сроков службы в паспорте трубопровода) устанавливаются согласно СО 153-34.17.464–2003 и составляют:

20 лет (150 тыс. ч) для паропроводов II категории группы I;

25 лет для стационарных трубопроводов III и/или IV категории сетевой и подпиточной воды;

30 лет для остальных трубопроводов II категории группы 2, III и IV категорий;

- срок индивидуального (остаточного) ресурса устанавливается экспертной организацией для каждого конкретного трубопровода;

- к основным элементам трубопроводов (определяющим их ресурс) относятся прямые трубы, гнутые, штампованные и штампосварные отводы (колена), а также тройники (врезки), сварные соединения и конические переходы;

- диагностирование трубопроводной системы, отработавшей срок службы, включает выполнение обследования трубопровода и расчёт на прочность с последующим составлением заключения экспертизы промышленной безопасности о техническом состоянии трубопровода и рекомендациями по допустимым параметрам и срокам дальнейшей его эксплуатации;

- при обследовании трубопровода выполняется следующий комплекс работ:

анализ технической документации, включающей данные по условиям эксплуатации, результаты эксплуатационного контроля, формуляры, сведения по типоразмерам, материалам элементов трубопровода и др.;

наружный осмотр трубопровода в горячем (рабочем) и холодном состояниях;

контроль металла неразрушающими методами: визуального и измерительного контроля, ультразвукового или радиографического контроля, магнитопорошковой или цветной дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, измерением твёрдости;

ревизия трубопроводной и опорно-подвесной системы (ОПС);

металлографический анализ с реплик (МАР), сколов, срезов или с использованием переносного портативного микроскопа для уста-

новления фактического состояния металла (микрповреждённости от ползучести, графитизации, коррозии, усталости, коррозионной усталости);

исследование состава, структуры, свойств и микрповреждённости на вырезках с применением разрушающих методов контроля (испытание образцов на механические свойства, металлографический анализ шлифов металла);

гидравлические испытания (для паропроводов I категории гидроиспытание назначается в случаях замены повреждённых при эксплуатации элементов);

- при проведении расчётных исследований осуществляется контрольный расчёт на прочность с определением приведённых напряжений (от внутреннего давления) и выполнением условия прочности для назначаемого индивидуального (остаточного) срока службы. При необходимости проводится расчёт на прочность по эквивалентным напряжениям от действия всех нагружающих факторов и/или расчёт на малоцикловую усталость;

- при подготовке заключения экспертизы промышленной безопасности о техническом состоянии трубопровода анализируются и обобщаются результаты комплексного обследования и расчётов на прочность с учётом фактических данных по условиям эксплуатации, результаты контроля и исследований. В выводах заключения приводятся краткий анализ результатов диагностирования, оценка технического состояния трубопровода, срок индивидуального (остаточного) ресурса и условия эксплуатации. При необходимости назначается промежуточный контроль металла;

- ресурс трубопровода после выработки им паркового ресурса может продлеваться неоднократно в зависимости от фактического состояния металла.

1.2. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Техническое диагностирование проводится, если объект исчерпал заданный (парковый) ресурс или отработал дополнительно назначенный срок службы, определённый после поэлементного обследования состояния трубопроводов и расчёта на прочность сварных и бесшовных деталей.

Организация проведения обследования и продления срока службы трубопроводов включает основные положения:

- мероприятия по обследованию и продлению срока службы организует предприятие — владелец энергооборудования;

- неразрушающий контроль проводит лаборатория или служба металлов предприятия — владельца энергооборудования, а также ремонтное или другое специализированное предприятие, имеющее в своём составе аттестованную лабораторию неразрушающего контроля;

- все виды неразрушающего и разрушающего контроля, а также расчёты на прочность проводятся в соответствии с требованиями государственных стандартов и другой нормативной документации, включая СО 153-34.17.470—2003, СО 153-34.17.464—2003;

- предприятие — владелец энергооборудования собирает и систематизирует техническую документацию по контролю основного металла и сварных соединений трубопровода за весь период его эксплуатации, включая результаты последнего обследования, а также результаты выполненных исследований и расчётов;

- указанная документация обобщается и в систематизированном виде является основой для разработки и выдачи заключения экспертизы промышленной безопасности по результатам технического диагностирования с установлением сроков и условий дальнейшей эксплуатации трубопровода (сварных соединений, бесшовных деталей). Заключение экспертизы промышленной безопасности разрабатывает экспертная организация.

Порядок проведения обследования трубопровода (а также сварных соединений и бесшовных деталей) включает выполнение следующих процедур:

- сбор, систематизацию и анализ технической документации по характеристике трубопровода и его элементов: типоразмеру и материалу сварных соединений и бесшовных деталей, параметрам и активности рабочей среды, стабильности нагружения и длительности наработки;

- анализ результатов эксплуатационного контроля (время проведения контроля по годам, методы и объёмы контроля, результаты оценки качества);

- анализ результатов текущего диагностирования неразрушающими и, при необходимости, разрушающими методами контроля;

- проведение расчёта на прочность (и при необходимости на циклическую прочность) с оценкой остаточного срока службы;

- комплексный анализ результатов обследования и расчёта на прочность с подготовкой и оформлением заключения экспертизы промышленной безопасности по техническому диагностированию с установлением сроков и условий дальнейшей эксплуатации трубопровода, включая сварные соединения и бесшовные элементы.

Отдельные положения порядка проведения обследования трубопроводов требуют дополнительного рассмотрения.

Анализ технической и эксплуатационной документации включает рассмотрение и поэлементное установление технического состояния сварных соединений, бесшовных деталей и трубопровода в целом. По результатам комплексного анализа устанавливается следующее:

- время (годы) изготовления, монтажа, ввода в эксплуатацию и регистрации трубопровода;
- особенности конструкционного и технологического оформления, материалы сварных соединений и бесшовных деталей, качество элементов трубопровода по результатам неразрушающих методов контроля;
- фактическое состояние опорно-подвижной системы и её соответствие проектному состоянию;
- соответствие проектных характеристик фактическим условиям эксплуатации (по температуре, давлению, состоянию рабочей среды, особенностям нагружения — в стационарном и/или переменном режимах работы);
- соответствие техническому проектному состоянию трубопровода по результатам технического освидетельствования, осмотров, гидравлических испытаний и обследований, включая информацию о ремонтах и реконструкциях.

Обследование сварных соединений и бесшовных трубных элементов при техническом диагностировании трубопроводов проводится с применением неразрушающих и разрушающих методов контроля (см. § 1.3). Качество и свойства сварных соединений и основного металла устанавливаются по нормативным требованиям государственных и отраслевых стандартов (см. § 1.4). Фактическая толщина стенки трубных элементов (прямых и гнутых труб) и пришовных зон сварных соединений определяется с помощью ультразвуковой толщинометрии.

Для проведения контрольных операций участок трубопровода освобождается от тепловой изоляции, при этом место контроля очищается от окалины и ржавчины до металлического блеска. Контроль выполняется на остывшем металле.

Расчёт на прочность с оценкой остаточного срока службы сварных соединений при техническом диагностировании трубопроводов проводится с учётом требований согласно РД 10-249-98, СО 153-34.17.470-2003, СО 153-34.17.464-2003 (см. § 2.3 и 3.3). Остаточный ресурс сварных соединений и основного металла по структурному фактору (микрповреждённости металла) устанавли-

вается согласно РД 153-34.1-17.467—2001 и ОСТ 34-70-690—96 (см. § 2.2 и 3.2).

Заключение экспертизы промышленной безопасности по результатам технического диагностирования трубопровода составляется по типовой форме и содержит разделы:

- *Введение*, в котором формулируются поставленные задачи (обосновывается необходимость проведения экспертизы);
- *Краткая характеристика объекта*: наименование трубопровода; регистрационный номер (при наличии); расчётные (проектные) параметры; дата пуска в эксплуатацию; наработка на момент обследования и количество пусков.

Кроме того, в краткую характеристику трубопровода входит информация об основных типоразмерах и материалах изготовления элементов, количестве элементов, данные по фактическим параметрам эксплуатации, а также сведения о предыдущих обследованиях (контроле), продлении срока службы и проведённых реконструкциях, ремонтах и заменах;

- *Перечень первичной технической документации*, представленной владельцем, и краткий анализ данной документации (результатов контроля, исследований состояния металла и расчётов на прочность);
- *Расчётный анализ фактических условий эксплуатации* и расчётная оценка индивидуального (остаточного) ресурса элементов трубопровода;
- *Выводы и рекомендации*. Решение об условиях и сроке продления эксплуатации трубопровода принимается на основе комплексного анализа состояния металла (по результатам контроля и исследований) и расчётных оценок остаточного ресурса.

1.3. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

При обследовании металла диагностируемого трубопровода предусмотрено применение неразрушающих и разрушающих методов контроля. Неразрушающие методы контроля применяются для оценки качества сварных и бесшовных трубных элементов, разрушающие методы контроля — для установления остаточной структуры и свойств элементов трубопроводов.

При неразрушающем контроле регламентированы следующие основные методы:

- визуальный и измерительный контроль;
- ультразвуковой или радиографический контроль;
- магнитопорошковая или цветная дефектоскопия либо вихре-токовый контроль;

- контроль измерением твёрдости;
- спектральный анализ;
- метод металлографического анализа реплик (срезов металла с помощью переносного микроскопа);
- гидравлическое испытание (при необходимости).

Большинство этих методов применяется для контроля качества сварных и бесшовных трубных элементов по месту их расположения на коллекторах котлов и трассах трубопроводов в соответствии с нормативно-техническими требованиями. Сравнительная характеристика отдельных неразрушающих методов контроля, применяемых для выявления трещин и микроповреждённости сварных соединений и основного металла трубопроводов, приведена в табл. 1.2.

Визуальный и измерительный контроль (ВК) наружной поверхности (и при необходимости внутренней поверхности с помощью эндоскопа) проводится в целях выявления и определения размеров дефектов, которые могли быть получены при монтаже, ремонте или эксплуатации трубопроводов. Качество контролируемой поверхности элементов трубопровода оценивается по нормативным требованиям (см. табл. 1.4).

Визуальный контроль проводится невооружённым глазом и/или с применением инструментальных средств, включая лупы 2 – 7-кратного увеличения (вплоть до 20-кратного увеличения), шаблоны и измерительный инструмент, эндоскопы. Сварные швы и прилегающие к ним поверхности основного металла трубных элементов предварительно очищаются от шлака, брызг, окалины и других загрязнений на ширину не менее 20 мм.

При необходимости визуальному контролю подвергается травлёная поверхность металла для повышения достоверности оценки качества сварных соединений углеродистого и низколегированного материала – стали. Контролируемая поверхность предварительно очищается до металлического блеска и протравливается реактивом (15 – 20 %-ным водным раствором азотной кислоты с помощью тампона или кисточки для соединений перлитной стали) с последующей нейтрализацией щелочным раствором. Для получения более чёткой макроструктуры травление выполняется дважды с промежуточной и заключительной нейтрализацией щелочным раствором. Зоны сварного соединения контролируются после просушки металла (с помощью фильтровальной бумаги).

Ультразвуковой контроль (УЗК) проводится для выявления дефектов (макротрещин и других недопустимых дефектов) в сварных соединениях (см. табл. 1.2, 1.5, 1.7 – 1.9). Ультразвуковой контроль выполняется на подготовленной поверхности (с шероховатостью не

Таблица 1.2. Сравнительная характеристика неразрушающих методов контроля, применяемых для выявления макротрещин и микроповрежденности металла сварных соединений трубопроводов

Метод контроля	Чувствительность	Выявляемые дефекты: поверхностные и/или внутренние трещины	Документальный отклик	Эффективность метода для выявления	
				микроповрежденности	макρο-трещин
Визуальный и измерительный	Более 0,1 мм	Поверхностные	— (рисунок)	—	+
Ультразвуковой	6 — 12 дБ	Внутренние	—	—	$\pm$ * ¹
Радиографический	Не менее 0,5 — 7 мм* ² , (0,1 — 0,2 мм)* ²	Внутренние	Рентгеновский снимок	—	(+)* ³
Магнитопорошковый	1 мкм	Поверхностные и на глубину $h \leq 2$ мм	Фотография, рисунок	—	+
Цветная дефектоскопия	1 мкм	Поверхностные	Фотография индикаторного рисунка	—	+
Вихре-токовый	1 мкм	Поверхностные глубиной $h > 0,1$ мм и длиной $l \geq 2$ мм	—	—	+
Металлографический (с реплик)	1 мкм	Поверхностные в металле зон сварных соединений	Реплика, фотография	+* ⁴	+

*¹ Ультразвуковой контроль эффективен для выявления трещин в сварных стыках труб с подкладным кольцом и недостаточно эффективен при диагностике сварных соединений других типов.

*² Ширина раскрытия несплошности (трещины).

*³ Трещина выявляется при условии, если луч проникающего излучения попадает в плоскость несплошности с отклонением $\pm 7^\circ$.

*⁴ Микроповрежденность в виде пор и микротрещин ползучести выявляется эффективно в металле ЗТВ_{рп} и недостаточно эффективно в металле шва. Микроповрежденность вследствие графитизации выявляется в металле всех зон сварного соединения.

Примечание. Знак «—» — указывает на неэффективность метода; знак «+» — на высокую эффективность; « $\pm$ » — на возможность выявления поврежденности (скорее да, чем нет).

хуже $R_z = 40$ мкм), на которой не допускаются следы окалины, грубые риски, раковины, следы брызг металла, заусенцы.

Результаты контроля оцениваются по двухбалльной системе:

- балл 1 — неудовлетворительное качество (брак) — в случаях, когда в металле обнаружены несплошности с характеристиками, превышающими максимально допустимые значения;
- балл 2а и 2б — удовлетворительное качество, когда не обнаружены несплошности с характеристиками, превышающими максимально допустимые значения (2а — ограничено годный, 2б — абсолютно годный металл).

При описании несплошностей в сварных соединениях применяются обозначения качества согласно ОП 501-ЦД-97:

А — несплошность с амплитудой эхо-сигнала, не превышающей браковочный уровень (допустимый по амплитуде);

Д — несплошность с амплитудой эхо-сигнала, превышающей браковочный уровень (недопустимый по амплитуде);

Г — непротяжённая несплошность;

Е — протяжённая несплошность;

О — несплошность с измеренными признаками объёмной несплошности;

П — несплошность с измеренными признаками плоскостной несплошности;

Н — несплошность с измеренной ориентацией (наклонная);

Т — поперечная несплошность (тип «Т» по ГОСТ 14782).

Метод ультразвуковой толщинометрии (УЗТ) применяется для измерения фактической толщины стенки трубных элементов и пришовной зоны сварных соединений трубопроводов. Результаты контроля методом УЗТ используются при расчёте на прочность сварных и бесшовных трубных элементов по минимальной фактической толщине стенки.

Радиографический контроль (РГК) проводится в целях выявления в сварных соединениях внутренних дефектов: трещин, непроваров, газовых пор, металлических и неметаллических включений (см. табл. 1.2, 1.6 — 1.8). Он также проводится при выявлении недоступных для внешнего осмотра наружных дефектов (прожогов, подрезов и др.) и при оценке размеров недоступных для внешнего осмотра вогнутости и выпуклости корня шва.

Сущность радиографического метода заключается в просвечивании контролируемого металла ионизирующим излучением, регистрации излучения на рентгеновской плёнке и последующем анализе выявленных внутренних дефектов по их теневому изображению. В

Таблица 1.3. Расчётная оценка механических свойств (прочности, пластичности) сталей и сварных швов по твёрдости (данные Т. Г. Березиной)

Марка стали (тип металла шва)	Формулы для расчётной оценки			Диапазон исследован- ной твер- дости, НВ
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	
20	0,36НВ	—	—	1600 — 2000
12МХ, 15ХМ	0,35НВ	0,545НВ — 471	$3,17 \cdot 10^4 / (\sigma_B + 2\sigma_{0,2})$ для $\tau_H > 10^5$ ч	
12Х1МФ	0,35НВ	0,545НВ — 471	$2,23 \cdot 10^4 / (\sigma_B + 2\sigma_{0,2})$ для $\tau_H = 0$ и $\sigma_{0,2} \leq 314$ МПа; $3,17 \cdot 10^4 / (\sigma_B + 2\sigma_{0,2})$ для $\tau_H = 0$ и $\sigma_{0,2} > 314$ МПа; $3,11 \cdot 10^4 / (\sigma_B + 2\sigma_{0,2})$ для $\tau_H > 0$	1275 — 1650
15Х1М1Ф	0,36НВ	—	—	1600 — 2000
20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ	0,257НВ — 116	(0,33НВ — 227)/0,87	—	1571 — 1961
(09Х1М)	0,3НВ + 64	—	—	981 — 1766
(09Х1МФ)	0,3НВ + 19	—	—	981 — 1766

Примечание. σ_B — временное сопротивление разрыву; $2\sigma_{0,2}$ — предел текучести; δ_5 — относительное удлинение; τ_H — длительность наработки при эксплуатации, ч.

Таблица 1.4. Допустимые размеры поверхностных дефектов (газовых пор, шлаковых включений), выявляемых при визуальном и магнитопорошковом контроле, а также при цветной дефектоскопии (СО 153-34.003—01)

Номинальная (меньшая) толщина трубного элемента в сварном соединении, мм	Допустимый максималь- ный размер дефекта, мм	Допустимое число дефектов на каждые 100 мм длины сварного шва, шт.
От 2 до 3 включительно	0,5	3
Свыше 3 до 4 включительно	0,6	4
Свыше 4 до 5 включительно	0,7	4
Свыше 5 до 6 включительно	0,8	4
Свыше 6 до 8 включительно	1,0	5
Свыше 8 до 10 включительно	1,2	5
Свыше 10 до 15 включительно	1,5	5
Свыше 15 до 20 включительно	2,0	6
Свыше 20 до 40 включительно	2,5	7
Свыше 40	2,5	8

качестве источников излучения при радиографическом контроле используются рентгеновские аппараты и гамма-дефектоскопы.

Подлежащие контролю сварные соединения очищаются от окалины, шлака, брызг металла и других загрязнений; также удаляются неровности, которые на снимке могут мешать выявлению и расшифровке изображений внутренних дефектов. На сварном соединении размещается эталон чувствительности и при необходимости образец-имитатор вогнутости и выпуклости корня шва.

Результаты контроля оцениваются по двухбалльной системе:

- баллом 1 оцениваются сварные соединения, если в них при контроле выявлены: трещины всех видов и направлений; непровары и другие дефекты, не удовлетворяющие нормативным требованиям по их размеру и количеству;
- баллом 2 оцениваются сварные соединения, если обнаруженные в них дефекты не превышают максимально допустимые либо вообще отсутствуют.

Таблица 1.5. Допустимые (максимальные) дефекты (несплошности), выявляемые ультразвуковым контролем, в сварных соединениях трубопроводов

Номинальная толщина сварного соединения, мм	Эквивалентная площадь одиночных несплошностей, мм ²		Количество одиночных несплошностей на любые 100 мм длины соединения	Протяжённость несплошностей	
	минимально фиксируемая	максимально допустимая		суммарная в корне шва	одиночных в сечении шва
От 2 до 3	0,3	0,6	6	20 % внутреннего периметра сварного соединения	Равная условной протяжённости компактной несплошности
Свыше 3 до 4	0,4	0,9	6		
Свыше 4 до 5	0,6	1,2	7		
Свыше 5 до 6	0,6	1,2	7		
Свыше 6 до 9	0,9	1,8	7		
Свыше 9 до 10	1,2	2,5	7		
Свыше 10 до 12	1,2	2,5	8		
Свыше 12 до 18	1,8	3,5	8		
Свыше 18 до 26	2,5	5,0	8		
Свыше 26 до 40	3,5	7,0	9		
Свыше 40 до 60	5,0	10,0	10		
Свыше 60 до 80	7,0	15,0	11		
Свыше 80	10,0	20,0	11		

Примечание. Компактной несплошностью считается несплошность с условной протяжённостью не более чем от контрольного (эталонного) отражателя. В отдельных случаях размер компактной несплошности задаётся НТД. Если две компактные несплошности расположены на расстоянии менее условной протяжённости от контрольного отражателя, они определяются как одна протяжённая несплошность.

