

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет Энергетический
Кафедра Тепловые электрические станции

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

_____ Н.Б. Карницкий

_____ 2017 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан

_____ К.В.Доброго

_____ 2017 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

для специальностей 1-43 01 04 Тепловые электрические станции
1-53 01 04 Автоматизация и управление
теплоэнергетическими процессами»

Составители:

доцент Герасимова А.Г., к.т.н., доцент, Качан С.А., к.т.н, доцент

Рассмотрено и утверждено

на заседании Совета энергетического факультета «23» февраля 2017 г.,
протокол № 6

ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ

Теоретический раздел:

– «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» – курс лекций;

Практический раздел:

– «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» – перечень тем практических и лабораторных занятий, лабораторный практикум;

Контроль знаний:

– «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» – перечень вопросов, выносимых на зачет и экзамен, контрольные тесты;

Вспомогательный раздел:

– «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» – учебные программы для учреждения высшего образования, перечень нормативных документов в области контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК

Повышение качества образовательных услуг за счет обеспечения студентов комплектом учебных и учебно-методических материалов, позволяющих самостоятельно изучать дисциплины «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» и «Контроль и диагностика технологического оборудования ТЭС», что особенно важно для студентов заочной формы получения образования. Также он будет полезен преподавателям для подготовки к лекционным и практическим занятиям.

Особенности структурирования и подачи учебного материала:

– теоретическая часть включает в себя конспект лекций по дисциплинам «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» и «Контроль и диагностика теплотехнического оборудования ТЭС»;

– практическая часть состоит из перечня тем практических и лабораторных занятий;

– раздел контроля знаний содержит вопросы к зачету, экзамену и контрольные тесты;

– вспомогательный раздел содержит учебные программы по дисциплинам «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» и «Контроль и диагностика теплотехнического оборудования ТЭС» и перечень нормативных документов в области контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС.

Рекомендации по организации работы с ЭУМК:

Для просмотра ЭУМК требуется установленная на компьютер пользователя программа просмотра pdf-файлов.

Рекомендуется последовательно изучать теоретические материалы в соответствии с темами практических и лабораторных занятий. Для выполнения лабораторных работ авторами был разработан лабораторный практикум, для выполнения практических учебно-методическое пособие. Указанные учебно-методические материалы размещены в репозитории БНТУ.

Курс лекций	7
Введение	7
Тема 1. Виды и методы контроля	7
1.1. Термины и определения	7
1.2. Виды дефектов и причины их образования	10
1.3. Эксплуатационные дефекты элементов котлов, паропроводов и их сварных соединений	12
Тема 2. Разрушающие методы контроля	15
2.1. Механические испытания	16
2.1.1. Испытания на растяжение	17
2.1.2. Испытания на твердость	21
2.1.3. Испытания на трещиностойкость	24
2.1.4. Испытания на ударную вязкость	25
2.1.5. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости	28
2.1.6. Усталостные испытания	29
2.1.7. Испытания на жаропрочность	31
2.2. Методы исследования строения металлов и сплавов	35
2.2.1. Изучение макроструктуры металла	35
2.2.2. Изучение микроструктуры металла	36
2.3. Оценка коррозионной стойкости материалов	37
2.3.1. Испытания на общую коррозию	37
2.3.2. Испытания на межкристаллитную коррозию	38
2.3.3. Испытания на коррозионное растрескивание	39
Тема 3. Методы неразрушающего контроля, применяемые при диагностике металлоконструкций тепломеханического оборудования ТЭС	40
3.1. Физические методы неразрушающего контроля	40
3.1.1. Акустические методы неразрушающего контроля	42
3.1.2. Методы акустико-эмиссионной диагностики	50
3.1.3. Вихретоковые методы контроля	52
3.1.4. Магнитные методы контроля	56
3.1.5. Капиллярные методы контроля	62
3.1.6. Радиационные методы неразрушающего контроля	67
3.1.7. Тепловой контроль	72
3.1.8. Оптический метод контроля	75
3.2. Средства неразрушающего контроля	78
3.2.1. Классификация средств неразрушающего контроля	78
3.2.2. Дефектоскопы	80
3.2.3. Толщиномеры	85
3.2.4. Структуроскопы	88
3.2.5. Переносные твердомеры	92
3.2.6. Оценка выявляемости некоторых дефектов металла различными методами неразрушающего контроля	94
3.3. Безобразцовые методы контроля микроструктуры структуры и состава сталей	94
3.3.1. Безобразцовый контроль микроструктуры структуры металла	94
3.3.2. Контроль химического и марочного состава сталей без разрушения объектов котла	96
Тема 4. Контроль и диагностика металл тепломеханического оборудования ТЭС	98
4.1. Техническое диагностирование. основные понятия и общие положения	98

4.2. Контроль качества сварных соединений тепломеханического оборудования и трубопроводов ТЭС.....	101
4.3. Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов.....	103
4.3.1. Контроль трубопроводов.....	103
4.3.2. Контроль барабанов котлов.....	109
4.4. Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин.....	111
4.4.1. Методы контроля состояния роторов.....	111
4.4.2. Контроль состояния металла корпусных деталей.....	121
4.4.3. Контроль лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации.....	125
Тема 5. Вибродиагностика.....	127
5.1. Вибродиагностика, основные понятия и параметры.....	127
5.2. Вибропреобразователи.....	128
5.3. Контрольные точки и направления вибрации.....	129
5.4. Критерии оценки вибрационного состояния.....	132
5.5. Технические средства измерения и анализа вибрации.....	133
Тема 6. Автоматизированные системы контроля состояния тепломеханического оборудования ТЭС.....	135
6.1. Автоматизированный комплекс для донтроя осевого канала ротора паровой турбины.....	135
6.2. Автоматизированный комплекс выявления трещин под стеллитовыми пластинами лопаток паровых турбин.....	137
6.3. Система автоматизированного контроля водоопускных отверстий барабанов котлов высокого давления.....	140
6.4. Автоматизированные комплексы для контроля коллекторов и гибов трубопроводов.....	140
Темы лабораторных занятий.....	143
Темы практических занятий.....	143
Вопросы к зачету.....	146
Вопросы к экзамену.....	147
Контрольные тесты.....	148
Учебные программы.....	154
Перечень ТНПА, используемых при аккредитации специалистов в области контроля и диагностики теплоэнергетического оборудования.....	189

Электронный учебно-методический комплекс

Теоретический раздел

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Курс лекций

Минск 2017 г.

КУРС ЛЕКЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Характерная особенность современной отечественной энергетики состоит в том, что большая часть тепломеханического оборудования выработало свой проектный и нормативный срок службы, тем не менее, продолжают эксплуатироваться, так как замена их на новые в настоящее время весьма ограничена. Как показывают проведенные обследования предприятий и организаций, это количество почти не уменьшается, что в основном связано с отсутствием достаточного финансирования.

Поддержание высокой эксплуатационной надежности и экономичности энергооборудования – одна из актуальнейших в настоящее время задач. Ее можно решить только в случае правильного применения материалов, удачного выбора конструкций, тщательного соблюдения технологических процессов, используемых при монтаже, ремонте и эксплуатации оборудования, а также своевременной и квалифицированной диагностике оборудования.

Квалифицированное выполнение технического диагностирования позволяет реально не допустить запредельных сроков работы оборудования, достаточно точно прогнозировать длительность их безопасной эксплуатации без излишних перестраховочных работ по контролю металла, сварных работ и без аварий. При соблюдении технологического режима эксплуатации и квалифицированном проведении технического диагностирования сроки службы тепломеханического оборудования можно продлить в несколько раз.

ТЕМА 1. ВИДЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

1. 1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Растущие требования к надежности и долговечности оборудования ТЭС требуют постоянного совершенствования методов и средств его контроля, заключающегося в проверке соответствия показателей качества оборудования установленным требованиям. Критериями качества могут являться физические, геометрические, функциональные и технологические показатели.

Различают виды и методы контроля. Согласно терминологии, установленной [ГОСТ 16504–81 «Испытания и контроль качества продукции»](#), *видом испытаний (контроля)* называют классификационную группировку контроля по определенному признаку, а *методом контроля* – правила применения определенных принципов и средств контроля, при этом метод контроля может содержать в себе информацию об определенной последовательности применения этих принципов на практике.

Средства контроля, исполнители и контролируемые объекты представляют собой систему контроля, элементы которой взаимодействуют между собой по правилам, установленным нормативно-технической документацией на контролируемые изделия. Такая система включает в себя три этапа – предварительный, пооперационный (технологический) и приемочный контроль. *Предварительный контроль* заключается в проверке квалификации исполнителей, состояния контрольного оборудования, аппаратуры и приспособлений, применяемых материалов. *Пооперационный контроль* предусматривает проверку качества подготовки изделия или его элементов к проведению технологического процесса, а также правильности порядка выполнения последнего. Такой контроль позволяет своевременно корректировать технологический процесс в случае его нарушения и оперативно устранять дефекты в изделиях. *Приемочный контроль* завершает технологический процесс изготовления изделий, разделяя их на две группы – годные и негодные (бракованные). Различают приемочный контроль *сплошной* и *выборочный*.

В зависимости от воздействия на объект контроля и влияния на его дальнейшие эксплуатационные характеристики различают два вида контроля – *разрушающий* и *неразрушающий* (рис. 1.1).

Разрушающий контроль (РК), проводится на образцах-свидетелях, моделях или натуральных образцах изделий, позволяет количественно определять характеристики качества, например прочность изделий, их долговечность, коррозионную стойкость и др.

РК осуществляется посредством прямой связи с контролируемым объектом и поэтому обладает более высокой достоверностью результатов контроля по сравнению с неразрушающими методами.



Рис. 1.1. Виды контроля

Разрушающий контроль используется для выборочной проверки отдельных образцов, и по результатам делается заключение о пригодности всего объекта контроля, из которого изъята выборка. РК приводит к разрушению или повреждению объекта и не дает полной уверенности в удовлетворительном качестве всей детали, подлежащей контролю.

Неразрушающий контроль (НК) не связан с разрушением или повреждением объекта контроля, и поэтому он может быть сплошным. Неразрушающий контроль дефектов, структуры и твердости металла проводится непосредственно на деталях и конструкциях с помощью переносных или портативных приборов. Для контроля структуры металла используют переносные микроскопы или пластиковые реплики, а для выявления дефектов применяют различные *физические методы*, основанные на взаимодействии различных физических полей, излучений и веществ с ОК. Физические методы контроля также могут использоваться при контроле геометрических размеров (толщинометрия); контроле структуры, химического состава и механических свойств (структуроскопия).

Методы неразрушающего безобразцового контроля механических свойств по характеристикам твердости основаны на взаимосвязи диаграмм вдавливания инденторов и диаграмм растяжения образцов и позволяют количественно оценить отдельные показатели прочности и пластичности металла без вырезки образцов на готовых изделиях. К настоящему времени уже имеется положительный опыт использования НК механических свойств металла энергетического оборудования, что дает возможность экономить материалы и трудозатраты, сокращать сроки простоя агрегатов в период ремонта. При совместном применении дефектоскопии металла и безобразцового контроля его механических свойств с учетом изменения микроструктуры можно получить достаточно полную информацию о состоянии металла, его работоспособности и прогнозировать дальнейший срок службы энергетического оборудования.

В отличие от РК, обычно НК не дает прямой связи с контролируемыми параметрами, и косвенно характеризует их эксплуатационные характеристики. Поэтому для повышения достоверности результатов НК, как правило, требуется выборочная проверка результатов методами РК. Ее выполняют на стадии первоначального ведения НК, а так же как арбитражное средство в сомнительных случаях.

Неразрушающим испытаниям всегда предшествует *визуально-измерительный контроль* на отсутствие недопустимых наружных дефектов.

Визуальный осмотр наружной, и по возможности внутренней поверхности, элементов оборудования и трубопроводов и измерительный контроль проводят с целью обнаружения и определения размеров поверхностных дефектов (трещин, коррозионных повреждений, деформированных участков, наружного износа элементов и т.д.), образовавшихся в процессе эксплуатации, при ремонте, при изготовлении или монтаже оборудования.

При визуальном контроле состояния основного материала и сварных соединений оборудования и трубопроводов проверяют:

- отсутствие (наличие) механических повреждений поверхностей;
- отсутствие (наличие) формоизменения изделий (деформированные участки, коробления, провисание, выход трубы из ряда и других отклонений от первоначального расположения);
- отсутствие (наличие) трещин и других поверхностных дефектов, образовавшихся (получивших развитие) в процессе эксплуатации;
- отсутствие коррозионного и эрозионного дефектов поверхностей;
- отсутствие наружного износа изделия (оборудования, трубопровода, поверхностей нагрева котла и других изделий).

При измерительном контроле состояния основного материала и сварных соединений определяют:

- размеры механических повреждений основного материала и сварных соединений;
- размеры деформированных участков основного материала (сварных соединений);
- овальность цилиндрических элементов, в т.ч. гибов труб;
- прямолинейность (прогиб) образующей изделия;
- физическую толщину стенки основного материала;
- глубину коррозионных язв и размеры зон коррозионного повреждения, включая их глубину.

При выполнении визуального осмотра целесообразно зачищать отдельные участки поверхности, а также использовать лупу и местную подсветку. При визуальном осмотре внутренних поверхностей недоступных для прямого осмотра применяют эндоскопы, перископы или простейшие приспособления виде штанги с закрепленным на ней зеркалом и источником света.

При измерениях обнаруженных дефектов используют измерительную линейку металлическую, микрометры, штангенциркули, рулетки измерительные. Для измерения диаметров трубопроводов и обечаек сосудов применяется – раздвижная штанга или рейка с мерной линейкой ценой деления 1 мм.

Разметку точек замера толщины стенок рекомендуется проводить краской или мелом, а замер фактической толщины стенок изделий – выполнять ультразвуковым методом.

1.2. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ И ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

В соответствии с [ГОСТ 15467-79 \(СТ СЭВ 3519-81\) «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения»](#) дефекты разделяют на явные и скрытые, критические, значительные и малозначительные, устранимые и неустраняемые. Такое разделение дефектов проводят для последующего выбора вида контроля качества продукции (выборочный или сплошной). При любом методе контроля о дефектах судят по косвенным признакам (характеристикам), свойственным данному методу. Результаты измерения характеризуют выявленные дефекты и используются для их классификации.

Встречающиеся в металлических изделиях дефекты различают по разме-

рам и расположению, а также по природе происхождения.

По происхождению подразделяют на дефекты:

- *плавки и литья* (раковины, поры, включения, ликвационные зоны и др.);
- *обработки давлением* (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, заковы, закаты, флокены и др.);
- *термической и химико-термической обработки* (зоны грубозернистой структуры, перегрева и пережога, термические трещины, несоответствие заданному значению толщины закаленного цементованного, азотированного и других слоев, а также толщины слоя гальванического покрытия и др.)
- *механической обработки* (шлифовочные трещины, прижоги);
- *сварки, спайки, склеивания* (трещины, подрезы, непровары, поры, шлаковые включения, прожоги, пережиги, непропаи, непрочлеи);
- *хранения и эксплуатации* (коррозионные поражения, трещины термической усталости, ползучести и др.).

Воздействие эксплуатационных нагрузок, окружающей среды (температура, влажность, пары кислот, щелочей, агрессивные компоненты топлива и т.п.), фазовые и структурные превращения, протекающие во времени в условиях воздействия эксплуатационных факторов при неблагоприятных сочетаниях могут вызвать зарождение и развитие эксплуатационных повреждений.

В табл.1.1. приведены наиболее типичные дефекты деталей тепломеханического оборудования, возникающие при статических и циклических нагрузках в нормальных условиях и при воздействии агрессивных сред.

Таблица 1.1. Эксплуатационные дефекты

Виды воздействия на металл	Наименование дефектов
Статическое нагружение	Трещины однократного нагружения (хрупкие, вязкие) Трещины замедленного разрушения Трещины ползучести Коррозионное поражение металлов Коррозионное растрескивание Водородная хрупкость
Динамическое нагружение	Износ (абразивный, эрозионный) Трещины механической усталости Трещины термической усталости Трещины коррозионной усталости Выкрашивание и трещины контактной усталости
Термические напряжения	Дефекты при воздействии термических напряжений

1.3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ, ПАРОПРОВОДОВ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Паропроводы. В процессе длительной эксплуатации при температуре выше 450°C на ряде паропроводов из теплоустойчивых сталей труб на прямых и гнутых участках наблюдается явление ползучести. Повреждения труб из-за *ползучести* начинается с наружной поверхности и характеризуется межзеренным растрескиванием.

Паропроводы из углеродистой стали, работающие при температуре 425°C и давлении 3,9МПа склонны к *графитизации*. Наиболее характерным местом графитизации является зона термического влияния сварных соединений. В этой зоне скапливаются в виде цепочки выделения графита. В результате чего под действием напряжений в паропроводе из-за потери прочности происходит бездеформационное хрупкое разрушение.

В ряде случаев в местах врезки вспомогательных линий к основным трассам паропроводов наблюдается их повреждение из-за попадания конденсата. Характерным признаком повреждения является сетка трещин на внутренней поверхности в месте врезки линии по ходу движения пара. Трещины транскристаллитные, ножевые заполнены окислами.

Гибы паропроводов. Повреждение гибов паропроводов из-за дефектов изготовления может быть в любом местегиба. Трещины, как правило, не прямолинейные и могут начинаться как с внутренней, так и с наружной поверхностигиба. В начале трещины, как правило, наблюдается обезуглероженный слой.

На гibaх, работающих в условиях ползучести, на растянутой части может наблюдаться сетка трещин на наружной поверхности. Трещины интеркристаллитные распространяются по границам зерен.

Разрушение гибов паропроводов может происходить по причине искажения формы сечения при его изготовлении. Такое разрушение происходит на участке между растянутой и нейтральной частямигиба. Трещины начинаются на внутренней поверхности и идут по границам зерен. На наружной поверхности данный дефект выглядит в виде одной прямолинейной трещины.

Из-за воздействия на участок паропровода высоких нескомпенсированных изгибающих напряжений часто наблюдаются повреждения в виде транскристаллитных трещин, которые начинаются с наружной поверхности в месте началагиба.

Повреждения сварных соединений паропроводов. Повреждения сварных соединений паропроводов могут быть как по наплавленному металлу, так и в околошовной зоне.

В процессе длительной эксплуатации паропроводов выполненных из углеродистой стали и эксплуатирующихся при температурах до 440°C наблюдаются ступенчатые транскристаллитные трещины усталости, которые распространяются в основном вдоль сварного шва. Повреждения в зоне сварного шва

могут также наблюдаться из-за некачественной термообработки сварных стыков – это продольные трещины, которые могут привести к хрупкому разрушению. Кроме продольных трещин в сварных швах могут наблюдаться и поперечные трещины, которые развиваются в местах приварки труб к литым деталям.

Повреждения сварных соединений паропроводов по околошовной зоне, как правило начинаются от места сопряжения усиления с трубой и носят кольцевой характер.

Сварные тройниковые соединения – наиболее повреждаемые элементы паропроводов. Повреждения происходят с образованием трещин, идущих с наружной поверхности магистральной трубы по низкотемпературной зоне термовлияния. Трещины носят интеркристаллитный характер. В районах, прилегающих к трещине, наблюдается зона микропор. Также на тройниках могут наблюдаться повреждения из-за ошибок конструкционного исполнения и из-за истощения ресурса прочности.

Повреждения коллекторов. В ряде случаев в процессе длительной эксплуатации возникают коррозионные дефекты, особенно в коллекторах с пароводяной смесью. Дефекты имеют различную длину, образуются на внутренней поверхности и идут от кромки трубных отверстий в радиальном направлении. Дефекты представляют собой небольшие язвины, соединяющиеся между собой. Характерным металлографическим признаком является тупой конец дефекта.

Также на коллекторах часто наблюдаются повреждения сварных стыков в местах приварки паропроводов к коллектору. Повреждения наблюдаются в околошовной зоне со стороны трубопровода. Как правило, трещины носят межкристаллитный характер, распространяясь по границам зерен.

Повреждения коллекторов из-за действия нескомпенсированных напряжений, как правило, наблюдаются на выходных коллекторах, работающих при температуре выше 500°C. Повреждения происходят с образованием трещин в местах приварки штуцеров к камере и идут по телу штуцера. Трещины имеют кольцевой характер.

На коллекторах наблюдаются также повреждения из-за термоусталости. Такие трещины идут от кромки отверстия, через которое выполнен подвод воды. Трещины транскристаллитные, ножевые, расположены сеткой, заполнены окислами.

Причинами повреждений коллекторов могут быть высокие температурные разбежки, возникающие при пусках(остановах), неудачная конструкция, а также небрежность при ремонте и ревизии.

Анализ повреждаемости котлоагрегатов показывает, что сегодня наиболее повреждаемым узлом является место приварки труб к коллекторам. Повреждения сварных стыков приварки труб к коллекторам приводит к износу пароводяной струей металла коллектора. В ряде случаев износ бывает существенный и коллектор требует восстановительного ремонта.

Поверхности нагрева котлов. Одной из причин повреждаемости поверхностей нагрева котлов является их длительный перегрев. Причиной разры-

ва труб при длительном перегреве является ползучесть металла, разрушение происходит с деформацией и плавным раскрытием. Разрушение начинается с наружной поверхности, трещины имеют межзеренный характер.

Причинами повреждаемости поверхностей нагрева котлов может быть также кратковременный перегрев. Характерными признаками перегрева является большое раскрытие трещин и сильный изгиб трубы.

Низкая жаростойкость сталей приводит к разрушению поверхностей нагрева за счет утонения стенок труб, причем разрушение может носить как хрупкий, так и вязкий характер.

Низкая жаропрочность сталей также является одной из причин повреждаемости труб поверхностей нагрева. По внешнему виду такие повреждения характеризуются увеличением диаметра и продольным раскрытием трубы. Трещины межзеренные.

Значительную долю повреждений труб поверхностей нагрева представляют *коррозионные повреждения*. Встречается как внутренняя, так и наружная коррозия. Общие признаки – оспины, язвины, раковины, которые утоняют стенку трубы. Основная доля повреждений труб поверхностей нагрева связана с наличием на внутренней поверхности трубы язвенной коррозии.

К язвенной коррозии относят следующие виды:

- кислородная (представляет собой язвины, закрытые окислами железа и протекает по причине недостаточной деаэрации котловой воды);
- пароводяная (также наблюдается в виде язвин, закрытых окислами железа, возникающих в связи с высокими тепловыми нагрузками, с разрушением защитных пленок из-за частых теплосмен);
- подшламовая (имеет вид раковин диаметром до нескольких десятков миллиметров, которые покрыты окислами железа, обусловлена образованием шлама с огневой стороны трубы).

На радиационных поверхностях нагрева наблюдаются повреждения, обусловленные *коррозионной усталостью*. Трещины коррозионной усталости – кольцевые, расположенные на внутренней поверхности труб.

Тепловая усталость металла поверхностей нагрева приводит к развитию термоусталостных трещин, которые также носят кольцевой характер, но расположены на наружной стороне трубы. Металлографическим признаком термоусталостных трещин является то, что трещины, ножевые, транскристаллитные.

Внутренняя поверхность гнутых элементов труб подвержена коррозионно-тепловой усталости. Трещины коррозионно-тепловой усталости транскристаллитные идут ступенькой. Такой вид повреждений имеет место на обогреваемых гibaх прямоточных котлов, и на необогреваемых гibaх прямоточных и барабанных котлов.

Поверхности нагрева, выполненные из аустенитных сталей подвержены *коррозии под напряжением* (межкристаллитной коррозии), характерным признаком которой являются трещины, начинающиеся на наружной поверхности. Повреждение происходит без утонения стенки, трещины распространяются по

границам зерен. В ряде случаев коррозия под напряжением может начинаться с внутренней поверхности труб. На этом участке наблюдается прогиб трубы.

Поверхности нагрева длительно эксплуатирующиеся могут разрушаться из-за *исчерпания ресурса прочности*. Характерным признаком чего является продольное раскрытие трубы и наличие на наружной поверхности трещин ползучести. Разрушение происходит с увеличением диаметра трубы.

Экранные трубы подвержены *водородному охрупчиванию* характерным признаком, которого является хрупкое разрушение без утонения стенки и увеличения диаметра трубы. На внутренней поверхности трубы наблюдается обезуглероживание, других изменений в структуре металла не наблюдается.

Поверхности нагрева также подвержены механическому *износу*. Характерным признаком износа является уменьшение толщины стенки трубы, обращенной навстречу потоку газов. Разрушение труб при износе происходит из-за утонения стенки ниже расчетной с образованием разрыва или свища.

Питательные трубопроводы. Опыт эксплуатации питательных трубопроводов показывает, что за регулирующими клапанами на основных и байпасных линиях питательных трубопроводов происходит эрозионный износ. На ТЭС с возвратом конденсата от промышленных предприятий может иметь место разрушение трубопроводов от электрохимической коррозии, связанное с воздействием на металл воды, содержащей различные коррозионные реагенты.

ТЕМА 2. РАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Разрушающий контроль предусматривает вырезку образцов металла из элементов оборудования и трубопроводов, изготовление образцов для механических или коррозионных испытаний и шлифов для детального металлографического анализа в лабораторных условиях. На рис. 2.1. Представлена схема вырезки образцов для проведения разрушающего контроля металла паропровода.