Таблица 1.6. Нормы допустимых дефектов, выявляемых радиографическим контролем в сварных соединениях трубопроводов

Размерный показатель сварного соединения, мм	$d_{\min}$, мм	Одиночные включения и скопления				Одиночные протяжённые включения		
		$[d_{\max}]$, мм		условия допустимости на длине 100 мм соединения		допустимые		$[N_d]$
		включения	скопления	$[N]$	$[F]$, мм	$[l_{\max}]$, мм	$[b_{\max}]$, мм	
От 2,0 до 3,0	0,10	0,6	1,0	12	2,0	5,0	0,6	2
Свыше 3,0 до 4,0	0,20	0,8	1,2	12	3,5	5,0	0,8	2
Свыше 4,0 до 5,0	0,20	1,0	1,5	13	5,0	5,0	1,0	2
Свыше 5,0 до 6,5	0,20	1,2	2,0	13	6,0	5,0	1,2	3
Свыше 6,5 до 8,0	0,20	1,5	2,5	13	8,0	5,0	1,5	3
Свыше 8,0 до 10,0	0,30	1,5	2,5	14	10,0	5,0	1,5	3
Свыше 10,0 до 12,0	0,30	2,0	3,0	14	12,0	6,0	2,0	3
Свыше 12,0 до 14,0	0,40	2,0	3,0	15	14,0	6,0	2,0	3
Свыше 14,0 до 18,0	0,40	2,5	3,5	15	16,0	6,0	2,5	3
Свыше 18,0 до 22,0	0,50	3,0	4,0	16	20,0	7,0	3,0	3
Свыше 22,0 до 24,0	0,50	3,0	4,5	16	25,0	7,0	3,0	3
Свыше 24,0 до 28,0	0,60	3,0	4,5	18	25,0	8,0	3,0	3
Свыше 28,0 до 32,0	0,60	3,5	5,0	18	31,0	8,0	3,5	3
Свыше 32,0 до 35,0	0,60	3,5	5,0	20	35,0	9,0	3,5	3
Свыше 35,0 до 38,0	0,75	3,5	5,0	20	35,0	9,0	3,5	3
Свыше 38,0 до 44,0	0,75	4,0	6,0	21	41,0	10,0	4,0	3
Свыше 44,0 до 50,0	0,75	4,0	6,0	22	47,0	11,0	4,0	3
Свыше 50,0 до 60,0	1,00	4,0	6,0	23	55,0	12,0	4,0	4
Свыше 60,0 до 70,0	1,00	4,0	6,0	24	65,0	13,0	4,0	4
Свыше 70,0 до 85,0	1,25	5,0	7,0	25	78,0	14,0	5,0	4
Свыше 85,0 до 100,0	1,50	5,0	7,0	26	92,1	14,0	5,0	4
Свыше 100,0	2,00	5,0	8,0	27	115,0	14,0	5,0	4

Примечания. 1. Непровар в корне шва стыков с односторонним доступом без подкладного кольца допускается максимальной суммарной длиной 20 % внутреннего периметра. 2. Допустимая высота (глубина) непровара: $h \leq 0,3$ мм для толщины стенки трубы $S = 2 + 3$ мм; $h \leq 0,4$ мм для $3 < S \leq 4$ мм; $h \leq 0,5$ мм для $4 < S \leq 5$ мм; $h \leq 0,6$ мм для $5 < S \leq 6,5$ мм; $h \leq 0,8$ мм для $6,5 < S \leq 8$ мм; $h \leq 1,0$ мм для $8 < S \leq 10$ мм; $h \leq 1,2$ мм для $10 < S \leq 12$ мм; $h \leq 1,4$ мм для $12 < S \leq 14$ мм; $h \leq 1,8$ мм для $14 < S \leq 18$ мм; $h \leq 2$ мм для $18 < S \leq 100$ мм. 3. Условные обозначения: $d_{\min}$ — минимальный фиксируемый размер включения; $[d_{\max}]$ — допустимый максимальный размер включения и скопления; $[N_d]$ — допустимое число дефектов на любом участке сварного соединения длиной 100 мм; $[l_{\max}]$ и $[b_{\max}]$ — допустимый максимальный размер (длина) и ширина протяжённого одиночного включения соответственно.

Таблица 1.7. Нормы допустимой выпуклости корня шва, выявляемой радиографическим контролем в стыках трубопроводов без подкладного кольца

Номинальный внутренний диаметр сваренных трубных элементов, мм	Допустимая максимальная высота выпуклости корня шва, мм
До 25 включительно	1,5
Свыше 25 до 150 включительно	2,0
Свыше 150	2,5

Таблица 1.8. Нормы допустимой вогнутости корня шва, выявляемой радиографическим контролем в стыках трубопроводов без подкладного кольца

Номинальная толщина сваренных трубных элементов, мм	Допустимая максимальная высота (глубина) вогнутости корня шва, мм
От 2,0 до 2,8 включительно	0,6
Свыше 2,8 до 4,0 включительно	0,8
Свыше 4,0 до 6,0 включительно	1,0
Свыше 6,0 до 8,0 включительно	1,2
Свыше 8,0	1,6

Таблица 1.9. Нормы допустимых несплошностей, выявляемых при ультразвуковом контроле в сварных стыковых соединениях центробежно-литых труб (сталь 15Х1М1Ф-ЦЛ)

Максимальная высота несплошности, мм	Протяжённость отдельной несплошности, мм, для стыков труб $D_n \times S$, мм			Минимальное расстояние между краями несплошностей, мм
	Ø920 × 32	Ø720 × 28 и Ø720 × 25	Ø630 × 28 и Ø630 × 25	
От 3,0	Не допускается			—
2,5	40	30	25	4-кратная протяжённость
2,0	80	60	50	3-кратная протяжённость
1,5	120	100	80	2-кратная протяжённость

Примечание. Кратность минимального расстояния между двумя соседними несплошностями оценивается по отношению к несплошности с наибольшей протяжённостью.

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) проводится для выявления в сварных соединениях и основном металле поверхностных несплошностей: трещин, надрывов, несплавлений, шлаковых включений (см. табл. 1.2, 1.4). Также могут выявляться подповерхностные несплошности на глубине до 4 — 5 мм.

Метод МПД основан на способности ферромагнитных частиц, находящихся в магнитном поле, ориентироваться и скапливаться в местах наибольшей плотности магнитного потока в зоне расположения поверхностных и подповерхностных дефектов. Контроль

проводится с помощью магнитных дефектоскопов. Материалами для контроля служат сухие порошки и суспензии, основой которых являются мелкие ферромагнитные частицы (обычно окись-закись железа черного цвета). Суспензии представляют собой взвеси порошка в жидкостях, например, на основе керосина.

Поверхность сварного соединения, подлежащая контролю, очищается от теплоизоляции, окалины, грязи с удалением грубых и глубоких рисок и неровностей, зачищается до металлического блеска при шероховатости поверхности не хуже $R_z = 40$ мкм, при необходимости обезжиривается.

Результаты магнитопорошковой дефектоскопии оцениваются по нормам визуального контроля (см. табл. 1.4).

К недостаткам метода магнитопорошковой дефектоскопии относится отсутствие регистрирующего документа, объективно подтверждающего результаты контроля, поэтому необходимы зарисовка вручную результата контроля или фотографирование обследованных участков с ферромагнитными частицами.

Цветная дефектоскопия (ЦД) является одним из методов капиллярного контроля (другой — люминесцентный метод) и проводится для обнаружения в сварных соединениях и основном металле поверхностных несплошностей: трещин (в том числе сквозных), надрывов, несплавлений и др. (см. табл. 1.2, 1.4). Метод цветной дефектоскопии основан на свойстве жидкостей (смачивающихся) активно проникать в мелкие открытые полости (капилляры) металла.

Для проведения контроля методом ЦД поверхность обследуемого металла освобождается от теплоизоляции и очищается от окалины, грязи, грубых и глубоких рисок и открытых полостей несплошностей; контролируемая поверхность обрабатывается механическим способом до шероховатости не хуже $R_z = 20$ мкм и обезжиривается.

На подготовленную контролируемую поверхность наносится индикаторное вещество (пенетрант), которое под действием капиллярных сил проникает в несплошность. Затем наносится проявитель, в результате чего часть индикаторного вещества под действием сорбционных сил вытягивается проявителем и окрашивает его (что и является признаком несплошности).

Результаты цветной дефектоскопии оцениваются по нормам визуального контроля (см. табл. 1.4).

К недостаткам метода цветной дефектоскопии (так же как и метода магнитопорошкового контроля) относится отсутствие регистрирующего документа, объективно подтверждающего результаты контроля, поэтому, как и при МПД, необходимы зарисовка вручную ре-

зультата дефектоскопии или фотографирование обследованных участков со скоплениями пенетранта в полостях несплошностей.

Вихрековый контроль (ВТК) проводится в целях выявления поверхностных дефектов (трещин, шлаковых включений и др.) в основном металле трубопроводов (см. табл. 1.2). Он применяется в отдельных случаях вместо МПД или ЦД. При ВТК выявляются трещины, выходящие на поверхность и имеющие глубину более 0,1 мм и длину более 2 мм. Этим методом не могут контролироваться сварные швы.

Поверхности, подлежащие токовихревому контролю, очищаются от грязи, подвергаются механической обработке (шлифованию) до шероховатости не более $R_z = 20$ мкм и протираются ветошью или салфеткой, слегка смоченной в растворителе для удаления масла. Контроль проводится при температуре окружающего воздуха от -10 до $+40$ °С и на поверхности обследуемой детали.

Результаты контроля оцениваются по двухбалльной системе:

- балл 1 — неудовлетворительное качество. Им оцениваются детали с дефектами, имеющими признаки трещин;
- балл 2 — удовлетворительное качество — для деталей, в которых не обнаружены дефекты или обнаружены дефекты, не имеющие признаков трещин. При оценке баллом 2 рекомендуется дополнительно провести визуальный контроль и оценить допустимость дефекта по нормам визуального контроля.

Контроль измерением твёрдости (ТВ) проводится для оперативной косвенной оценки прочностных свойств металла (сварных швов, основного металла) трубопроводов. Контроль выполняется с помощью переносных твёрдомеров статического и/или динамического действия различных типов. Контролируемые участки металла предварительно шлифуют до металлического блеска.

Выявленные значения твёрдости легированного металла швов ($HB_{мш}$) сопоставляются с нормативными требованиями (см. табл. 1.11); для основного металла полученные значения твёрдости сопоставляются с нормативными требованиями СО 153-34.17—2003 и СО 153-34.17.464—2003. Полученные значения твёрдости могут быть использованы для экспресс-анализа прочностных и пластических свойств металла расчётным способом (см. табл. 1.3), а также для оценки величины упрочнения шва по критерию $\gamma_{мш} = HB_{мш}/HB_{ом}$.

Спектральный анализ (стилоскопирование) выполняется для подтверждения в сварном шве и основном металле трубопроводов требуемого по нормативно-технической документации (НТД) содержания легирующих элементов (см. табл. 1.12). Перед контролем обследуемая поверхность металла подлежит очистке до металлического

блеска. Контроль проводится с помощью переносных приборов — стилоскопов.

Металлографический анализ с реплик (МАР) или со срезов металла, а также с помощью переносных микроскопов является эффективным методом оценки микроструктуры (микроповреждённости) металла по месту расположения сварных соединений и трубных элементов на трассе трубопровода (см. табл. 1.2).

Результаты оценки фактического состояния металла (микроповреждённости) используются для оперативного определения остаточного срока службы элементов и в целом трубопровода по структурному фактору.

Гидравлическое испытание при диагностировании трубопроводов II – IV категорий проводится в соответствии с требованиями ПБ 10-573-03 для подтверждения необходимой прочности и плотности сварных соединений и других элементов. Метод контроля заключается в выдержке не менее 10 мин под пробным внутренним давлением водой $p_{п} = 1,25p_{раб}$ с последующим снижением до рабочего давления $p_{раб}$ и осмотром каждого сварного соединения при рабочем давлении.

Гидроиспытание при диагностировании паропроводов I категории проводится в случаях, если в процессе эксплуатации выполнялись замены или ремонт повреждённых элементов трубопровода.

При разрушающем контроле применяются следующие основные методы:

- металлографические исследования;
- химический и фазовый анализ;
- механические испытания;
- испытания на длительную прочность.

Для выполнения разрушающего контроля предварительно из действующего трубопровода вырезается контрольный патрубок с кольцевым швом в центре. Допускается операцию вырезки проводить огнем способом при условии последующего удаления механическим способом кольцевого участка металла шириной не менее 30 мм с каждого конца патрубка. Длина патрубка после механической обработки с кольцевым швом в центре должна составлять не менее 300 мм для трубопроводов с температурой эксплуатации выше 450 °С и не менее 200 мм — для остальных трубопроводов.

Образцы, предназначенные для разрушающего контроля, вырезаются из патрубка и изготавливаются механическим способом (фрезерованием, строжкой, шлифованием); применение огневой резки не допускается.

Таблица 1.10. Допустимые размеры включений и газовых пор, выявляемых при металлографическом исследовании в металле швов, согласно СО 153-34.003-01 (РД 153-54.1-003-01)

Номинальная толщина стенки трубного элемента в стыковых соединениях или меньший катет углового шва, мм	Допустимый максимальный размер одиночных включений и скоплений, мм	Максимально допустимое число включений (скоплений) и газовых пор в макрошлифе поперечного сечения
До 5	0,5	4
Свыше 5 до 6,5	0,6	4
Свыше 6,5 до 8,5	0,8	4
Свыше 8,5 до 12	1,0	4
Свыше 12 до 20	1,3	5
Свыше 20 до 35	2,0	6
Свыше 35 до 50	2,5	7
Свыше 50	3,0	8

Примечания: 1. Включения (скопления) с максимальным размером до 0,2 мм включительно не учитываются. 2. Расстояние между любыми двумя включениями и скоплениями должно составлять не менее 3-кратного наибольшего размера любого из двух рассматриваемых включений или скоплений.

Таблица 1.11. Допустимые значения твердости металла шва после высокого отпуска согласно СО 153-34.003-01 (РД 153-54.1-003-01)

Металл шва (состав по углероду и легирующим элементам)	Допустимая твердость НВ металла шва при толщине стенки S трубных элементов в соединении, мм		
	$S \leq 20$ для стыковых сварных соединений	$S > 20$ для стыковых соединений и $S < 20$ для соединений с угловым швом*1	$S > 20$ для соединений с угловым швом
09Х1М	135 — 240	135 — 230	135 — 220
09Х1МФ*2	150 — 250	150 — 240	150 — 230
10Х9НМФ, 10Х9ГСНМФ	260 — 280*3	—	—

*1 За толщину стенки соединений с угловым швом принимается толщина стенки приваренных штуцеров (труб, патрубков).

*2 На сварных соединениях (сталь 12Х1МФ) допускается снижение средней твердости до 140 НВ.

*3 Значения твердости приведены для металла швов, выполненных ручной аргонодуговой сваркой.

Металлографические исследования включают методы макро- и микроанализа. Макроанализ проводится в целях выявления особенностей структуры и качества металла; выявляемые дефекты сопоставляются с нормативными требованиями (см. табл. 1.10). Размер макрошлифов сварного соединения должен охватывать сварной шов, зону термического влияния (ЗТВ) и основной металл, не затронутый нагревом при сварке.

Поверхность макрошлифа подвергается тонкому шлифованию с последующим травлением в реактиве согласно ОСТ 34-70-690–96. Макроанализ шлифов проводится невооружённым глазом или при небольшом увеличении ($\times 10 - 30$).

Микроанализ выполняется для оценки микроструктуры (микроразрушенности от ползучести, графитизации, усталости) металла. Исследованию подвергаются макрошлифы площадью $100 - 300 \text{ мм}^2$ согласно ОСТ 34-70-690–96; для анализа микроструктуры сварного соединения макрошлиф должен охватывать все зоны: металл шва, зону термического влияния и основной металл.

Исследуемая площадь макрошлифов подготавливается механическим способом (тонкой шлифовкой и полировкой) и подвергается электролитическому или химическому травлению в специальных растворах согласно ОСТ 34-70-690–96.

При микроанализе исследование микроструктуры проводится с помощью оптического микроскопа при увеличении от $\times 500$ до $\times 1000$. Результаты микроанализа оцениваются согласно ОСТ 34-70-690–96 и СО 153-34.17.467–2001.

Химический и фазовый анализ проводится соответственно для оценки химического состава (основного металла и металла шва) и определения содержания легирующих элементов в карбидах (стали, металле шва).

Химический анализ используется для оценки соответствия фактического состава нормативным требованиям углеродистого и низколегированного материала — стали.

Фазовый анализ выполняется для косвенной оценки остаточной фактической жаропрочности теплоустойчивого низколегированного материала по структурному фактору (величине обеднения твёрдого раствора легирующими элементами).

Механические испытания проводятся в целях определения механических свойств основного металла и сварных соединений согласно ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9454–78, ГОСТ 9651–84, ГОСТ 6996–66.

Механические свойства устанавливаются по результатам испытаний гладких образцов на статическое (кратковременное) растяжение, надрезанных образцов на ударный изгиб и по результатам измерения твёрдости макрошлифов.

При испытании на статическое растяжение сварных соединений определяются механические характеристики: временное сопротивление разрыву σ_b , МПа (кгс/мм^2), и относительное сужение в месте разрыва образца ψ , %. При испытании основного металла дополнительно определяются предел текучести металла (физический) σ_T , МПа (кгс/мм^2), или предел текучести (условный) $\sigma_{0,2}$, МПа

(кгс/мм²), а также относительное удлинение после разрыва образца δ_5 , %.

Испытания на растяжение проводятся не менее чем на двух гладких (ненадрезанных) образцах при комнатной температуре (испытание по ГОСТ 1497—84) и при необходимости при повышенной (рабочей) температуре (испытание по ГОСТ 9651—84). При температуре 20 °С испытываются плоские и/или цилиндрические образцы типа II сварных соединений (с поперечным швом в расчётной части) и типа IV (для рабочей температуры) согласно ГОСТ 6996—66.

При испытании на ударный изгиб определяется ударная вязкость (или работа удара), а также процентное содержание хрупкой и вязкой составляющих поверхности излома для металла шва и основного металла при толщине образцов не менее 2 мм.

Для ударных изгибных испытаний применяются образцы с U-образным надрезом преимущественно типа VI и с V-образным надрезом преимущественно типа IX согласно ГОСТ 6996—66, ГОСТ 9454—78. Единицей ударной вязкости служит джоуль на сантиметр в квадрате (кгс · м/см²). Испытания на ударный изгиб проводятся не менее чем на трёх образцах при комнатной и рабочей температурах.

Измерение твёрдости металла различных участков сварного соединения проводится на макрошлифах поперечного сечения согласно ГОСТ 6996—66. Твёрдость измеряется по Виккерсу (HV). Результаты измерения HV сопоставляются с нормативными требованиями на твёрдость основного металла $[HV_{ом}]$ и металл шва $[HV_{мш}]$ и при необходимости на величину упрочнения металла шва $[γ_{мш}] = [HV_{мш}]/[HV_{ом}]$.

Результаты измерения твёрдости могут использоваться для определения расчётным способом прочностных и пластических свойств основного металла и сварных швов соединений (табл. 1.3).

Испытание на длительную прочность сварных соединений и основного металла проводится в целях подтверждения нормативных остаточных жаропрочных свойств металла в период диагностирования паропроводов, эксплуатирующихся в условиях ползучести. Результаты испытаний используются для расчётной оценки остаточного ресурса паропровода по фактической остаточной длительной прочности металла. В этом случае применяется вариант сокращённых испытаний — не менее 8 образцов для основного металла и не менее 12 образцов для сварного соединения. Испытания проводятся в соответствии с ГОСТ.10145—81.

Преимущественно испытываются цилиндрические образцы диаметром 10 мм в расчётной части. Для испытания образцов сварных

соединений при необходимости используются образцы глоской формы размером 5×20 мм в поперечном сечении расчётной части.

Испытания проводятся при температурных условиях на $30 - 60$ °С выше рабочей (эксплуатационной) температуры с последующим пересчётом длительности эксперимента на рабочую температуру по параметру $P_{д.п} = T(\lg \tau - 2 \lg T + 25)10^{-3}$ или по параметру Ларсона – Миллера $P = T(\lg \tau + 20)10^{-3}$.

При пересчёте с повышенной температуры на рабочую время эксперимента увеличивается многократно. Так, максимальному времени испытания $5 - 10$ тыс. ч при повышенной температуре $590 - 605$ °С соответствует длительность $100 - 200$ тыс. ч и более при рабочей температуре 545 °С (на примере испытаний образцов сварных соединений стали 12Х1МФ).

По результатам испытаний образцов из сварного соединения определяются предел длительной прочности σ_{ω} , МПа, и длительная пластичность — относительное сужение ψ_{ω} , %, в месте разрушения образца; при испытании основного металла определяются предел длительной прочности $\sigma_{t/r}$, МПа) и относительное удлинение l , %.

При необходимости оценивается фактический коэффициент прочности сварного соединения для данных температурных условий из расчёта:

$$\varphi_{\omega} = \sigma_{\omega} / \sigma_{t/r}$$

1.4. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Сварные соединения и основной металл диагностируемых трубопроводов по химическому составу, свойствам и качеству должны соответствовать нормативным требованиям технических условий.

Качество и форма наружной поверхности сварных соединений, устанавливаемых по результатам визуального и измерительного контроля, должны удовлетворять требованиям СО 153-34.003-01 (РД 153-34.1-003 – 01) и СО 153-34.17.464–2003:

- выпуклость («усиление») сварных швов допускается высотой $h = 0,5 \div 3,0$ мм при толщине стенки труб $S < 10$ мм; $h = 0,5 \div 3,5$ мм при $S = 10 \div 20$ мм и $h = 0,5 \div 4,0$ мм при $S > 20$ мм;
- подрезы основного металла (в районе зоны сплавления) допускаются глубиной не более $0,2$ мм;
- отклонение от прямолинейности сварных стыков труб, измеряемых просветом между линейкой и трубой на расстоянии 200 мм от стыка, допускается не более $3,0$ мм;

Таблица 1.12. Требования к результатам стилоскопирования металла швов (наплавленного металла) согласно СО 153-34.003-01 (РД 153-34.1-003-01)

Сварочный материал (марка)		Результаты стилоскопирования
Электрод	Сварочная проволока	
ТМЛ-1у	Св-08МХ	Наличие молибдена. Отсутствие ванадия. Содержание хрома*
ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38	Св-08ХМ, Св-08ХМА-2, Св-08ХГСМА	То же
ТМЛ-3у, ЦЛ-20М, ЦЛ-20, ЦЛ-39, ЦЛ-45	Св-08ХМФА, Св-08ХМФА-2, Св-08ХГСМФА	Наличие ванадия и молибдена. Отсутствие ниобия. Содержание хрома*. Содержание марганца (более 1 % недопустимо)
ЦЛ-57	—	Отсутствие никеля, Наличие ванадия, марганца, молибдена. Содержание хрома (8,5 – 10,5 %)
—	Св-10Х9НМФА	Наличие ванадия, никеля, молибдена. Содержание хрома (8,5 – 9,6 %)
—	Св-10Х9ГСГМФ	Наличие ванадия, никеля, молибдена. Содержание хрома (8,5 – 9,6 %) и марганца (1,2 – 1,8 %)
—	Св-12Х11НМФ	Наличие ванадия, никеля, молибдена. Содержание хрома (10,5 – 12 %)
—	Св-10Х11ВМФ	Наличие никеля, ванадия. Содержание хрома (10,5 – 12 %), молибдена (1,0 – 1,3 %), вольфрама (1,0 – 1,4 %)
—	Св-01Х19Н9, Св-04Х19Н9	Отсутствие молибдена, ванадия и ниобия. Содержание хрома (18 – 20 %), никеля (8 – 10 %)
—	Св-06Х19Н9Т	Отсутствие молибдена, ванадия и ниобия. Содержание хрома (18 – 20 %), никеля (8 – 10 %), наличие титана
ЦТ-26, ЦТ-26М	Св-04Х19Н11МЗ	Отсутствие ванадия. Содержание хрома (14 – 21 %), никеля (7 – 12 %), молибдена (1,5 – 3,0 %)
ЭА-400/10У, ЭА-400/10Т	—	Содержание хрома (16 – 19 %), никеля (9 – 12 %), молибдена (2,0 – 3,1 %), марганца (1,5 – 3,0 %), ванадия (0,3 – 0,75 %)
ЦТ-15, ЦТ-15К, ЦТ-15-1	Св-08Х19Н10Г2Б, Св-04Х20Н10Г2Б	Содержание хрома (16 – 24 %), никеля (9 – 14 %), марганца (1,0 – 2,5 %). Наличие ниобия
ЦЛ-25, ОЗЛ-6, ЗИО-8	Св-07Х25Н13	Отсутствие молибдена, ванадия и ниобия. Содержание хрома (22 – 27 %), никеля (11 – 14 %)
ЭА-395/9, ЦТ-10, НИАТ-5	Св-10Х16Н25АМ6	Содержание хрома (13 – 17 %), никеля (23 – 27 %) и молибдена (4,5 – 7,0 %)
ЦЛ-9	—	Содержание хрома (21 – 26 %), никеля (11 – 14 %), марганца (1,2 – 2,5 %). Наличие ниобия
ЦТ-45	Св-03Х20Н45Г6М6Б-ВИ	Содержание хрома (18,5 – 22 %), никеля (43 – 48 %), молибдена (5,5 – 7,5 %), марганца (5,0 – 7,0 %), ниобия (1,6 – 2,2 %)

* Контроль проводится с целью не допустить ошибочного использования высоколегированных присадочных материалов (с содержанием хрома более 4 %) для сварки стыков труб из перлитной стали.

Таблица 1.13. Критерии работоспособности сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов I категории из теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей согласно СО 153-34.17.470–2003

Критерий	Оптимальное значение
Прочностной	
Длительная прочность соединений σ_{ω} , МПа	Не менее $[\sigma_{\omega}]$
Коэффициент прочности соединений φ_{ω}	Не менее $[\varphi_{\omega}]$
Разупрочнение зоны термического влияния $\xi_{\text{рп}}$, %	Не более 10
Твердость металла шва 09Х1МФ $\text{HB}_{\text{мш}}$	140 – 240
Упрочнение металла шва 09Х1МФ $\gamma_{\text{мш}}$ ($\gamma_{\text{мш}} = \text{HB}_{\text{мш}}/\text{HB}_{\text{ом}}$)	1,0 – 1,4
Временное сопротивление разрыву (предел прочности) соединений при 20 °С $\sigma_{\text{в}}^{\text{ср}}$, МПа	Не менее $\sigma_{\text{в}}^{\text{о.м}}$
Деформационный	
Длительная пластичность соединений ψ_{ω} , %	Не менее 10
Критическая температура хрупкости соединений $t_{\text{к}}$, °С	Не более 30
Ударная вязкость шва 09Х1МФ KCU , Дж/см ² (кгс · м/см ²)	Не менее 49 (5)
Технологический (согласно СО 153-34.003–01)	
Угол изгиба при температуре 20 °С для толщины стенки труб:	
$S \leq 20$ мм	Не менее 50
$S > 20$ мм	Не менее 40
Структурный (по данным ОАО ВТИ)	
Содержание бейнита в основном металле Б, %	Не более 90
Размер зерна микроструктуры основного металла, номер	Не крупнее № 4
Размер зерна микроструктуры металла шва 09Х1МФ и околошовной зоны (участки перегрева при сварке), номер	Не крупнее № 2
Доля участков с мелким зерном (№ 6 – 8) в микроструктуре металла шва 09Х1МФ, %	Не менее 30
Толщина ферритных прослоек (оторочек) в микроструктуре металла шва 09Х1МФ $l_{\text{ф}}$, мкм	15 – 50
Микрповрежденность порами ползучести металла зон соединений (согласно РД 153-34.1-17.467–2001), стадия	$I_{\text{п}} - II_{\text{п}}$
Конструкционный	
Запас по толщине стенки трубных элементов в пришовной зоне соединения S_{f}/S_0	Не менее 1,4
Относительная разнотолщинность трубных элементов тройника в пришовной зоне, $\beta^{\text{к}}/\beta^{\text{ш}}$	0,95 – 1,05
Конструкционная прочность сварного тройника (с одиночным отверстием под штуцер) $d_{\text{о}}/(D_{\text{н}}^{\text{к}} - 2S_{\text{f}}^{\text{к}})$	Не более 0,75

Критерий	Оптимальное значение
Силовой (по данным ОАО НПО ЦКТИ)	
Критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения) соединений при 20 °С K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}	Не менее 80
То же, но при 545 °С K'_{Ic} , МПа · м ^{1/2}	Не менее 100
Пороговое значение критического коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения) для условий ползучести на период $(1,2 \div 2,2)10^5$ ч при температуре 545 — 550 °С K_{IcTh} , МПа · м ^{1/2}	Не менее 12

Примечания: 1. Микроповрежденность металла зон сварных соединений (стали 12Х1МФ, 15Х1М1Ф) не допускается при наличии единичных пор ползучести размером более 1 — 2 мкм и плотностью $\rho > 100$ пор/мм², т.е. на стадии поврежденности выше II_п структурной шкалы РД 153-34.1-17.467—2001. 2. Условные обозначения: S_f и S_0 — фактическая и расчетная толщина стенки соответственно; β^k и β^w — параметры для корпуса и штуцера тройника соответственно ($\beta^k = D_n^k / D_{вн}^k$; $\beta^w = d_n^w / d_{вн}^w$); d_o — диаметр отверстия в корпусе тройника под штуцер ($d_o \approx d_{вн}^w$); S_f^k — фактическая толщина стенки корпуса тройника в пришовной зоне (в районе углового шва).

- западания (углубления) между валиками и чешуйчатость поверхности шва допускаются размером не более 1,2 мм при толщине стенки труб $S = 4 \div 6$ мм, до 1,5 мм при $6,0 < S \leq 10$ мм и не более 2,0 мм при $S > 10$ мм;

- одиночные сварочные дефекты допускаются размерами, приведенными в табл. 1.4;

- трещины любого размера и ориентации не допускаются.

Качество металла сварных соединений по результатам ультразвукового и радиографического контроля должно соответствовать требованиям СО 153-34.003-01 (РД 153-34.1-003—01) согласно данным, приведенным в табл. 1.5 — 1.8.

Сварные соединения трубопроводов I категории, эксплуатирующихся при температуре выше 450 °С, должны отвечать нормативным требованиям качества (см. табл. 1.4 — 1.13):

- дефекты, выявляемые неразрушающими методами контроля, не должны превышать нормативные требования (см. табл. 1.4 — 1.9);

- дефекты, выявляемые при металлографическом анализе макрошлифов, не должны превышать нормативные требования (см. табл. 1.10);

- твердость металла швов должна удовлетворять нормативным требованиям (см. табл. 1.11);

Таблица 1.14. Критерии качества основного металла паропроводов I категории из теплоустойчивых сталей с температурой эксплуатации выше 450 °С согласно СО 153-34.17.470–2003

Критерий	Оптимальное значение
Поверхностные дефекты: раковины, риски и другие одиночные повреждения глубиной h_d , мм	$2,0 \leq h_d \leq 10S$
Трещины всех видов и любой ориентации	Не допускаются
Остаточная деформация ползучести, %, для прямых труб:	
из стали 12Х1МФ	Не более 1,5
из стали 15Х1М1Ф	Не более 1,0
То же для прямых участков гибов из сталей этих марок	Не более 0,8
Снижение механических свойств после 10^5 ч эксплуатации по сравнению с уровнем свойств, регламентированных техническими условиями на поставку паропроводных труб:	
прочностных свойств при 20 °С: σ_B , $\sigma_{0,2}$, МПа	Не более 30
ударной вязкости при 20 °С KCU , Дж/см ²	Не более 15
Предел текучести стали $\sigma_{0,2}$, МПа:	
12Х1МФ при температуре 550 °С	Не менее 180
15Х1М1Ф при температуре 550 °С	Не менее 200
15ХМ и 12МХ при температуре 510 °С	Не менее 200
Микроповрежденность структуры стали при увеличении $\times 500$, балл	Не более 4-го балла
Суммарное содержание всех легирующих элементов в карбидном осадке (к общему их количеству) для стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф, %	Не более 60
Снижение длительной прочности на период 10^5 и $2 \cdot 10^5$ ч по сравнению со средним уровнем этой характеристики, регламентированным в технических условиях на паропроводные трубы, %	Не более 20
Снижение длительной пластичности на период продолжения срока эксплуатации, %	Не более 5,0
Снижение плотности металла вблизи наружной поверхности труб по сравнению с исходным состоянием, %	Не более 0,3
Критическая температура хрупкости t_k , °С:	
стали 12Х1МФ	Не более 60
стали 15Х1М1Ф	Не более 50
Критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения) хромомолибденованадиевой стали при температуре 20 °С K_{Ic} , МПа $\cdot$ м ^{1/2}	65 – 73

Таблица 1.15. Критерии качества сварных соединений и основного металла трубопроводов II – IV категорий из конструкционных низколегированных и углеродистых сталей с температурой эксплуатации ниже 450 °С согласно СО 153-34.17.464–2003

Критерий	Оптимальное значение
Локальная деформация в виде вмятин или выпучин с максимальным размером l на поверхности трубных элементов	$l \leq 10S$ $l \leq 0,2D_n$
Твёрдость металла по результатам измерения переносными приборами для сталей марок, НВ: Ст3, Ст4, 10, 20, 15К и 20К 09Г2С, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 10Х5М	110 – 180 120 – 200
Поверхностные дефекты (повреждения) сварных швов (и основного металла): одиночные коррозионные язвы, раковины или эрозийные повреждения глубиной h , мм то же, но протяжённостью L , мм скопления коррозионных язвин глубиной h , мм продольные цепочки язвин, а также трещины всех видов и ориентации	$0,2S \leq h \leq 2,5$ $L \geq 0,25\sqrt{(D_n - S)S}$ $h \geq 1,0$ Не допускается
Графитизация сварных соединений и основного металла (согласно ОСТ 34-70-690–96), балл	Не более 2
Механические свойства основного металла (стали) при температуре 20 °С: допускаемое снижение σ_B или $\sigma_{0,2}$ от значений, регламентированных НТД допускаемый уровень $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ для углеродистых сталей то же для низколегированных сталей допускаемая ударная вязкость, Дж/см ² : <i>KCU</i> <i>KCV</i>	Не более 5,0 % Не более 0,65 Не более 0,75 Не менее 30 Не менее 25
Механические свойства сварных соединений при температуре 20 °С: временное сопротивление разрыву $\sigma_B^с$, МПа то же для соединений стали 15ГС, подвергнутых термообработке (высокому отпуску), МПа технологические свойства (угол изгиба) соединений углеродистых сталей, град: при $S \leq 20$ мм при $S > 20$ мм то же для соединений низколегированных сталей, град: при $S \leq 20$ мм при $S > 20$ мм	$\sigma_B^с \geq \sigma_B^{ом}$ Не менее 451 Не менее 100 Не менее 80 Не менее 80 Не менее 60
Местные подрезы соединений глубиной h , мм	$0,5S \leq h \leq 0,05$
То же по протяжённости L шва, %: для трубопроводов II категории для трубопроводов III и IV категорий	Не более 10 Не более 20

Примечания: 1. Одиночными считаются дефекты (язвы, раковины и др.), расстояние между ближайшими кромками которых превышает утроенное значение максимального диаметра наибольшего дефекта. 2. Допускается наличие коррозионных язвин глубиной 2 мм и протяжённостью 20 мм для трубопроводов II, III категорий; глубиной 2 мм и протяжённостью 30 мм для трубопроводов IV категории. 3. Условные обозначения: D_n и S — номинальный наружный диаметр и толщина стенки трубных элементов соответственно.

- металл швов по результатам стилоскопирования должен соответствовать нормативному составу (см. табл. 1.12);

- сварные соединения должны удовлетворять критериям: прочностным σ_{ω} , φ_{ω} , σ_B^{cc} ; деформационным ψ_{ω} , t_K , KCU ; технологическому — углу изгиба; структурному — микроповрежденности не более стадии Π_{II} (см. табл. 1.13).

- основной металл паропроводов из таких сталей должен удовлетворять нормативным критериям качества (см. табл. 1.14).

Сварные соединения трубопроводов углеродистой стали I категории группы 4 (из стали 20, 15ГС) с температурой эксплуатации до 450 °С должны удовлетворять требованиям качества:

- дефекты, выявляемые методами контроля, не должны превышать нормативных требований (см. табл. 1.4 — 1.8, 1.10);

- кратковременные механические свойства соединений при температуре 20 °С должны удовлетворять требованиям:

временное сопротивление разрыву $\sigma_B^{cc} \geq \sigma_B^{om}$;

ударная вязкость металла шва $KCU^{мш} \geq 49 \text{ Дж/см}^2$;

- технологические свойства по показателю угла изгиба при температуре 20 °С должны быть не ниже 100° при толщине стенки $S \leq 20 \text{ мм}$ и не ниже 60° при $S > 20 \text{ мм}$.

Сварные соединения и основной металл трубопроводов II — IV категорий из конструкционных низколегированных и углеродистых сталей, эксплуатирующихся при температуре ниже 450 °С, должны удовлетворять нормативным требованиям качества:

- дефекты, выявляемые неразрушающими методами контроля в сварных соединениях, не должны превышать нормативных требований (см. табл. 1.4 — 1.8, 1.10);

- работоспособность сварных соединений и основного металла должна удовлетворять нормативным требованиям (табл. 1.15);

- микроповрежденность металла не должна быть более 2-го балла по шкале графитизации ОСТ 34-70-690—96.

ГЛАВА ВТОРАЯ

Паропроводы I категории

2.1. ПРОГРАММА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Программа диагностирования включает процедуры по обследованию паропровода и расчёту на прочность сварных и бесшовных трубных элементов (рис. 2.1).

Программу диагностирования разрабатывают экспертные организации, к числу которых относится ОАО ВТИ. В этой программе предусматриваются следующие требования:

- представление предприятием — владельцем паропровода для экспертной организации необходимой технической документации в систематизированном виде. В техническую документацию входит информация по контролю элементов паропровода за весь период его эксплуатации, проведённым заменам элементов, результатам выполненных исследований и расчётов;
- проведение неразрушающего контроля (в требуемых объёмах и необходимыми методами) сварных и бесшовных трубных элементов, а также в целом паропровода в период его обследования предприятием — владельцем паропровода;
- ревизия паропроводной и опорно-подвесной системы с проведением расчётов на прочность. Обследование паропроводной трассы и расчётные исследования выполняют специализированные организации, к числу которых относится ОАО «Фирма ОРГРЭС»;
- выполнение исследования сварного стыкового соединения (и основного металла), вырезанного из обследуемого паропровода. Исследование структуры и свойств металла осуществляет специализированная организация;
- проведение контроля микроповреждённости металла методом металлографического анализа с реплик (переносным микроскопом) для оценки остаточного ресурса сварных и бесшовных трубных эле-

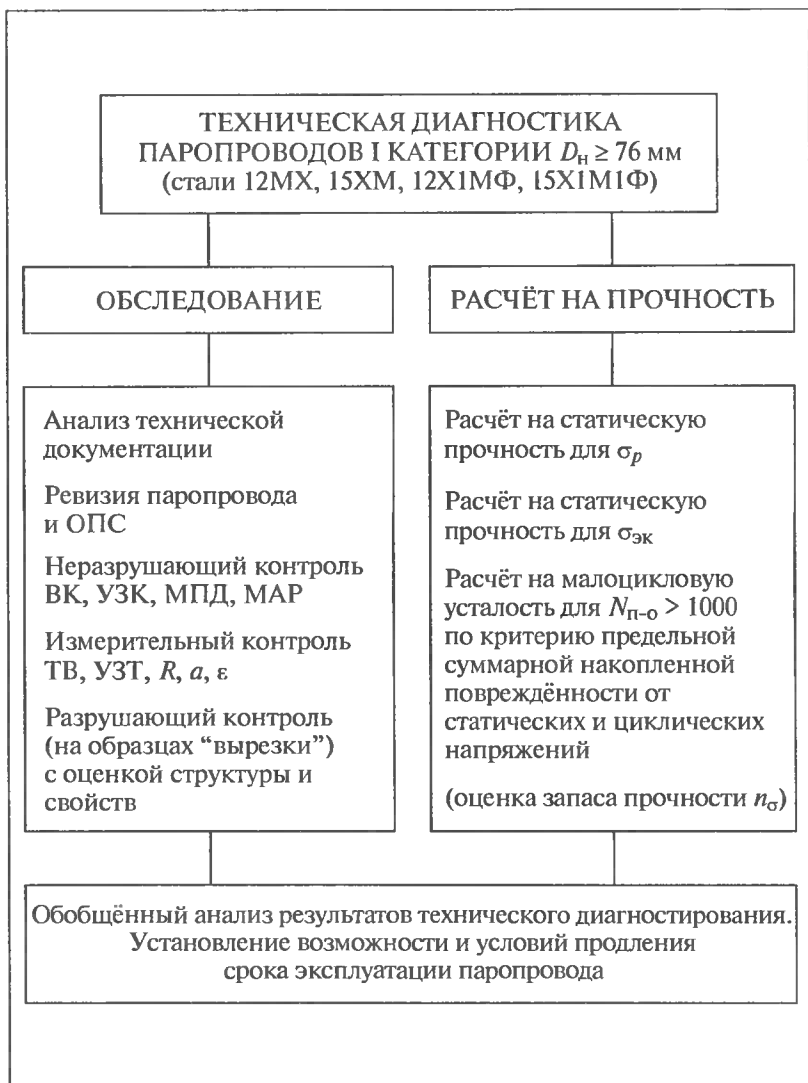


Рис. 2.1. Процедуры, выполняемые при техническом диагностировании паропроводов I категории с температурой эксплуатации свыше 450°C согласно СО 153-34.17.470—2003 (σ_p — приведённое напряжение от внутреннего давления рабочей среды; $\sigma_{эк}$ — эквивалентное напряжение от действия всех нагружающих факторов; $N_{п-о}$ — число накопленных циклов нагружения при пусках-остановах; ОПС — опорно-подвесная система; R — радиус кривизныгиба; a — овальностьгиба; ϵ — накопленная остаточная деформация от ползучести)

ментов по структурному фактору. Металлографический анализ с оценкой остаточного ресурса выполняет экспертная организация;

- выполнение расчёта на прочность сварных и бесшовных трубных элементов. Расчёт на прочность проводит экспертная организация для назначения индивидуального срока службы с учетом установленного остаточного ресурса по структурному фактору (микроповрежденности металла);

- подготовка Заключения экспертизы промышленной безопасности (на основании результатов обследования и расчётов на прочность) с выводами и рекомендациями о возможности, сроке и параметрах дальнейшей эксплуатации паропровода. Заключение экспертизы промышленной безопасности разрабатывает экспертная организация.