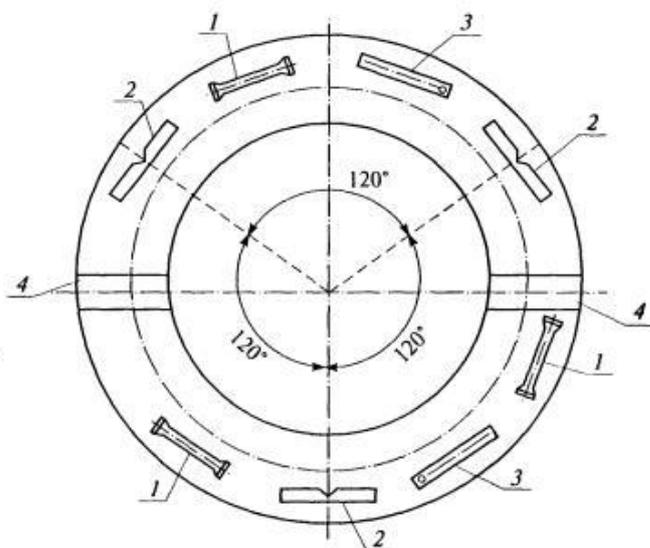


Рис.2.1. Схема вырезки образцов из паропровода для механических испытаний, карбидного и металлографического анализов металла: 1 – образцы для испытания на растяжение; 2 – образцы для испытания на ударную вязкость; 3 – образцы для карбидного анализа; 4 – образцы для металлографического анализа

Так как разрушающий контроль приводит к разрушению или повреждению объекта контроля его рекомендуется выполнять только в определенных случаях:

- при неудовлетворительных результатах измерения твердости переносными приборами;
- при обнаружении изменений структуры металла по данным металлографического анализа на сколах (репликах) или структуроскопах (приборах неразрушающего контроля), выходящих за пределы требований нормативно-технической документации (НТД) на металл в исходном состоянии;
- при необходимости установления причин возникновения дефектов металла ОК, влияющих на его работоспособность;
- при нарушении режима эксплуатации, в результате которого возможны изменения в структуре и свойствах металла, деформации и разрушения элементов оборудования или проявления недопустимых дефектов;
- при отсутствии в технической документации сведений о марке стали объекта контроля или использовании при ремонте ОК материалов или полуфабрикатов, на которые отсутствуют сертификационные данные.
- при оценке остаточного ресурса оборудования.

Вырезки делаются из наиболее теплонапряженных или подверженных коррозии зон после предварительной толщинометрии, как правило проводимой с использованием ультразвуковых толщиномеров (с целью выявления для вырезки участков с минимальной толщиной). Количество вырезок должно соответствовать поставленной перед исследователем задаче. Количество вырезок определяется в методических рекомендациях и технических условиях для проведения РК.

При разрушающем контроле металла энергетического оборудования обычно проводятся механические испытания, структурный анализ и испытания на межкристаллитную коррозию.

2.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Механическими свойствами металлов называют свойства, которые выявляются испытаниями при воздействии внешних нагрузок. В результате таких испытаний определяют количественные характеристики механических свойств. Эти характеристики необходимы для выбора металлов и режимов их термообработки, расчетов на прочность, контроля и диагностики их прочностного состояния в процессе эксплуатации.

При проведении механических испытаний стремятся воспроизвести такие условия воздействия на материал, которые имеют место при эксплуатации изделия, изготовленного из этого материала. Многообразие условий службы материалов обуславливает проведение большого числа механических испытаний. Основными признаками, позволяющими классифицировать виды механических испытаний, являются:

- способ нагружения (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез и др.);

- скорость нагружения (статическая, динамическая);
- протяженность процесса испытания во времени (кратковременная, длительная).

Существуют и другие признаки классификации, которые характеризуются сложностью напряженно-деформированного состояния, режимами нагружения, типами образцов, агрессивностью среды.

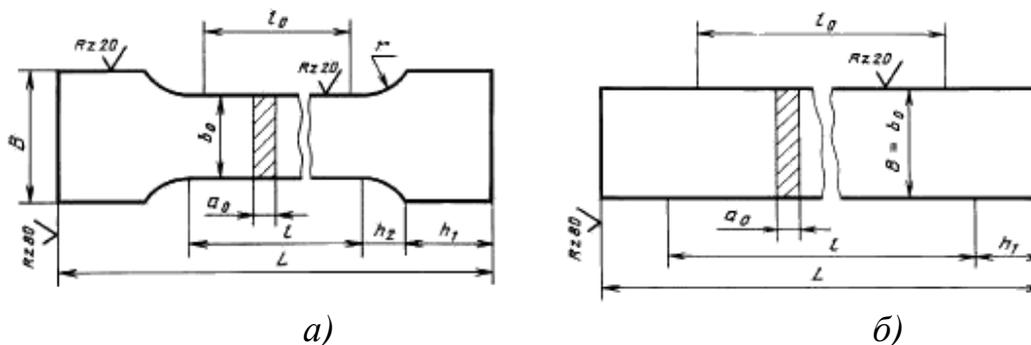
В результате механических испытаний материалов определяют следующие характеристики: упругость, пластичность, прочность, твердость, вязкость, усталость, трещиностойкость, хладноломкость, жаропрочность.

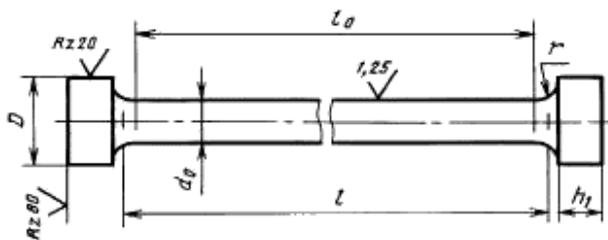
При диагностике энергетического оборудования проводят следующие виды механических испытаний:

- растяжение;
- твердость;
- трещиностойкость;
- ударную вязкость;
- хладноломкость и критическую температуру хрупкости;
- усталость;
- жаропрочность.

2.1.1. Испытания на растяжение

Испытания на растяжение позволяют получить достаточно полную информацию о механических свойствах материала. При испытаниях на специальных разрывных машинах образец растягивается двумя противоположными силами, приложенными к его оси. В соответствии с [ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»](#) для испытания на растяжение используют стандартные образцы, имеющие в поперечном сечении форму круга (цилиндрические образцы) или прямоугольника (плоские образцы) рис.2.2. Плоские образцы обычно применяют для испытания листовых материалов. Длина начальной расчетной части l_0 образцов зависит от площади поперечного сечения F_0 . Перед испытанием на образцы наносят расчетную длину неглубокими кернами, рисками или другими метками.





в)

Рис.2.2. Образцы для испытания на растяжение: а – плоский образцы с головками; б – плоские образцы без головки; в – круглый цилиндрический

Перед испытанием образец закрепляют вертикально в захватах испытательной машины. На рис.2.3 представлена принципиальная схема типичной испытательной машины, основными элементами которой являются: приводной нагружающий механизм, обеспечивающий плавное нагружение образца вплоть до его разрыва; силоизмерительное устройство для измерения силы сопротивления образца растяжению; механизм для автоматической записи диаграммы растяжения. На рис. 2.4 представлен внешний вид испытательных разрывных машин разных производителей.

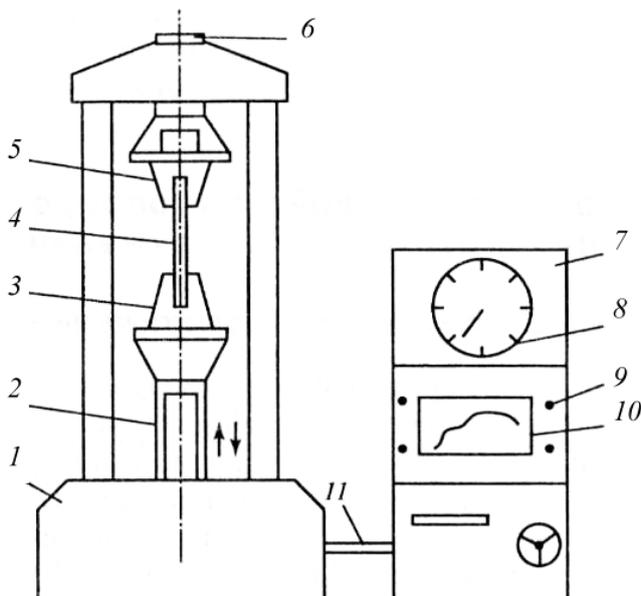


Рис.2.3. Схема испытательной машины: 1 – остов машины; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец; 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятка управления; 10 – диаграммный механизм; 11 – кабель



Рис.2.4. Внешний вид испытательных разрывных машин разных производителей.

В процессе испытания диаграммный механизм непрерывно регистрирует первичную (машинную) диаграмму растяжения в координатах нагрузка P – абсолютное удлинение образца Δl (рис.2.5).

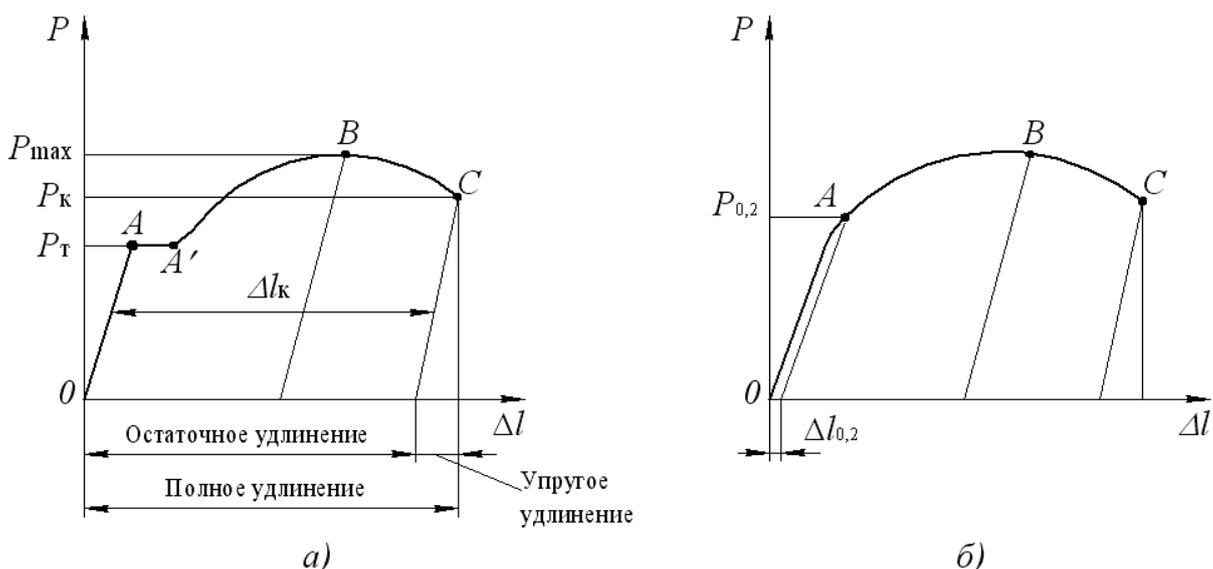


Рис.2.5. Схемы диаграмм растяжения пластичных материалов: а – с площадкой текучести; б – без площадки текучести

Диаграмма растяжения состоит из трех участков: упругой деформации OA , равномерной деформации AB и сосредоточенной деформации шейки BC .

Для большинства пластичных материалов характерна диаграмма растяжения с постепенным переходом от упругой в пластическую область (рис.2.5,б). Для некоторых пластичных материалов (например, низкоуглеродистая сталь) свойственна диаграмма растяжения с переходом в пластическую область в виде площадки текучести $A-A'$ (рис.2.5,а).

При растяжении определяют следующие основные показатели прочности и пластичности материалов.

Показатели прочности материалов характеризуются удельной величиной – напряжением, равным отношению нагрузки в характерных точках диаграммы растяжения к площади поперечного сечения образца. Дадим определение наиболее часто используемым показателям прочности материалов.

Предел текучести (физический) – это наименьшее напряжение, при котором материал деформируется (течет) без заметного изменения нагрузки, МПа:

$$\sigma_T = P_T / F_0$$

где P_T – нагрузка, соответствующая площадке текучести на диаграмме растяжения (рис.2.5, а).

F_0 – начальная площадь поперечного сечения расчетной части образца.

Если на машинной диаграмме растяжения нет площадки текучести (рис. 2.4, б), то задаются допуском на остаточную деформацию образца и определяют условный предел текучести.

Условный предел текучести – это напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % от начальной расчетной длины образца, МПа:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0$$

где $P_{0,2}$ – нагрузка, соответствующая остаточному удлинению $\Delta_{0,2} = 0,002 l_0$.

Временное сопротивление (предел прочности) – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{\max} , предшествующей разрыву образца, МПа:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0.$$

Истинное сопротивление разрыву – это напряжение, определяемое отношением нагрузки P_K в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в месте разрыва F_K , МПа:

$$S_K = P_K / F_K.$$

Показатели пластичности. Величина пластической деформации к моменту разрушения образца характеризует пластичность материала. Различают две характеристики пластичности: относительное удлинение δ и относительное сужение ψ .

Относительное удлинение после разрыва – это отношение приращения расчетной длины образца после разрыва Δl_k к ее первоначальной длине, % :

$$\delta = (\Delta l_k / l_0) \cdot 100 = [(l_k - l_0) / l_0] \cdot 100.$$

Относительное удлинение после разрыва зависит от соотношения l_0 и d_0 , т.е. от кратности образцов. Чем меньше отношение l_0 / d_0 (кратность образца), тем больше δ . Это объясняется влиянием шейки образца, где имеет местососредоточенное удлинение. Поэтому индекс δ указывает на кратность образца, например δ_5, δ_{10} . Если значения δ приведены без указания кратности образцов, то в этом случае имеют в виду кратность 5.

Относительное сужение после разрыва – это отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва ΔF_k к начальной площади поперечного сечения, %:

$$\psi = (\Delta F_k / F_0) \cdot 100 = [(F_0 - F_k) / F_0] \cdot 100.$$

Условно принято считать металл надежным при $\delta \geq 15\%$, $\psi \geq 45\%$.

В отличие от конечного относительного удлинения конечное относительное сужение не зависит от соотношения l_0 и d_0 (кратности образца), так как в последнем случае деформацию оценивают в одном, наиболее узком, сечении образца.

Современные испытательные машины позволяют проводить испытания по различным режимам в широком диапазоне нагрузок и скоростей деформирования и оснащены ПЭВМ.

2.1.2. Испытания на твердость

Основными методами определения твердости являются методы внедрения в поверхность испытываемого металла стандартных наконечников из твердых недеформируемых материалов под действием статических нагрузок: методы Бринелля, Роквелла, Виккерса (рис.2.6). Твердость определяется глубиной внедрения в испытываемый материал закаленного стального или вольфрамового шарика, алмазных конуса или пирамиды.

Значения твердости выражаются *числами твердости* в различных шкалах.

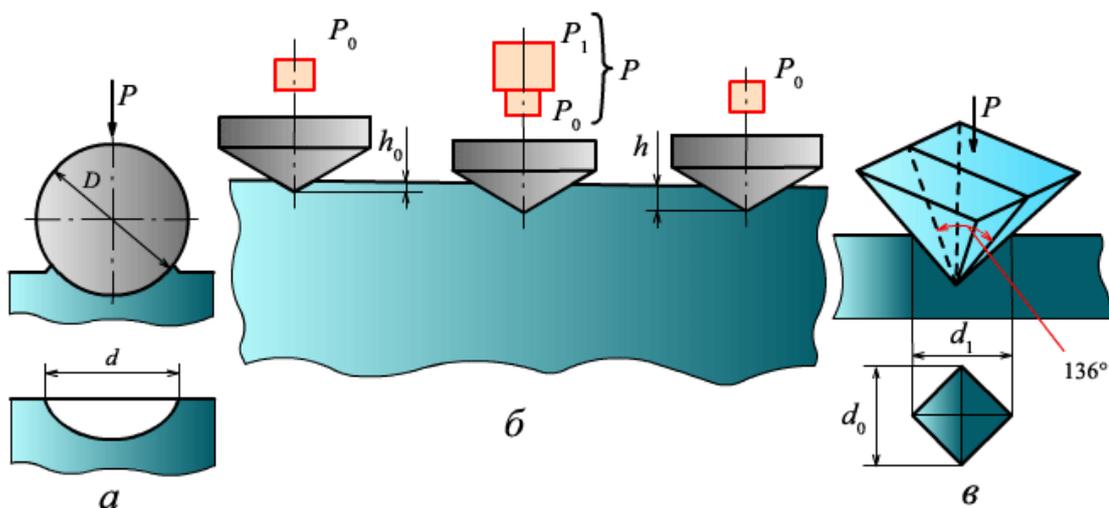


Рис.2.6. Схемы испытания на твердость:
 а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Определение твердости по методу Бринелля.

Для определения твердости по методу Бринелля (ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю») в качестве твердого тела, вдавливаемого в испытуемый материал, используют стальной шарик определенного диаметра D , который вдавливается в испытуемый материал с усилием P (рис.2.6а). После снятия нагрузки на поверхности материала остается шаровой отпечаток диаметром d .

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обозначаемое НВ. Число твердости представляет собой отношение усилия P к площади поверхности F получаемого отпечатка (шарового сегмента):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2H}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}\right)}$$

Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость металла.

На практике твердость определяют не по формулам, а по специальным таблицам, исходя из диаметра отпечатка d .

Твердость по Бринеллю выражается в кгс/мм² (значение твердости по Бринеллю обычно дают без указания размерности, например НВ 350).

Методом по Бринеллю можно испытывать материал с твердостью не более НВ 450. При более высокой твердости испытуемого материала вдавливаемый шарик деформируется и результаты испытания искажаются.

Временное сопротивление и число твердости по Бринеллю связаны между собой: для стали $\sigma_B = 0,34$ НВ, для алюминиевых сплавов $\sigma_B = 0,35$ НВ, для медных сплавов $\sigma_B = 0,45$.

Определение твердости по Виккерсу (ГОСТ 2999-75 «Металлы и сплавы.

Метод измерения твердости по Виккерсу») осуществляется вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136° (рис. 2.6, б). После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка d . Число твердости по Виккерсу HV подсчитывается как отношение нагрузки P к площади поверхности пирамидального отпечатка F :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}.$$

Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV, указываются нагрузка P и время выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости, кгс/мм², не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10–15 с, а для цветных металлов – 30 с. Например, HV_{10/15} 450 означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при $P = 10$ кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

Преимущество метода Виккерса по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы более высокой твердости из-за применения алмазной пирамиды.

При испытании на твердость по методу Роквелла (ГОСТ 9013–59* (ИСО 6508-86) «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу») в поверхность материала вдавливаются алмазный конус, угол, при вершине которого составляет 120° , или стальной шарик диаметром 1,588 мм. Согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка. Схема испытания по методу Роквелла показана на рис. 2.33, в. Вначале к индентору прикладывается предварительная нагрузка P_0 , под действием которой он вдавливается в образец на глубину h_0 . Затем прикладывается основная нагрузка P_1 , под действием которой индентор вдавливается на глубину h_1 . После этого снимают нагрузку P_1 , но оставляют предварительную нагрузку P_0 . При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не достигает уровня h_0 . Разность $h - h_0$ зависит от твердости материала; чем тверже материал, тем меньше эта разность. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,002 мм. При испытании мягких металлов методом Роквелла в качестве индентора применяется стальной шарик. Последовательность операций такая же, как и при испытании алмазным конусом. Число твердости, определенное методом Роквелла, обозначается символом HR. Однако в зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к этому символу добавляется буква А или С, или В, обозначающая соответствующую шкалу измерений.

Число твердости по Роквеллу подсчитывают по формулам:

$$HRA(HRC) = 100 - ((h - h_0) / 0,002);$$

$$HRB = 130 - ((h - h_0) / 0,002);$$

где 100 и 130 – предельно заданные числа делений индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм. Например, HRC 50 означает, что твердость, определенная методом Роквелла по шкале С при вдавливании алмазного конуса, равна 50 (размерность не ставится).

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла фиксируется непосредственно стрелкой индикатора, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размеров отпечатка.

Для измерения твердости тонких слоев материалов и даже их отдельных структурных составляющих применяют *метод микротвердости* (ГОСТ 9450 – 76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников»). Этот метод подобен методу Виккерса, однако при этом используют малые нагрузки вдавливания: 0,049 (0,005); 0,098 (0,01); 0,196 (0,02); 0,49 (0,05); 0,98 (0,1); 1,962 (0,2); 4,9 (0,5) Н (кгс).

Испытания на твердость проводят на приборах твердомерах. Внешний вид твердомеров представлен на рис. 2.7.



Рис.2.7. Внешний вид твердомеров: а – цифровой твердомер по Бринеллю (производитель Time Group Inc); б – цифровой твердомер по Роквеллу 600MRD; в – Твердомер по Виккерсу SP-5 с видео измерением

2.1.3. Испытания на трещиностойкость

Трещиностойкостью называют свойство материалов сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях. Трещины в материалах могут быть металлургического и технологического происхождения, а также возникать и развиваться в процессе эксплуатации. При возможном хрупком разрушении для безопасной работы элементов конструкций и машин необхо-

можно количественно оценивать размеры допустимых трещиноподобных дефектов. Для оценки размера допустимого дефекта необходимо знать количественную характеристику трещиностойкости материала.

Количественной характеристикой трещиностойкости материала является *критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации K_{Ic} в вершине трещины*. На практике значение K_{Ic} используют для определения связи между разрушающими напряжениями и размерами дефектов в элементе конструкции.

Коэффициент K_{Ic} определяют испытанием специальных образцов с предварительно выращенной усталостной трещиной (ГОСТ 25.506–85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»). На рис.2.8 изображена схема компактного образца с надрезом и выращенной усталостной трещиной для определения K_{Ic} .

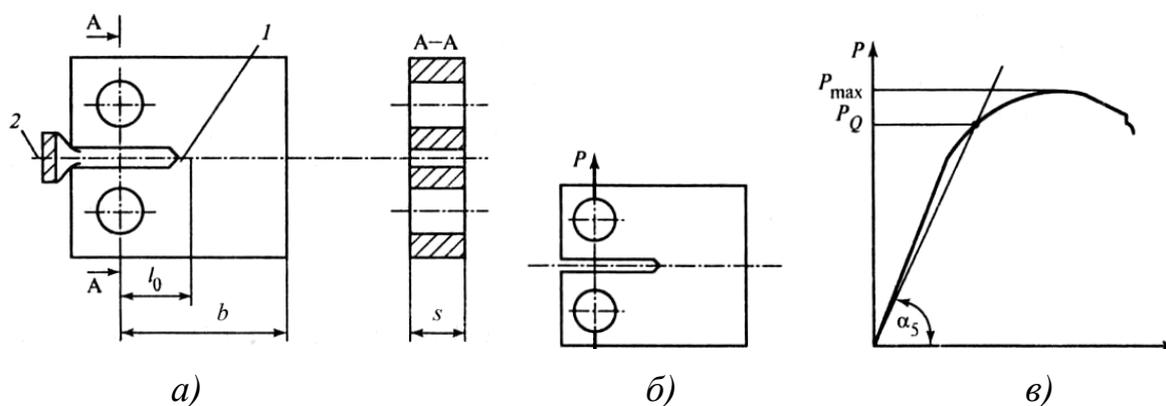


Рис.2.8. Испытание на трещиностойкость: а – схема прямоугольного компактного образца для определения K_{Ic} (1 – трещина усталости; 2 – датчик раскрытия); б – схема компактного образца; в – диаграмма его внецентренного растяжения $P-V$

Образец подвергается внецентренному растяжению (рис.2.8, б) с автоматической регистрацией диаграммы нагрузка P – раскрытие берегов надреза образца V (рис.2.8, в).

2.1.4. Испытания на ударную вязкость

Основным динамическим испытанием является метод испытания на ударный изгиб в соответствии с ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах». Этот вид испытаний проводят для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению. Метод основан на разрушении образца с надрезом одним ударом маятникового копра (рис.2.9). В результате таких испытаний определяют *ударную вязкость*, которая оценивается работой, затраченной на ударный излом образца и отнесенной к площади его поперечного сечения в месте надреза.

Согласно стандарту, для определения ударной вязкости применяют призматические образцы с надрезами различных типов. Самыми распространенными типами являются образцы с U-образным (рис.2.10, а) и V-образным (рис.2.10, б) надрезами.

Работа K , МДж, затраченная на ударный излом образца, может быть определена по формуле:

$$K = G(h_1 - h_2),$$

где G – вес маятника;

h_1 – высота подъема маятника до испытаний;

h_2 – высота подъема маятника после испытаний.