В примере 2.1 приводится типовая программа диагностирования паропровода I категории при выработке паркового ресурса, составленная для первого продления срока службы согласно СО 153-34.17.464–2003. При возможном повторном продлении ресурса объём неразрушающего контроля элементов паропровода при его обследовании увеличивается в 2 раза.

Пример 2.1

Программа диагностирования паропровода I категории при выработке нормативного ресурса на тепловой электростанции (проектные параметры пара: $p = 25,5$ МПа, $t = 545$ °C)

1. Цель технического диагностирования:

- установить возможность безопасной дальнейшей эксплуатации паропровода и выдать (в случае необходимости) рекомендации по его ремонту и/или наладке;
- определить сроки и условия дальнейшей эксплуатации паропровода.

2. Техническому диагностированию подлежит паропровод I категории (рег. условный № 222).

3. Подготовка паропровода к диагностированию выполняется силами и средствами владельца в соответствии с требованиями разд. 3 СО 153-34.17.470–2003. Работы по диагностированию проводятся на холодном (неработающем) паропроводе с соблюдением правил техники безопасности. Перед остановом паропровода и последующей его диагностикой проводится предварительный осмотр в рабочем состоянии. Для выполнения визуально-измерительного контроля и дефектоскопии сварных соединений и бесшовных деталей проводится операция по удалению теплоизоляционного покрытия паропроводов в местах контроля и измерений.

Таблица 2.1. Объёмы контроля при обследовании паропровода I категории на тепловой электростанции

Метод контроля	Объём контроля	Зоны контроля	Примечание
Паропроводная и опорно-подвесная системы; ревизия согласно разд. 7 СО 153-34.17.470—2003			
Наружный осмотр в рабочем состоянии	100 %	Трассировка паропровода и состояние ОПС	Расчёт на прочность по участкам паропровода
Наружный осмотр в холодном состоянии	100 %	Теплоизоляция и кожух, трассировка, элементы ОПС	Расчёт на прочность по участкам паропровода
Прямые участки труб; контроль согласно п. 4.1 СО 153-34.17.470—2003			
Контроль остаточной деформации ползучести	100 %	—	—
УЗТ	Не менее пяти труб с наибольшей остаточной деформацией ползучести, но не менее двух труб по каждому типоразмеру	Контрольное сечение трубы в зоне расположения реперов	Толщина стенки контролируется в четырёх точках равномерно по периметру трубы
ВК, МПД (ЦД) и УЗК, также анализ микроструктуры и микроповреждённости с реплик	Не менее двух труб по каждому типоразмеру	В зоне расположения реперов на длине трубы не менее 500 мм	На трубах с наибольшей остаточной деформацией ползучести и с минимальной толщиной стенки
Гнутые отводы (гибы); контроль согласно п. 4.2 СО 153-34.17.470—2003			
Визуально-измерительный контроль	100 % по каждому типоразмеругиба	—	Измерение остаточной деформации ползучести, овальности
ВК, УЗК, МПД (ЦД)	100 % по каждому типоразмеругиба	По всей длине гнутой части на 2/3 окружностигиба, включая растянутую и нейтральные зоны	—
УЗТ	100 % по каждому типоразмеругиба	В растянутой и нейтральных зонахгиба	—
Анализ микроструктуры и микроповреждённости с реплик	10 % гибов, но не менее трёх гибов, общего числа на паропровод, при этом один гиб по каждому типоразмеру	Гибы с максимальной остаточной деформацией ползучести	—
Штампованные и штамповарные колена (ШСК)*; контроль согласно п. 4.3 СО 153-34.17.470—2003			
ВК, УЗК, МПД (ЦД)	25 % штампованных колен; 25 % ШСК, но не менее двух	На всей длине изогнутой части по всему периметру, включая наружный и внутренний обводы и нейтральные зоны колена	—
УЗК, МПД (ЦД) сварных продольных соединений ШСК	100 %	Продольные сварные швы на наружном и внутреннем обводах ШСК	—

Метод контроля	Объём контроля	Зоны контроля	Примечание
УЗТ	25 % штампованных колен; 100 % ШСК	На наружном и внутреннем обводах, также в нейтральных зонах ШСК	В ШСК контроль с каждой стороны продольного шва
Анализ микроструктуры и микроповреждённости металла ШСК с реплик	50 %, но не менее трех ШСК каждого типоразмера	В центральной части ШСК	ОМ, ЗТВ и МШ (продольных швов)
Сварные соединения; контроль согласно п. 4.4 СО 153-34.17.470—2003			
ВК, УЗК, МПД (ЦД) и УЗТ	20 % для соединений типа 1; 100 % для соединений типа 2	УЗТ пришовных зон сварных соединений	100 %-ный контроль соединений типа 1 при выявлении в них недопустимых дефектов
Контроль твёрдости	100 %	Металл шва и основного металла (15X1M1Ф, 15X1M1ФЛ)	—
Анализ микроструктуры и микроповреждённости с реплик	10 – 20 % для ССС; 20 – 60 % для ССС _{ртз} , ССС _{кл} ; 30 – 100 % для ТСС, ШСС	МШ, ЗТВ и ОМ сварного соединения	Объём контроля уточняется по табл. 1 СО 153-34.17.470—2003

* Обследование штампованных и штампосварных отводов (колен) проводится на паропроводах ГПП.

Примечания: 1. К типу 1 относятся стыковые сварные соединения без концентраторов напряжений (соединения прямых труб между собой); к типу 2 — сварные соединения с концентраторами напряжений (соединения труб с фасонными трубными элементами). 2. При обнаружении недопустимых дефектов в сварных соединениях по результатам неразрушающего контроля или анализа микроповреждённости (и в других случаях) объём сварных соединений, подлежащих металлографическому анализу и контролю микроповреждённости, увеличивается не менее чем в 2 раза согласно п. 4.4.6 СО 153-34.17.470—2003. Условные обозначения: МШ — металл шва; ЗТВ — зона термического алияния; ОМ — основной металл; ССС, ССС_{ртз}, ССС_{кл} — стыковые сварные соединения труб одинакового типоразмера, разнотолщинных трубных элементов и труб с коническими переходами соответственно; ТСС, ШСС — тройниковые и штуцерные сварные соединения соответственно; ШСК — штампосварное колено.

4. Техническая документация, которую передаёт предприятие — владелец паропровода для анализа в экспертную организацию, включает:

- эксплуатационно-техническую документацию: паспорт каждого паропровода, исполнительные схемы, монтажно-сборочные чертежи, режимы работы, дефекты металла и опорно-подвесной системы (ОПС), перечень аварий, перечень арматуры;
- информацию по технологии изготовления деталей и монтажу паропровода (свидетельства об изготовлении элементов и о монтаже паропровода, формуляры наладки ОПС);

- результаты эксплуатационного контроля бесшовных элементов и сварных соединений паропровода, информацию об их ремонте и/или замене новыми элементами или участками паропровода;

- информацию о проектных параметрах эксплуатации паропровода (температуре и давлении пара), а также о фактических условиях эксплуатации по годам наработки: температуре, давлению, длительности наработки, числу циклов пусков-остановов паропровода.

5. Визуальный и измерительный контроль при техническом диагностировании паропровода и ОПС проводится силами владельца в объёмах, указанных в разд. 7 СО 153-34.17.470—2003. Контроль включает (табл. 2.1):

- наружный осмотр паропровода в горячем (рабочем) состоянии для оценки общего состояния трубопроводной системы (отсутствия/наличия провисаний, прогибов, противоуклонов и т.п.), опорно-подвесной системы (отсутствия/наличия разрушений опор и пружин, обрывов подвесок и т.п.), указателей тепловых перемещений и дренажей.

Нормы и критерии оценки технического состояния паропроводов регламентированы СО 153-34.17.470—2003. Результаты наружного осмотра оформляются актами по общему состоянию паропроводов;

- наружный осмотр паропровода в холодном (нерабочем) состоянии для оценки соответствия трассировки паропровода монтажно-сборочному чертежу с измерением отсутствующих геометрических размеров трассы. Также осмотр проводится для оценки состояния тепловой изоляции с внешним кожухом паропровода, наличия и соответствия типов опор и подвесок монтажно-сборочному чертежу с проверкой их исправности (сварных швов опор скользящие и неподвижных опор, отсутствия/наличия обрывов тяг подвесок, разрушения и выпучивания пружин).

Техническое состояние паропровода по результатам внешнего осмотра устанавливается с учётом норм и критериев оценки согласно СО 153-34.17.470—2003 и оформляется соответствующими актами;

- визуальный контроль металла паропроводов с проведением измерений. Предварительно контролируемые участки и элементы паропровода освобождаются от обшивки (кожухов) и теплоизоляции. Результаты проверки оцениваются по нормативным критериям качества согласно СО 153-34.17.470—2003;

- по результатам ревизии паропроводной и опорно-подвесной систем владельцем паропровода оформляется следующая техническая документация: акт о техническом состоянии паропровода и

ОПС, ведомости дефектов паропровода и ОПС с отметками об их устранении, аксонометрическая расчётная схема паропровода согласно п. 7.8 СО 153-34.17.470—2003.

6. Дефектоскопия основного металла элементов паропровода проводится силами владельца с помощью неразрушающих методов контроля ВК, УЗК и МПД (ЦД) в объёмах, указанных в табл. 2.1. В первую очередь контролю подлежат места выборок дефектов (трещин) и ремонтных заварок с примыкающей зоной основного металла шириной не менее 30 мм. При обнаружении недопустимых дефектов в основном металле и ремонтных заварках объём контроля элементов данного типоразмера удваивается (но не превышает 100 %). Оценка качества элементов паропроводов проводится в соответствии с требованиями СО 153-34.17.470—2003.

7. Дефектоскопия сварных соединений паропровода проводится силами владельца методами ВК, УЗК, МПД (ЦД) в объёмах и местах, приведённых в табл. 2.1.

Оценка качества сварных соединений по результатам дефектоскопии осуществляется в соответствии с требованиями СО 153-34.17.470—2003.

8. Контроль фактической толщины стенки элементов паропровода проводится силами владельца методом УЗТ в объёмах и местах, указанных в табл. 2.1.

9. Металлографическое исследование сварных соединений и гибов паропровода с реплик проводится силами экспертной организации, при этом подготовительные операции (шлифовка и полировка мест контроля, снятие реплик) выполняются силами владельца. Контроль проводится в объёмах и местах, указанных в табл. 2.1.

10. Измерение твёрдости сварных соединений паропровода проводится силами владельца в объёмах и местах, указанных в табл. 2.1.

11. Исследование свойств и структуры сварного соединения (вырезанного силами владельца из действующих паропроводов) проводится экспертной организацией. Вырезанное стыковое сварное соединение включает кольцевой шов и примыкающие к нему с обеих сторон трубные участки основного металла шириной не менее 130 мм (после огневой резки) и не менее 100 мм (после механической обработки).

Примечание. Необходимость в вырезке контрольной пробы сварного соединения устанавливается в случае обнаружения недопустимых дефектов или недопустимой микроповреждённости металла в процессе проведения контроля согласно п. 5.1 СО 153-34.17.470—2003.

12. Анализ результатов технического диагностирования и проведение контрольных расчётов на прочность с разработкой Заключения

экспертизы промышленной безопасности по паропроводу осуществляется экспертной организацией.

2.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Согласно программе диагностирования (см. пример 2.1) при обследовании паропровода I категории проводится комплекс диагностических операций с применением неразрушающего контроля:

- наружный осмотр паропровода в горячем (рабочем) и холодном состояниях с ревизией паропроводной и опорно-подвесной системы; расчёт на прочность;
- визуальный контроль с измерением накопленной ползучести металла, овальности и радиуса кривизны гибов, фактической толщины стенки для последующего использования полученных данных в расчётах на прочность;
- контроль качества сварных и бесшовных трубных элементов методами УЗК (или РГК), МПД (или ЦД, или ТВК), измерением твёрдости (ТВ) с последующей оценкой соответствия полученных результатов нормативным требованиям;
- металлографический анализ с реплик (переносным микроскопом или срезов металла) для определения стадии микроповреждённости металла от ползучести. По результатам микроанализа определяется допустимый минимальный срок остаточного ресурса. Назначаемый индивидуальный ресурс, включающий накопленную наработку с установленным остаточным ресурсом, принимается основным сроком, по которому проводится расчёт на прочность сварных и бесшовных трубных элементов паропровода;
- разрушающий контроль основного металла и сварного соединения, вырезаемого из обследуемого паропровода для оценки фактического состава, структуры и остаточных механических и жаропрочных свойств после длительной эксплуатации паропровода при ползучести;
- гидравлические испытания паропровода при условии замены отдельных повреждённых сварных и/или бесшовных трубных элементов при эксплуатации.

По результатам каждого вида контроля, испытания и исследования даётся критическая оценка соответствия этих результатов нормативным требованиям. При положительной комплексной оценке результатов обследования паропровода проводится расчёт на прочность сварных и бесшовных трубных элементов (см. § 1.3).

В примере 2.2 приводятся данные обследования паропровода острого пара (ОП) с оценкой полученных результатов по каждому виду контроля.

Пример 2.2. Результаты неразрушающего контроля при обследовании паропровода ОП (рег. условный № 222, см. пример 2.1) после накопленной наработки $\tau_n \approx 240$ тыс. ч.

Наружный осмотр. Наружному осмотру подвергался паропровод острого пара (включая перемычки), находящийся в холодном и горячем (рабочем) состояниях.

По результатам наружного осмотра паропровода ОП в горячем и холодном состояниях установлено:

- отсутствие провисаний, прогибов, защемлений на трассах паропровода;
- отсутствие обрывов подвесок паропровода;
- исправленное состояние дренажных устройств и воздушников;
- тепловая изоляция и кожухи наружного покрытия паропровода ОП находятся в исправном состоянии; повреждения не выявлены.

Состояние опорно-подвесной системы. По результатам проверки состояния ОПС, проведённой ОАО «Фирма ОРГРЭС», установлено следующее:

- выявленные дефекты по ОПС паропровода ОП устранены;
- регулировка ОПС удовлетворяет требованиям НТД; небаланс нагрузки на пружинные опоры в рабочем состоянии паропровода не превышает установленных нормативных значений 15 %; суммарные небалансы нагрузок не превышают нормативных значений ± 5 %;
- расчётный уровень напряжений от всех нагружающих факторов в рабочем и холодном состояниях металла паропровода ОП $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15Х1М1Ф) не превышает допустимых значений на расчётный ресурс 300 тыс. ч для параметров $t = 545$ °С, $p = 25,5$ МПа; условия прочности соблюдаются для всех расчётных участков паропровода ОП на срок 300 тыс. ч;
- на паропроводах БРОУ $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12Х1МФ) условия прочности соблюдаются в основном для всех расчётных участков на срок 275 тыс. ч. На отдельных участках труб действуют повышенные расчётные напряжения.

Визуальный контроль металла. По результатам визуального контроля металла элементов и участков паропровода ОП (включая перемычки) установлено:

- соответствие качества наружной поверхности сварных соединений, прямых труб и гибов нормативным требованиям; недопустимые дефекты не выявлены;

- соответствие качества наружной поверхности задвижек нормативным требованиям; данные фасонные элементы признаны годными.

Дефектоскопия сварных соединений и гибов. Контролю подвергались элементы паропровода ОП:

- гибы и сварные тройники методами УЗК и МПД в объёме 100 %;
- стыковые сварные соединения методом УЗК в объёме 100 %;
- сварные тройники методом МПД в объёме 100 % и стыковые сварные соединения (на перемычках паропровода) методом МПД в объёме от 20 % (соединения типа 1) до 100 % (соединения типа 2);
- литые корпусные детали задвижек методом МПД в объёме 100 %.

По результатам проведённого контроля установлено удовлетворительное качество сварных соединений, прямых участков паропроводных труб, гибов и корпусов задвижек; недопустимые дефекты не обнаружены.

Измерительный контроль гибов и прямых труб. По результатам измерительного контроля установлено:

- фактическая овальность гибов $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15Х1М1Ф) составляет $a_f = 3,7 \div 4,6$ % и гибов $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12Х1МФ) — $a_f = 3,7 \div 4,6$ %. Установленное максимальное значение овальности гибов ($a_{f\max} = 4,6$ %) принято для расчёта на прочность;

- фактическая толщина стенки в растянутой (внешней) стороне гибов $S_f = 43,8 \div 49,1$ мм (гибы $\varnothing 245 \times 45$ мм) и $S_f = 28,6 \div 30,1$ мм (гибы $\varnothing 159 \times 30$ мм). Установленные минимальные значения толщины стенки в растянутой части гибов ($a_{f\min} = 43,8$ и $28,6$ мм соответственно) приняты для расчёта на прочность;

- фактический радиус кривизны $R_f = 1000$ мм для гибов $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15Х1М1Ф) и $R_f = 650$ мм для гибов $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12Х1МФ). Данные размеры радиуса кривизны гибов приняты в расчёт на прочность.

- фактическая толщина стенки прямых участков паропроводных труб $S_f = 44,8 \div 45,6$ мм (труб $\varnothing 245 \times 45$ мм у врезок), $S_f = 44,2 \div 45,0$ мм (труб $\varnothing 245 \times 45$ мм у сварных стыков), $S_f = 29,0 \div 29,9$ мм (труб $\varnothing 159 \times 30$ мм у сварных стыков). Минимальные значения фактической толщины стенки $S_{f\min} = 44,2$ мм и $S_{f\min} = 29,0$ мм приняты в расчёт на прочность для труб соответственно $\varnothing 245 \times 45$ мм и $\varnothing 159 \times 30$ мм.

Измерительный контроль остаточной деформации прямых труб и гибов. Измерительному контролю подвергались трубные элементы

Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) паропровода ОП. Из результатов контроля следует:

- фактическая остаточная деформация ползучести после длительной наработки (примерно 240 тыс. ч) $\epsilon_f = 0,11 \div 0,26$ % на гихах и $\epsilon_f = 0,14 \div 0,32$ % на прямых трубах;

- выявленная остаточная деформация оценивается небольшим значением, которое удовлетворяет нормативным требованиям [2.1].

Контроль твёрдости сварных соединений. Измерениям твёрдости подвергались швы сварных соединений и трубы Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) и Ø159 × 30 мм (сталь 12Х1МФ) паропровода острого пара. Из анализа результатов контроля следует:

- фактическая твёрдость металла швов 09Х1МФ характеризуется значениями в диапазоне $HB_{f_{мш}} = 182 \div 198$; твердость основного металла — значениями $HB_{f_{ом}} = 148 \div 167$ и $HB_{f_{ом}} = 130 \div 150$ для труб соответственно Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) и Ø159 × 30 мм (сталь 12Х1МФ);

- фактическая твёрдость металла швов $HB_{f_{мш}} = 182 \div 198$ отвечает нормативным требованиям $[HB_{мш}] = 150 \div 240$ согласно [2.7]. Упрочнение швов $\gamma_{мш} = HB_{f_{мш}}/HB_{f_{ом}}$ составляет 1,2 и 1,36 соответственно для соединений труб Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) и Ø159 × 30 мм (сталь 12Х1МФ). Установленное упрочнение швов соответствует нормативным требованиям $[\gamma_{мш}] = 1,0 \div 1,4$ согласно [2.1].

Исследование микроструктуры основного металла и сварных соединений. Металлографическому анализу подвергались реплики (оттиски) металла, снятые на пяти гихах и четырёх сварных соединениях по месту их расположения на паропроводе острого пара. Исследования проводились при увеличении × 500 на оптическом микроскопе NEOFOT-32. Методика подготовки реплик и оценка результатов исследований соответствовали требованиям и рекомендациям [2.8, 2.9].

Из результатов металлографического анализа следует:

- в металле четырёх гивов Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) и одного гива Ø159 × 30 мм (сталь 12Х1МФ) выявлены множественные ориентированные микропоры, что свидетельствует о значительном развитии в металле процессов ползучести. Степень микроповреждённости оценена от 3 — 4-го до 4-го балла по шкале [2.8];

- в металле зон (шве, ЗТВ и основном металле) двух сварных соединений Ø245 × 45 мм (сталь 15Х1М1Ф) и двух соединений Ø159 × 30 мм (сталь 12Х1МФ) также выявлено множество ориентированных пор ползучести плотностью $\rho > 1000$ пор/мм² (рис. 2.2).

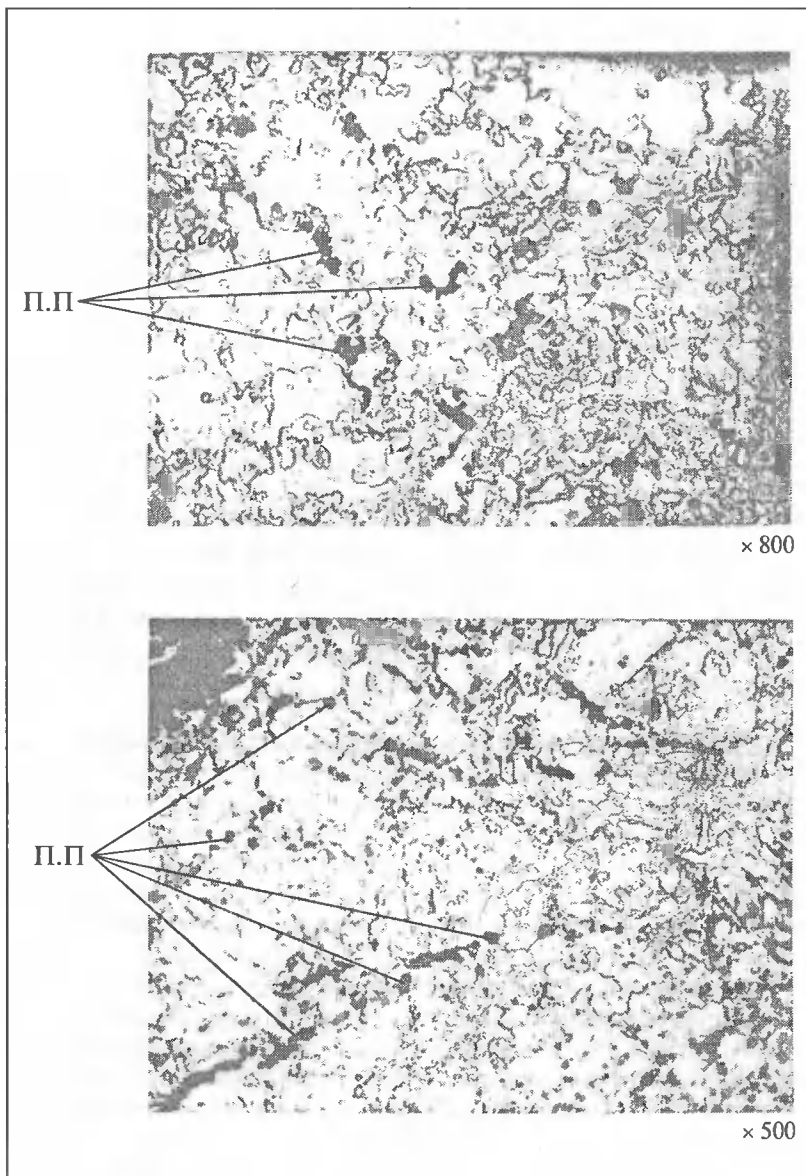


Рис. 2.2. Характер микроповреждённости порами ползучести (П.П) сварного соединения паропровода $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15Х1М1Ф). Микроповреждённость металла на стадии III.3п – IV.1п согласно [2.9]

Сварные соединения накопили микроповреждённость на стадиях III.3п – IV.1п, что указывает на исчерпание их ресурса примерно на 80 % согласно [2.9];

- длительность последующей эксплуатации сварных соединений до возможного появления макротрещин (в период исчерпания ресурса 85 – 90 %; стадия IVп) составит примерно 30 тыс. ч. Следовательно, индивидуальный ресурс по фактическому состоянию металла будет исчисляться сроком $\tau_{и.р} = 270$ тыс. ч;

- с учётом выявленной микроповреждённости металла необходимо предусмотреть проведение (через 10 – 12 тыс. ч эксплуатации) промежуточного контроля методом металлографического анализа сварных соединений и гибов на участках паропровода $\varnothing 159 \times 30$ мм (в местах действия повышенных напряжений) и врезок $\varnothing 245 \times 45 / \varnothing 159 \times 30$ мм стационарного паропровода в объёме 100 %. Одновременно следует ограничить продление ресурса паропровода на срок 30 тыс. ч до индивидуального ресурса $\tau_{и.р} = 270$ тыс. ч.

Результаты стилископирования труб металла швов. По результатам выборочного контроля методом спектрального анализа установлено:

- паропроводные трубы $\varnothing 245 \times 45$ мм и $\varnothing 159 \times 30$ мм изготовлены из низколегированного хромомолибденованадиевого материала — сталей 15X1M1Ф и 12X1MФ соответственно;

- металл сварных швов соответствует хромомолибденованадиевому материалу нормативного состава $Cr = 1,0$ %; $Mo = 0,5$ %; $V = 0,2$ %.

Разрушающий контроль для оценки фактического состава, структуры и свойств металла не проводился вследствие короткого срока остаточного продлеваемого ресурса (на 20 тыс. ч) и организационно-технических трудностей на ТЭС по выполнению вырезки из паропровода контрольного трубного участка с кольцевым швом.

Гидравлическое испытание паропровода ОП не проводилось, поскольку в процессе длительной эксплуатации не было зафиксировано повреждений сварных и бесшовных трубных элементов и не было замен трубопроводных участков.

Результаты проведённого обследования в целом позволяют положительно решать вопрос о продлении срока службы паропровода ОП после выработки паркового ресурса. Однако вследствие микроповреждённости металла продление ограничено сроком 20 тыс. ч до исчерпания паропроводом ОП индивидуального (остаточного) ресурса 270 тыс. ч, который должен быть подтверждён расчётом на прочность сварных и бесшовных трубных элементов.

2.3. РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ

Расчёт на прочность проводится в соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации [2.1, 2.10]. Контрольный расчет на прочность включает в себя выполнение следующих расчётных операций:

- определение приведённых напряжений (от внутреннего давления) для основных элементов стационарного паропровода;
- оценку выполнения условия прочности по результатам сопоставления значений фактического и допускаемого запаса прочности для всех типоразмеров сварных и бесшовных трубных элементов паропровода на назначенный индивидуальный (остаточный) ресурс $\tau_{н.р} = 270$ тыс. ч (после наработки $\tau_n = 240$ тыс. ч).

Допускаемые напряжения принимаются на назначаемый индивидуальный ресурс (с учётом установленного остаточного ресурса по микроповреждённости металла при обследовании сварных соединений и гибов паропровода ОП).

Приведённые напряжения согласно [2.10] определяются по формулам:

для прямых труб и сварных стыков (с кольцевым швом)

$$\sigma_p = (p/2)[D_n - (S_{f\min} - C_2)]/(S_{f\min} - C_2);$$

для гибов

$$\sigma_p = (p/2)[D_n - (S_{f\min} - C_2)/(K_i Y_i)] K_i Y_i / (S_{f\min} - C_2);$$

для сварных тройников

$$\sigma_p = [p/(2\varphi_c)][D_n/(S_{f\min} - C_2) - 1],$$

где p — давление пара; D_n — наружный диаметр; $S_{f\min}$ — минимальная фактическая толщина стенки, установленная методом ультразвуковой толщинометрии; C_2 — эксплуатационная прибавка к толщине стенки согласно [2.10], $C_2 = 0,5$ мм; Y_i , K_i — коэффициент формы и торовый коэффициент гiba соответственно; φ_c — расчётный коэффициент прочности при ослаблении отверстием тройника с учётом укрепления (расчёт согласно [2.10]).

Фактический запас прочности сварных и бесшовных трубных элементов паропровода устанавливается по формуле:

$$n_\sigma = 1,5[\sigma]/\sigma_p,$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение на ресурс 270 тыс. ч для $t = 545^\circ\text{C}$.

Прочность трубных элементов (и сварных соединений) обеспечивается при выполнении условия:

$$n_\sigma \geq [n_\sigma] = 1,25.$$

Минимальные значения допустимого запаса прочности $[n_\sigma] = 1,25$ принимаются согласно [2.1] с учётом выявленной при диагностировании пониженной жаропрочности металла (по микроповреждённости порами ползучести).

Результаты контрольного расчёта на прочность сварных и бесшовных трубных элементов паропровода острого пара рассмотрены в примере 2.3.

Пример 2.3. Провести контрольный расчёт на прочность сварных и бесшовных трубных элементов паропровода ОП (рег. условный № 222) (см. примеры 2.1 и 2.2). Исходные данные для расчёта приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Технические данные для расчёта на прочность элементов станционного паропровода ОП ($\tau_{н.р} = 270$ тыс. ч для $t = 545^\circ\text{C}$, $p = 25,5$ МПа)

Показатель	Прямые трубы (сварные стыки)		Гнутые трубы (гибы)*		Сварные тройники
D_n , мм	245	159	245	159	$\frac{159}{245}$
$S_{f\min}$, мм	44,2	29,0	43,8	28,6	$\frac{29,0}{44,2}$
Марка стали	15X1M1Ф	12X1МФ	15X1M1Ф	12X1МФ	$\frac{12X1МФ}{15X1M1Ф}$
$[\sigma]$, МПа	62,65	56,2	62,65	56,2	$\frac{56,2}{62,65}$
C_2 , мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
R , мм	—	—	1000	650	—
Y_i	—	—	0,9267	0,9293	—
K_i	—	—	0,9453	0,9456	—
$a_{\max}$, %	—	—	4,4	4,6	—
Φ_c	—	—	—	—	0,71

* Расчёт по растянутой (внешней) стороне гибов.

Условные обозначения: R — радиус кривизныгиба; $a_{\max}$ — максимальная овальностьгиба.

Таблица 2.3. Результаты контрольного расчёта на прочность элементов станционного паропровода ОП ($\tau_{н,р} = 270$ тыс. ч для $t = 545$ °С, $p = 25,5$ МПа)

$D_n \times S$, мм	Марка стали	$[\sigma]$, МПа	σ_p , МПа	n_σ	$[n_\sigma]$	$n_\sigma \geq [n_\sigma]$
Прямые трубы (и сварные стыковые соединения)						
245 × 45	15X1M1Ф	62,65	58,7	1,60	1,25	+
159 × 30	12X1MФ	56,20	58,4	1,44	1,25	+
Гнутые трубы (гибы)						
245 × 45	15X1M1Ф	62,65	50,5	1,86	1,25	+
159 × 30	12X1MФ	56,20	50,7	1,66	1,25	+
Сварные тройники						
245 × 45	15X1M1Ф	62,65	72,6	1,29	1,25	+
159 × 30	12X1MФ	56,20				

Примечание. Значок «+» означает, что элемент паропровода удовлетворяет условию прочности.

По результатам расчётных исследований установлено, что все элементы станционного паропровода ОП удовлетворяют условию прочности (табл. 2.3). Из этого следует, что по условию обеспечения нормативного запаса прочности указанный паропровод ОП может эксплуатироваться до истечения назначенного индивидуального срока службы 270 тыс. ч при параметрах $p = 25,5$ МПа, $t = 545$ °С.

2.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Заключение экспертизы по продлению ресурса паропровода I категории составляется по типовой форме согласно СО 153-34.17.470—2003 и содержит следующие разделы:

- введение — краткая постановка задачи;
- краткая характеристика объекта;
- результаты анализа технической документации, которая представляется владельцем паропровода;
- результаты обследования паропровода;
- результаты расчёта на прочность элементов паропровода;
- заключение (выводы и рекомендации) по техническому состоянию, сроку и условиям дальнейшей эксплуатации паропровода.

В примере 2.4 приводится краткое изложение экспертного заключения по продлению ресурса паропровода ОП.

Пример 2.4. Составить заключение экспертизы промышленной безопасности по техническому диагностированию паропровода ОП

и установлению возможности, срока и условий его дальнейшей эксплуатации. Основанием для составления экспертного заключения являются результаты обследования, проведённого по программе технического диагностирования, и расчёта на прочность (см. примеры 2.1 – 2.3). Ниже приводится краткое содержание экспертного заключения.

Заключение
экспертизы промышленной безопасности по техническому
диагностированию паропровода ОП ТЭС и установлению
возможности, срока и условий его дальнейшей эксплуатации

1. Вводная часть

Постановка задачи (основание для проведения экспертизы). Парковый ресурс станционного паропровода ОП для проектных параметров $t = 545\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 25,5\text{ МПа}$ составляет:

- 250 тыс. ч для гибов и 300 тыс. ч для прямых труб $\varnothing 245 \times 45\text{ мм}$, сталь 15Х1М1Ф;
- 160 тыс. ч для гибов и 225 тыс. ч для прямых труб $\varnothing 159 \times 30\text{ мм}$, сталь 12Х1МФ.

Фактическая наработка паропровода ОП в период эксплуатации 1972 – 2008 гг. составила 240 839 ч при 555 пусках. Среднегодовая наработка паропровода ОП равна примерно 6,8 тыс. ч/год. Фактическая температура пара при эксплуатации $t_f = 539 \div 549\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обследование паропровода ОП для продления его ресурса является первичным. Оно проводилось в период планового ремонта с 7 июля по 24 октября 2008 г.

Цель настоящей работы в рамках экспертизы промышленной безопасности состояла в проведении диагностирования станционного паропровода ОП с оценкой его технического состояния и установлением возможности, условий и срока безопасной дальнейшей эксплуатации после выработки паркового ресурса.

Экспертиза проведена в соответствии с основными требованиями [2.1 – 2.5].

Работа проводилась экспертной организацией по договору (номер и дата) с ТЭС.

Сведения об экспертной организации. Приводится информация по названию экспертной организации, её юридическому адресу, фамилии И. О. директора, номеру и сроку действия лицензии, названию организации выдавшей лицензию.

Сведения об экспертах и дефектоскопистах. Работа по экспертизе выполнена экспертами специализированной научно-исследовательской организации, назначенными распоряжениями в составе

(должности, фамилии И.О. экспертов, номера удостоверений аттестации и сроки действия).

Контроль элементов паропровода ОП неразрушающими методами выполнен лабораторией металлов и сварки ТЭС, аттестованной в установленном порядке в системе неразрушающего контроля (номер свидетельства).

Контроль неразрушающими методами выполнялся аттестованными в установленном порядке дефектоскопистами — специалистами неразрушающего контроля II уровня квалификации в составе (фамилии И.О., номера удостоверений и сроки действия).

Перечень объектов и цель экспертизы. Действие данного заключения экспертизы распространяется на стационарный паропровод ОП ТЭС.

Цель настоящей работы (экспертизы) состояла в оценке соответствия этого паропровода предъявляемым требованиям промышленной безопасности, подтверждении его работоспособности и выдаче рекомендаций по возможности, условиям и сроку его дальнейшей эксплуатации. Программа технического диагностирования приведена в примере 2.1.

Данные о заказчике. Приводятся название организации, юридический адрес, руководитель (должность), фамилия И. О.

Сведения о рассмотренных технических документах. По результатам выполненного контроля стационарного паропровода ОП ТЭС в ходе его диагностирования представлен комплект первичной технической документации (перечень справок, формуляров, сводных таблиц, заключений, актов приёмки после выполнения капитального ремонта паропровода ОП и наладки ОПС, протоколов с указанием номеров и дат проведения неразрушающего контроля).

2. Краткая характеристика паропровода ОП

Паропровод ОП рассчитан на температуру 545°C и давление 25,5 МПа, его эксплуатационная наработка на период проведения диагностирования в 2008 г. достигла 240 839 ч при 555 пусках. Среднегодовая наработка паропровода ОП не превысила 6,8 тыс. ч/год.

Парковый ресурс элементов паропровода ОП на параметры $p = 25,5 \text{ МПа}$, $t = 545^{\circ}\text{C}$ составляет:

- 300 и 250 тыс. ч соответственно для прямых труб (включая сварные стыки труб) и гибов $\varnothing 245 \times 45 \text{ мм}$ (сталь 15Х1М1Ф) стационарного паропровода;
- 225 и 160 тыс. ч соответственно для прямых труб (включая сварные стыки труб) и гибов $\varnothing 159 \times 30 \text{ мм}$ (сталь 12Х1МФ) паропроводов ОП к БРОУ.

Фактическая температура пара при эксплуатации $t_f = 539 \div 549$ °С. Эквивалентная температура пара $t_{эк} = 545,8$ °С.

Станционный паропровод ОП (четырёхниточный) изготовлен из труб $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15Х1М1Ф) и перемычек (паропроводов БРОУ), изготовленных из труб $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12ХМ1Ф).

Паропровод включает в себя следующие элементы основного типоразмера:

- 27 прямых труб $\varnothing 245 \times 45$ мм;
- 38 гнутых труб (гибов) $\varnothing 245 \times 45$ мм;
- 76 стыковых сварных соединений труб $\varnothing 245 \times 45$ мм;
- 4 сварных тройника $\varnothing 159 \times 30$ мм/ $\varnothing 245 \times 45$ мм;
- 8 задвижек DN 150;
- 11 прямых труб $\varnothing 159 \times 30$ мм;
- 35 гнутых труб (гибов) $\varnothing 159 \times 30$ мм;
- 48 стыковых сварных соединений труб $\varnothing 159 \times 30$ мм.

Размеры труб соответствуют требованиям [2.6].

3. Результаты анализа технической документации

Эксплуатация станционного паропровода ОП и техническое обслуживание велись (по информации владельца) в соответствии с требованиями Ростехнадзора РФ. На элементах паропровода за период эксплуатации 1972 — 2008 гг. повреждений не зафиксировано.

Комплексное обследование паропровода для продления его срока службы после выработки паркового ресурса проводилось впервые в 2008 г.

4. Результаты обследования паропровода ОП

Результаты обследования данного паропровода приведены в примере 2.2.

5. Результаты расчёта на прочность

Результаты контрольного расчёта на прочность сварных и бесшовных трубных элементов паропровода рассмотрены в примере 2.3.

6. Заключение (выводы и рекомендации)

6.1. Общее состояние трассы паропровода ОП и ОПС установлено удовлетворительным. При визуальном контроле паропровода в основном металле и сварных соединениях недопустимых дефектов не обнаружено.

6.2. По результатам контроля методами УЗК и МПД установлено удовлетворительное качество основного металла и сварных соеди-

нений; недопустимые дефекты на проконтролированных элементах паропровода ОП не выявлены.

6.3. По результатам измерительного контроля установлены фактические значения характеристик гибов и прямых труб:

- максимальная овальность гибов $a_{f\max} = 4,6 \%$;
- минимальная толщина стенки в растянутой (внешней) стороне $S_{f\min} = 43,8$ мм для гибов $\varnothing 245 \times 45$ мм и $S_{f\min} = 28,6$ мм для гибов $\varnothing 159 \times 30$ мм;
- минимальная толщина стенки прямых участков паропровода $S_{f\min} = 44,2$ мм и $S_{f\min} = 29,0$ мм соответственно для труб $\varnothing 245 \times 45$ мм и $\varnothing 159 \times 30$ мм;
- максимальная остаточная деформация ползучести $\varepsilon_{f\max} = 0,26 \%$ для гибов и $\varepsilon_{f\max} = 0,32 \%$ для прямых труб, что удовлетворяет нормативным требованиям [2.1].

6.4. По результатам измерения твёрдости установлено, что фактическая твёрдость металла швов сварных соединений характеризуется значениями $HB_{f\text{мш}} = 182 \div 197$, что соответствует нормативным требованиям $[HB_{f\text{мш}}] = 150 \div 240$ согласно [2.7].

Упрочнение швов составляет $\gamma_{\text{мш}} = HB_{f\text{мш}}/HB_{f\text{ом}} = 1,2$ и $1,36$ соответственно для соединений труб $\varnothing 245 \times 45$ мм (сталь 15X1M1Ф) и $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12X1MФ), что удовлетворяет нормативным требованиям $[\gamma_{\text{мш}}] = 1,0 \div 1,4$ [2.1].

6.5. По результатам металлографических исследований (рис. 2.2) выявлена повышенная микроповреждённость металла гибов и сварных соединений, что свидетельствует о значительном развитии процессов ползучести в этих элементах паропровода ОП.