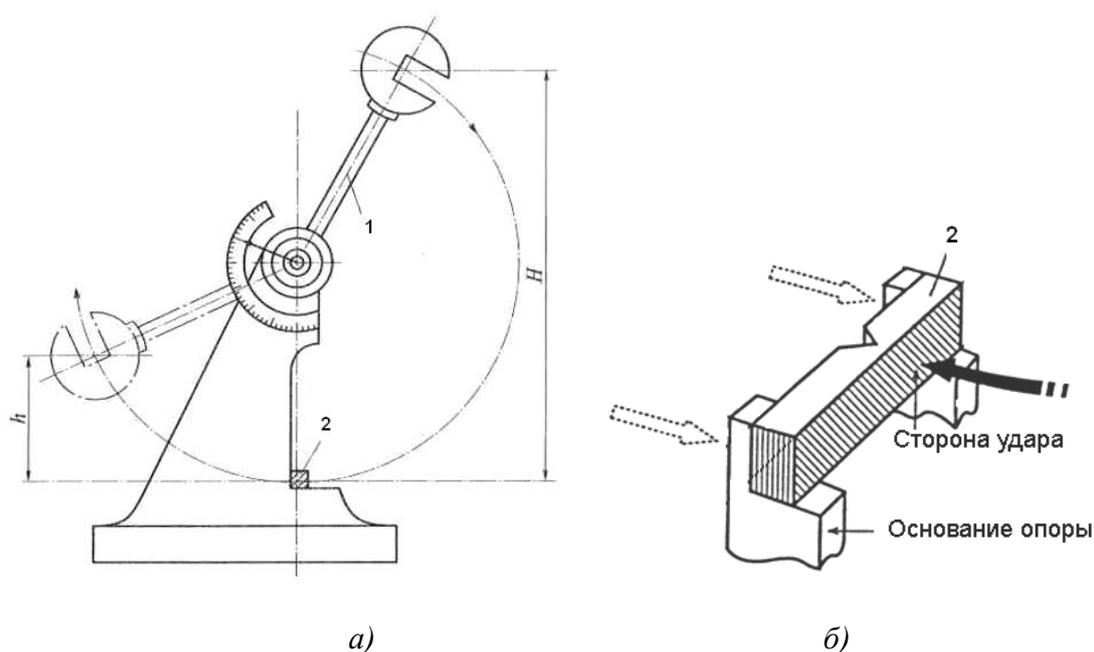


Рис. 2.9. Схема испытаний на ударную вязкость: а – схема маятникового копра; б – расположение образца на копре; 1 – маятник; 2 – образец

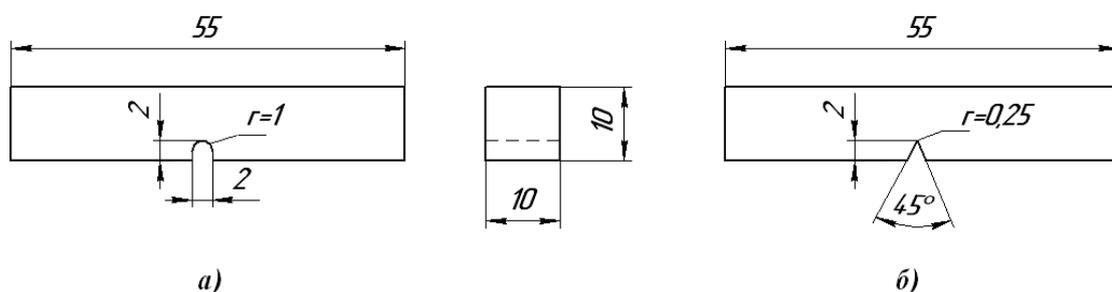


Рис.2.10 Образцы для испытаний на ударную вязкость: а – с U-образным надрезом (образец Менаже); б – с V-образным надрезом (образец Шарпи)

Указатель на шкале копра, проградуированный с учетом потерь (трения в подшипниках, сопротивления стрелки указателя, сопротивления воздуха и т.п.) фиксирует значение работы K .

Ударная вязкость обозначается символом KC , МДж/м², и подсчитывается как отношение работы K к площади поперечного сечения образца в надрезе F . Если образец с U-образным надрезом, то к символу добавляется буква U (KCU), а если с V-образным надрезом, то добавляется буква V (KCV).

Вместе с тем ударная вязкость является сложной механической характеристикой и состоит из двух составляющих: *удельной работы зарождения трещины* $KC_з$ и *удельной работы ее распространения* $KC_р$:

$$KC = KC_з + KC_р .$$

В охрупченных материалах основная часть работы совершается на зарождение трещины, при этом работа распространения трещины незначительна. В пластичных материалах преобладает работа на распространение трещины. Анализ составляющих ударной вязкости позволяет более рационально выбрать материал и определить его назначение.

Современные копры (рис.2.11) автоматизированы: подъем молота осуществляется с помощью моторизованной системы, которая автоматически возвращает молот в исходное положение после каждого испытания. Каждый инструмент с автоматической цифровой системой управления укомплектован автоматической системой торможения молота.

При установке образца вручную, испытатель находится вне рабочей зоны инструмента. Установка производится с помощью специального устройства, обеспечивающего центровку образца на опорах. Цифровая консоль управления имеет мембранную клавиатуру и жидкокристаллический дисплей с подсветкой для выбора параметров испытания и результатов.

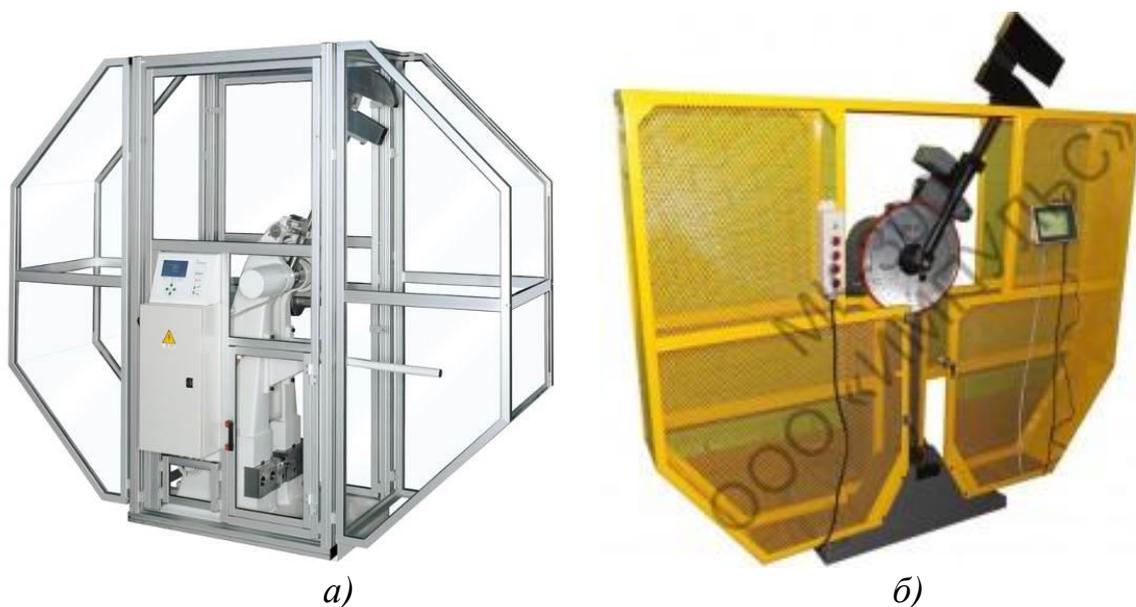


Рис.2.11. Внешний вид копра для проведения испытаний образцов на ударную вязкость: а – маятниковый копер Zwick/Roell, Германия; б – маятниковый копер Точприбор, Россия

2.1.5. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости

Испытания ударной вязкости широко применяют для оценки склонности металла к хрупкому разрушению при низких температурах. Для оценки хладноломкости обычно проводят испытания серии образцов при понижающихся температурах.

Хладноломкостью называют способность некоторых металлов охрупчиваться при низких температурах. К хладноломким относят металлы с решеткой объемно центрированного куба, например, Fe_{α} и гексагональной, например, Zn. Для этой группы металлов при отрицательной температуре наблюдается резкое снижение ударной вязкости.

К нехладноломким металлам относят металлы с решеткой гранецентрированного куба, например Fe_{γ} , Al, Ni и др.

Деление металлов на хладноломкие и нехладноломкие условно, так как, например, аустенитные стали, имеющие решетку гранецентрированного куба, тоже подвержены охрупчиванию, но только в меньшей степени и при более низких температурах, чем углеродистые и низколегированные стали, имеющие решетку объемно-центрированного куба.

Испытывая образцы на ударную вязкость, разрушают вязкий металл в результате одновременного воздействия надреза, повышенной скорости деформирования и низкой температуры. Кривые зависимости ударной вязкости от температуры называют *серийными кривыми хладноломкости*.

На рис.2.12 представлены графики температурного изменения ударной вязкости хладноломкой стали. Как видно из рисунка, снижение ударной вязкости, т.е. вязкие и хрупкие изломы, происходит в некотором интервале температуры.

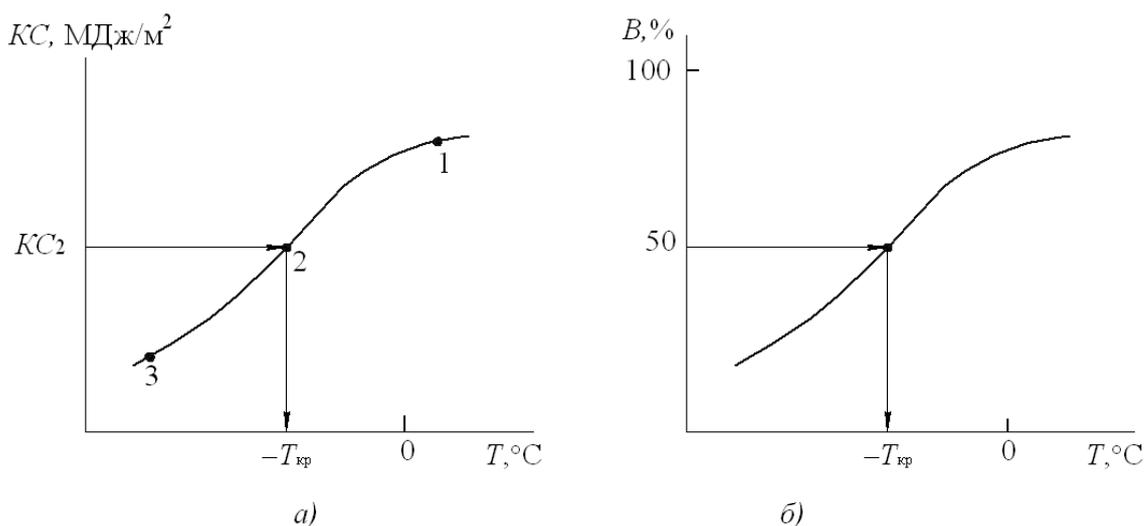


Рис.2.12. Схемы низкотемпературного изменения ударной вязкости (а) и волокнистости в изломе ударного образца (б)

Характер снижения ударной вязкости напоминает порог, что привело к выражению *порог хладноломкости*. Температура, при которой происходит определенное снижение ударной вязкости, называется *критической температурой хрупкости* $T_{кр}$. Количественно критическую температуру хрупкости можно определить по температуре, соответствующей началу порога хладноломкости (точка 1), концу порога хладноломкости (точка 3) и по заданному значению ударной вязкости KC_2 (точка 2).

Оценку хладноломкости можно также проводить по виду излома разрушившегося образца. Метод основан на определении соотношения площадей вязких и хрупких участков излома ударных образцов. Вязкий излом имеет характерное волокнистое строение с пепельным оттенком. С понижением температуры количество волокнистой структуры в изломе снижается, появляются кристаллические блестящие участки. Обычно за критическую температуру хрупкости принимают такую температуру, при которой доля волокнистой составляющей структуры равна 50%.

2.1.6. Усталостные испытания

Усталость представляет собой процесс постепенного накопления повреждений в металле под действием переменных напряжений, приводящих к образованию и развитию усталостных трещин. Усталость ответственна примерно за 50 % случаев всех аварийных разрушений, встречающихся в инженерной практике.

Большинство разрушений деталей и конструкций при эксплуатации происходит в результате циклического нагружения. Металл, подверженный такому нагружению, может разрушаться при более низких напряжениях, чем при однократном плавном нагружении. Свойство материалов противостоять усталости называют *выносливостью*.

Испытания на усталость проводят в соответствии с [ГОСТ 25502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость»](#). Усталостные характеристики при комнатной температуре обычно определяют при испытании образцов круглого сечения на изгиб с вращением рис.2.13.

Циклическое нагружение осуществляется подвешенным неподвижным грузом при вращении консольно закрепленного образца (рис.2.13, а). Цикл напряжений – это совокупность переменных значений напряжений за один период T их изменения. За максимальное напряжение цикла σ_{max} принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение, а за минимальное σ_{min} – наименьшее по алгебраической величине напряжение. Цикл характеризуется коэффициентом асимметрии

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}.$$

Если $|\sigma_{\min}| = |\sigma_{\max}|$, то $R = -1$ и цикл в этом случае называют *симметричным* (рис.2.13, б). Если $|\sigma_{\min}| \neq |\sigma_{\max}|$ то цикл называют *асимметричным*.

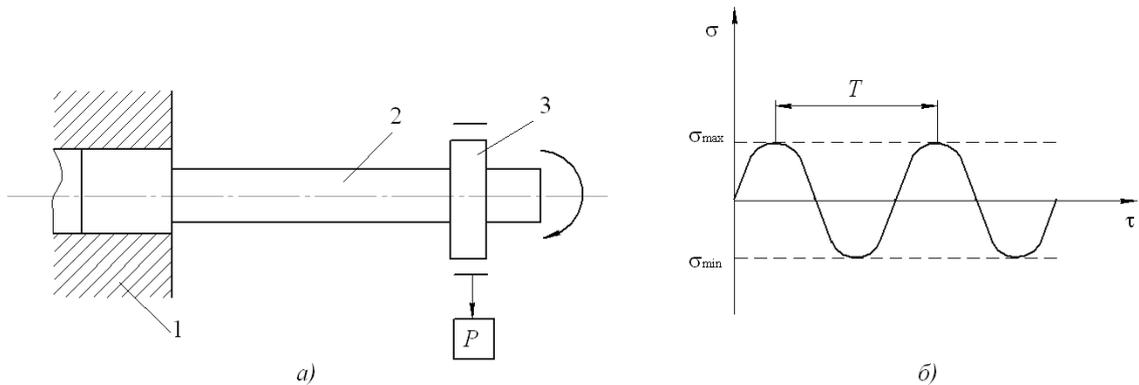


Рис. 13. Испытания на усталость: а – схема нагружения образца; б – циклическое изменение напряжения σ в образце; 1 – вращающийся шпиндель; 2 – образец; 3 – нагружающий подшипник

Сопротивление усталости характеризуется *пределом выносливости* σ_R , под которым понимают максимальное напряжение, не вызывающее разрушения образца при любом числе циклов (физический предел выносливости) или заданном числе циклов (ограниченный предел выносливости). Предел выносливости при симметричном цикле обозначается σ_{-1} .

Испытывают серию образцов (не менее 15) при различной нагрузке и определяют разрушающее напряжение и соответствующее число цикло нагружения. Каждый образец испытывают только на одном уровне напряжений – до разрушения или базового числа циклов. По результатам испытаний отдельных образцов строят диаграммы усталости в координатах максимальное напряжение σ_{\max} – число циклов N (рис.2.14).

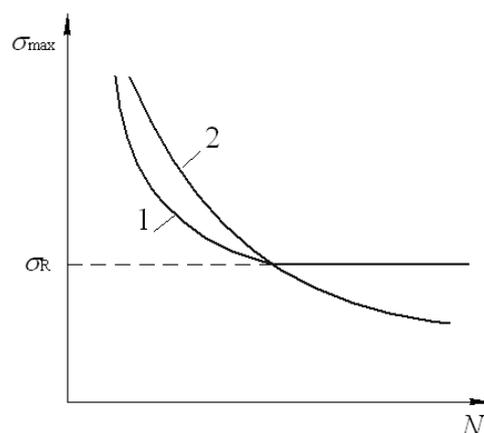


Рис.2.14. Диаграмма усталости: 1 – материалы, имеющие физический предел выносливости; 2 – материалы, не имеющие физический предел выносливости образец

Переход кривой усталости в горизонтальную линию наблюдается обычно на сталях после 10^7 циклов нагружения. Для цветных сплавов это значение составляет обычно 10^8 циклов нагружения. Ордината, соответствующая постоянному значению σ_{\max} , является физическим пределом выносливости. Но могут быть случаи, когда и после указанного числа циклов кривая усталости не переходит в горизонтальную линию, а продолжает снижаться. Тогда $N = 10^7$ для сталей и $N = 10^8$ для цветных сплавов принимают за базовое число циклов и при указанных числах циклов определяют ограниченный предел выносливости.

Изложенная выше методика испытания материалов относится к испытаниям на *многоцикловую усталость*, когда используются большое базовое число циклов (до $N = 10^7-10^8$) и высокая частота нагружения (до 300 Гц). Кроме того, проводят испытания и на *малоцикловую усталость*, отражающие условия эксплуатации конструкций, подвергающихся воздействию редких, но значительных по величине циклических нагрузок. Испытания на малоцикловую усталость проводятся при малой частоте нагружения (3–5 Гц) и базовом числе циклов не более $N = 5 \cdot 10^4$.

Термической усталостью называют усталость металлов, вызванную напряжениями от циклических колебаний температуры. Термическая усталость отличается от силовой меньшим числом циклов и сравнительно высоким уровнем напряжений.

2.1.7. Испытания на жаропрочность

Одним из основных требований, предъявляемых к металлу энергоустановок, является высокая жаропрочность. *Жаропрочность* – способность металлов и сплавов длительно работать без разрушения под воздействием внешних нагрузок и повышенных температур.

Для оценки показателей жаропрочности металла проводят механические испытания на ползучесть и длительную прочность.

Ползучесть – это явление, заключающееся в том, что металл, нагруженный при постоянно высокой температуре, медленно и непрерывно пластически деформируется под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате развития ползучести увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб. Деталь, проработавшая определенное время в условиях ползучести, разрушается при пластической деформации, во много раз меньшей, чем при кратковременной перегрузке при той же температуре. Повышение рабочих температур на тепловых электростанциях привело к тому, что многие детали работают в условиях, при которых появляется ползучесть.

Испытания на ползучесть проводятся в соответствии с требованиями [ГОСТ 3248-81](#). Сущность метода состоит в том, что образец подвергается постоянной растягивающей нагрузке при постоянной температуре, причем фиксируется удлинение образца во времени. Схема установки и образцы для испытаний на ползучесть приведены на рис.2.15 и 2.16.

Образец устанавливают в захваты машины и помещают в печь. Изме-

рение температуры производят прибором, обеспечивающим точность измерения не менее $\pm 0,5\%$. Не реже одного раза в 2 ч проверяют температуру потенциометром. Рекомендуется автоматическая запись температуры на протяжении всего испытания.

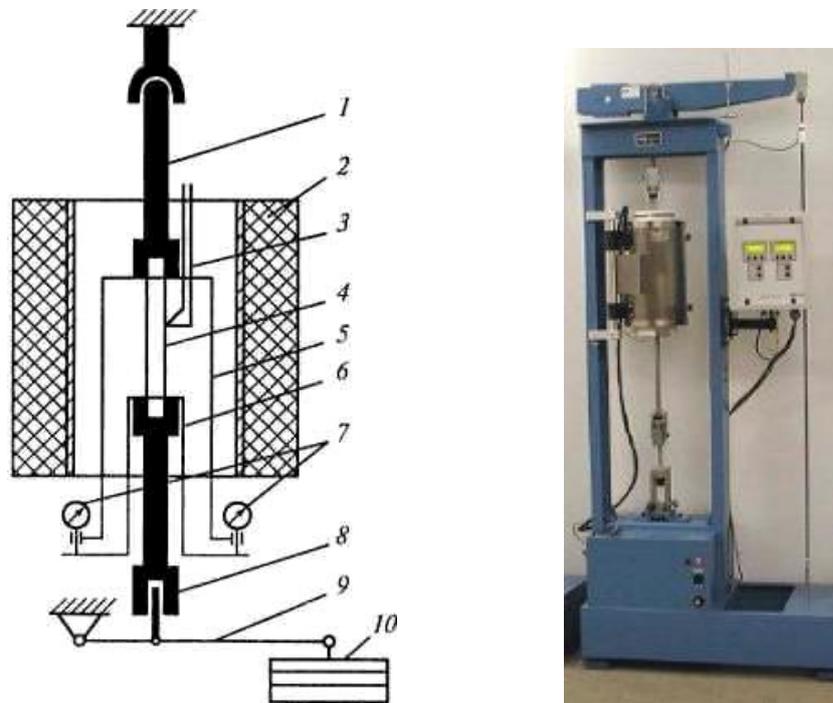


Рис.2.15. Схема и внешний вид установки для испытания металла на ползучесть:
 1 – верхний захват; 2 – электропечь; 3 – термопреобразователи; 4 – образец; 5 – наружная шина; 6 – внутренняя шина; 7 – индикатор часового типа; 8 – нижний захват; 9 – грузовой рычаг; 10 – грузы

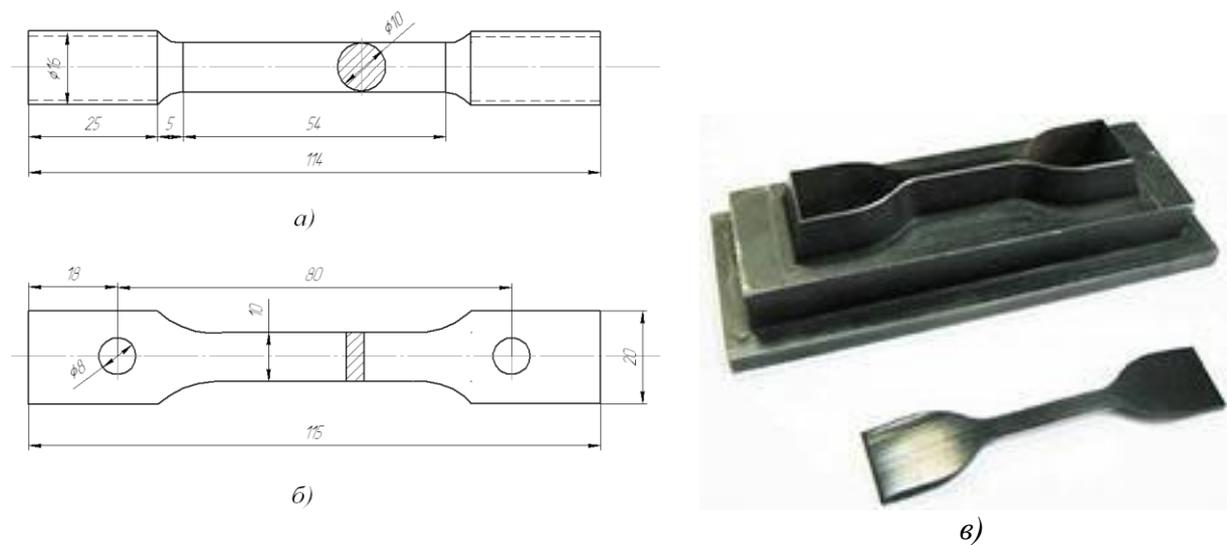


Рис. 2.16 Форма и размеры образцов для испытания на ползучесть на ползучесть:
 а, в – цилиндрический; б – плоский

На образец при помощи системы рычагов и грузов передается постоянная нагрузка. Когда образец вытягивается, один из захватов перемещается, компенсируя удлинение образца. Постоянная нагрузка обеспечивается грузами, уложенными на тарелку рычага. Допускаемая погрешность при положении нагрузки $\pm 1\%$.

Возникающие в образце деформации измеряют при помощи экзотензометров и по результатам строят диаграммы ползучести в координатах деформация ε – время τ . (рис.2.17).

Кривая ползучести состоит из 4-х участков. Участок OA соответствует упругой деформации, возникшей в момент приложения нагрузки.

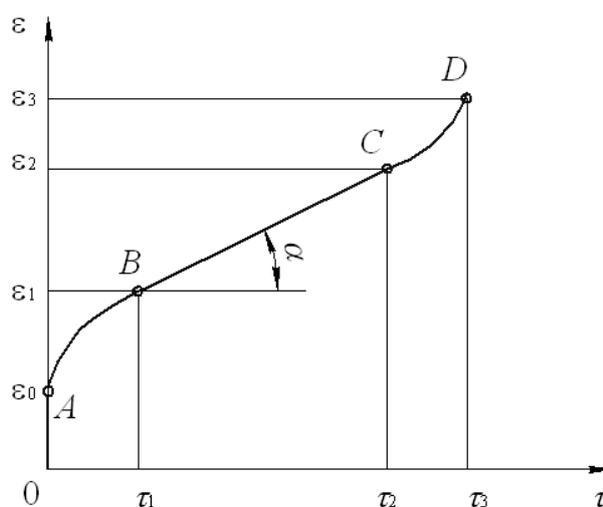


Рис.2.17. Схема диаграммы ползучести

Участок AB характеризует неустановившуюся ползучесть, где металл деформируется с неустановившейся скоростью, участок BC – установившуюся ползучесть и участок CD – ускоренное разрушение, связанное с образованием шейки.

Основной характеристикой ползучести является предел ползучести. *Предел ползучести* – напряжение, которое вызывает заданную деформацию за определенный промежуток времени. Заданная деформация устанавливается исходя из допустимых зазоров между деталями, а время – из срока службы изделия. Так, для теплоэнергетического оборудования задается деформация, равная 1 %, а время – 10^5 ч. При таком большом промежутке времени основная деформация соответствует прямолинейному участку диаграммы ползучести, по сравнению с которой деформация на начальном криволинейном участке ничтожно мала, и ею можно пренебречь. Тогда скорость деформации на установившемся участке для $\varepsilon = 1\%$ и времени $\tau = 10^5$ ч будет составлять $1/10^5$ %/ч (10^{-5} %/ч).

Предел ползучести обозначают $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$, где t – температура, °С; τ – время, ч; ε – деформация, %.

Для деталей длительное время работающих при повышенных температу-

рах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например 0,1% за 10^5 ч.

Например, для допускаемой деформации, равной 1 %, за 10^5 ч при температуре $t = 500$ °С предел ползучести обозначается: $\sigma_{1/10^5}^{550} = 130$ МПа (напряжение, равное 130 МПа, вызывает деформацию в 1 % за 10^5 ч при температуре 550°С).

Длительная прочность – это сопротивление материалов разрушению в условиях ползучести. *Испытания на длительную прочность* выполняются на тех же машинах, что и испытания на ползучесть, но с доведением образцов до разрушения. Обычно испытывают не менее 10 образцов из одного материала при одной и той же температуре, но при разных напряжениях: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \dots, > \sigma_n$. Методы испытаний на длительную прочность регламентированы ГОСТ 10145-81.

В результате таких испытаний получают диаграмму длительной прочности в координатах напряжение σ – время до разрушения τ (рис.2.18). При уменьшении σ время до разрушения τ увеличивается.

Чаще всего диаграмму длительной прочности представляют в виде степенного уравнения

$$\tau = A_1 \sigma^{-b_1},$$

где A_1 , и b_1 – постоянные коэффициенты для испытываемого материала при заданной температуре.

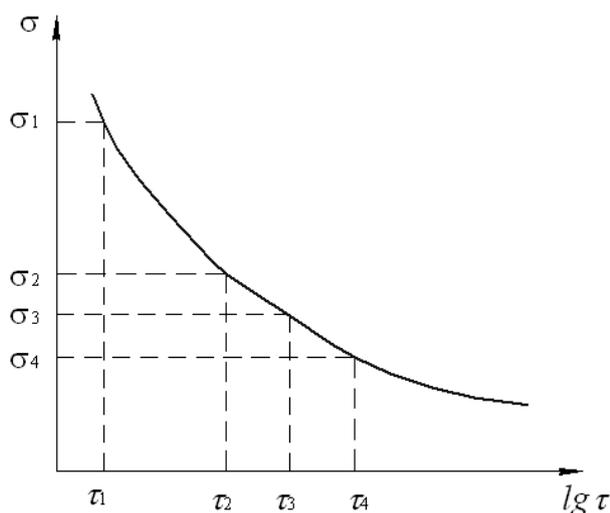


Рис.2.18. Кривая длительной прочности

Диаграммы длительной прочности дают возможность оценить *предел длительной прочности* – напряжение, которое при постоянной температуре доводит металл до полного разрушения за заданный промежуток времени, определяемый сроком службы изделия. Предел длительной прочности обозначается

σ_{τ}^t , где t – температура, °С; τ – время до разрушения, ч. Так, для теплоэнергетического оборудования значения σ_{τ}^t находят по времени, равному 10^5 ч. В этом случае величина σ_{τ}^t есть напряжение, доводящее металл до разрушения за 10^5 ч при заданной температуре.

Например, $\sigma_{10^5}^{550} = 150$ МПа – напряжение, равное 150 МПа, доводит металл до разрушения за 10^5 ч при температуре 550 °С.

2.2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металлографические методы исследования позволяют выполнить структурный анализ металлов и сплавов. При изучении строения металлов и сплавов различают *макроструктуру* – строение металла, видимое невооруженным глазом или при небольших увеличениях, и *микроструктуру* – строение металла, определяемое металлографическими методами, т.е. с использованием различных типов микроскопов (оптических, электронных и ионных).

2.2.1. Изучение макроструктуры металла

Макроструктуру металла изучают путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов – продольных и поперечных макрошлифов (темплетов) или изломов – невооруженным глазом, а также с помощью лупы при увеличении до 30 раз.

Это позволяет контролировать достаточно большую поверхность и получать общее представление о качестве металла и о наличии в нем определенных дефектов. Макроструктурный анализ позволяет установить форму и расположение крупных зерен в литом металле, выявить трещины, усадочные пустоты, зональную ликвацию (неоднородность химического состава в объеме слитка).

Макроанализ, как правило, является не окончательным, а предварительным этапом исследования структуры металла. Он позволяет выбрать те участки, которые затем тщательно изучаются с помощью металлографических методов.

Большое значение для успешного проведения макроанализа имеет правильный выбор наиболее характерного для исследуемой детали сечения или места излома. Как правило, для контроля качества металла число образцов, их размеры, место вырезки и другие условия отбора проб указывают в стандартах и технических условиях на конкретную металлопродукцию.

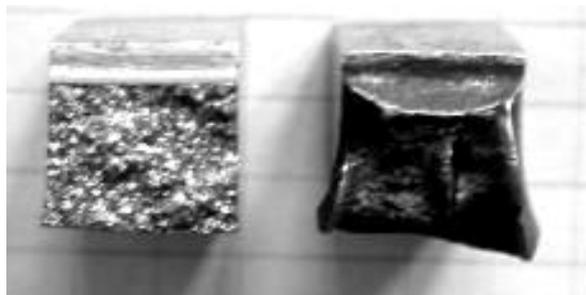


Рис.19. Изучение макроструктуры по изломам образцов

Существуют три способа изучения макроструктуры металлов:

- глубокое травление;
- метод отпечатков;
- анализ изломов.

Глубокое травление и метод отпечатков проводят на макрошлифах (темплетах). Контролируемую поверхность перед испытанием торцуют, строгают и шлифуют. Готовая поверхность должна быть ровной без наклепа и прижога.

При изучении макроструктуры *методом травления* (ТР) образцы после шлифования травят специальными реактивами до выявления строения и дефектов макроструктуры. Для выявления макроструктуры многих марок сталей применяют горячий (60 – 80°C) 50% раствор соляной кислоты. Темплеты травят в течение 5 – 45 мин до четкого выявления макроструктуры. Этот метод применяют для выявления структуры и макродефектов (пор, трещин, раковин и др.). В этом случае изображение и изучение структуры осуществляется на самом макрошлифе.

Метод отпечатков основан на том, что изображение структуры проявляется не на самом шлифе, а на бумаге, ткани или пленке. Материал с нанесенным на него реактивом прижимают к поверхности шлифа. В результате воздействия реактива с отдельными структурными составляющими на бумаге образуются характерные окрашенные продукты. Таким образом, например, выявляют неравномерное распределение серы в стали.

Метод анализа излома наиболее прост и доступен. Объектом исследования является естественная поверхность разрушенного образца или детали. Вид излома свидетельствует о характере разрушения металла.

2.2.2. Изучение микроструктуры металла

Микроструктурный анализ состоит в изучении структуры металла и сплавов с помощью световых микроскопов, увеличивающих исследуемый объект в 30 – 2000 раз. Для микроструктурного анализа необходимо изготовить небольшой образец (микрошлиф), имеющий обычно форму цилиндра или призмы. Плоскую поверхность микрошлифа готовят более тщательно, чем при макроструктурном анализе.



Рис.20. Изучение микроструктуры сталей и сплавов

После шлифовки и полировки поверхность подвергают химическому травлению специальными реактивами. Например, для травления углеродистых сталей и чугунов применяют спиртовой 2 – 4 %-ный раствор азотной или пикриновой кислоты. В результате действия реактива происходит растворение металлических зерен и их пограничных слоев, которые растворяются более интенсивно. Это приводит к тому, что отражение вертикально падающих лучей света от поверхности зерен и их границ происходит под разными углами. Поэтому границы зерен выявляются в виде темных линий. Кроме того, имеются различия в скоростях растворения отдельных фаз и структурных составляющих.

После травления микрошлиф промывают в проточной воде, высушивают и устанавливают на предметном столике металлографического микроскопа. Перемещая столик микрометрическими винтами, можно детально изучить различные малые участки поверхности металла. Чем больше увеличение микроскопа, тем выше локальность анализа.

Микроструктурный анализ позволяет установить размеры кристаллических зерен, относительное количество структурных составляющих, размеры и расположение неметаллических включений, наличие микродефектов в виде пор и трещин, дендритную ликвацию в зерне, ориентировочно химический состав, изменения в строении сплава под воздействием различных видов обработки.

2.3. ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Для характеристики коррозионных свойств материалов обычно проводят их испытания на стойкость против общей коррозии, межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

2.3.1. Испытания на общую коррозию

Испытания на общую коррозию проводят на образцах с большим отношением поверхности к объему. Коррозионную среду выбирают с учетом условий эксплуатации материала. Испытания проводят в жидкости при постоянном или многократно повторяемом переменном нагружении образцов в кипящем соляном растворе, в парах или окружающей атмосфере.

Наиболее часто применяют пятибалльную систему оценки общей коррозии (табл.2.1). Критерием коррозионной стойкости является скорость коррозии ($V_{кор}$, мм/год).

Кроме глубины проникновения, оценку коррозионной стойкости можно проводить по десятибалльной шкале потери массы образца за определенный период времени на единицу площади K , г/(м²·ч).

Пересчет обоих показателей проводят по формуле

$$V_{кор} = 8,76 K / \gamma ,$$

где $V_{кор}$ – скорость коррозии, мм/год;
 γ – плотность, г/см³;
 K – потеря массы образца, г/(м²·ч).

Таблица.2.1. Пятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов

Балл	Скорость коррозии $V_{кор}$, мм/год	Категория стойкости металла
1	Не более 0,10	Сильнстойкие
2	0,10–1,00	Стойкие
3	1,10–3,00	Пониженнстойкие
4	3,10–10,0	Малостойкие
5	Более 10,0	Нестойкие

2.3.2. Испытания на межкристаллитную коррозию

Испытания на межкристаллитную коррозию проводят в соответствии с ГОСТ 6032–2003 «Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии». Этот стандарт устанавливает методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) металла из коррозионно-стойких сталей и сплавов, в том числе двухслойных, аустенитного, ферритного, аустенитно-ферритного, аустенитно-мартенситного классов, а также их сварных соединений и наплавленного металла.

В зависимости от химического состава стали и сплава и их назначения выбирают один из следующих методов испытания на стойкость к МКК: АМУ, АМУФ, ВУ, ДУ, В, Б. В условных обозначениях методов буквы обозначают:

А,Б,В,Д – буквенное наименование методов (А – испытание образцов в растворе серной кислоты, Б – анодное травление образцов в ингибированной серной кислоте, В – образцов в растворе серной кислоты и цинкового порошка, Д – испытание образцов в азотной кислоте);

М – присутствие в растворе для испытаний металлической меди;

Ф – присутствие в растворе для испытаний иона фтора;

У – ускоренные испытания.

Испытания проводят на плоских образцах, изготовленных из вырезок зон основного металла или сварного шва. Стандартом допускается также изготовление цилиндрических образцов из проволоки, цилиндрических заготовок диаметром не более 10 мм. Количество образцов (от 4 до 8 штук) зависит от метода испытаний на МКК.

Размеры образцов должны обеспечивать возможность:

- изгиба на угол $90^\circ \pm 5^\circ$ плоского образца, сегмента, цилиндра или патрубка диаметром до 10мм, проволоки;
- сплющивания кольцевых образцов;
- осмотра поверхности изгиба на участке, ширина которого позволяет выявить межкристаллитные трещины с учетом возможного влияния кромок.

Для оценки стойкости к межкристаллитной коррозии сталей ферритного, аустенитного и аустенитно-ферритного классов обычно применяют метод АМУ.

Перед испытаниями образцы из хромистых сталей подвергают провоцирующему нагреву при температуре 1100 °С в течение 30 ч, а хромоникелевые аустенитные – при температуре около 700 °С в течение до 60 ч.

Сущность метода АМУ заключается в том, что образцы выдерживают в кипящем водном растворе сернистой меди или серной кислоты в присутствии металлической меди.

Для проведения испытаний применяют следующие реактивы: кислоту серную, медь сернистую; воду дистиллированную, медь в виде стружки, кислоту соляную и кислоту азотную.

Раствор для испытаний готовят следующим образом: к 1000±3 см³ воды добавляют сернистую медь (50±0,1)г, небольшими порциями серную кислоту (250±3) см³ и до загрузки образцов в колбу с раствором добавляют медную стружку в количестве, обеспечивающем всесторонний контакт с образцами и отсутствие контакта между образцами.

Испытания проводят в стеклянной колбе с обратным холодильником. Допускается загрузка образцов одной и той же марки в несколько рядов при условии, что ряды образцов, между которыми находится медная стружка, не будут соприкасаться друг с другом. Загрузка образцов различных марок сталей в одну и ту же колбу не допускается.

Затем колбу заполняют раствором для испытаний, нагревают и непрерывно кипятят. Продолжительность выдержки в кипящем растворе составляет 8,00± 0,25 ч.

После выдержки в кипящем растворе образцы промывают водой и просушивают. При отложении на образцах слоя меди, несмываемого струей воды, его удаляют, промывая образцы в 20% – 30%-ном растворе азотной кислоты при температуре 20°С – 25°С.

По окончании испытаний для обнаружения МКК образцы изгибают на оправке на угол 90° ± 5°, либо подвергают травлению специальными реактивами и металлографическому исследованию. Отсутствие трещин на поверхности образца свидетельствует о его стойкости к МКК.

2.3.3. Испытания на коррозионное растрескивание

Коррозионное растрескивание представляет собой разрушение металла при одновременном действии коррозионно-активной среды и растягивающих напряжений.

Испытания на коррозионное растрескивание проводят при нагружении образца в коррозионной среде, соответствующей служебным условиям эксплуатации детали. Среда не должна вызывать общей коррозии и оказывать воздействие на ненагруженные образцы металла. Для аустенитных хромоникелевых сталей примером такой среды может служить кипящий раствор смеси со-

лей $MgCl_2$, $NaCl$ и $NaNO_3$. Агрессивность сред должна быть не меньше той, в которой должны служить испытуемые материалы.

Ферритные стали имеют максимальную стойкость к коррозионному растрескиванию, а аустенитные – минимальную.

ТЕМА 3. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Методы неразрушающего контроля, основанные на различных физических явлениях, имеющих место при исследованиях качества (прохождении и передаче энергии или прохождении вещества через объект контроля) называют *физическими*.

В соответствии [ГОСТ 18353-79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов»](#) неразрушающий контроль в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на девять видов: акустический, проникающими веществами, магнитный, оптический, радиационный, радиоволновый, тепловой, электрический, электромагнитный (вихретоковый). В табл. 3.1. приведены виды неразрушающего контроля и физические явления, на которых они основаны.

Таблица 3.1. Виды неразрушающего контроля и физические явления, на которых они основаны

Вид контроля	Физические основы
Акустический	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. Примечание. При использовании упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический»
Вихретоковый	Вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых к контролируемом объекте.
Магнитный	Вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом
Оптический	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом

Проникающими веществами	Вид неразрушающего контроля, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта. Примечание. При выявлении невидимых или слабо видимых глазом поверхностных дефектов, термин «проникающими веществами» может изменяться на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефекта» – на «течеискание»
Радиоволновой	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом
Тепловой	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами
Радиационный	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. Примечание. В наименовании методов контроля слово «радиационный» может заменяться словом, обозначающим конкретный вид ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т.д.)
Электрический	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом или возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия

Методы каждого вида неразрушающего контроля классифицируются по следующим признакам:

- характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- первичным информативным параметрам;
- способам получения первичной информации.

При дефектоскопии методы контроля выбирают исходя из способов изготовления деталей, а также видов дефектов, подлежащих выявлению. Основной характеристикой метода контроля является чувствительность, определяющая его способность выявлять дефекты минимальных размеров. Чувствительность оценивают абсолютными или относительными (по отношению к толщине контролируемого изделия) размерами выявляемых дефектов. Она зависит от вида дефекта, его размеров, ориентации и местоположения в изделии. Так как наиболее опасными дефектами изделий являются трещины, сравнительную оценку чувствительности различных методов контроля осуществляют по выявляемости ими трещин различного размера (табл.3.2.).

Таблица 3.2. Минимальные размеры трещин, выявляемых при неразрушающем контроле

Виды контроля	Размеры трещин, мкм		
	Раскрытие	Глубина	Протяженность
Визуальный	5...10	–	100
Радиационный	100	1,5...5%S	–
Ультразвуковой	0,01...0,1	100...300	–
Магнитный (магнитопорошковый)	1...10	10...50	300
Вихретоковый	0,5...1	150...200	600...2000
Капиллярный	1...10	10...100	100...3000

Большинство методов контроля (магнитного, вихретокового, капиллярного, ультразвукового) можно использовать для испытаний при одностороннем доступе к изделию. Методы радиационного контроля требуют двустороннего доступа к объекту: с одной стороны находится источник излучения, а с другой – детектор. Важную роль при выборе методов играют технические условия (правила контроля) на отбраковку. При равной чувствительности предпочтение отдают тому методу, который проще, доступнее, имеет более высокую производительность и обеспечивает большую достоверность результатов контроля.

При контроле металла теплоэнергетического оборудования наиболее широко применяются: акустические, магнитные, вихретоковые, радиационные и капиллярные методы неразрушающего контроля.

3.1.1. Акустические методы неразрушающего контроля

Акустические методы контроля основаны на возбуждении и распространении акустических (упругих) волн в упругих телах, и определении акустических свойств материала исследуемого объекта контроля.

В зависимости от частоты упругие колебания делятся на группы:

- инфразвуковые – частотой до 20 Гц;
- звуковые – с частотой от 20 до $2 \cdot 10^4$ Гц;
- ультразвуковые – от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^9$ Гц;
- гиперзвуковые – более $2 \cdot 10^9$ Гц.

При акустическом контроле (АК) используются только звуковые и ультразвуковые диапазоны частотой от 50 Гц до 50 МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика: не превышает 1 кВт/м^2 . Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

К акустическим свойствам сред относят скорость распространения волны, коэффициент затухания и удельное волновое сопротивление (характеристический импеданс). В твердом теле эти величины определяют для продольных и поперечных волн. Основные акустические свойства различных материалов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Акустические свойства веществ

Вещество	Скорость волн $c, 10^3$ м/с		Плотность $\rho, 10^3, \text{кг/м}^3$	Волновое сопротивле- ние $z, 10^6$ Па·с/м	Коэф-т затухания на 2,5 МГц $\delta, \text{Нп/м}$
	продольные	поперечные			
Металлы					
Алюминий	6,36	3,13	2,7	17,2	0,1...1
Бронза	3,5...3,8	2,3...2,5	8...9	30...34	–
Вольфрам	5,32	2,77	19,3	102,7	–
Дюралюмин	6,2...6,4	3...3,2	2,7...2,8	19...20	0,1...1
Железо	5,92	3,23	7,8	46,3	0,2...5
Латунь	4,3...4,7	3,1...3,5	8,4...8,5	36...40	–
Медь	4,72	2,4	8,9	42	2,5...20
Никель	5,7	3,0	8,9	50,7	–
Свинец	2,16	0,87	11,4	24,6	–
Серебро	3,65	1,65	10,5	38,3	–
Сталь:					
углеродистая	5,90...5,94	3,22...3,25	7,7...7,9	45,9...46,3	0,1...10
аустенитная	5,77...6,14	3,2...3,31	7,6...8	44...48	0,3...40
Титан	6,1	3,13	4,5	27,5	–
Титановые сплавы ВТ, ОТ	6,05...6,3	3,1...3,3	4,5...4,7	27...29	–
Чугун	3,5...5,6	2,2...3,2	7,2...7,6	26...42	0,3...50
Неметаллы					
Бетон	2,1...5,2		1,8...2,8	6...9,5	–
Полистирол	2,35	1,13	1,06	2,5	10...13
Резина	1,4...2,3		0,9...1,6	2...3	30...60
Стекло орган.	2,7...2,75	1,12...1,13	1,17...1,19	3,0.. 3,3	20...30
Фторопласт	1,35		2,2	30	160
Эбонит	2,4	–	1,2	2,9	90
Жидкости и газы					
Вода	1,49	–	0,998	1,49	0,156
Глицерин	1,92	–	1,27	2,43	10,6
Трансформатор- ное масло	1,4	–	0,9	1,3	0,8
Спирт этиловый	1,18	–	0,79	0,93	0,34
Воздух	0,33	–	0,0013	0,00043	10...12

Пьезоэлектрические преобразователи. Для возбуждения упругих колебаний в различных материалах используются специальные преобразователи: пьезоэлектрические, магнитострикционные, электромагнитно-акустические и др. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (рис.3.1).

Пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) – устройство, предназначенное для преобразования электрической (акустической) энергии в акустическую (электрическую). Принцип работы преобразователя основан на использовании пьезоэлектрического эффекта.



Рис.3.1. Внешний вид пьезоэлектрических преобразователей

Общие технические требования к ПЭП регламентирует [ГОСТ 26266-90 «Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования»](#). В соответствии со стандартом ПЭП классифицируют по ряду признакам.

По способам ввода ультразвуковых колебаний ПЭП подразделяют на контактные, щелевые, иммерсионные и бесконтактные.

Контактные преобразователи нашли наибольшее применение в промышленности. Их основным недостатком является нестабильность акустического контакта в процессе сканирования преобразователя.

При контроле некоторых деталей и конструкций, когда не допускается нанесение контактной жидкости перед ПЭП (например, при обнаружении поверхностных трещин), используют щелевые (менисковые) преобразователи.

Иммерсионный ввод УЗ-колебаний чаще всего используют при автоматизированном контроле изделий небольшого размера или изделий простой геометрической формы, например труб небольшого диаметра. Иногда преобразователи с иммерсионной локальной ванной применяют при контроле по грубообработанным поверхностям.

Особую группу составляют бесконтактные ПЭП, которые возбуждают упругие колебания в металле за счет взаимодействия переменного электрического и магнитного полей.

По направлению ввода упругих колебаний в исследуемый объект ПЭП бывают прямые, наклонные, комбинированные.

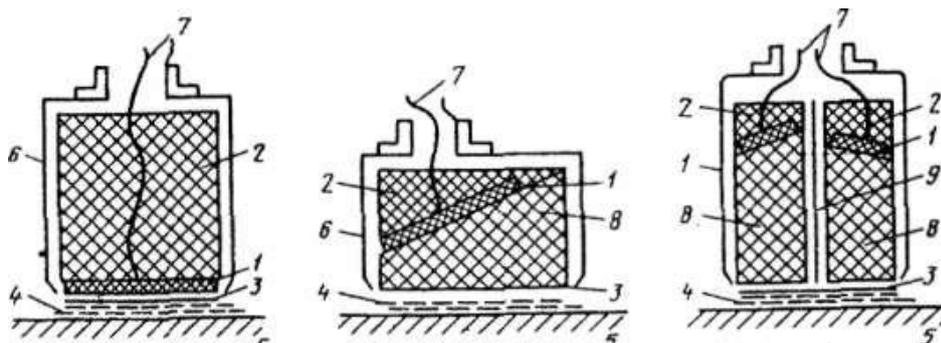
По конструктивному исполнению и способу подключения к электронной части дефектоскопа пьезоэлектрические преобразователи подразделяют на совмещенные, раздельно-совмещенные (РС), раздельные.

В совмещенных ПЭП пьезоэлемент выполняет роль излучателя и приемника УЗ-колебаний. В РС-преобразователях функции излучателя и приемника

разделены, а конструктивно они выполнены в одном корпусе.

В зависимости от формы рабочей поверхности или пьезоэлемента ПЭП могут быть *плоскими* или *неплоскими*. Среди неплоских широкое распространение получили *фокусирующие* ПЭП.

Тип ПЭП определяют сочетанием перечисленных выше признаков: контактные прямые совмещенные; иммерсионные прямые совмещенные; контактно-иммерсионные прямые; контактные прямые РС с акустической задержкой; контактные наклонные совмещенные с акустической задержкой; контактные наклонные РС с акустической задержкой. На рис. 3.2 показаны конструктивные схемы некоторых ПЭП.



1 – пьезопластина; 2 – демфер; 3 – протектор; 4 – контактная жидкость; 5 – объект контроля; 6 – корпус; 7 – выводы; 8 – призма; электроакустический экран

Рис.3.2. Конструкции пьезопреобразователей: а – прямой совмещенный контактный; б – наклонный совмещенный; в – раздельно-совмещенные

Основным элементом ПЭП является пьезопластина 1, которая представляет собой пластину, изготовленную пьезоэлектрического материала (кварц, турматин, титанат бария, цирконат-титаната свинца и др.) На поверхность таких пластин наносится тонкие слои серебра, служащие электродами. После поляризации таких пластин в постоянном электрическом поле они приобретают пьезоэлектрические свойства. При приложении к электродам переменного электрического напряжения пьезопластина начинает изменять свои размеры (растягивается и сжимается) в зависимости от частоты напряжения. В тоже время при механическом многократном сжатии и растяжении пластинки на ее поверхностях появляются электрические разряды: пьезоэффект обратим. Если пьезопластину (пьезоэлемент) расположить на поверхности контролируемой детали, то в материале ее будут возбуждаться и распространяться упругие волны.

В контактном *прямом* преобразователе (рис. 3.2а) пьезопластина приклеена или прижата с одной стороны к демпферу 2, с другой – к протектору 3. Пьезопластину, демпфер и протектор, склеенные между собой, называют *вибратором*. Вибратор размещен в корпусе 6. С помощью выводов 7 пьезопластину соединяют с электронным блоком дефектоскопа. Контактная жидкость (смазочный материал) 4 обеспечивает передачу упругих колебаний ультразвуковой

частоты преобразователя к контролируемому изделию 5 и наоборот. Прямые преобразователи предназначены для возбуждения продольных волн и предназначены в основном для выявления поперечных дефектов.