По структурному фактическому состоянию металла сварных соединений (микроповреждённости) дальнейшая эксплуатация паропровода ОП после выработки паркового ресурса $\tau_{\text{п.р}} = 250$ тыс. ч должна быть ограничена сроком 20 тыс. ч (30 тыс. ч после накопленной наработки $\tau_{\text{н}} = 240$ тыс. ч) до назначенного индивидуального ресурса 270 тыс. ч.

6.6. По результатам контрольного расчёта на прочность установлено, что все элементы станционного паропровода ОП (прямые трубы, гибы и сварные соединения) удовлетворяют условию прочности на срок службы 270 тыс. ч при параметрах пара $p = 25,5$ МПа, $t = 545$ °С.

6.7. Паропровод ОП соответствует предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности и может быть допущен к дальнейшей эксплуатации на рабочих параметрах $t = 545$ °С, $p = 25,5$ МПа до общей наработки 270 тыс. ч.

6.8. Владельцу станционного паропровода ОП (с учётом микроповреждённости металла и действия повышенных напряжений на отдельных трубных участках) необходимо предусмотреть выполнение следующих мер:

- провести промежуточный контроль микроповреждённости металла гибов и прямых труб $\varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 12Х1МФ), включая сварные стыки на участках паропровода БРОУ (в местах действия повышенных напряжений), а также сварных тройников $\varnothing 245 \times 45 / \varnothing 159 \times 30$ мм (сталь 15Х1М1Ф/12Х1МФ) паропровода ОП в объёме 100 % через 10 – 12 тыс. ч эксплуатации, т.е. при накопленной наработке 250 – 255 тыс. ч;
- при обнаружении микроповреждённости выше 4-го балла по шкале [2.8] гибок и прямые трубы заменить новыми трубными элементами. При выявлении микроповреждённости выше стадии III_п – IV.1п [2.9] сварные соединения отремонтировать по технологии [2.11] или переварить по технологии [2.7].

Перечень использованных нормативных источников для паропроводов I категории

2.1. **СО 153-34.17.470–2003.** Инструкция о порядке обследования и продления срока службы паропроводов сверх паркового ресурса. ОАО ВТИ. 2004.

2.2. **ПБ 10-573–03.** Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды.

2.3. **ПБ 03-246–98.** Правила проведения экспертизы промышленной безопасности (Утверждены ГГТН РФ 06.11.98 за № 64, зарегистрированы Минюстом России 08.12.98 за № 1656).

2.4. **Положение** о порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах (Утверждено ГГТН РФ и зарегистрировано в Минюсте РФ 05.08.02 рег. № 3665).

2.5. **РД 10-369–00.** Положение по проведению экспертизы промышленной безопасности паровых и водогрейных котлов, сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды (Утверждено постановлением ГГТН РФ 10.07.2000 за № 40).

2.6. **ТУ 14-ЗР-55–2001.** Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия.

2.7. **СО 153-34.003–01 (РД 153-34.1-003–01).** Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования.

2.8. **ОСТ 34-70-690—96.** Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации.

2.9. **СО 153-34.17.467—2001 (РД 153-34.1-17.467—2001).** Экспрессный метод для оценки остаточного ресурса сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов по структурному фактору.

2.10. **РД 10-249—98.** Нормы расчёта на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.

2.11. **РД 34.17.310—96.** Сварка, термообработка и контроль при ремонте сварных соединений трубных систем котлов и паропроводов в период эксплуатации.

2.12. **РД 10-577—03.** Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.

Приложение № 1

Копии лицензий экспертной организации и лаборатории металлов и сварки на ТЭС, копии удостоверений аттестованных экспертов и специалистов неразрушающего контроля — дефектоскопистов

Приложение № 2

Программа технического диагностирования паропровода I категории при выработке нормативного ресурса на тепловой электростанции; проектные параметры пара: $p = 25,5$ МПа, $t = 545$ °С

Приложение № 3

Справки, формуляры, акты, протоколы, заключения по результатам проведённого неразрушающего контроля и условиям эксплуатации трубопроводных участков паропровода ОП

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Трубопроводы II – IV категорий

3.1. ПРОГРАММА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Программа диагностирования включает в себя процедуры по обследованию трубопроводов и расчёту на прочность сварных и бесшовных трубных элементов согласно СО 153-34.17.464—2003 (рис. 3.1).

Программу контроля технического состояния объекта (диагностирования) согласно [3.1] выбирают или разрабатывают в зависимости от категории трубопровода и условий его эксплуатации следующие организации:

- для трубопроводов II категории, отработавших установленный срок службы, — экспертная организация;
- для трубопроводов независимо от категории, отработавших 40 лет и более или имевших аварию, — экспертная организация;
- для трубопроводов III и IV категорий, имеющих накопленную наработку менее 40 лет и не претерпевших аварий, — лаборатории (службы) металлов электростанций, электрогенерирующих компаний или энергоремонтных предприятий, проводящих контроль данных трубопроводов.

Программа обследования включает в себя выполнение процедур: анализ технической документации, визуальный контроль, контроль неразрушающими методами, исследование металла на вырезках и репликах, расчёт на прочность, гидравлические испытания.

В программе предусматриваются требования о представлении предприятием — владельцем трубопровода для экспертизы необходимой технической документации в систематизированном виде:

- данные по эксплуатационному контролю, условиям эксплуатации, проведённым заменам элементов;



Рис. 3.1. Процедуры, выполняемые при техническом диагностировании трубопроводов II – IV категорий согласно СО 153-34.17.464–2003 ($N_{\Delta t, \Delta p}$ — число циклов изменения температуры и давления; ОМ — основной металл. Остальные обозначения см. на рис. 2.1)

- протоколы (заключения) о результатах проведённого неразрушающего контроля (в требуемых объёмах и необходимыми методами) сварных и бесшовных трубных элементов;

- акты о результатах ревизии трубопроводной и опорно-подвесной систем;

- заключения о результатах исследования сварного стыкового соединения (и основного металла), вырезанного из обследуемого трубопровода. Исследование структуры и свойств металла выполняет специализированная организация;

- протоколы (заключения) о проведении контроля микроповреждённости (контроль на графитизацию с реплик или сколов) металла для трубопроводов II категории группы 1 (после выработки назначенного срока), II категории группы 2 и III категории группы 1 (после выработки не менее двух назначенных сроков службы или имеющих аварии). Металлографический анализ выполняет лаборатория металлов на ТЭС или экспертная организация;

- данные о результатах расчёта на прочность сварных и бесшовных трубных элементов, который проводит экспертная организация.

На основании результатов обследования и расчётов на прочность экспертная организация разрабатывает заключение экспертизы промышленной безопасности о возможности, сроке и параметрах дальнейшей эксплуатации трубопровода.

В примере 3.1 приводится программа диагностирования трубопровода II категории группы 1 после длительной эксплуатации, составленная для продления срока службы согласно СО 153-34.17.464–2003.

Пример 3.1

Программа технического диагностирования трубопровода II категории группы 1, отработавшего нормативный срок службы при параметрах пара $p = 3,2$ МПа, $t = 425$ °С

1. Цель технического диагностирования:

- установить возможность безопасной дальнейшей эксплуатации трубопровода и выдать (в случае необходимости) рекомендации по его ремонту и/или наладке;

- определить сроки и условия дальнейшей эксплуатации паропровода после максимальной наработки $\tau_n \approx 490$ тыс. ч его отдельных участков.

2. Техническому диагностированию подлежит паропровод (рег. условный № 444).

3. Подготовка паропровода к диагностированию выполняется силами и средствами владельца. Работы по диагностированию проводятся на холодном (неработающем) паропроводе с соблюдением

правил техники безопасности. Перед остановом паропровода и выводом его в диагностику проводится предварительный осмотр в рабочем состоянии. Для выполнения визуально-измерительного контроля и дефектоскопии сварных и бесшовных трубных элементов проводится операция по удалению теплоизоляционного покрытия с паропровода в местах контроля и измерений.

4. Техническая документация, которую передает владелец паропровода для анализа в экспертную организацию, включает:

- эксплуатационно-техническую документацию на паропровод: паспорт, исполнительные схемы, монтажно-сборочные чертежи, режимы работы, дефекты металла и ОПС, перечень аварий, перечень арматуры;
- информацию по технологии изготовления деталей и монтажу (свидетельства об изготовлении элементов и о монтаже паропровода, формуляры наладки ОПС);
- результаты эксплуатационного контроля сварных и бесшовных трубных элементов, информацию о ремонте и/или замене новыми элементами или участками паропровода;
- информацию о фактических условиях эксплуатации по годам наработки: температуре, давлению, длительности наработки, числу циклов пусков-остановов.

5. Визуальный и измерительный контроль при техническом диагностировании проводится силами владельца в объемах, представленных табл. 3.1, и включает:

- наружный осмотр паропровода в горячем (рабочем) состоянии для оценки общего состояния трубопроводной системы (отсутствия/наличия провисаний, прогибов, противоуклонов и т.п.), опорно-подвесной системы (отсутствия/наличия разрушений опор и пружин, обрывов подвесок и т.п.), указателей тепловых перемещений и дренажей.

Нормы и критерии оценки технического состояния паропровода регламентированы СО 153-34.17.464—2003. Результаты наружного осмотра оформляются актами по общему состоянию паропровода;

- наружный осмотр паропровода в холодном (нерабочем) состоянии для оценки соответствия трассировки паропровода монтажно-сборочному чертежу с измерением отсутствующих геометрических размеров трассы. Также осмотр проводится для оценки состояния тепловой изоляции с кожухом наружного покрытия паропровода, наличия и соответствия типов опор и подвесок монтажно-сборочному чертежу с проверкой их исправности (сварных швов опор скользящего и неподвижных опор, отсутствия/наличия обрывов тяг подвесок, разрушения и выпучивания пружин).

Таблица 3.1. Объёмы контроля при техническом диагностировании трубопровода II категории группы 1 (рег. условный № 444) ТЭС

Метод контроля	Объём контроля	Зоны контроля	Примечание
Трубопроводная и опорно-подвесная системы			
Наружный осмотр в горячем (рабочем) состоянии	100 %	—	Контроль трассировки трубопровода и состояния ОПС
Наружный осмотр в холодном состоянии	100 %	Теплоизоляция и кожух, трассировка, элементы ОПС	То же
Гибы (гнуемые трубные элементы)			
ВК	50 % по каждому типоразмеру ггиба	—	Измерение радиуса, овальности, формы
УЗК, МПД	20 % по каждому типоразмеру ггиба	По всей длине и периметру гнутой части	При обнаружении дефекта объём контроля увеличивается до 100 %
УЗТ	25 % по каждому типоразмеру ггиба	В трёх сечениях центральной части ггиба	—
Измерение твердости (ТВ)	Два ггиба каждого типоразмера на паропровод	В трёх сечениях центральной части ггиба	—
Исследование структуры и свойств (на вырезке)	Одна вырезка на трубопровод	Гиб со сварным стыковым соединением	—
Конические переходы			
ВК	50 %	—	—
УЗК	100 % продольных швов переходов	—	При наличии продольных швов
УЗТ	50 %	В двух контрольных сечениях, в каждом по четыре контрольные точки	Объём контроля 100 % для сварных переходов
Корпуса арматуры			
ВК	100 %	—	—
МПД	Один корпус арматуры каждого типоразмера на паропровод	Наружная поверхность радиусных переходов	Контролируется 100 % площади радиусных переходов
	100 % мест выборки дефектов и ремонтных заварок	Поверхность выборки, заварок и примыкающие зоны шириной не менее 30 мм	—

Метод контроля	Объём контроля	Зоны контроля	Примечание
УЗТ	20 % корпусов и не менее одного корпуса каждого типоразмера на паропровод	Точки контроля согласно СО 153-34.17.464—2003 (положение В)	Для литых корпусов контролируется толщина стенки только патрубков
Заглушки (донышки)			
ВК	100 %	—	Диаметр детали устанавливается по наружному диаметру трубы
УЗТ	50 %	Точки контроля согласно СО 153-34.17.464—2003 (положение В)	При наличии приварных рёбер жесткости — не менее одной точки контроля на каждом сегменте
Прямые трубы			
ВК	Участки, примыкающие к фасонным элементам, арматуре	Участки длиной не менее 500 мм от сварного шва	Также контролируются прямые участки в местах прохода паропровода через стенки, площадки и вблизи неподвижных опор
УЗТ	Три контрольных сечения на каждые 100 м паропровода каждого типоразмера	Точки контроля (см. СО 153-34.17.464—2003, положение В)	Толщина стенки контролируется в четырёх точках, одна из которых находится на нижней образующей горизонтального участка
Стыковые сварные соединения прямых труб			
ВК	Не менее 50 %	Сварной шов и примыкающие зоны шириной не менее 50 мм	Контролируются также сварные соединения вблизи неподвижных опор
УЗК, МПД	Не менее 50 %	То же	При отбраковке хотя бы одного стыка объём контроля увеличивается до 100 %
УЗТ	Не менее 50 %	Пришовная зона примыкающих к шву труб	—
Измерение твёрдости (ТВ)	Одно соединение на каждый типоразмер труб	Сварной шов, ЗТВ, основной металл	—

Метод контроля	Объём контроля	Зоны контроля	Примечание
Исследование металла на вырезке	Не менее одной вырезки на паропровод $D_H = 325 \div 382$ мм	—	Контроль для определения механических свойств, сплошности и графитизации

Стыковые сварные соединения труб с фасонными элементами

ВК	100 %	Сварной шов и примыкающие зоны шириной $l \geq 50$ мм по всему периметру	—
УЗК, МПД	100 %	То же	—
УЗТ	Не менее 50 %	Пришовная зона примыкающих к шву разнотолщинных трубных элементов	—
Измерение твёрдости (ТВ)	Одно соединение на каждый типоразмер паропровода	Сварной шов, ЗТВ и основной металл соединения	—

Сварные тройники и врезки

ВК, УЗК, МПД	100 %	Угловой шов и примыкающие зоны шириной не менее 50 мм по всему периметру	—
УЗТ	100 %	Пришовные зоны, примыкающие к угловому шву коллектора (трубы) и штуцера	Точки контроля (см. СО 153-34.17.464—2003, положение В)
Измерение твёрдости (ТВ)	По одному соединению каждого типоразмера на паропровод	МШ, ЗТВ и ОМ соединения	—

Примечания: 1. Вырезку стыкового сварного соединения для оценки механических свойств, сплошности и микрповреждённости металла следует проводить на начальных участках паропровода со стороны подвода рабочей среды (на участках с максимальными температурой и давлением пара). 2. Измерение толщины стенки трубных элементов (гибов, сварных тройников, врезок, прямых труб, арматуры, переходов) проводится в контрольных точках по схемам согласно СО 153-34.17.464—2003 (положение В).

Техническое состояние паропровода по результатам внешнего осмотра устанавливается с учётом норм и критериев оценки согласно СО 153-34.17.464—2003 и оформляется соответствующими актами;

- визуальный контроль металла паропровода с проведением измерений. Предварительно контролируемые участки и элементы паропровода освобождаются от обшивки (кожухов) и теплоизоляции. Объёмы визуально-измерительного контроля представлены в табл. 3.1. Результаты проверки оцениваются по нормативным критериям качества согласно СО 153-34.17.464—2003.

6. Дефектоскопия основного металла элементов паропровода проводится силами владельца с помощью неразрушающих методов контроля УЗК и МПД в объёмах, указанных в табл. 3.1. В первую очередь контролю подлежат места выборок дефектов (трещин) и ремонтных заварок с примыкающей зоной основного металла шириной не менее 30 мм. При обнаружении недопустимых дефектов в основном металле и ремонтных заварках объём контроля элементов данного типоразмера удваивается. Оценка качества элементов паропроводов проводится в соответствии с требованиями СО 153-34.17.464—2003.

7. Дефектоскопия сварных соединений паропровода проводится силами владельца методом УЗК и одновременно методом МПД или ЦД в объёмах и местах, указанных в табл. 3.1. Повышенный объём контроля (не менее 50 %) для стыковых сварных соединений соответствует рекомендациям заключения предыдущей экспертизы промышленной безопасности 2003 г. Увеличенный до 100 % объём контроля методами УЗК и МПД для врезок обусловлен исчерпанием их расчётного ресурса в условиях длительной эксплуатации сверх $3 \cdot 10^5$ ч. Факт исчерпания срока службы этих элементов предварительно установлен по результатам выборочного расчёта с учётом регламентированного утонения толщины стенки на значение $C = C_1 + C_2$.

Оценка качества сварных соединений по результатам дефектоскопии проводится в соответствии с требованиями СО 153-34.17.464—2003.

8. Контроль толщины стенки элементов паропровода проводится силами владельца методом ультразвуковой толщинометрии в объёмах и местах, указанных в табл. 3.1. При выявлении утонённой (или увеличенной) толщины стенки по сравнению с номинальной выполняется расчёт ресурса сварных соединений и бесшовных элементов паропровода по фактической толщине стенки.

9. Измерение твёрдости основного металла элементов и сварных соединений паропровода проводится силами владельца в объёмах и местах, указанных в табл. 3.1.

10. Исследование свойств и структуры сварного соединения (вырезанного силами владельца из действующего паропровода) проводится экспертной организацией. Вырезанный патрубок («катушка») включает кольцевой шов в центре патрубка и примыкающие к шву с обеих сторон кольцевые участки основного металла шириной не менее 130 мм (после огневой резки) и не менее 100 мм (после механической обработки).

11. Гидравлическое испытание паропровода выполняется (силами владельца) согласно требованиям ПБ 10-573-03 «Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды».

12. Анализ результатов технического диагностирования и проведение расчётов на прочность с оформлением Заключения экспертизы промышленной безопасности паропровода (рег. условный № 444) ТЭС выполняет экспертная организация.

3.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Обследование паропровода проводится согласно индивидуальной программе технического диагностирования с применением неразрушающего и разрушающего методов контроля для конкретного трубопровода II – IV категорий. Результаты контроля оформляются актами, протоколами, заключениями организации, проводившей контроль и/или исследование.

По результатам каждого контроля даётся оценка соответствия (или несоответствия) полученных результатов обследования нормативным требованиям.

Анализ результатов обследования трубопровода II категории группы I рассмотрен в примере 3.2.

Пример 3.2. Результаты обследования трубопровода I категории группы I по программе технического диагностирования (пример 3.1)

Наружный осмотр. Наружному осмотру подвергались трубопроводные системы паропровода (рег. условный № 444) в холодном и горячем (рабочем) состояниях.

По результатам наружного осмотра паропровода в холодном состоянии установлено:

- отсутствие провисаний, прогибов, защемлений на трассах трубопроводов и коллекторов, соответствие их трассировки чертежам; отдельные замечания по теплоизоляции устранены;
- удовлетворительное состояние ОПС и арматуры.

По результатам наружного осмотра паропровода в горячем состоянии установлено:

- отсутствие провисаний, прогибов, обрыва подвесок, разрушения опор и других дефектов трассы и ОПС;

- удовлетворительное состояние ОПС.

Визуальный контроль металла. Визуальному контролю подвергались сварные соединения, прямые трубы и гибы паропровода ОП.

По результатам визуального контроля установлено:

- отсутствие расслоений металла, коррозионных повреждений, трещин и других недопустимых дефектов;
- соответствие качества наружной поверхности металла нормативным требованиям.

По результатам поэлементного визуального контроля дополнительно установлено:

- соответствие качества сварных соединений и гибов нормативным требованиям; недопустимые дефекты не выявлены;
- соответствие качества задвижек, редукционного клапана и перехода нормативным требованиям; данные фасонные элементы признаны годными.

Дефектоскопия сварных соединений. По результатам контроля методами ЦД и УЗК установлено удовлетворительное качество сварных соединений. Недопустимые дефекты не обнаружены.

Дефектоскопия основного металла. По результатам контроля методами ЦД и УЗК установлено удовлетворительное качество гибов, прямых труб, врезок, задвижек. Недопустимые дефекты не выявлены.

Измерительный контроль толщины трубных элементов. Контролю методом ультразвуковой толщинометрии подвергались прямые трубы, гибы, сварные соединения, включая врезки.

По результатам проведённого контроля установлены значения фактической толщины стенки трубных элементов паропровода (табл. 3.2). Утонение стенки элементов составляет примерно 2 — 16 %. Минимальные значения фактической толщины стенки S_{fmin} приняты в расчёт на прочность элементов паропровода.

Измерительный контроль гибов. По результатам измерительного контроля определены значения овальности и размеры радиусов гибов (табл. 3.3). Максимальная овальность и размеры радиусов приняты в расчёт на прочность гибов.