В контактных *наклонных* совмещенных преобразователях (рис.3.2, б) для ввода ультразвуковых колебаний под углом к поверхности контролируемого изделия применяют призму 8. Эти преобразователи предназначены для возбуждения в основном сдвиговых (поперечных) и поверхностных волн, а также продольных волн, наклонных к поверхности контролируемого объекта. Такими преобразователями контролируют вертикально расположенные дефекты и сварные швы.

Вибратор контактных *раздельно-совмещенных* преобразователей (рис.2.2, в) состоит из двух призм 8 с приклеенными к ним пьезопластинами 1, которые разделены электроакустическим экраном 9. Он служит для предотвращения прямой передачи сигналов от излучающей пьезопластины, подключенной к генератору, к приемной пьезопластине, подключенной к усилителю электронного блока дефектоскопа. Раздельно-совмещенные преобразователи применяются обычно при одностороннем доступе к детали.

Классификация акустических методов контроля.

Методы акустического контроля делят на две большие группы: *активные*, основанные на излучении и приеме акустических колебаний и волн, и *пассивные*, использующие только прием колебаний и волн. Источником колебаний в пассивных методах является сам контролируемый объект. Например, образование трещин сопровождается возникновением акустических колебаний, выявляемых акустико-эмиссионным методом.

К *пассивным* методам относят также вибрационно-диагностический, основанный на измерении параметров вибрации какой либо отдельной детали или узла (ротора, подшипников, лопаток турбин и т.п.) с помощью приемников контактного типа, и шумодиагностический метод, состоящий в анализе спектров шумов работающего механизма на слух или с помощью специальных приборов.

Активные методы делят на пять подгрупп: методы отражения, прохождения, комбинированные (использующие как отражение, так и прохождение), собственных колебаний и импедансные.

Методы *отражения* основаны на анализе отражения импульсов упругих волн от неоднородностей или границ ОК, *прохождения* – на влиянии параметров ОК на характеристики прошедших через него волн. *Комбинированные* методы используют влияние параметров ОК как на отражение, так и на прохождение упругих волн. В методах *собственных колебаний* о свойствах объекта контроля судят по параметрам его свободных или вынужденных колебаний (их частотам и величине потерь). В *импедансных* методах информативным параметром служит механический импеданс ОК в зоне его контакта с преобразователем.

Внутри подгрупп активные методы различают также по способам выявления дефектов. Полная классификация акустических методов контроля пока-

зана на рис.3.3.

Из существующих ультразвуковых методов неразрушающего контроля наибольшее практическое применение находит *эхо-метод*. Около 80 % объектов, контролируемых УЗ методами, проверяют эхо-методом.

Широкое распространение эхо-метод нашел в дефектоскопии. Ультразвуковой эхо-дефектоскоп применяется для обнаружения несплошностей и неоднородностей в ОК, определения их координат, размеров и характера путем излучения импульсов ультразвуковых колебаний, приема и регистрации отраженных от неоднородностей эхо-сигналов.



Рис.3.3. Классификация методов акустического контроля

На рис.3.4. показана упрощенная блок-схема импульсного эхо-дефектоскопа.

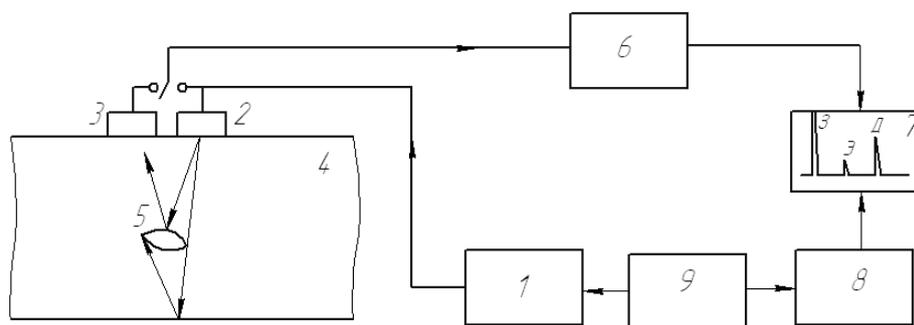


Рис.3.4. Упрощенная структурная схема ультразвукового эхо-дефектоскопа:

1 – генератор; 2,3 – излучатель и приемник (пьезоэлектрический преобразователь); 4 – объект контроля; 5 – дефект; 6 – усилитель; 7 – индикатор; 8 – генератор развертки; 9 – синхронизатор; 3 – зондирующий импульс, Э – импульс от дефекта, Д – импульс от донной поверхности контролируемой детали

При эхо-импульсном методе объект контроля прозвучивают зондирующими импульсами упругих волн, которые возбуждаются генератором 1. Их посылают в контролируемое изделие один за другим через определенные промежутки времени – паузы или интервалы. В преобразователе 2 они преобразуются в импульсы УЗ-колебаний, которые распространяются в объекте контроля 4, отражаются от дефектов 5 и противоположной донной поверхности ОК, принимаются тем же (совмещенная схема включения) или другим (раздельная схема включения) преобразователем 3. Преобразователь превращает УЗ-сигналы в электрические.

От него сигнал поступает на усилитель 6, а затем на электроды, вызывающие вертикальное отклонение светящейся точки на экране 7. Одновременно (иногда спустя некоторый интервал времени) с запуском генератора импульсов начинает работать генератор развертки 8. Правильную последовательность включения их, а также других узлов дефектоскопа, не показанных на упрощенной схеме, обеспечивает синхронизатор 9. Сигналы от генератора развертки вызывают горизонтальное отклонение светящейся точки на экране. В результате на экране УЗ-дефектоскопа строится график, по горизонтальной оси которого откладывается время, пропорциональное глубине залегания дефекта, а по вертикальной – интенсивность отраженного от дефекта импульса, зависящая от его размеров и ориентировки относительно зондирующего импульса и пропорциональная амплитуде эхо-сигналов.

Технология проведения контроля. Общая технологическая схема проведения контроля ультразвуковым методом показана на рис.3.5.



Рис. 3.5. Технология проведения контроля ультразвукового контроля

Области применения акустических методов

В общем случае области применения акустических методов контроля представлены на рис.3.6.



Рис.3.6. Области применения акустических методов

Достоинства и недостатки ультразвукового контроля. К главным *преимуществам* ультразвукового контроля относят:

- возможность контроля любых материалов;
- высокая точность и скорость исследования, а также его низкая стоимость;
- безопасность для человека (в отличие, к примеру, от рентгеновской дефектоскопии);
- высокая мобильность вследствие применения портативных ультразвуковых дефектоскопов;
- возможность проведения ультразвукового контроля (в отдельных случаях) на действующем объекте, т.е. на время проведения УЗК не требуется выведения контролируемой детали/объекта из эксплуатации;

К основным *недостаткам* можно отнести:

- наличие мертвой зоны;
- сложность определения реальных размеров дефектов, т.к. размер дефекта при УЗК определяется его отражательной способностью и поэтому по результатам контроля дается эквивалентный размер дефекта,
- невозможность обнаружения некоторых видов дефектов в силу их характера, формы или расположения в объекте контроля;
- затруднителен контроль деталей небольшой размера и толщины, а также деталей, имеющих сложную форму с криволинейными и сферическими поверхностями малого радиуса;
- трудности при ультразвуковом контроле металлов с крупнозернистой структурой, из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука;
- жесткие требования к качеству контролируемой поверхности (очистка, зачистка, создание необходимой шероховатости поверхности, нанесение контактной жидкости).

3.1.2. Методы акустико-эмиссионной диагностики.

Метод акустической эмиссии (АЭ) основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в процессе внутренней локальной перестройки кристаллической структуры контролируемого объекта, появления и развития трещин в ОК и др. Метод акустической эмиссии позволяет регистрировать развивающиеся дефекты и оценивать степень их опасности.

Источником волн АЭ является также истечение рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте, поэтому метод акустической эмиссии можно применять для обнаружения течей, например, в тепловых сетях.

Схема проведения акустико-эмиссионного метода контроля приведена на (рис.3.7).

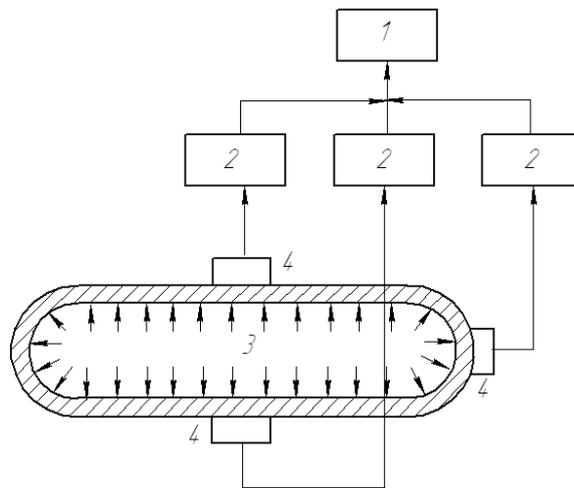


Рис. 3.7. Акустико-эмиссионный метод контроля: 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник; 5 – усилитель; 6 – блок обработки информации с индикатором

Приборы для контроля акустико-эмиссионным методом обычно выполняют многоканальными. Контактные с объектом ПЭП 4 принимают упругие волны и позволяют установить место их источника (дефекта). Сигналы проходят через усилители 2 и поступают в блок обработки информации 1, который помогает выделению сигналов от трещин на фоне помех и формирует изображение на экране участка ОК с сигналами от развивающейся трещины.

Основные положения по применению акустическо-эмиссионного метода контроля сосудов, котлов, аппаратов и технологических трубопроводов регламентированы ПБ-03-593-03 «Правила организации проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов».

Метод акустической эмиссии рекомендуется использовать для контроля промышленных объектов, как правило, в сочетании с другими методами неразрушающего контроля по следующим схемам:

- проводят АЭ контроль объекта и в случае выявления источников волн АЭ и в месте их обнаружения проводят контроль одним из регламентированных методов неразрушающего контроля (ультразвуковым, радиационным, магнитным, вихретоковым, капиллярным и другими, предусмотренными нормативно-технической документацией);

- проводят контроль объекта одним из регламентированных методов НК и в случае обнаружения недопустимых дефектов или при возникновении сомнения в достоверности применяемых методов НК проводят контроль объекта с использованием метода АЭ;

- проводят контроль объекта одним из регламентированных методов НК, в случае наличия в объекте дефекта, метод АЭ используют для слежения за развитием этого дефекта;

- метод акустической эмиссии применяют в качестве сопровождающего метода, повышающего безопасность, при пневматических и гидравлических испытаниях сосудов, работающих под давлением.

Метод акустической эмиссии также может быть использован для оценки остаточного ресурса и решения вопроса относительно возможности дальнейшей эксплуатации объекта. Оценка ресурса проводится с использованием специально разработанных методик, согласованных в установленном порядке, при этом достоверность результатов контроля зависит от объема и качества априорной информации о моделях развития повреждений и состояния материала ОК.

3.1.3. Вихретоковые методы контроля.

Вихретоковый контроль (ВТК) основан на анализе взаимодействия переменного электромагнитного поля радиочастотного диапазона (диапазон от единиц герц до десятков мегагерц), создаваемого вихретоковым преобразователем, с электропроводящим объектом контроля.

В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка (одна или несколько), называемая вихретоковым преобразователем (ВТП).

Так как вихревые токи возникают только в электропроводящих объектах, то объектами ВТК могут быть детали, изготовленные из металлов и сплавов, графита, полупроводников и других электропроводящих материалов.

Достоинством вихретокового контроля является то, что его можно проводить при отсутствии контакта между ВТП и ОК, поэтому его часто называют бесконтактным, благодаря чему можно проводить контроль деталей с защитными или лакокрасочными покрытиями, под слоем окалины или коррозионных отложений. Дополнительным преимуществом вихретокового контроля является то, что на сигналы ВТП практически не влияет влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения. К достоинствам ВТК можно также отнести высокую производительность контроля и простоту конструкции вихретоковых преобразователей.

Глубина проникновения вихревых токов в деталь небольшая (в пределах от долей миллиметра до нескольких миллиметров) и зависит от частоты возбуждающего тока, электропроводности и магнитной проницаемости материала ОК. Поэтому вихретоковый метод можно использовать только для контроля поверхностных слоев.

Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте контроля зависит от его геометрических размеров и электромагнитных параметров, а также от взаимного расположения ВТП и объекта контроля.

Классификация вихретоковых преобразователей.

По способу соединения обмоток ВТП делят на абсолютные и дифференциальные.

По электрическим свойствам сигнала различают параметрические и трансформаторные датчики. В первых сигналом служит приращение комплексного сопротивления, во втором – приращение комплексного напряжения (ЭДС), возникающее в одной или нескольких измерительных обмотках.

В зависимости от взаимного расположения ВТП по отношению к объекту контроля различают *накладные, проходные и экранные* (рис.3.8). В накладном ВТП все катушки располагается на одной стороне детали. В экранном – по разные стороны детали. В проходном ВТП либо катушки охватывают деталь в целом (наружные), либо деталь охватывает все катушки (внутренние).

Наружные проходные датчики применяются для контроля прутков, проволоки, профилей, обойм подшипников и т.п. Внутренними проходными датчиками проверяют трубы, отверстия. Накладными датчиками контролируются изделия любой формы и размеров. Экранными проходными датчиками проверяются трубы, накладными – листы, ленты.

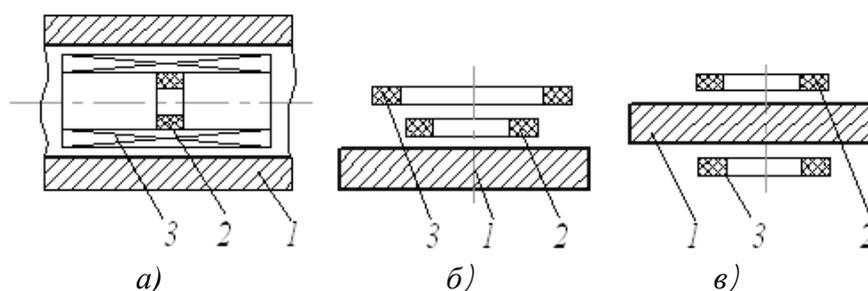


Рис.3.8. Разновидности вихретоковых преобразователей:

a – внутренний проходной; *б* – накладной; *в* – накладной экранный; 1 – объект контроля; 2 – измерительная обмотка катушки; 3 – возбуждающая обмотка катушки

Конструкция и размеры датчика зависят от формы и размеров изделия и целей контроля. Конструктивные схемы некоторых типов датчиков показаны на рис.3.9.

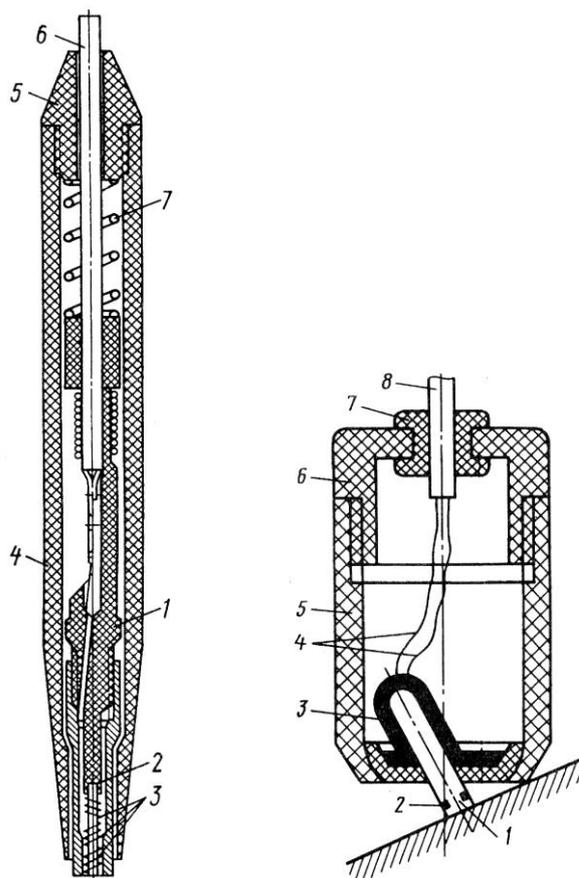


Рис 3.9. Конструкция накладных ВТП:

а – карандашного типа с подпружинной катушкой: 1 корпус; 2 – магнитопровод; 3 – обмотки; 4 – оправка; 5 – колпачек; 6 – кабель; 7 – пружина; *б* – с плавающей подвеской катушки: 1 – каркас; 2 – обмотки; 3 – резиновая манжета; 4 – гибкие выводы обмотки; 5 – корпус; 6 – колпачек; 7 – резиновая втулка; 8 – кабель

Принцип действия вихретокового дефектоскопа можно пояснить с помощью схемы, представленной на рис.3.10. Вихретоковый преобразователь состоит из возбуждающей обмотки, подключенной к выходу генератора переменного тока, и измерительной обмотки, подключенной к блоку измерения.

Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электромагнитном объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на катушках или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно его.

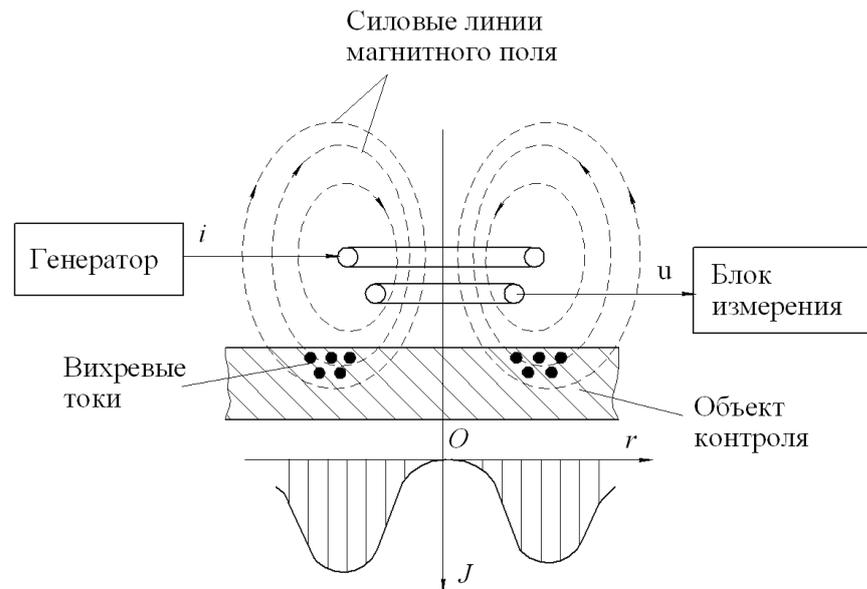


Рис. 3.10. Обобщенная функциональная схема, прибора реализующего метод вихревых токов

При контроле детали с помощью того или иного датчика вихревые токи возникают непосредственно под датчиком, на небольшой глубине. Поэтому вихретоковый метод контроля рекомендуется применять для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов.

На рис.3.10 также показан график распределения плотности вихревых токов в ОК. Из графика видно, что максимального значения плотность вихревых токов в ОК достигает под витками возбуждающей обмотки ВТП. Под центром возбуждающей обмотки ВТП вихревые токи отсутствуют, а следовательно и обнаружить дефект в этом месте объекта контроля не представляется возможным.

Области применения вихретоковых методов контроля.

Вихретоковые методы контроля применяются в дефектоскопии, структурографии и толщинометрии. С помощью вихретоковых датчиков также можно контролировать параметры вибрации и перемещения деталей.

В дефектоскопии с помощью этого метода обнаруживают дефекты типа нарушения сплошности, выходящие на поверхность или залегающие на небольшой глубине под поверхностью (в электропроводящих листах, трубах, мелких деталях и т.д.), выявляют разнообразные трещины, расслоения, закаты, пленки, раковины, неметаллические включения и т.д.

Метод вихревых токов позволяет успешно решать задачи контроля размеров изделий. Этим методом измеряют диаметр труб, толщину металлических листов и стенок труб при одностороннем доступе к изделию.

Структурное состояние металлов и сплавов влияет на их электрические и магнитные характеристики. Благодаря этому оказывается возможным контролировать не только вариации химического состава, но и структуру металлов и сплавов, а также измерять механические напряжения в них. С помощью вихре-

токовых методов можно контролировать качество термической и химико-термической обработки деталей, состояние поверхностных слоев после механической обработки, обнаруживать остаточные механические напряжения, выявлять усталостные трещины в металлах на ранней стадии развития и т.д.

3.1.4. Магнитные методы контроля.

Магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами и на определении магнитных свойств объекта контроля.

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. Операция намагничивания (помещения изделия в магнитное поле) при этом виде контроля является обязательной. Съём информации может быть осуществлен с полного сечения образца (объекта контроля) либо с его поверхности.

В зависимости от конкретных задач неразрушающего контроля, марки контролируемого материала, требуемой производительности метода могут использоваться те или иные информативные параметры. К числу наиболее распространенных параметров относятся следующие параметры: намагниченность, индукция (остаточная индукция), напряженность магнитного поля, магнитная восприимчивость, коэрцитивная сила.

По решаемым задачам все магнитные методы контроля можно разделить на три группы:

- 1) магнитная дефектоскопия;
- 2) магнитная толщинометрия;
- 3) магнитная структуроскопия.

По способам регистрации магнитных полей рассеяния и определения магнитных свойств, контролируемых изделий магнитные методы делят на семь видов, классификация магнитных методов контроля приведена на рис.3.11.



Рис.3.11. Классификация магнитных методов контроля по способам регистрации магнитных полей рассеяния

В дефектоскопии теплоэнергетического оборудования из магнитных методов контроля наиболее широкое применение нашел магнитопорошковый метод. Магнитопорошковый метод предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов.

Магнитопорошковый метод основан на выявлении магнитных полей рассеяния над дефектами с помощью ферромагнитных частиц (рис.3.12).

Сущность метода заключается в следующем: магнитный поток в бездефектной части изделия имеет определенное направление. Если же на пути этого потока встречаются дефекты в виде несплошности металла (трещины, неметаллические включения и т.д.), то в этих местах из-за пониженной магнитной проницаемости магнитный поток изменяет свое направление так, что над дефектом возникает местное магнитное поле. После снятия намагничивающего поля магнитное поле над дефектом остается из-за наличия остаточной индукции.

На характер и величину магнитного поля над дефектом влияют следующие факторы: напряженность намагничивающего поля; магнитные свойства

ва материала изделия; размер и форма контролируемого изделия; размер, форма, место расположения и направление дефекта на изделии.

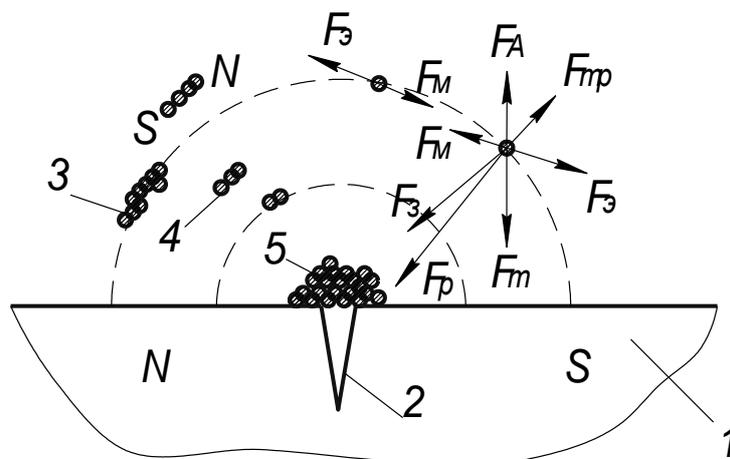


Рис.3.12. Магнитное поле над трещиной:

1 – объект контроля; 2 – трещина; 3,4 – цепочки из частиц порошка; 5 – порошок над трещиной; $F_з$ – сила магнитного поля, направленная к месту трещины; $F_м$ – сила тяжести; $F_А$ – сила выталкивающего действия жидкости; $F_{тр}$ – сила трения; $F_{э, м}$ – силы электростатического и магнитного взаимодействия между частицами; $F_р$ – результирующая сила

Для выявления магнитных полей над дефектами на контролируемые участки изделия наносятся ферромагнитный порошок либо его взвесь в воде, керосине или масле. Так как магнитное поле над дефектом неоднородное, то магнитные частицы, попавшие в это поле, будут перемещаться к месту расположения дефекта и накапливаться над дефектом. В результате над дефектом происходит накопление части порошка в виде полосок (валиков, жилок, шнуров). Так как ширина полоски из осевшего порошка значительно больше ширины трещины, волосины и других дефектов, то магнитопорошковым методом могут быть выявлены мельчайшие трещины и прочие дефекты.

В зависимости от магнитных свойств материала, формы и размеров контролируемой детали, наличия в ней немагнитного покрытия применяют два способа магнитопорошкового контроля: на остаточной намагниченности и в приложенном магнитном поле.

Метод на остаточной намагниченности предназначен в основном для выявления поверхностных дефектов в деталях простой формы. Способ приложенного магнитного поля применяют для контроля деталей сложной формы, крупногабаритных деталей, а также для обнаружения дефектов под слоем немагнитного покрытия.

Особенность контроля способом приложенного магнитного поля состоит в том, что технологические операции: намагничивание, нанесение на поверхность детали магнитного индикатора, осмотр или часть осмотра детали выполняют одновременно.

Последовательность выполнения технологических операций при контроле деталей магнитопорошковыми способами показана на рис.3.13.

В соответствии со схемой технология проведения магнитопорошкового контроля включает в себя следующие этапы:

- подготовка поверхности детали к контролю (удаление загрязнений, влаги, нанесение на поверхность детали белой краски, снятие электростатических зарядов с проверяемой детали);
- намагничивание объекта контроля (деталь можно помещать в соленоид или намагничивать при помощи электромагнита);

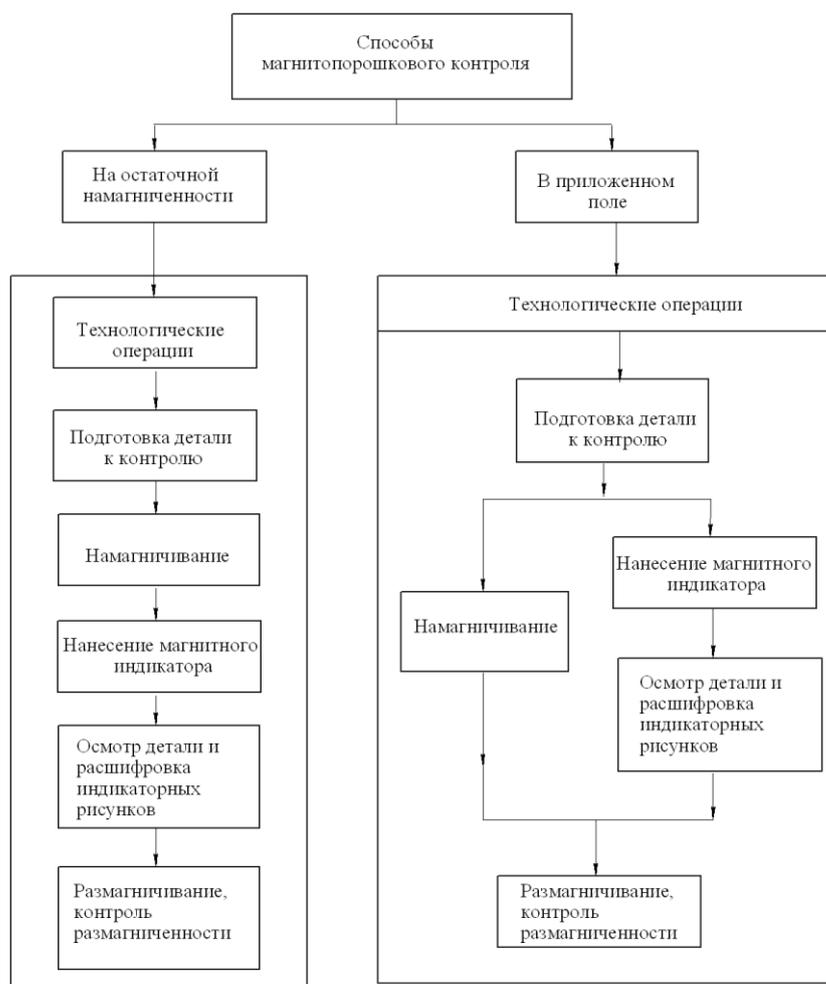


Рис.3.13. Последовательность выполнения технологических операций при контроле деталей магнитопорошковыми способами

– нанесение магнитного индикатора, в качестве которого могут быть использованы: черный магнитный порошок закиси-оксида железа Fe_3O_4 , краснобурый порошок гамма-оксида железа, порошок карбонильного железа, ферритные порошки, порошок никеля;

– осмотр поверхности детали и расшифровка индикаторных рисунков (форма индикаторного рисунка зависит от характера, величины и глубины залегания дефекта);

– размагничивание детали и контроль размагниченности.

Для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов сварных швов может применяться **магнитографический метод**, который основан на обнаружении магнитных полей рассеяния, возникающих в местах дефектов при намагничивании контролируемых деталей. Поля рассеяния от дефектов фиксируются в виде магнитных отпечатков на эластичном магнитоносителе (магнитной ленте), плотно прижатом к контролируемой поверхности.

Основной элемент магнитографического контроля – магнитная лента – выполняет двойную роль: сначала служит индикатором поля дефекта, фиксируя это первичное поле в виде пространственного распределения остаточной намагниченности рабочего слоя, а затем сама становится источником вторичного, отображенного магнитного поля, которое, в свою очередь считывается еще одним индикатором.

Процесс контроля состоит из двух основных операций: записи и считывания. Для первого процесса необходимы устройства намагничивания (чаще всего электромагниты). Ленту магнитным слоем накладывают на контролируемый сварной шов и плотно прижимают к нему резиновым поясом. Затем шов подвергают намагничиванию с одновременной записью полей рассеяния на ленту. Ленту снимают со шва, наматывают на кассету и доставляют к месту, где находится аппаратура для считывания записи. Воспроизведение или считывание записи с магнитной ленты, осуществляется магнитографическим дефектоскопом. Возможно определение указанных процессов в едином устройстве (например, с использованием кольцевых лент или магнитных валиков, прокатываемых по изделию).

Принципиальная схема магнитографического дефектоскопа приведена на рис. 3.14.

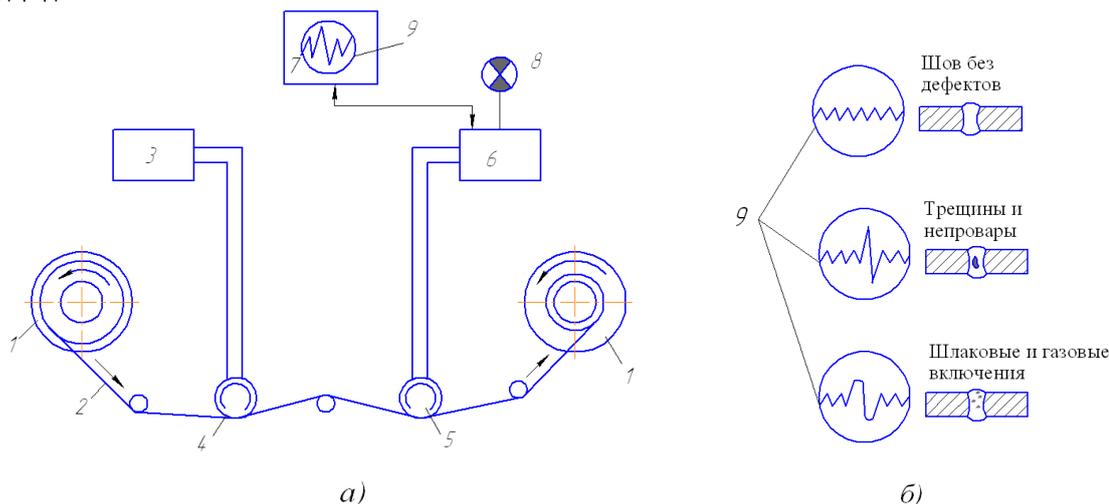


Рис. 3.14. Схема магнитографического дефектоскопа: а – воспроизведение записи на экране дефектоскопа, б – характер импульсов на индикаторном экране; 1 – кассета с магнитной лентой; 2 – магнитная лента; 3 – генератор для стирания записи; 4 – «стирающая» головка; 5 – «воспроизводящая» головка; 6 – усилитель; 7 – индикаторное устройство; 8 – сигнализатор недопустимости дефекта; 9 – индикаторный экран

Основным элементом магнитографического дефектоскопа является воспроизводящая магнитная головка, которая преобразует зафиксированные на ленте магнитные сигналы. Индикация сигналов осуществляется при помощи электронно-лучевых трубок. Для определения величины дефектов магнитографические дефектоскопы настраиваются по эталонным лентам, записанным на контрольных образцах сварных соединений.

Изображение дефектов на экране индикатора может быть импульсным (рис. 3.14, б) или телевизионным (видимым). При видимом изображении форма изображения на экране соответствует форме дефекта, а степень почернения характеризует его глубину. Трещины характеризуются наличием извилистых темных линий с большой контрастностью, непровары – прямых линий, шлаковые включения – темных пятен и т.п.

Основными достоинством магнитографического метода является его бесконтактность – не требуется подготовительной операции по зачистке поверхности контролируемой детали, и высокая производительность.

Магнитная структуроскопия основана на использовании корреляционных связей между физико-химическими или механическими характеристиками ОК и одной или несколькими магнитными характеристиками контролируемого материала.

Все изменения в структуре материала в процессе его изготовления, обработки, зарождения и развития повреждений отражаются в соответствующих изменениях магнитных и электрофизических параметров.

Наиболее полно магнитные характеристики материала отражены в зависимости, известной под названием «петля магнитного гистерезиса» (рис.3.15а).

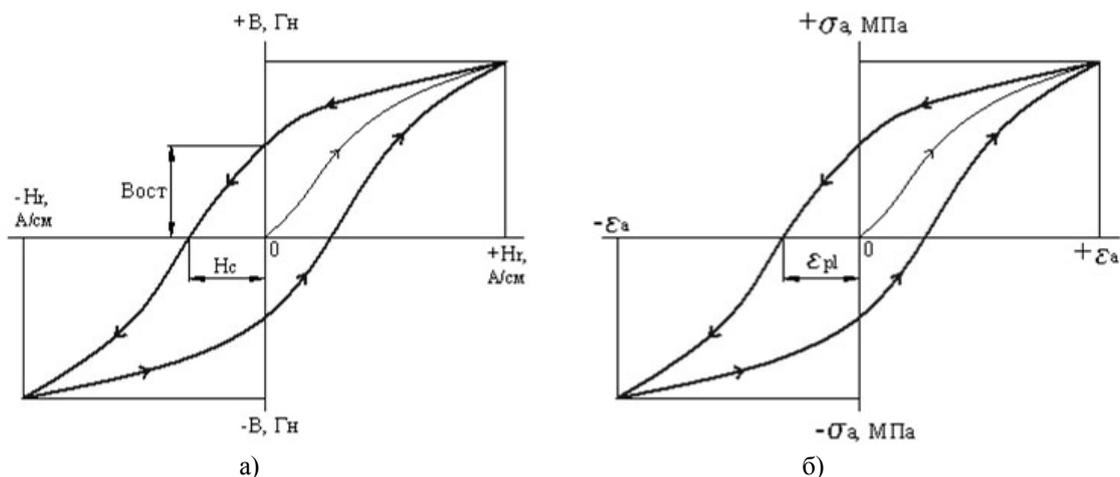


Рис. 3.15. Зависимость коэрцитивной силы и пластической деформации:

а – магнитная петля гистерезиса; б – деформационная петля гистерезиса; H_c – коэрцитивная сила, А/см; $B_{ост}$ – остаточная индукция, Гн; ϵ_{pl} – остаточная деформация; σ_a – амплитуда напряжений, МПа

По использованным магнитным информативным параметрам различают следующие разновидности магнитной структуроскопии:

- ферритометрия;
- коэрцитиметрия;
- контроль по остаточной намагниченности;
- контроль по магнитной проницаемости;
- контроль по магнитным шумам.

Наибольшее распространение нашли две первые разновидности магнитной структуроскопии: ферритометрия и коэрцитиметрия.

В последние годы коэрцитиметрия стала широко применяться для контроля напряженного состояния металлоконструкций опасных производственных объектов различного назначения, что является весьма актуальным для технической диагностики. К примеру, основными источниками разрушения труб поверхностей нагрева и сосудов, работающих под давлением, являются зоны концентрации напряжений, в которых процессы коррозии, ползучести и усталости протекают наиболее интенсивно. В местах концентрации напряжений происходит повышение коэрцитивной силы.

Магнитная толщинометрия как правило применяется для оценки толщины немагнитных покрытий на ферромагнитных материалах.

3.1.5. Капиллярные методы контроля

Капиллярный контроль (КК) основан на использовании капиллярных свойств жидкости и является одним из наиболее широко используемых в промышленности методов неразрушающего контроля. Его применяют для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов (раскрытием $< 10\text{мкм}$) в ОК любых форм и размеров, изготовленных из металлических или других любых твердых непористых материалов. Поверхностные дефекты выявляются путем образования индикаторных рисунков с высоким оптическим (цветовым или яркостным) контрастом и с шириной линии превышающей ширину раскрытия дефекта.

Капиллярный контроль представляет собой многооперационный процесс. Типовой перечень операций включает в себя подготовку изделия к контролю, нанесение индикаторной жидкости, удаление ее излишков, нанесение проявителя и проявление рис.3.16.



Рис. 3.16. Технологический процесс капиллярного контроля

Во время каждой из этих операций поверхность трещины вступает в контакт с несколькими дефектоскопическими материалами, в основном с жидкостями. Поэтому явление смачивания поверхности детали различными жидкими дефектоскопическими материалами играет первостепенную роль. Только благодаря смачиванию возможен контакт между дефектом и дефектоскопическими материалами и реализация капиллярного контроля. Смачивание поверхности зависит от силы поверхностного натяжения жидкости σ , чем меньше сила поверхностного натяжения жидкости, тем лучше смачивает она поверхность твердого тела. В таблице 3.4 приведены величины поверхностного натяжения для некоторых дефектоскопических жидкостей.

Таблица 3.4 Величины поверхностного натяжения для некоторых дефектоскопических жидкостей при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении

Жидкость	Поверхностное натяжение σ , 10^{-2} Н/м
Вода	7,28
Ацетон	2,37
Пентан	1,50
Толуол, бензол	2,85; 2,90
Ксилол	2,90
Этиловый спирт	2,28
Бутиловый спирт,	2,46;
Пенетрант ЛЖ-6А	2,97

Основной характеристикой смачивания является краевой угол смачивания θ (рис. 3.17).

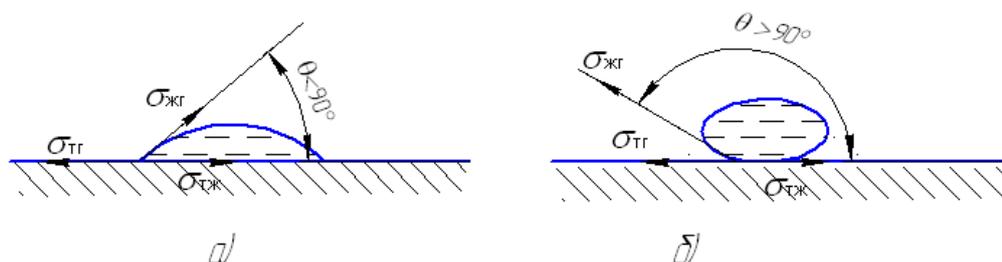


Рис.3.17. Смачивание поверхности твердого тела жидкостью: *a* – смачивание поверхности твердого тела жидкостью; *б* – несмачивание;

После того как благодаря смачиванию индикаторная жидкость заполнит трещину, создаются условия для проявления эффекта капиллярности. Высота капиллярного подъема вычисляется по формуле

$$h = 2\sigma \cos \theta / \rho g R,$$

где R – радиус капилляра;
 ρ – плотность жидкости;
 g – ускорение свободного падения.

Как видно из формулы, чем больше смачивание $\sigma \cos \theta$, тем больше капиллярный подъем. Радиус капилляра обратно пропорционален h , т.е. чем меньше радиус, тем больше капиллярный подъем.

Классификация методов капиллярного контроля. Основные методы капиллярной дефектоскопии классифицируют по типу проникающих веществ и оптическим свойствам индикаторных рисунков, характеризующим их видимость.

В зависимости от типа проникающих веществ методы КК делят на:

– *метод проникающих растворов*, являющийся жидкостным методом капиллярной дефектоскопии, в котором в качестве пенетранта используется раствор индикаторного вещества в жидкости;

– *метод фильтрующихся суспензий* использует в качестве жидкого проникающего вещества суспензии, которые образуют индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы;

– *метод течеискания* предназначен для поиска сквозных дефектов, отличающийся тем, что при проведении контроля на одну поверхность ОК наносится индикаторная жидкость, а на противоположную – проявитель; стадия удаления пенетранта в этом случае отсутствует.

По оптическим свойствам индикаторного рисунка методы подразделяются на: яркостный, цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной.

Цветной метод в качестве индикаторной жидкости использует ярко окрашенные жидкости, и дефекты выявляются по индикаторным следам на контрастном фоне проявителя (обычно ярко-красные следы на белом фоне). Для цветного метода используется естественное освещение, лампы накаливания или комбинированное освещение. Чувствительность цветного метода находится на уровне II класса с выявлением дефекта раскрытием 1 мкм. Цветной метод является наиболее распространенным среди капиллярных методов неразрушающего контроля.

Люминесцентный метод контроля обладает большей чувствительностью, но требует применения специального облучения ультрафиолетовым светом и затемненного помещения для осмотра изделия. При люминесцентном методе контроля дефект заполняется индикаторной жидкостью, которая представляет собой раствор либо суспензию люминофора в смеси органических растворителей, керосина, масел и поверхностно-активного вещества. При проявлении извлеченный из дефекта люминофор дает на темном фоне контрастный, светящийся под действием ультрафиолетовых лучей след, что позволяет выявлять дефекты раскрытием более 0,1 мкм. В связи с повышенной чувствительностью человеческого глаза в желто-зеленой области применяются люминофоры с максимальной световой отдачей именно в этой области спектра.

Люминесцентно-цветной метод. Это жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или в длинноволновом ультрафиолетовом излучении.

Один из наиболее простых методов капиллярного контроля – *яркостный (ахроматический) метод*. Его называют также керосиновой пробой, так как в качестве индикаторной жидкости используется керосин. На проявителе на основе мела или каолина керосин вызывает потемнение следа по сравнению с общим фоном непропитанного керосином порошка каолина или мела.

Метод фильтрующихся суспензий использует в качестве жидкого проникающего вещества индикаторные суспензии, которые образуют индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы. Обладает сравнительно меньшей чувствительностью. Различают его цветную, люминесцентную и люминесцентно-цветную разновидности.

Кроме перечисленных выше основных методов контроля применяются комбинированные капиллярные методы, которые классифицируются в зависимости от характера физических полей и особенностей их взаимодействия с контролируемым объектом.

Выбор того или иного метода капиллярной дефектоскопии для конкретной задачи определяется требуемой чувствительностью контроля с учетом экономических и прочих ограничений.

Технология проведения капиллярного контроля. Технология проведения капиллярного неразрушающего контроля является многооперационной. В ней нет процессов маловажных – любой плохо, недобросовестно или некачественно выполненный процесс может свести на нет все усилия оператора при осуществлении предыдущих операций и привести к тому, что опасный дефект не будет выявлен.

Технологическая схема капиллярного контроля показана на рис.3.18.

Подготовительные операции имеют целью вывести на поверхность изделия устья дефектов, устранить возможность возникновения фона и ложных индикаций. Способ подготовки зависит от состояния поверхности и требуемого класса чувствительности. Далее следует стадия нанесения пенетранта.

В качестве проникающих веществ используют керосин, цветные или люминесцентные жидкости. Его наносят погружением в ванну, намазыванием кистью, поливанием, разбрызгиванием пульверизатором или из аэрозольного баллона. Пенетрант оставляют на поверхности объекта контроля на 10...30 мин.

Удаление излишек пенетранта с поверхности ОК необходимо, чтобы исключить образование фона и возникновения ложных индикаций. При выполнении этой операции важно сохранить пенетрант в полости объекта. Удаление выполняют протиркой сухими или влажными салфетками, промыванием очистителем. После промывки объект контроля сушат и наносят проявитель.

Проявление – это процесс извлечения пенетранта, оставшегося в полости дефектов с образованием индикаторного рисунка на фоне проявителя, который заметен гораздо лучше, чем сама несплошность. В качестве проявителя приме-

няют мелкодисперсные порошковые материалы (оксид магния, силикагель, мел, каолин, тальк, белая сажа); суспензии (водные или на основе органических растворителей); красочные (лаки) или пленочные материалы. Важно нанести проявитель равномерно, тонким (порядка 0,1 мм) сплошным слоем. Время проявления варьируют от 5 до 25 мин в зависимости от свойств проявителя.

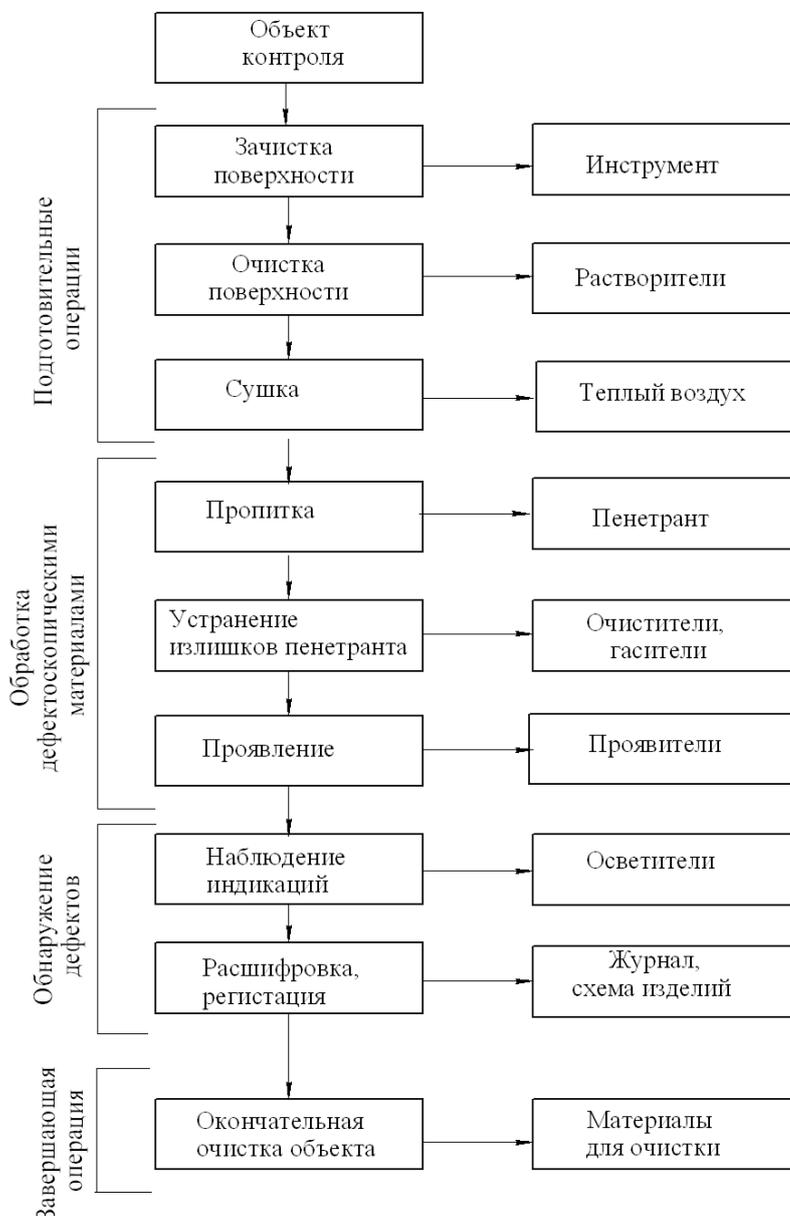


Рис.3.18. Технологическая схема проведения капиллярного контроля

Важное требование к дефектоскопическим материалам – их *совместимость*. Выбранный пенетрант должен хорошо смачивать поверхность объекта контроля, смываться очистителем без вымывания из дефектов, проявляться рекомендуемым проявителем. Поэтому дефектоскопические материалы рекомендуется употреблять в виде наборов, выпускаемых промышленностью.

Несомненным достоинством капиллярного метода является то, что с его помощью можно не только обнаружить поверхностные и сквозные дефекты, но

и получить по их расположению, протяженности, форме и ориентации по поверхности ценную информацию о характере дефектов и даже некоторых причинах их возникновения.

3.1.6. Радиационные методы неразрушающего контроля

Радиационные методы неразрушающего контроля основаны на законе ослабления интенсивности излучения, проходящего через контролируемый объект, в зависимости от плотности материала и его толщины.

При радиационном контроле (РДК) используют, как минимум три основных элемента (рис.3.19): источник ионизирующего излучения; контролируемый объект; детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

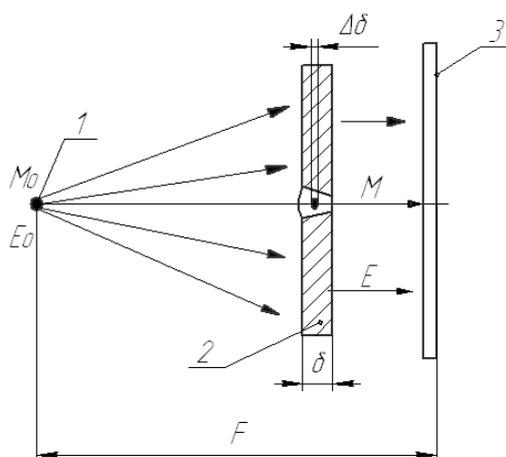


Рис. 3.19. Схема просвечивания: 1 – источник; 2 – объект контроля; 3 – детектор

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется, поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины δ и плотности ρ контролируемого объекта, а также от интенсивности M и энергии излучения E . При наличии в объекте контроля дефектов размером $\Delta\rho$ изменяется интенсивность и энергия пучка излучения.

По результатам измерения интенсивности излучения за объектом определяют наличие в нем дефектов – раковин, пор, включений и т.д.

Методы РДК различаются способами детектирования дефектоскопической информации (рис.3.20) и соответственно делятся на: радиографический, радиоскопический, радиометрический.