Контроль твёрдости металла проводился с использованием переносного твёрдомера типа “ТЕМР-2”. Анализ полученных данных по измерению твердости свидетельствует о следующем (табл. 3.4):

- фактическая твёрдость металла гибов составляет $(131 \div 146) \text{HB}_{f(\text{гнб})}$, что соответствует нормативным требованиям $(110 \div 180) \text{HB}$ для углеродистого материала (стали 20) согласно [3.1];
- фактическая твёрдость металла шва сварных соединений определена значениями $(128 - 150) \text{HB}_{f\text{мш}}$, что свидетельствует о равнопрочности сварных соединений и основного металла.

Таблица 3.2. Результаты измерения фактической толщины стенки трубных элементов на паропроводе (рег. условный № 444)

Трубопровод	Элемент	$D_n \times S$	S_f , мм	$S_{f\min}$, мм
Коллектор от ресивера	ССС	377×16	15,7 – 16,4	15,7
	ПУТ	377×16	15,9 – 16,8	15,9
	Гибы	377×16	15,2 – 16,9	15,2
		325×15	13,0 – 15,5	13,0
	Врезки	325×15	14,0 – 16,8	14,0
Главный коллектор	ССС	382×16	15,7 – 16,2	15,7
		273×12	11,9 – 12,4	11,9
	ПУТ	382×16	15,2 – 15,4	15,2
		377×16	15,1 – 15,5	15,1
	КП	$273/382 \times 16$	14,8 – 17,0	14,8
	Тройники	382×16	14,5 – 17,2	14,5
		377×16	16,6 – 17,6	16,6
		325×15	15,6 – 17,1	15,6
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка I)	ССС	273×12	10,3 – 12,9	10,3
	ПУТ	273×12	11,5 – 15,1	11,5
	Гибы	273×12	10,4 – 10,9	10,4
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	ССС	273×12	10,1 – 12,9	10,1
	ПУТ	273×12	11,9 – 15,1	11,9
	Гибы	273×12	10,0 – 11,5	10,0
Паропровод РОУ 33/7 № 1 (нитка II)	ССС	278×16	14,9 – 16,2	14,9
	ПУТ	278×16	15,6 – 16,2	15,6
	Гибы	273×12	15,4 – 15,9	15,4
Паропровод РОУ 33/7 № 2 (нитка I)	ССС	278×16	15,6 – 16,2	15,6
	ПУТ	278×16	17,3 – 17,9	17,3
		273×12	15,6 – 16,2	15,6
	Гибы	278×16	15,5 – 15,7	15,5
	Врезки	273×12	15,6 – 16,2	15,6

Условные обозначения: ПУТ — прямой участок трубы; КП — конический переход; $D_n \times S$ — наружный диаметр и толщина стенки трубного элемента (номинальные размеры).

Примечание. Значения S_f и $S_{f\min}$ по гйбам приведены для растянутой части.

Таблица 3.3. Результаты измерительного контроля гйбов паропровода (рег. условный № 444)

Трубопроводная система	$D_n \times S$, мм	a_f , %	$a_{f\max}$, %	R , мм
Коллектор от ресивера	377×16	3,67 – 3,88	3,88	900
	325×15	2,77	2,77	900
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка I)	273×12	3,84 × 4,33	3,84	850
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	273×12	3,87 – 4,73	3,87	850
Паропровод РОУ 33/7 № 1 (нитка II)	278×16	3,61 – 4,39	3,61	900
Паропровод РОУ 33/7 № 2 (нитка I)	278×16	3,37 – 4,19	3,37	900

Таблица 3.4. Результаты измерения твёрдости элементов паропровода (рег. условный № 444)

Трубопроводная система	Элемент	$D_n \times S$, мм	HV_f	HV_{fmid}
Коллектор от ресивера	МШ	377	139 – 150	144
		325	132 – 148	140
Главный коллектор (нитка II)	МШ	382	138 – 145	142
		377	139 – 145	143
		340	139 – 147	143
		325	141 – 146	142
		300	141 – 149	145
		250	138 – 142	140
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка I)	МШ	273×12	129 – 137	133
	Гибы	273×12	133 – 136	135
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	МШ	273×12	128 – 137	132
	Гибы	273×12	133 – 136	132
Паропровод РОУ 33/7 № 1 (нитка II)	МШ	278×16	129 – 143	138
	Гибы	273×12	131 – 139	135
Паропровод РОУ 33/7 № 2 (нитка I)	МШ	273×12	138 – 147	142
	Гибы	273×12	141 – 146	144

Условные обозначения: HV_f — фактическая твёрдость (интервал значений); HV_{fmid} — фактическая твёрдость (средние значения); МШ — металл шва.

Исследование свойств и структуры сварного соединения, вырезанного из паропровода $\varnothing 273 \times 12$ мм, после наработки 487 125 ч. Проводились кратковременные механические испытания образцов и металлографические исследования шлифов поперечного сечения.

Испытанию подвергались образцы на растяжение и ударный изгиб КСУ при комнатной и рабочей температуре; шлифы для измерения твёрдости HV — при комнатной температуре. Форма и размеры образцов, а также обработка результатов соответствовали требованиям [3.11]. Испытания образцов на растяжение и ударный изгиб, а также химический анализ металла проводились Испытательным центром «Теплотехник» ОАО ВТИ, а измерение твёрдости — лабораторией сварки ОАО ВТИ.

Макроанализ выполнялся с увеличением $\times 1$ и $\times 3$ макрошлифов, а микроанализ — при увеличении $\times 100$ и $\times 500$ металла зон микрошлифов на оптическом микроскопе NEOFOT-32. Шлифы подготавливались согласно требованиям и рекомендациям [3.6]. Металлографические исследования осуществлялись лабораторией сварки ОАО ВТИ.

Одновременно лабораторией сварки ОАО ВТИ проводился микроанализ металла восьми сколов, снятых с гибов, врезок, прямых труб в целях выявления свободного графита на элементах паропровода (табл. 3.5). Результаты исследований металла сколов приведены в табл. 3.9.

Химический состав металла сварного соединения. Химический анализ выполнялся с помощью прибора PMI Macter 0210041 Optik 0210036. Из результатов химического анализа следует (табл. 3.6):

- основной металл паропроводных труб отвечает нормативным требованиям к химическому составу углеродистого материала (стали 20);
- металл шва соответствует нормативным требованиям к химическому составу наплавленного металла электродов Э50А.

Механические свойства сварного соединения. Образцы для испытаний (на растяжение, ударный изгиб и замер твёрдости) изготавливались механическим способом и испытывались согласно ГОСТ 6996 [3.11].

Из результатов проведённых исследований можно отметить следующее (табл. 3.7):

Таблица 3.5. Места снятия сколов с элементов паропровода (рег. условный № 444)

Паропровод	Типоразмер, мм	Элемент паропровода	Номер схемы/формуляра
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	Ø273 × 12	СС № 14	Т1-264
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	Ø273 × 12	Прямой участок гiba между СС № 13 и 14	Т1-264
Главный коллектор (нитка II)	Ø382 × 16 Ø377 × 16	СС № 6 конического перехода	ТЭ-2753
Главный коллектор (нитка II)	Ø382 × 16 Ø325 × 15	СС № 11 со стороны штуцера врезки	ТЭ-2753
Паропровод РОУ 33/7 № 1	Ø278 × 16	СС № 11	ТЭ-2754
Паропровод РОУ 33/7 № 1	Ø273 × 12	Прямой участок гiba Г2	ТЭ-2754
Паропровод РОУ 33/7 № 1	Ø278 × 16 Ø278 × 16	СС № 3а со стороны штуцера врезки	ТЭ-2754
Паропровод РОУ 33/7 № 1	Ø278 × 16 Ø278 × 16	СС № 3а со стороны коллектора	ТЭ-2754

Условные обозначения: Т1-264...ТЭ-2754 — номера схем (формуляров) на отдельные трубопроводные системы паропровода II категории группы I.

Таблица 3.6. Химический состав зон сварного соединения $\varnothing 273 \times 12$ мм паропровода (рег. условный № 444) (сталь 20)

Элемент	Объект исследования			Нормативные требования для металла	
	ОМ ₁	ОМ ₂	Металл шва (Э50А)	стали 20 по [3.8]	наплавки (Э50А) по [3.9]
C	0,21 – 0,23	0,20 – 0,23	0,11 – 0,12	0,17 – 0,24	0,08 – 0,12
Si	0,29 – 0,31	0,19 – 0,20	0,19 – 0,21	0,17 – 0,37	0,18 – 0,40
Mn	0,61 – 0,63	0,42 – 0,43	0,82 – 0,84	0,35 – 0,65	0,80 – 1,00
S	0,01 – 0,02	0,005 – 0,009	0,009 – 0,014	Не более 0,025	Не более 0,040*
P	Менее 0,005	Менее 0,005	Менее 0,005	Не более 0,030	Не более 0,045*
Cr	0,075 – 0,080	0,044 – 0,045	Менее 0,005	Не более 0,25	—
Ni	0,14 – 0,15	0,036 – 0,039	0,030 – 0,043	Не более 0,25	—
Cu	0,21 – 0,22	0,272 – 0,277	0,142 – 0,154	Не более 0,30	—

* Требования по ГОСТ 9467 [3.12].

Условные обозначения: ОМ₁ и ОМ₂ — основной металл труб с одной и другой стороны сварного шва соединения; Э50А — тип покрытого электрода для выполнения сварного шва.

• кратковременные механические свойства сварного соединения при температуре 20 °С соответствуют нормативным требованиям; при повышенной температуре оно характеризуется необходимой прочностью, высокой пластичностью и ударной вязкостью;

• твёрдость металла шва находится в диапазоне значений $(142 \div 146)HV_{\text{мш}}$; основного металла (сталь 20) — примерно

Таблица 3.7. Механические свойства сварного соединения $\varnothing 273 \times 12$ мм паропровода (рег. условный № 444) (сталь 20)

Исследуемый металл	t_n , °С	σ_B , кгс/мм ²	ψ , %	KCU, кгс · м/см ²
Стыковое соединение труб $\varnothing 159 \times 8$ мм	20	$\frac{46,5 - 54,3}{50,4}$	$\frac{58,7 - 62,4}{60,6}$	$\frac{27,9 - 28,9}{28,4}$
	425	$\frac{50,5 - 57,1}{53,8}$	$\frac{53,9 - 62,4}{55,8}$	$\frac{30,6 - 31,8}{31,2}$
Требования [3.8 и 3.9]	20	$\sigma_B \geq 42,0$	$[\psi] \geq 45$	$[KCU] \geq 5$

Примечания: 1. В числителе дроби приведены минимальные и максимальные значения, а в знаменателе — средние значения свойств. 2. Для каждой температуры испытывалось по четыре образца.

Условные обозначения: σ_B — временное сопротивление разрыву; ψ — относительное сужение в месте разрушения образца; KCU — ударная вязкость при испытании образцов типа VI по ГОСТ 6996 [3.11]; t_n — температура испытания.

$(140 \div 143)HV_{OM}$ и зоны термического влияния — около $(134 \div 140)HV_{ЗТВ}$.

Разупрочнение ЗТВ сварного соединения характеризуется значением $\xi_{ЗТВ} \approx 6\%$ (из расчета $100\Delta HV_{ЗТВ}/HV_{OM}$), а упрочнение металла шва $\gamma_{МШ} \approx 1,02$ (из результатов расчёта $\gamma_{МШ} = HV_{МШ}/HV_{OM}$). Твёрдость основного металла соответствует нормативным требованиям [3.1].

Выявленные значения твёрдости и её неоднородность по зонам сварного соединения углеродистого материала (стали 20) являются типичными и допустимыми;

- по механическим кратковременным свойствам сварное соединение характеризуется высокой работоспособностью.

Металлографические исследования сварного соединения включали в себя макроанализ и микроанализ шлифов поперечного сечения.

Из результатов макроанализа следует, что стыковое сварное соединение сохранило свою форму и размеры. Многослойный сварной шов выполнен в V-образную разделку кромок на подкладном остающемся кольце и имеет внешнюю выпуклость высотой около 3 мм, шириной примерно 30 мм. В сварном шве и зоне сплавления недопустимые дефекты не выявлены. Качество сварного соединения отвечает нормативным требованиям [3.1, 3.9].

По результатам микроанализа установлено следующее (табл. 3.8):

- в сварном соединении отмечается некоторое различие микроструктуры металла зон по количеству перлитной составляющей и размеру зерна, что обусловлено химической неоднородностью основного металла и металла шва, а также технологическим влиянием сварки (неравномерным нагревом зон соединения);

- основной металл характеризуется феррито-перлитной структурой. Размер зерна соответствует № 5 — 7 согласно [3.10]. Металл сварного шва имеет феррито-перлитную микроструктуру с содержанием перлитных участков около 15 %. В околосшовной зоне (вдоль

Таблица 3.8. Микроструктура металла зон сварного соединения $\varnothing 273 \times 12$ мм паропровода (рег. условный № 444) (сталь 20)

Зона сварного соединения	Составляющие микроструктуры	Количество П, %	Размер зерна, номер по [3.10]	Сфероидизация П, балл по [3.6]	Наличие графита
ОМ	Ф + П	~ 20	5 — 7	1	Нет
МШ	Ф + П	15	4 — 7	1	Нет
ОЗ	Ф + П	~ 20	4 — 6	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	Менее 15	8 — 9	1	Нет

Условные обозначения: ОЗ — околосшовная зона; ЗТВ_{рп} — «разупрочнённая» прослойка ЗТВ; Ф — феррит; П — перлит.

Таблица 3.9. Результаты микроанализа металла сколов, снятых с гибов, сварных соединений, врезок паропровода (рег. условный № 444) (см. табл. 3.5)

Зона исследования	Составляющие микро-структуры	Количество П, %	Размер зерна, номер по [3.10]	Сферо-идизация П, балл по [3.6]	Наличие графита
Сварное соединение № 14 паропровода ТЭЦ – ПВС (нитка II)					
ОМ	Ф + П	~ 20	5 – 6	1	Нет
МШ	Ф + П	15	4 – 6	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	~ 20	8 – 9	1	Нет
Прямой участокгиба между сварными стыками № 13 и 14 паропровода ТЭЦ – ПВС (нитка II)					
ОМ	Ф + П	~ 20	5 – 6	1	Нет
Сварное соединение № 6 главного коллектора (нитка II)					
ОМ	Ф + П	~ 20	5 – 6	1	Нет
МШ	Ф + П	15	5 – 7	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	Менее 20	8 – 9	1	Нет
Сварное соединение № 11 паропровода РОУ 33/7 № 1					
ОМ	Ф + П	~ 25	5 – 6	1	Нет
МШ	Ф + П	20	5 – 6	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	Менее 20	8 – 9	1	Нет
Прямой участокгиба (Г2) паропровода РОУ 33/7 № 1					
ОМ	Ф + П	~ 20	5 – 6	1	Нет
Сварное соединение врезки № 3а (со стороны штуцера) паропровода РОУ 33/7 № 1					
ОМ	Ф + П	~ 15	5 – 6	1	Нет
МШ	Ф + П	20	4 – 6	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	Менее 15	8 – 9	1	Нет
Сварное соединение врезки № 3а (со стороны коллектора) паропровода РОУ 33/7 № 1					
ОМ	Ф + П	~ 20	5 – 6	1	Нет
МШ	Ф + П	20	5 – 7	1	Нет
ЗТВ _{рп}	Ф + П	~ 20	8 – 9	1	Нет

линии сплавления) имеется характерный участок крупных зёрен со структурой видманштетта с ферритной оторочкой; такая структура соответствует баллу 1 шкалы 2 согласно [3.8]. Установленная микро-структура является типичной для сварных соединений углеродистого материала (стали 20);

- свободный графит в металле зон сварного соединения не выявлен;

- микроструктура сварного соединения является допустимой.

Исследование микроструктуры на сколах проводилось в целях выявления фактического состояния металла на гibaх, сварных стыковых соединениях и врезках паропровода (см. табл. 3.5). Микрошлифы подготавливались и подвергались травлению согласно требованиям и рекомендациям [3.6].

По результатам исследований микроструктуры установлено следующее (табл. 3.9):

- металл зон сварных соединений имеет феррито-перлитную структуру. Размер зёрен основного металла соответствует № 5 – 6, металла шва — № 4 – 7, разупрочнённой прослойки зоны термического влияния — № 8 – 9 согласно [3.10]. Содержание перлитных участков в зависимости от зоны сварного соединения находится в пределах 15 – 25 %. Сфероидизация перлитной составляющей соответствует баллу 1 согласно [3.6];

- основной металл прямых участков гибов имеет феррито-перлитную структуру. Размер зерен соответствует № 5 – 6, содержание перлитных участков в зависимости от зоны сварного соединения составляет 20 %. Сфероидизация перлитной составляющей соответствует 1 баллу;

- свободный графит в исследованном металле элементов паропровода не выявлен.

- микроструктура металла сварных соединений (стыков, врезок) и гибов является допустимой.

Гидравлическое испытание паропровода (рег. условный № 444) проводилось в соответствии с требованиями [3.2] при температуре воды 40 °С пробным давлением 4,0 МПа с выдержкой 10 мин, после чего давление было снижено до рабочего уровня $p = 3,2$ МПа и проведён наружный осмотр элементов паропровода.

В результате наружного осмотра видимых остаточных деформаций, трещин, признаков разрыва, течи в сварных швах, разъёмных соединениях и в основном металле не обнаружено. Гидравлическое испытание пробным давлением 4,0 МПа паропровод (рег. условный № 444) выдержал.

3.3. РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ

Расчет на прочность выполняется в соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации РД 10-249—98 [3.7].

Способ расчёта выбирается с учётом результатов обследования и условий эксплуатации трубопровода:

- контрольный расчёт на прочность (от действия внутреннего статического давления) является основным способом расчёта для трубопроводов II — IV категорий при условии, что число пусков-остановов не превышает 500 циклов за весь срок эксплуатации и при условии положительных результатов обследования трубопровода и ОПС;

- расчёт на прочность (от действия всех нагружающих факторов) необходимо проводить в случаях, если при обследовании обнаружены несоответствия трубопроводной и опорно-подвесной систем проектным требованиям (защемления, коробление участков, нарушение состояния опор), а также в случаях, если число пусков-остановов превышает 500 циклов или число изменений температуры и давления превышает 1000 циклов;

- при коррозии со средней скоростью утонения стенки трубных элементов более 0,1 мм/год расчёт на прочность должен проводиться по минимальной фактической толщине стенки $S_{f\min}$ с учётом её последующего утонения на конец планируемого срока эксплуатации.

Одновременно следует отметить, что расчёт на прочность по минимальной фактической толщине стенки $S_{f\min}$ может применяться в любом случае независимо от условий эксплуатации трубопровода II — IV категорий (действия статических нагрузок или их сочетания с циклическими нагрузками) и независимо от размера коррозионной повреждённости сварных и бесшовных трубных элементов. Такой расчёт на прочность даёт консервативные и корректные результаты (в запас прочности), в максимальной степени приближенные к фактическому прочностному состоянию элементов трубопровода.

Контрольный расчёт на прочность проводится с выполнением следующих условий:

- приведённые (окружные) напряжения являются основными и оцениваются от действия внутреннего статического давления для сварных и бесшовных трубных элементов трубопровода. Необходимо вводить в расчёт минимальные значения фактической толщины стенки трубных элементов $S_{f\min}$ и максимальные значения фактической овальности гибов $a_{f\max}$; расчёт проводится на проектные параметры пара (давление, температуру);

- допускаемые напряжения $[\sigma]$ принимаются на сроки назначенного индивидуального ресурса $\tau_{и.р.}$, который определён при сумми-

ровании накопленной наработки τ_n (на момент обследования трубопровода) и принятого остаточного ресурса дальнейшей эксплуатации по результатам установленного фактического состояния металла (свойств, микроповрежденности, качества);

- контрольному расчёту на прочность подлежат прямые трубы, включая стыковые сварные соединения с кольцевым швом, гнутые трубы (гибы) и врезки (типа труба в трубе с угловым швом);
- условие прочности трубных элементов и сварных соединений на период назначенного индивидуального (остаточного) ресурса $\tau_{н.р}$ удовлетворяется при выполнении прочностного критерия $n_\sigma \geq [n_\sigma]$, где n_σ и $[n_\sigma]$ — фактический и допустимый запасы прочности, соответственно.

Приведённые напряжения согласно [3.7] определяются по формулам:

для прямых труб и сварных стыков с кольцевым швом

$$\sigma_p = (p/2)[D_n - (S_{f\min} - C_2)]/(S_{f\min} - C_2);$$

для гибов

$$\sigma_p = (p/2)[D_n - (S_{f\min} - C_2)/(K_i Y_i)]K_i Y_i/(S_{f\min} - C_2);$$

для врезок

$$\sigma_p = [p/(2\varphi_\omega)][D_n/(S_{f\min} - C_2) - 1],$$

где $S_{f\min}$ — минимальная фактическая толщина стенки трубных элементов, установленная по результатам диагностирования (ультразвуковой толщинометрии) на трубопроводе; φ_ω — коэффициент прочности сварного соединения врезки, $\varphi_\omega = 0,8$ (или определяется φ_σ согласно РД 10-249-98); C_2 — эксплуатационная прибавка к толщине стенки элементов паропровода на назначенный ресурс, $C_2 = 0,5$ мм.