Рис. 3.20. Классификация методов радиационного контроля

Радиографические методы основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов.

Радиационная интроскопия – метод радиационного НК, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля. Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, «экспрессивность» и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия – метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества). Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

Источники ионизирующего излучения. При радиационном контроле в качестве источников ионизирующих излучений используются:

- рентгеновские аппараты;
- гамма-дефектоскопы,
- ускорители электронов (бетатроны, линейные ускорители и микротроны).

Рентгеновским аппаратом называют совокупность технических средств, предназначенных для получения и использования рентгеновского излучения (рис.3.21).



Рис. 3.21. Внешний вид рентгеновских аппаратов разных производителей

Рентгеновские аппараты служат источниками характеристического и тормозного излучений в широком диапазоне энергий (от 0,5 до 1000 кэВ). Рентгеновское излучение в рентгеновском аппарате образуется в вакуумном приборе, называемом рентгеновской трубкой (рис.3.23).

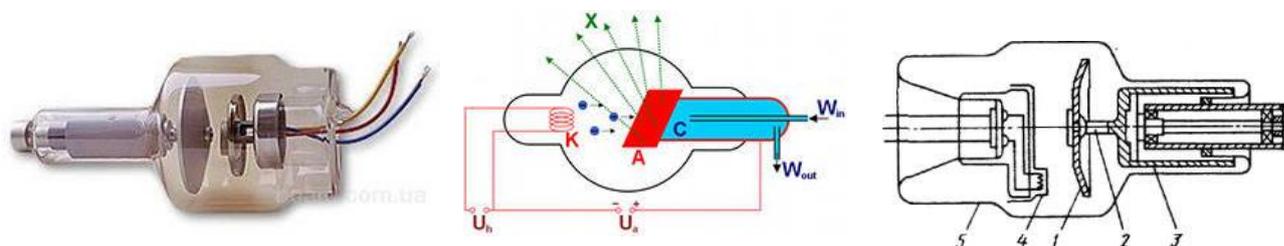


Рис.3.22. Рентгеновская трубка с вращающимся анодом: 1 – анод; 2 – стержень анода; 3 – ротор; 4 – катод; 5 – баллон

Рентгеновские аппараты применяют для просвечивания стальных деталей толщиной до 120 – 160 мм.

Гамма-дефектоскопы. Значительный объем радиационного контроля осуществляется с помощью гамма-дефектоскопов (рис.3.23), которые заряжают радионуклидными изотопами.

Радионуклиды, заключенные в герметичные металлические ампулы, помещают в защитные блоки дефектоскопов. Выпуск и перекрытие пучка излучения осуществляется с помощью дистанционных приводов управления.



Рис.3.23. Внешний вид гамма-дефектоскопов разных производителей

Дефектоскопы в основном используют в полевых и монтажных условиях при отсутствии источников электропитания, контроле изделий, расположенных в труднодоступных местах.

Гамма-дефектоскопы применяют для просвечивания стальных изделий толщиной до 200 мм.

Ускорители электронов. Для дефектоскопии изделий большой толщины и сложной формы применяют источники тормозного излучения с энергией до нескольких десятков МэВ. Такими источниками излучения являются электростатические генераторы, ускорители прямого действия, бетатроны, линейные ускорители, микротроны.

Принцип действия *линейного ускорителя* электронов (рис.3.24) основан на том, что электроны, введенные с некоторой начальной скоростью вдоль оси цилиндрического волновода, в котором возбуждается бегущая электромагнитная волна с предельной компонентой электрического поля, попадая в ускоряющую полуволну, ускоряются под действием электрического поля.

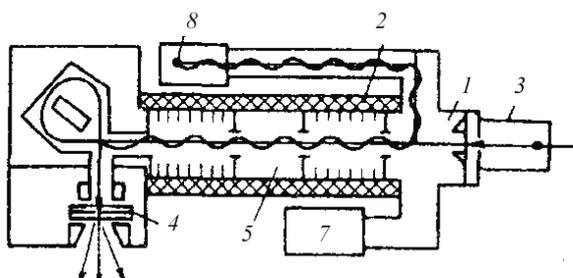


Рис. 3.24. Схема линейного ускорителя: 1 – камера; 2 – электромагнит; 3 – электронная пушка; 4 – мишень; 5 – волновод; 6 – резонатор; 7 – вакуумный насос; 8 – генератор

Для непрерывного увеличения энергии электронов необходимо, чтобы электромагнитная волна двигалась вдоль волновода с такой скоростью, при которой электрон не выходит за пределы ускоряющей полуволны. С целью получения необходимой для ускорения электронов скорости электромагнитной вол-

ны внутри волновода устанавливаются диафрагмы. Таким образом, диафрагмированный волновод является основным узлом линейного ускорителя электронов.

Ускорители электронов применяются для контроля стальных изделий толщиной до 700 мм.

Для обнаружения и регистрации ионизирующего рентгеновского и γ -излучения, потоков нейтронов, позитронов, α - и β -частиц используются *детекторы ионизирующих излучений*. Они делятся на следующие группы: фотографические, ионизационные, полупроводниковые, радиолюминесцентные (сцинтилляционные, термолюминесцентные), зарядовые (эмиссионные), детекторы Черенкова, калориметрические и химические. Калориметрические и химические детекторы, имеющие низкую чувствительность, применяют в основном для измерения очень больших мощностей доз излучения в ускорителях заряженных частиц, мощных кобальтовых облучательных установках и т.п.

Фотографические детекторы (рентгеновские пленки) используются для регистрации излучения при радиографическом контроле деталей.

К *ионизационным детекторам* излучений относятся ионизационные камеры и газоразрядные счетчики (пропорциональные, Гейгера-Мюллера, коронные и искровые). Принцип работы этих детекторов основан на ионизирующем воздействии излучений на газы, выходным сигналом ионизационного детектора являются ионизационный ток или импульсы, возникающие при воздействии на газовую среду излучений.

Полупроводниковые детекторы основаны на явлении фотопроводимости, т.е. на явлении возникновения в твердых телах электрического тока под действием падающего на них излучения.

Радиолюминесцентные (сцинтилляционные) детекторы основаны на световозбуждающем действии излучения на некоторые вещества. Такими веществами являются, например, люминофоры, которые преобразуют поглощенную энергию ионизирующего излучения в видимый свет.

При контроле деталей и изделий радиографическим методом с использованием рентгеновской пленки или ксерорадиографических (или электрорадиографических) пластин определяют качество литых заготовок и деталей; коррозию внутренних поверхностей трубопроводов, баллонов, цилиндров, штоков клапанов и других закрытых полых деталей, контроль которых другими методами затруднен или невозможен; изучают качество сварных и паяных соединений; заделки тросов и гибких шлангов в наконечники; подрезы на внутренних поверхностях полых деталей и разностенность; состояние или правильность взаимного расположения деталей внутри различных агрегатов и механизмов, например, закрытых подшипников и др.

При радиоскопическом (визуальном радиационном) контроле используется принцип преобразования скрытого рентгеновского и γ -изображения просвечиваемого объекта в видимое световое, которое изучается на экранах преобразователей ионизирующих излучений и телевизионных приемников.

Визуальные радиационные методы широко и эффективно применяются для контроля качества литья, сварки, пайки, сборки, а также состояния агрегатов и механизмов без их демонтажа.

Радиометрический контроль заключается в измерении ослабления интенсивности пучка излучения, прошедшего через просвечиваемый объект. Для измерения интенсивности пучка излучения за объектом используется сцинтилляционные, полупроводниковые, газоразрядные счетчики или ионизационные камеры.

3.1.7. Тепловой контроль

Термографический контроль (инфракрасная термография) это разновидность теплового метода неразрушающего контроля, который осуществляется исследованием теплового излучения объектов.

В тепловых методах неразрушающего контроля используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которое в свою очередь зависит от внутренних или наружных дефектах. Под дефектом при этом понимается наличие скрытых трещин, полостей, раковин, непроваров, инородных включений и т.д., всевозможных отклонений физических свойств объекта контроля от нормы, наличия мест локального перегрева или охлаждения.

Выделяют активный и пассивный тепловой контроль.

Активный тепловой контроль это контроль, который проводится с использованием дополнительного источника тепловой стимуляции, т.е. объект контроля специально нагревают или охлаждают, а потом исследуют его температурные и тепловые поля. В качестве источников тепловой стимуляции используют оптические и индукционные нагреватели, СВЧ, лазеры и т.д.). Активный метод теплового контроля применяется, когда во время эксплуатации объект самостоятельно не выделяет тепловое излучение достаточное для проведения термографического контроля.

При *пассивном тепловом* контроле анализ тепловых полей проводят регистрацией их собственного теплового излучения. Возникновение теплового поля в объекте контроля происходит при его эксплуатации или изготовлении. Тепловой контроль с использованием пассивного метода является наиболее распространенным методом теплового контроля и широко применяется практически во всех отраслях промышленности. Основное преимущество метода заключается в том, что контроль объектов осуществляется без вывода из эксплуатации.

Наиболее распространенным видом теплового контроля является термографический контроль (инфракрасная термография), который осуществляется исследованием теплового излучения объектов.

Результаты термографического контроля, как правило, представляют в виде инфракрасных термограмм, на которых отражается распределение теплового излучения (температуры) объекта (рис.3.25).

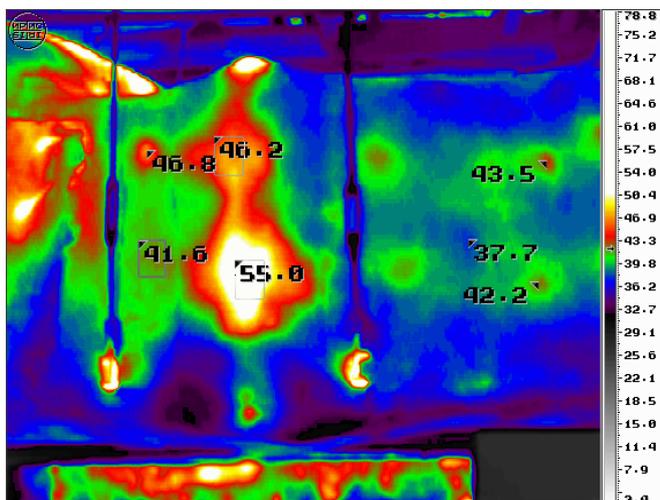


Рис. 3.25. Внешний вид инфракрасной термограммы контролируемого объекта

Приборы теплового контроля. Различают контактные и бесконтактные приборы теплового контроля.

К *контактным приборам* теплового контроля относят: термопары, металлические и полупроводниковые сопротивления, термоиндикаторы, термокарандаши, манометрические и жидкостные термометры. *Бесконтактными приборами теплового контроля являются:* тепловизоры, пирометры, термографы, квантовые счетчики и др.

В последнее время среди бесконтактных приборов теплового контроля самыми востребованными являются тепловизоры. Тепловой контроль, проводимый с использованием тепловизоров, часто называют тепловизионным контролем. Внешний вид тепловизоров различных производителей показан на рис. 3.26.



Рис.3.26. Тепловизоры: а – NEC TH-7700/7800 (NEC Avio Infrared Technologies Co. Ltd, США-Япония). ; б – FLIR B400 (Flir Systems, США-Швеция)

Тепловизоры являются оптико-электронными приборами, состоящими из детектора излучения (ИК-приемника), сканера, встроенного эталона температуры, электронного блока, монитора, программного продукта, блока питания или аккумуляторной батареи. Кроме того, тепловизорные системы могут включать в себя карту памяти, для записи и хранения информации, а также встроенную фотокамеру.

Результаты проведения термографического контроля тепловизором FLIR T365 со встроенной фотокамерой представлены на рис. 3.27.

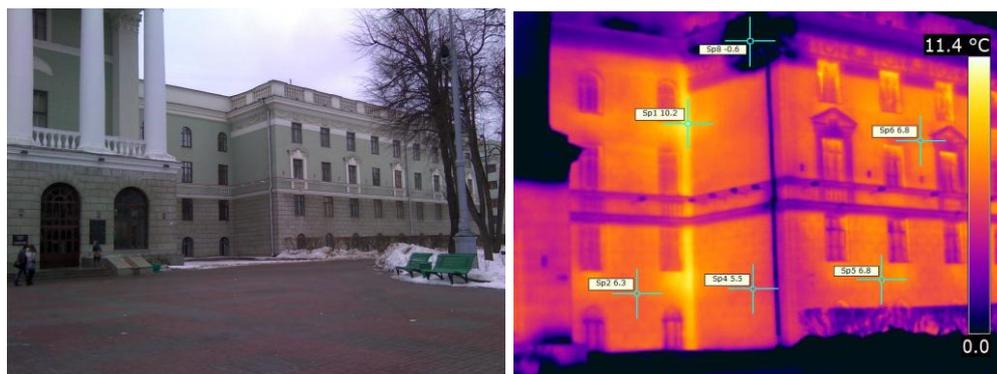
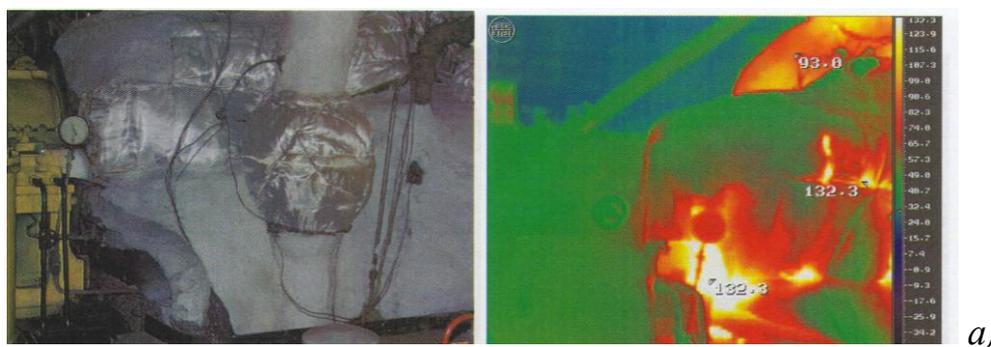


Рис. 3.27. Фотография и термограмма здания, полученные в результате контроля тепловизором FLIR T365

Термографический контроль нашел широкое применение в качестве неразрушающего метода контроля объектов тепло- и электроэнергетики.

В теплоэнергетике тепловой контроль применяется для оценки качества тепловой изоляции оборудования и трубопроводов, контроля дымовых труб и градирен и пр. На рис.3.28. представлены результаты тепловизорной диагностики тепловой изоляции паровой турбины и состояния дымовой трубы.



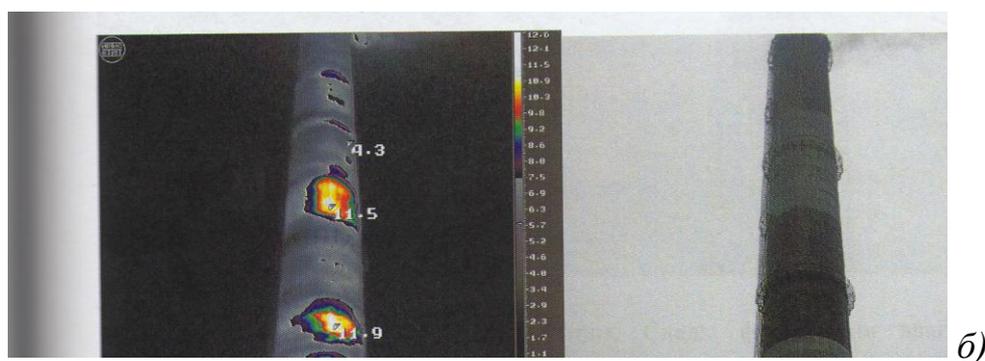


Рис.3.28. Картограммы теплового контроля: а – изоляция паровой турбины (в аварийном состоянии) ; б – дымовая труба с незначительным поверхностным разрушением бетона

Достоинствами теплового контроля являются:

- дистанционность (возможность проведения контроля на расстоянии до 0,5 км);
- наглядность;
- высокая скорость обработки информации;
- высокая производительность контроля;
- высокое линейное разрешение;
- возможность контроля при одно- и двустороннем доступе к изделию;
- теоретическая возможность контроля любых материалов;
- многопараметрический характер испытаний;
- сочетаемость со стандартными системами обработки информации;
- возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами.

3.1.8. Оптический метод контроля

Оптический метод неразрушающего контроля основан на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом.

Оптический метод контроля, как правило, применяется при визуальном контроле с целью увеличения рассматриваемых зон контроля или для контроля в труднодоступных местах.

При оптическом контроле в качестве средств контроля применяются специальные оптические системы. Оптической системой называют совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и т.п.), предназначенную для определенного формирования пучков световых лучей. Оптические системы применяются при визуальном контроле.

К оптическим системам относят лупы, микроскопы, эндоскопы и пр.

Луна – простейшая оптическая система, состоящая из линзы или системы линз, предназначенная для наблюдения предметов, расположенных на конечном расстоянии.

Промышленность выпускает лупы общего назначения различных типов и

конструкций: складные, карманные, измерительные, часовые, лупы с ручкой и др.

Чтобы максимально использовать возможность лупы, ее всегда следует держать так, чтобы ее плоскость была параллельна поверхности контролируемого изделия и как можно ближе к глазу, так как при этом глаз воспринимает наибольшее количество отраженного от поверхности объекта контроля света.

Международный стандарт ISO/FDIS 3D58:1997 классифицирует увеличители (лупы) как средства визуального контроля на следующие типы:

- одноэлементные – с увеличением до 4^x (тип А);
- многоэлементные – с увеличением до 10^x (тип В);
- стереоскопические;
- биноккулярные, обычно с большим рабочим расстоянием (тип С.1);
- двуокулярные (тип С.2);
- увеличители в виде вогнутого зеркала с отражателем – с увеличением до 6^x (тип D).

Микроскопы. Типы микроскопов и методы оптической микроскопии определяются либо областью применения, либо методом исследования. В зависимости от круга решаемых задач микроскопы могут быть учебными, рабочими, лабораторными, исследовательскими и универсальными.

При контроле энергетического оборудования применяются, как правило, рабочие и металлографические микроскопы.

Рабочие микроскопы, используемые в цеховых условиях, имеют увеличение порядка 40^x , поле зрения около 5 мм, разрешающую способность ~ 3,5 мкм. Их используют при контроле поверхностей, имеющих гальваническое покрытие, окрашенных и полированных поверхностей, для обнаружения трещин, пузырей и других дефектов и т.п.

Микроскопы металлографические используются для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов. Образцы металла – шлифы – предварительно полируются и протравливаются, благодаря чему зерна структуры становятся отличными друг от друга. Металлографические микроскопы умеют увеличение до 2000 х. Эти микроскопы, как правило, отличаются от других типов микроскопов тем, что у них предметный столик расположен над объективом. Благодаря этому образец устанавливается на столике исследуемой полированной поверхностью вниз, а остальная его поверхность может иметь произвольную форму. Такое расположение столика позволяет также помещать на нем громоздкие образцы.

В последнее время получили широкое распространение стереоскопическая и телевизионная микроскопия.

Стереоскопическая микроскопия позволяет видеть предмет объемным за счет рассматривания его каждым глазом под разными углами.

Телевизионная микроскопия позволяет наблюдать микрообъекты на телеэкране. Телевизионные микроскопы позволяют чисто электронным путем менять масштаб, контраст и яркость изображения. Достоинством телевизионной

микроскопии является возможность дистанционно наблюдать объекты (например, радиоактивные).

Эндоскопы. Эндоскопы – это оптические смотровые приборы, построенные на базе волоконной и линзовой оптики и механических устройств.

Принцип действия эндоскопов заключается в осмотре объекта контроля помощью специальной оптической системы (часто типа микроскоп, телескоп), позволяющей передавать изображение на значительные расстояния (до нескольких десятков метров).

Эндоскопия возникла в результате сближения, взаимопроникновения и частичного слияния волоконно-линзовой оптики, с одной стороны, и визуального контроля, с другой.

С помощью современных эндоскопов можно провести любой вид визуальной диагностики и контроля внутри закрытого пространства на значительную глубину (практически до 30 м). На рис. 3.29 показан внешний вид эндоскопов разных производителей.



а)



б)

Рис. 3.29. Видеозендоскопы: а– Everest XL Go™ , б – PCE VE-350N

Как правило, в эндоскопах используется холодный источник света высокой яркости, что позволяет безопасно проводить визуальный контроль поверхностей в полостях, содержащих взрывчатые материалы, жидкости или газы, а также обеспечило качественное фотографирование, киносъемку и телевизионную передачу изображения указанных поверхностей при малых размерах входного отверстия контролируемой полости. Эффективные методы жидкого и газового охлаждения позволяют использовать эндоскопы в горячих местах ядерных реакторов, топках паровых и водогрейных котлов при температуре до 2000 °С.

3.2. СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

К средствам неразрушающего контроля (СНК) относят контрольно-измерительную аппаратуру, в которой используют проникающие поля, излучения и вещества для получения информации о качестве исследуемых материалов и объектов.

3.2.1. Классификация средств неразрушающего контроля

В классификаторе в зависимости от методов на основе которых работают приборы неразрушающего контроля СНК разделены на семь основных групп. Первые четыре знака классификатора (табл. 3.5) определяют общие отраслевые признаки СНК, пятый знак обозначает основной физический метод, на основе которого создан прибор. Шестой знак определяет класс аппаратуры по основным приборным признакам.

Таблица 3.5. Классификация приборов неразрушающего контроля качества материалов и изделий (по классификатору приборов)

Код классификатора	Приборы неразрушающего контроля
1	2
42 7610 42 7611 42 7612 42 7613 42 7614 42 7615 42 7616 42 7617 42 7618	<i>Акустические</i> для контроля методом: теневым эхо-импульсным резонансным свободных колебаний эмиссионным импедансным велоссиметрическим Прочие
42 7620 42 7621 42 7622 42 7623 42 7624 42 7625 42 7626 42 7628	<i>Капиллярные</i> для контроля методом: цветным яркостным люминесцентным люминесцентно-цветным фильтрующих частиц комбинированным Прочие
42 7630 42 7631 42 7632 42 7633 42 7634 42 7635 42 7636 42 7638	<i>Магнитные</i> для контроля методом: магнитопорошковым магнитографическим магнитоферрозондовым индукционным пандемоторным магнитополупроводниковым Прочие
42 7640 42 7641 42 7642 42 7643 42 7644 42 7645	<i>Оптические и тепловые</i> <i>Оптические</i> для контроля методом: прошедшего излучения отраженного излучения собственного излучения <i>Тепловые</i> для контроля методом: прошедшего излучения

42 7646 42 7648	отраженного излучения собственного излучения Прочие
42 7650 42 7651 42 7652 42 7653 42 7654 42 7655 42 7658	<i>Радиационные</i> для контроля методом: рентгеновским гамма бета нейтронным позитронным Прочие
42 7660 42 7661 42 7662 42 7663 42 7668	<i>Радиоволновые</i> для контроля методом: прошедшего излучения отраженного излучения собственного излучения Прочие
42 7670 42 7671 42 7672 42 7673 42 7674 42 7675 42 7676 42 7678	<i>Электромагнитные (вихревых токов) и электрические</i> для контроля электромагнитным методом с использование преобразователей: проходных накладных экранных комбинированных для контроля электрическим методом Прочие

По техническому исполнению средства контроля можно разделить на три класса:

- 1 – автономные приборы для определения одной или нескольких взаимосвязанных качественных характеристик;
- 2 – комплексные системы, автоматические линии и роботы-контроллеры, предназначенные для определения ряда основных параметров, характеризующих качество ОК;
- 3 – системы НК для автоматического управления технологическими процессами по качественным признакам.

По видам контролируемых параметров СНК разделяют на:

- приборы-дефектоскопы, предназначенные для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, пор, расслоений и т.п.);
- приборы-толщиномеры – для контроля геометрических характеристик (наружные и внутренние диаметры, толщина стенки, покрытий, слоев, степени износа, ширины и длины изделия);
- приборы для измерения физико-механических и физико-химических характеристик (электрических, магнитных и структурных параметров, отклонений от заданного химического состава, измерения твердости, пластичности, коэрцитивной силы и т.п.);
- приборы технической диагностики для предсказания возникновения различного рода дефектов, в том числе нарушений сплошности, изменения размеров и физико-механических свойств на период эксплуатации.

3.2.2. Дефектоскопы

Дефектоскопами называются приборы НК, предназначенные для обнаружения дефектов, нарушающих сплошность ОК (трещины, раковины, расслоения и т. п.). Это наиболее распространенный тип приборов НК. В дефектоскопии чаще других используются акустический, проникающими веществами, магнитный, радиационный и вихретоковый виды контроля.

В настоящее время наиболее широко применяют *акустические дефектоскопы* – ультразвуковые эходефектоскопы (табл.3.6), принцип действия которых основан на излучении импульсов ультразвуковых колебаний и регистрации эхосигналов, отраженных от дефектов в ОК.