Фактический запас прочности трубных элементов (и сварных соединений) трубопровода устанавливался по формуле:

$$n_\sigma = 1,5[\sigma]/\sigma_p$$

с последующей оценкой удовлетворения условия прочности

$$n_\sigma \geq [n_\sigma] = 1,5,$$

где $[n_\sigma] = 1,5$ — допустимый запас прочности согласно РД 10-249-98.

Минимальный уровень запаса прочности, допускаемый значением $[n_\sigma]_{\min} = 1,35$, принят для трубопроводов (сталь 20), работающих при температуре выше 350 °С, согласно [3.1]. В этом случае должно удовлетворяться условие прочности по критерию $n_\sigma \geq [n_\sigma]_{\min} = 1,35$.

Из результатов контрольного расчёта на прочность трубопровода II категории группы 1 было установлено, что все прямые трубы (со

Таблица 3.10. Результаты расчёта на прочность прямых труб (и сварных стыков) паропровода (рег. условный № 444) (сталь 20)

$D_H \times S$, мм	$\tau_{н.р}$, тыс. ч	$[\sigma]$, МПа	S_{fmin} , мм	C_2 , мм	σ_p , МПа	n_σ	$n_\sigma > [n_\sigma]$
377 × 16	500	44,0	15,7	0,5	38,1	1,70	+
	520	43,2	15,1	0,5	39,7	1,63	+
382 × 16	520	43,2	15,2	0,5	40,0	1,62	+
273 × 12	420	47,2	15,6	0,5	27,3	2,59	+
	520	43,2	15,6	0,5	27,3	2,37	+
278 × 16	520	43,2	15,9	0,5	27,3	2,37	+
219 × 9	420	47,2	8,1	0,5	44,8	1,58	+

Примечания: 1. Знак «+» означает, что данный элемент паропровода удовлетворяет условию прочности на заданный срок $\tau_{н.р}$ при проектных параметрах пара. 2. Значения допускаемого напряжения $[\sigma]$ выбраны для назначенного индивидуального ресурса ($\tau_{н.р}$) по каждому типоразмеру труб согласно [3.7].

Таблица 3.11. Результаты расчёта на прочность гибов паропровода (рег. условный № 444)

$D_H \times S$, мм	R , мм	a_{fmax} , %	$\tau_{н.р}$, тыс. ч	$[\sigma]$, МПа	S_{fmin} , мм	C_2 , мм	$K_1 Y_1$	σ_p , МПа	n_σ	$n_\sigma > [n_\sigma]$
377 × 16	900	3,88	500	44,0	15,2	0,5	0,913	35,1	1,88	+
							0,981			
325 × 15	900	2,77	500	44,0	13,0	0,5	0,923	25,1	2,63	+
							0,940			
273 × 12	850	4,73	420	47,2	10,0	0,5	0,931	42,5	1,69	+
							1,035			
		4,70	520	43,2	10,4	0,5	0,931	40,4	1,60	+
							1,023			
278 × 16	900	4,70	520	43,2	15,4	0,5	0,933	26,4	2,46	+
							1,005			
219 × 9	850	5,00	420	47,2	8,4	0,5	0,943	42,8	1,65	+
							1,060			

Примечание. См. примечания к табл. 3.10.

Таблица 3.12. Результаты расчёта на прочность врезок паропровода (рег. условный № 444) (сталь 20)

$D_H \times S$, мм	$\tau_{н.р}$, тыс. ч	$[\sigma]$, МПа	S_{fmin} , мм	C_2 , мм	φ_ω	σ_p , МПа	n_σ	$n_\sigma \geq [n_\sigma]$
325 × 15	500	44,0	14,0	0,5	0,8	47,9	1,40	+
377 × 16			15,9					
	520	43,2	15,6	0,5	0,8	44,8	1,45	+
			16,6					
325 × 15	520	43,2	15,6	0,5	0,8	47,9	1,35	+
382 × 16			15,8					
273 × 12	520	43,2	15,6	0,5	0,8	31,7	2,00	+
278 × 16			17,3					
219 × 9	420	47,2	8,0	0,5	0,8	52,1	1,36	+
219 × 9			8,1					

Примечания: 1. См. примечания к табл. 3.10. 2. В числителе дроби значения S_{fmin} указаны для труб (штуцера) с меньшим диаметром, а в знаменателе — для труб (коллектора) с большим диаметром.

сварными стыками), гибы и врезки (примеры 3.1 и 3.2) удовлетворяют условию прочности на сроки назначенного индивидуального ресурса, поскольку $n_{\sigma} > [n_{\sigma}]_{\min} = 1,35$ для всех элементов трубопровода (пример 3.3).

Пример 3.3. Провести контрольный расчёт на прочность элементов трубопровода II категории группы 1 (паропровода II категории, сталь 20) на сроки индивидуального ресурса $\tau_{и,р} = 420 \div 520$ тыс. ч для параметров пара $p = 3,2$ МПа, $t = 425$ °С. Максимальная наработка отдельных трубопроводных систем диагностируемого паропровода $\tau_n = 487\,125 \approx 490$ тыс. ч.

Результаты расчёта приведены в табл. 3.10 – 3.12, которые свидетельствуют о том, что все типоразмеры сварных и бесшовных трубных элементов удовлетворяют условию прочности $n_{\sigma} \geq [n_{\sigma}]$ при допустимом запасе прочности $[n_{\sigma}] = 1,25$.

3.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Экспертное заключение экспертизы по продлению ресурса паропровода II категории составляется по типовой форме согласно СО 153-34.17.464–2003 и содержит те же разделы, что и для паропровода I категории (см. § 2.4).

В примере 3.4 приводится краткое изложение экспертного заключения по продлению ресурса паропровода II категории.

Пример 3.4. Составить заключение экспертизы промышленной безопасности по техническому диагностированию трубопровода II категории группы 1 (паропровода II категории) и установлению возможности, срока и условий его дальнейшей эксплуатации. Основанием для составления экспертного заключения являются результаты обследования, проведённого по программе технического диагностирования и расчёта на прочность (см. примеры 3.1 – 3.3). Ниже приводится краткое содержание экспертного заключения.

Заключение

экспертизы промышленной безопасности по техническому диагностированию трубопровода II категории группы 1 ТЭС и установлению возможности, срока и условий его дальнейшей эксплуатации на параметрах пара 3,2 МПа, 425 °С.

1. Вводная часть

Постановка задачи (основание для проведения экспертизы)

Допустимый срок эксплуатации паропроводов среднего давления (категории II, группы 1) составляет по наработке 150 тыс. ч, или

20 лет, согласно действующему нормативно-техническому документу [3.1].

Фактическая эксплуатационная наработка паропровода (рег. словный № 444) ТЭС (по отдельным трубопроводным системам) на 26.12.07 достигла 385,119 – 488,768 тыс. ч. Следовательно, паропровод существенно превысил свой нормативный срок службы. В 2004 г. паропровод подвергался техническому диагностированию и на основании заключения ОАО ВТИ срок службы данного трубопровода среднего давления был продлен до 2007 г.

Содержание настоящей работы в рамках экспертизы промышленной безопасности заключалось в проведении технического диагностирования элементов паропровода с оценкой его технического состояния и установлением возможности, условий и срока безопасной дальнейшей эксплуатации.

Экспертиза проведена в соответствии с основными требованиями [3.2 – 3.5].

Сведения об экспертной организации. Приводится информация по названию экспертной организации, её юридическому адресу, фамилии И. О. директора, номеру и сроку действия лицензии, какой организацией выдана лицензия.

Сведения об экспертах и дефектоскопистах. Работа по экспертизе выполнена экспертами специализированной научно-исследовательской организации, назначенными распоряжениями в составе (должности, фамилии И.О. экспертов, номера удостоверений аттестации и сроки действия).

Контроль элементов паропровода ОП неразрушающими методами выполнен лабораторией металлов и сварки ТЭС, аттестованной в установленном порядке в системе неразрушающего контроля — № свидетельства.

Контроль неразрушающими методами выполнялся аттестованными в установленном порядке дефектоскопистами — специалистами неразрушающего контроля II уровня квалификации в составе (фамилии И.О., номера удостоверений и сроки действия).

Перечень объектов и цель экспертизы. Действие данного заключения экспертизы распространяется на паропровод II категории группы I.

Цель настоящей работы (экспертизы) состояла в оценке соответствия этого паропровода предъявляемым требованиям промышленной безопасности, подтверждении его работоспособности и выдаче рекомендаций по возможности, условиям и сроку его дальнейшей эксплуатации. Программа технического диагностирования прилагается (пример 3.1).

Данные о заказчике. Приводятся название организации, юридический адрес, руководитель (должность), фамилия, И.О.

Сведения о рассмотренных технических документах. По результатам выполненного контроля станционного паропровода II категории группы I в ходе его диагностирования представлен комплект первичной технической документации (справки, формуляры, сводные таблицы, заключения, протоколы с указанием номеров, дат и результатов неразрушающего и разрушающего контроля).

2. Конструкция, материалы, технология изготовления, условия эксплуатации паропровода II категории

Паропровод среднего давления II категории (рег. условный № 444) включает трубопроводные системы, в том числе коллектор от ресивера, главный коллектор, паропроводы № 1 (нитка II) и № 2 (нитка I), паропроводы РОУ 33/7 нитки I и II (см. табл. 2.1).

Трубопроводные системы введены в эксплуатацию в 1949 – 1951 гг.; длительность их наработки на 26.12.07 достигла 385,119 – 487,125 тыс. ч при проектных параметрах пара $t = 425^\circ\text{C}$ и $p = 3,7\text{ МПа}$ (табл. 3.13). Средняя ежегодная наработка составила примерно 7 тыс. ч/год.

3. Результаты анализа технической документации

Эксплуатация паропровода (рег. условный № 444), а также его технические освидетельствования велись (по информации владельца) в соответствии с требованиями Ростехнадзора. Специальные обследования этого паропровода периодически проводились ОАО ВТИ в 1999 и 2004 гг., результаты которых позволили обосновать периодическое продление срока службы этого паропровода.

По результатам последнего предыдущего технического диагностирования, проведённого в 2004 г., паропровод был допущен к дальнейшей эксплуатации до 2007 г.

4. Результаты технического диагностирования паропровода

Паропровод II категории группы I (рег. условный № 444) подвергался техническому диагностированию в период 2007 – 2008 гг.

Обследование паропровода проводилось в соответствии с индивидуальной программой, разработанной ОАО ВТИ (см. пример 3.1). Предусмотренные данной программой объёмы и методы контроля соответствуют требованиям СО 153-34.17.464–2003 [3.1]. Результаты технического диагностирования рассмотрены в примере 3.2.

5. Результаты обследования паропровода II категории

Результаты обследования данного паропровода приведены в примере 3.2.

Таблица 3.13. Паропровод (рег. условный № 444). Параметры пара: $t = 425^\circ\text{C}$, $p = 3,2 \text{ МПа}$ (сталь 20)

Трубопроводная система	Схема, номер	Год пуска	τ_n , тыс. ч	$\Delta\tau_{o,p}$, тыс. ч	$\tau_{n,p}$, тыс. ч	$[\sigma]$, МПа	$D_n \times S$, мм
Коллектор от ресивера	ТГ-387	1951	470,725	28	500	44,0	377 × 15/ 325 × 15
Главный коллектор	ТЭ-2753	1949	488,768	28	520	43,2	382 × 16/ 377 × 16/ 325 × 15
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка I)	Т1-264	1950	487,125	28	520	43,2	273 × 12/ 219 × 9
Паропровод ТЭЦ – ПВС (нитка II)	Т1-264	1950	486,338	28	520	43,2	273 × 12/ 219 × 9
Паропровод РОУ 33/7 № 1 (нитка II)	ТЭ-2754	1949	392,149	28	420	47,2	278 × 16/ 273 × 12
Паропровод РОУ 33/7 № 1 (нитка II)	ТЭ-2832	1949	385,119	28	420	47,2	278 × 16/ 273 × 12

Условные обозначения: τ_n — наработка на 26.12.07; $\Delta\tau_{o,p}$ — назначаемый остаточный ресурс 28 тыс. ч из расчёта четырёх лет эксплуатации до 01.10.10 при среднегодовой наработке 7,0 – 7,2 тыс. ч/год; $\tau_{n,p}$ — назначаемый индивидуальный ресурс, $\tau_{n,p} = \tau_n + \Delta\tau_{o,p}$; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение на период $\tau_{n,p}$.

6. Результаты расчёта на прочность

Результаты контрольного расчёта на прочность сварных и бесшовных трубных элементов паропровода рассмотрены в примере 3.3.

7. Заключение (выводы и рекомендации)

7.1. Общее состояние трассы паропровода и ОПС признано удовлетворительным. При внешнем осмотре паропровода в холодном и горячем состояниях и визуальном контроле качества основного металла и сварных соединений элементов недопустимых дефектов не обнаружено.

7.2. По результатам контроля методами цветной и ультразвуковой дефектоскопии установлено удовлетворительное качество основного металла и сварных соединений; недопустимые дефекты на проконтролированных элементах и участках паропровода не выявлены.

7.3. По результатам ультразвуковой толщинометрии стенки трубных элементов имеют фактическое утонение до 2 – 16 % по сравнению с номинальной толщиной.

7.4. Результаты измерения твёрдости свидетельствуют: фактическая твёрдость $(131 \div 146)$ НВ гибов и $(128 \div 146)$ НВ металла швов сварных соединений соответствует нормативным требованиям $[(110 \div 180)$ НВ] для углеродистого материала (стали 20).

Кратковременные механические свойства сварного соединения контрольной вырезки, установленные при испытании образцов на растяжение, ударную вязкость и измерением твёрдости, соответствуют при температуре 20 °С нормативным требованиям; при повышенной (рабочей) температуре — характеризуются достаточной прочностью, высокой пластичностью и ударной вязкостью.

7.5. По результатам металлографических исследований установлена удовлетворительная микроструктура зон сварных соединений и металла гибов. Графитизация в обследованных элементах паропровода II категории группы I отсутствует.

7.6. Гидравлическое испытание пробным давлением $p_{пр} = 4,0$ МПа (с последующим внешним осмотром при рабочем давлении $p = 3,2$ МПа), проведённое в соответствии с требованиями Правил Госгортехнадзора России (Ростехнадзора), паропровод (рег. условный № 444) выдержал без замечаний и нарушений.

7.7. Расчётом на прочность установлено, что для всех элементов паропровода (рег. условный № 444) соблюдаются условия прочности на сроки назначенного индивидуального ресурса при проектных параметрах пара с учётом фактических размеров и свойств металла.

7.8. Паропровод (рег. условный № 444) соответствует предъявляемым к нему требованиям промышленной безопасности и может быть допущен к дальнейшей эксплуатации до 01.10.10 на параметрах: $t = 425$ °С, $p = 3,2$ МПа.

7.9. Настоящее заключение экспертизы промышленной безопасности представить на утверждение в территориальный орган Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России в течение одного месяца со дня его подписания руководителем экспертной организации.

Перечень использованных нормативных источников для трубопроводов II — IV категорий

3.1. **СО 153-34.17.464—2003.** Инструкция по продлению срока службы трубопроводов II, III и IV категорий. М.: ОАО ВТИ. 2004.

3.2. **ПБ 10-573—03.** Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды.

3.3. **ПБ 03-246—98.** Правила проведения экспертизы промышленной безопасности с Изменением № 1 (ПБ И 03-490(246)—02). (Утверждены Постановлением ГГТН России от 16.11.98 г. № 64 и от 01.08.02 № 48; зарегистрированы Минюстом России 08.12.98 рег. № 1656; 23.08.02 пер. № 3720).

3.4. РД 10-520—02. Положение по проведению экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используются паровые и водогрейные котлы, сосуды, работающие под давлением, трубопроводы пара и горячей воды (Утверждено Постановлением ГТН России от 23.10.02 № 62; зарегистрировано Минюстом России 16.12.02 рег. № 4001).

3.5. РД 03-484—02. Положение о порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах (Утверждено Постановлением № 43 ГТН России от 09.07.02; зарегистрировано Минюстом России 05.08.02 рег. № 3665).

3.6. ОСТ 34-70-690—96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации.

3.7. РД 10-249—98. Нормы расчёта на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.

3.8. ТУ 14-ЗР-55—2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. Технические условия.

3.9. СО 153-34.003—01 (РД 153-34.1-003—01). Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования.

3.10. ГОСТ 5639. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

3.11. ГОСТ 6996. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

3.12. ГОСТ 9467. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы.

Приложение № 1

Копии лицензий экспертной организации и лаборатории металлов и сварки на ТЭС, копии удостоверений аттестованных экспертов и специалистов неразрушающего контроля — дефектоскопистов

Приложение № 2

Программа технического диагностирования паропровода II категории при выработке нормативного ресурса на тепловой электростанции; проектные параметры пара: $p = 3,7$ МПа, $t = 425$ °С

Приложение № 3

Справки, формуляры, акты, протоколы, заключения по результатам проведённого неразрушающего контроля и условиям эксплуатации трубопроводных участков паропровода II категории

Содержание

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Нормативные и технические	
требования	5
1.1. Общие положения	5
1.2. Организация и порядок проведения	
технического диагностирования	7
1.3. Методы контроля	10
1.4. Критерии оценки качества	24
ГЛАВА ВТОРАЯ. Паропроводы I категории	31
2.1. Программа диагностирования	31
2.2. Анализ результатов обследования	38
2.3. Расчёт на прочность	44
2.4. Заключение экспертизы	
промышленной безопасности	46
Перечень использованных нормативных источников	
для паропроводов I категории	51
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Трубопроводы II — IV категорий	53
3.1. Программа диагностирования	53
3.2. Анализ результатов обследования	61
3.3. Расчёт на прочность	70
3.4. Заключение экспертизы	
промышленной безопасности	73
Перечень использованных нормативных источников	
для трубопроводов II — IV категорий	77

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу «Энергетик»

ХРОМЧЕНКО ФЕЛИКС АФАНАСЬЕВИЧ

Диагностика для продления ресурса трубопроводов ТЭС
(Справочные материалы)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

115280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23
Телефоны (495) 675-19-06, тел./факс 234-74-21

Редакторы: Л. Л. Жданова, Н. В. Ольшанская

Худож.-техн. редактор Т. Ю. Андреева

Корректор Е. П. Севостьянова

Сдано в набор 02.02.10. Подписано в печать 24.03.10.

Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 5,0. Заказ БЭТ/03(135)-2010

Макет выполнен издательством «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Отпечатано типографией издательства «Фолиум»: 127238, Москва, Дмитровское ш., 58.

Журнал «Энергетика за рубежом»

Приложение к журналу «Энергетик»

Подписывайтесь на специальное приложение к журналу «Энергетик» — **«Энергетика за рубежом»**. Это приложение выходит **один раз в два месяца**.

Журнал «Энергетика за рубежом» знакомит читателей с важнейшими проблемами современной зарубежной электроэнергетики:

- развитие и надежность энергосистем и энергообъединений;
- особенности и новшества экономических и рыночных отношений в электроэнергетике;
- опыт внедрения прогрессивных технологий в энергетическое производство;
- модернизация и реконструкция (перемаркировка) оборудования электростанций, электрических и тепловых сетей;
- распространение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- энергосбережение, рациональное расходование топлива и экологические аспекты энергетики.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу **«ПРЕССА РОССИИ»**. Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Подписной индекс журнала «Энергетика за рубежом» — приложения к журналу «Энергетик»

87261

Об авторе



Феликс Афанасьевич Хромченко —
доктор технических наук,
профессор, лауреат премии
Правительства РФ в области
надёжности и долговечности
трубопроводов и корпусного
оборудования электростанций.
Руководил службами сварки
предприятий в системе Минэнерго
СССР и лабораторией сварки
ОАО ВТИ; ныне главный научный
сотрудник отделения металлов
ОАО ВТИ.

Ф. А. Хромченко — автор 15 книг (монографий, справочников), более 200 статей, 12 внедрённых изобретений по проблемам совершенствования монтажной и ремонтной сварочной технологии, надёжности и продления ресурса элементов трубопроводов и энергетического оборудования. Принимал участие в работе 16 конгрессов Международного института сварки.

С помощью своевременной диагностики
можно существенно увеличить срок службы
трубопроводов ТЭС.