Таблица 3.6. Ультразвуковые дефектоскопы и их технические характеристики

Тип	Рабочая частота, МГц	Глубина прозвучивания, мм	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель
УД2-12	1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0	От 2 до 6000	170x280x450	8,4	Россия
УД2-17	1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0	От 2 до 6000	165x260x360	2,7	Россия
УД2-70	1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0	От 2 до 5000	245x145x70	3	НПФ «Ультракон сервис», Украина
УД3-71	0,4...15	От 0 до 6000	188x107x78	0,72	Россия
УД2-102 Пеленг	1,25; 1,8; 2,5; 5,0	От 0,4 до 10000	165x265x60	2,15	ППГ «Алтек», Россия
УД4-Т	От 0,4 до 10,0	От 0,5 до 5000	210x125x85	2,2	«Вотум», Молдова
USM 22	От 0,5 до 15,0	От 2,5 до 10000	245x265x45	1,6	Кгауткрамер, Германия
USM 32X	От 0,5 до 20,0	До 10000	255x177x100	2,2	Кгауткрамер, Германия
USN58	От 0,5 до 25,0	До 10000	282x159x159	2,9	Кгауткрамер, Германия

Основными параметрами ультразвуковых дефектоскопов являются: максимальная глубина прозвучивания, которая убывает с ростом частоты акустических колебаний, и мертвая зона (или минимальная глубина прозвучивания), которая определяется минимальной глубиной залегания искусственного дефекта в виде цилиндра диаметром 2 мм, надежно выявляемого дефектоскопом. На рис. 3.30 представлены ультразвуковые дефектоскопы УД3-71 и USM32X.



Рис. 3.30. Ультразвуковые дефектоскопы УДЗ-71 (а) и USM32X (б)

Ультразвуковые дефектоскопы (УЗД) предназначены в основном для неразрушающего контроля объектов из металлов и сплавов, а также сварных соединений в таких ОК. Возможен контроль объектов из пластиков, резины, стекла, фарфора, керамики, бетона.

Вихретоковые дефектоскопы (ВД) основаны на регистрации электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой вихретокового преобразователя (ВТП) в электропроводящем ОК. Технические характеристики некоторых вихретоковых дефектоскопов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Вихретоковые дефектоскопы и их технические характеристики

Тип	Объекты контроля	Скорость контроля, м/с	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель
1	2	3	4	5	6
FD	Выявление трещин, расположенных на поверхности ферромагнитных изделий	-	45x80x120	0,2	Институт прикладной физики НАН РБ, г. Минск
ВД 96 Зонд	Выявление трещин, коррозии, несплошностей и неоднородностей в подповерхностном слое черных и цветных металлов и сплавов	До 4	156x70x200	1,1	«Главдиагностика», Россия
ВД -10А	Оперативный контроль поверхностных и подповерхностных дефектов в различных деталях сложной конфигурации из титана, стали, алюминия, магния и пр.		170x250x50	1,4	НПЦ НК «Корпус», Россия
ВД 34П	Ферро- и неферромагнитные прутки и трубы \varnothing 1-47 мм	0,5-4	Электронный блок 470x340x285, блок ВТП 310x350x400, осциллограф 390x100x280	40	з-д «Контрольприбор», Россия
ВД 89Н	Листы, трубы, ребра шириной >2,5мм, отверстия \varnothing 4-25мм,	0,5-4	170x90x40	2	з-д «Контрольприбор»,

	объекты сложной формы из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов				Россия
ВД516Ц	Трубы большого диаметра \varnothing от 60мм и плоские изделия из ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов	До 2 м/с	130x50x275	-	ЦНИТМАШ, Россия
245 МД	Цилиндрические изделия (валы, оси и др.) двигателей и несущих конструкций (выявление трещин выходящих на поверхность)	До 4 м/с	150x80x30	0,4	Машпроект, Россия

В вихретоковых преобразователях используются проходные и накладные ВТП. Дефектоскопы с проходными ВТП применяют обычно для высокоскоростного контроля качества проволоки, прутков, труб, шариков и роликов подшипников и др. деталей. Дефектоскопы с накладными ВТП применяют для локального контроля плоских изделий (листов, лент, пластин и др.), а также для контроля цилиндрических изделий с использованием сканирующих устройств, обеспечивающих вращательное движение преобразователя по отношению к ОК.

ВД не требуют механического контакта ВТП с ОК, что позволяет реализовать высокопроизводительный контроль бесконтактным способом.

Одним из основных параметров ВД является порог чувствительности, определяемый минимальными размерами дефекта заданной формы, при которых отношение сигнал-помеха составляет более двух. Для ВД с проходными преобразователями порог чувствительности обычно определяется глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженного в процентах поперечного размера (диаметра) изделия; с накладными преобразователями – абсолютными размерами дефекта по глубине и протяженности. Внешний вид вихретоковых дефектоскопов представлен на рис. 3.31.



Рис.3.31. Вихретоковые дефектоскопы ВД-10А (а) и ВД516Ц (б)

Магнитные дефектоскопы (МПД) основаны на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов при намагничивании ферромагнитных объектах контроля. Для регистрации полей рассеяния применяют магнитный порошок, магнитную ленту, феррозонды, преобразователи Холла и другие преобразователи. Наибольшее распространение получили магнитопорошковые дефектоскопы.

Они просты в устройстве и эксплуатации и применяются для НК ферромагнитных ОК любой формы. В табл. 3.8 приведены технические характеристики некоторых типов МПД. Внешний вид приборов показан на рис.3.32.



Рис. 3.32. Магнитный дефектоскоп МД-4К и МД01-ПК

Таблица 3.8. Технические характеристики магнитных дефектоскопов

Тип	Назначение	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель
МПД 70	Контроль ферромагнитных деталей, сварных швов, стенок отверстий в полевых, лабораторных, цеховых условиях	660x50x260	48+30 (дефектоскоп + принадлежности)	АО «Интроскоп», Россия
МПД 87	Контроль различных изделий, узлов и деталей машин в лабораторных и цеховых условиях	307x496x400	70+30	«Ульракон-Сервис», Украина
МД-4К	Контроль поверхностных дефектов типа нарушения сплошности металла на локальных участках крупногабаритных деталей	-	7	МПФ «Промприлад», Украина
МД-12ПШ	Контроль деталей из ферромагнитных материалов	275x520x320	59	ОАО «ДЭЗО» (Днепропетровский завод электротехнического оборудования), Украина

Радиационные дефектоскопы используют в качестве источников излучения рентгеновские трубки, радиоактивные изотопы и ускорители заряженных частиц (электронов). При радиографическом способе регистрации результатов контроля используют фоточувствительную пленку (пленочная радиография) или обычную бумагу, на которой получают изображение с помощью полупроводниковых пластин (электрорадиография). *Дефектоскопы с радиоактивными источниками* используют гамма-излучение и применяются в основном в качестве переносных и передвижных аппаратов при контроле труднодоступ-

ных мест ОК и в полевых условиях. Дефектоскопы с радиоактивными источниками позволяют контролировать стальные ОК толщиной от 1 до 200 мм. Для дефектоскопии ОК большей толщины применяют *ускорители заряженных частиц* (бетатроны, линейные ускорители, микротроны). Стационарными бетатронами можно контролировать стальные детали толщиной до 500 мм.



Рис. 3.33. Приборы радиационной дефектоскопии: *а* - гамма-дефектоскоп «Гаммарид-192/120»; *б* – Рентгеновский аппарат «Ратмир-250П»

В *рентгенотелевизионных установках* (интроскопах) изображение с флюороскопического экрана усиливается оптическим усилителем и преобразуется в изображение на экране телевизионной трубки, что позволяет реализовать дистанционный контроль.

Основные технические характеристики некоторых типов радиационных дефектоскопов приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Технические характеристики радиационных дефектоскопов

Тип	Источник излучения	Объекты контроля	Телевизионное излучение, разы	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5	6
МТР-ЗИ	Рентгеновский аппарат РУП-150-10-1	Элементы радиоэлектронной аппаратуры, тонкостенные и малогабаритные сварные детали из алюминиевых и магнитных сплавов толщиной 1-50 мм	1,5-30	Рентгеновский блок 1700x1000x2000 Телевизионный блок 750x500x1200	950
«Ратмир-250П» (панорамный)	Рентгеновский аппарат	Для радиографического контроля небольших толщин стали, и объектов из легких сплавов. Глубина просвечивания стали до 45 мм	-	Габариты рентгеновского моноблока (d-диаметр) 1050x185	32 (вес радиационного блока)

РИ-60ТК	Рентгеновский аппарат РУП-150/300-0,1	Литые детали, толсто-стенные сварные конструкции из алюминия, титановых сплавов, пластмасс и керамики	-	Рентгеновский блок 774x1035x340 Телевизионный блок 750x500x1200	950
Гамма-дефектоскоп Гаммарид-192/120	Источник излучения 192 Ir 137 Cs	Радиографический контроль металла и сварных соединений. Толщина просвечиваемого материала, мм: стали 1 – 80; легких металлов и сплавов 1,5 – 250	-	Габаритные размеры радиационной головки, мм (не более): 240x110x110	17

Дефектоскопы, использующие *проникающие вещества* для НК, классифицируют по типу пенетранта и способу регистрации индикаторного рисунка. Основными объектами капиллярной дефектоскопии являются изделия из неферромагнитных конструкционных материалов: лопатки турбин, детали корпусов энергооборудования, сварные швы, а также изделия из диэлектрических материалов, например, из керамики.

В настоящее время наиболее широко применяется следующая дефектоскопическая аппаратура: люминесцентные дефектоскопы ЛДА-3 и ЛД-4, ультрафиолетовые установки КД-20Л и КД21-Л, установки контроля лопаток УКЛ-1, стационарная дефектоскопическая установка «Дефектолюмоскоп СЛДУ-М» и др.

3.2.3. Толщиномеры

Толщиномеры предназначены для определения размеров ОК и их отклонений от номинальных значений. Наибольшее распространение получили *акустические (ультразвуковые), вихретоковые, магнитные и радиационные толщиномеры*, технические характеристики которых приведены в табл.3.9.

Таблица 3.9. Технические характеристики толщиномеров

Тип	Объект контроля	Диапазон измеряемых толщин, мм	Погрешность измерения, %	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель
1	2	3	4	5	6	7
<i>Акустические</i>						
Булат 2	Листы, емкости, трубы из металлических и неметаллических материалов То же, в том числе сильно корродированных, съеденных накипью	От 0,4 до 600	Т=0,4-10 ±(0,001Т +0,01), где Т - измеряемая толщина ±(0,002Т +0,01)	150x80x30	0,22	ЗАО «Константа», Россия
Булат 5		От 0,6 до 200		120x60x25	0,15	
ТУЗ 1	Трубопроводы,	От 0,6 до	±(0,005Т	164x84x30	0,5	

ТУЗ 3	стенки котлов, сосудов при одностороннем доступе То же	300 От 1,2 до 200	+0,1) $\pm(0,005T+0,1)$	-	0,2	НПФ «Ультракон-Сервис», Украина
26XTDL	Трубы, котлы, сосуды, в.т.ч. подверженные коррозионному и эрозионному износу	От 0,5 до 500	$\pm(0,01T+0,1)$	-	-	GE Panametrics, США
26MG	То же	От 0,5 до 508	0,1	65x129x29	0,24	Крауткрамер, Германия
ТТ 100 Time	Листовые материалы и цилиндрические изделия из металлических и неметаллических материалов	От 1,2 до 225,0	0,1	126x68x23	0,17	Time Group Inc.
<i>Вихрековые</i>						
DEFOTEST	Стальные изделия (трубы, сосуды и т.д.)	0,1-3	-	200x80x200	3	Институт прикладной физики НАН РБ, г.Минск
ТМ-300	Немагнитные покрытия различных металлов	От 3 до 300мкм	$\pm 0,03T+3$) мкм	Датчик $\varnothing 53 \times 90$, индик.блок 150x82x33	0,4	То же
ЗОНД ИТГ-98	Измерение глубины трещин в электропроводящих магнитных и немагнитных материалах	От 0,5 до 100	Не более 10	220x155x80	2,2	ЦНИТМАШ, Россия
ВИД 345	Трубы, котлы, сосуды под давлением в.т.ч. подверженные коррозионному и эрозионному износу	-	$\pm(0,1T+0,2)$	150x80x35	0,5	-
ВТ 10НЦ	Диэлектрические покрытия на неферромагнитных материалах	От 0,02 до 50	5	127x200x280	3,5	З-д «Контрольприбор», Россия
<i>Магнитные</i>						
УМТ-1	Ферромагнитные материалы под слоем немагнитного покрытия или коррозии и слоя покрытия или коррозии	От 0 до 5,5	-	196x100x40	1	Институт прикладной физики НАН РБ, г.Минск
МТЦ-2М	Немагнитные и никелевые покрытия	От 0 до 10	$\pm(0,02T+1,5)$	200x90x40	0,4	То же

	на ферромагнитных и неферромагнитных основаниях					
МТЦ-3	Немагнитные покрытия на ферромагнитных основаниях	От 0 до 6	$\pm(0,02T+1,5)$	150x85x45	0,3	То же
МТ-41НЦ	Неферромагнитные покрытия на ферромагнитном основании	От 0 до 12	5	127x200x280	3,5	З-д «Контрольприбор», Россия
Magna-Mike 8500	Неферромагнитные материалы и покрытия	От 0 до 9,65	1	238x138x38	0,95	GE Panametrics, США

Акустические толщиномеры по характеру явлений, используемых в них, можно разделить на следующие виды:

- а) импульсные, в которых толщина изделий или слоя измеряется по времени прохождения ультразвукового импульса;
- б) с непрерывным излучением, в которых толщина определяется по фазе ультразвуковых волн, прошедших контролируемый слой или изделие;
- в) теневые, в которых измеряемый параметр – амплитуда ультразвуковых колебаний или импульсов, прошедших через изделие контролируемой толщины;
- г) резонансные, в которых используется резонанс ультразвуковых колебаний, возникающий на определенной частоте, связанной с толщиной ОК.

В последнее время используются и электромагнитно-акустические метод, при котором возбуждение и прием ультразвуковых колебаний осуществляется электромагнитным бесконтактным методом.

Самыми распространенными являются эхо-импульсные толщиномеры, измеряющие время между зондирующим и одним из отраженных импульсов.

Внешний вид толщиномеров ультразвуковых показан на рис.3.34.



Рис 3.34. Толщиномеры ультразвуковые ТУ31, 2 и ТТ 100Time

Магнитные толщиномеры применяются в основном для контроля толщины немагнитных покрытий на изделиях из ферромагнитных материалов. Наибольшее распространение получили магнитоотрывные и индукционные толщиномеры. Принцип действия первых основан на измерении силы воздействия постоянных магнитов или сердечников электромагнитов с ОК, которая зависит от толщины немагнитного покрытия. Принцип действия индукционных толщиномеров основан на определении магнитного сопротивления магнитной цепи, зависящего от толщины контролируемого покрытия.



Рис. 3.35. Толщиномеры магнитные УМТ-1 и МТЦ-3

Радиационные толщиномеры используют для измерения толщины ОК из любых материалов по ослаблению прошедшего через ОК ионизирующего излучения (при двустороннем доступе к ОК) или по его отражению (при одностороннем доступе). В качестве источников излучения применяют рентгеновские трубки или радиоактивные изотопы. В качестве детекторов излучения применяют ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые детекторы.

Вихретоковые толщиномеры не требуют контакта с ОК, но применимы только для контроля объектов, содержащих электропроводящие слои. Вихретоковые толщиномеры служат для контроля толщины металлических листов, лент, стенок труб, толщины диэлектрических (в т.ч. теплоизоляционных) и электропроводящих покрытий на электропроводящих объектах.

3.2.4. Структуроскопы

Структуроскопы предназначены для определения физико-механических и физико-химических свойств и характеристик материалов ОК (химический состав, твердость, прочность, пластичность, электрические и магнитные характеристики, степень коррозионных поражений и т. п.).

Для структуроскопии различных материалов чаще всего используются акустический, магнитный и вихретоковый методы контроля. Технические характеристики некоторых структуроскопов приведены в табл.3.10.

В *акустических приборах* используется связь физико-механических свойств ОК со скоростью распространения и затухания ультразвука. Их чаще всего используют для определения размеров зерна в металлах и сплавах, для

обнаружения межкристаллитной коррозии, для определения упругих постоянных, для контроля прочности бетона и т. д.



Рис. 3.36. Ультразвуковой структуроскоп УС-3ЦЛ

Вихретоковые приборы используют для сортировки ферро- и неферромагнитных ОК по маркам сплава, для контроля правильности режима термической и термохимической обработки стальных деталей, для сортировки по твердости и т. д. Сортировка обычно ведется методом сравнения со стандартным образцом.



а)



б)

Рис. 3.37. Вихретоковый структуроскоп ВЭ-26НП (а), ВС-2010 (б)

Таблица 3.11. Технические характеристики структуроскопов

Тип	Объект контроля	Контролируемые параметры	Габариты, мм	Масса, кг	Изготовитель
1	2	3	4	5	6
<i>Акустические</i>					
Импульс-2М	Стальные изделия в производственных и полевых условиях	Твердость (НВ, HRC), предел прочности, МПа	-	1,05	Институт прикладной физики НАН РБ,

					г. Минск
УС - 12ИМ	Металлические изделия толщиной 0,2-300 мм с плоскопараллельными гранями	Коэффициент затухания УЗ 0,25-10дБ/см; скорость распространения УЗ 1250-9999 м/с	480x170x480	20	АО «Интроскоп», Молдова
УК-10ПМ	Изделия из бетона, кирпича, пластика	Время распространения УЗ 8-9999мкс	280x170x350	9	То же
УС-13И	Изделия из стали, чугуна и др. металлов и сплавов толщиной 2-100 мм	Коэффициент затухания УЗ 0,25-10дБ/см; время распространения УЗ 2-50мкс	280x170x350	9	То же
УС-3ЦЛ	Изделия из чугуна	Физико-механические свойства	126x85x25	0,5	НПК «Луч», Россия
<i>Вихретоковые</i>					
НТ-1	Стальные и чугунные изделия сложной формы и в труднодоступных местах	Твердость (НВ, HV, HRC)	300x230x100	3	Институт прикладной физики НАН РБ, г Минск
ВЭ-26НП	Применяется при сортировке изделий по приращению удельной электрической проводимости и контролю различных механических характеристик электропроводящих ферромагнитных материалов	-	157x84x30	0,3	ЗАО «Спектр КСК», Россия
ВС-11П	Ферромагнитные Ø14-100 мм	Марка стали, качество термообработки, твердость	Электронный блок 495x580x210 блок датчика 220x140x290	25+7	АО «Интроскоп», Молдова
ВС 2010	Ферромагнитные стали	Марка стали, физико-механические свойства, качество термообработки	525x430x175	12	ЗАО «Спектр» Россия
<i>Магнитные</i>					
КРМ-Ц	Ферромагнитные стальные и чугунные изделия произвольной формы	Коэрцитивная сила 1,0-40,0 А/см. Физико-механические свойства	Электронный блок 230x250x60, датчик 80x100x140	2+1,7	ЗАО «Спектр» Россия

КРМ-Ц-К2Л	Ферромагнитные стальные и чугунные изделия произвольной формы	Коэрцитивная сила 1,0-20,0 А/см. Напряженно-деформированное состояние	260x205x55	2,5	То же
КИФМ-1	Ферромагнитные стальные и чугунные изделия произвольной формы	Качество химической и термохимической обработки через связь с коэрцитивной силой	Электронный блок 230x250x60, датчик 80x100x140	12+1,5	З-д «Контрольприбор», Россия
ИМА-4М	Низкоуглеродистые и среднеуглеродистые стали	Твердость, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве	320x320x100	7	Институт прикладной физики НАН РБ, г. Минск
Эллипс	Плоские и цилиндрические изделия из углеродистых и низколегированных сталей и сварные соединения	Твердость, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение при разрыве	380x170x470	15	То же
КИПФ-1	Углеродистые и легированные стали	Качество термообработки, механические свойства и структура через связь с коэрцитивной силой	Электронный блок 385x265x140 датчик 122x75x85	9+1,5	То же

Магнитные приборы применяют для сортировки ферромагнитных ОК по твердости, размерам зерна, анизотропии свойств, содержанию примесей и углерода. Чаще других для этих целей используют *коэрцитиметры*, использующие корреляцию между коэрцитивной силой и контролируемыми параметрами ОК.



Рис 3.38. Магнитный структуроскоп – коэрцитиметр КРМ-Ц

3.2.5. Переносные твердомеры

Для определения твердости и показателей других механических свойств металла теплотехнического оборудования (трубопроводов, барабанов, корпусных деталей турбин) используются портативные переносные твердомеры.

По принципу действия они подразделяются на три основные группы – механического, физического и физико-механического действия. На рис.3.39 схематически приведена классификация этих твердомеров.

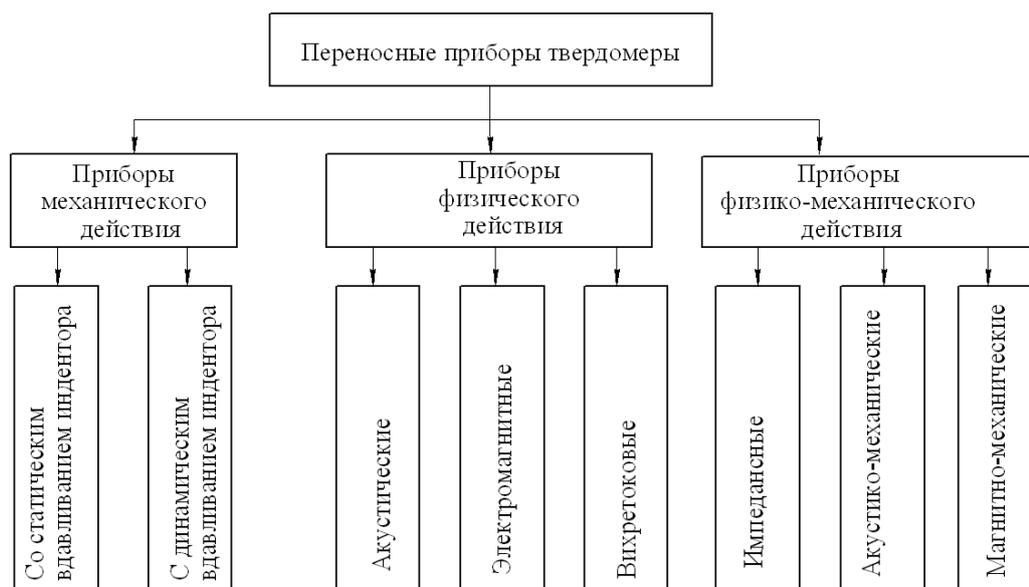


Рис. 3.39. Классификация портативных приборов-твердомеров

Широкое распространение получили переносные твердомеры статического действия, которые позволяют прямым способом в соответствии с государственным стандартом определить твердость по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу. Приборы закрепляют на испытуемых деталях с помощью струбцин, а также магнитных, ленточных или цепных захватов. Нагрузку на индентор создают ручной механической подачей

Для контроля твердости металла теплотехнического оборудования наряду с переносными твердомерами статического действия используются переносные твердомеры динамического действия. Эти твердомеры делятся на эталонные и безэталонные. На практике чаще всего используются твердомеры с эталонами. При динамическом нагружении индентор одновременно вдавливаются в ОК и эталон.

Основные технические характеристики переносных твердомеров приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12. Основные технические характеристики переносных твердомеров механического действия

Марка	Метод и диапазон измерения твердости	Погрешность измерения нагрузки, %	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Изготовитель
<i>Статического действия</i>					
ТБП	Бринелля 80-450НВ	±1	162х320х345	11,0	АО «Точприбор», Россия
ТРП 5011	Роквелла 70-93HRA 25-100HRB 20-70HRC	±3 ±2 ±1	155х125х315 (испытательной головки) 250х155х750 (испытательного устройства)	3,2	То же
ТВП 5012-01	Виккерса 13-2000 HV	±1	250х200х180	6,0	То же
МЭИ Т-12	Бринелля 8-450 НВ	±1	300х100х132	7,0	МЭИ, Москва
<i>Динамического действия</i>					
Марка	Основные шкалы измерения	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Разработчик, изготовитель	
ТПЦ-4	НВ, HRC	120х85х45	0,3	Институт прикладной физики НАН РБ, г. Минск	
ТЭМП-2	НВ, HV, HRC	175х90х35	0,4	НПФ «Технотест», г. Москва	
МЕД-УД2	НВ, HV, HRC	145х80х40 (электрон. блок); Ø22х160 (датчик)	0,8 0,45	Россия	
МИТ-2	НВ, HV, HRC	60х180х170 (электрон. блок); Ø30х140 (датчик)	1,3	НПП «Митекс», Россия	
MICRODUR	HV, HRC	150х115х50 (электрон. блок); Ø38х205 (датчик)	1,3 0,5	Krautkramer, Германия	
EQU TIP	НВ, HV, HRC	510х360х120 (переносной чемоданчик)	6,0	PROCEQ SA, Швейцария	



Рис. 3.40. Переносные портативные твердомеры ТЕМП-2 и МЕД-УД2

3.2.6. Оценка выявляемости некоторых дефектов металла различными методами неразрушающего контроля

Оценка выявляемости некоторых дефектов металла различными методами неразрушающего контроля приведена в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Оценка выявляемости некоторых дефектов в металле различными методами НК

Вид дефекта	Вид НК				
	радиографический	магнитопорошковый	капиллярный	вихретоковый	ультразвуковой
Включения неметаллические, шлаковые	4	0	0	2	4
Вмятины	0	0	0	2	0
Грубозернистость околосшовной зоны	0	0	0	2	4
Закаты	0	0	2	3	3
Заковы	0	2	2	3	3
Коррозия:					
- атмосферная	0	0	3	4	4
- поверхностная газовая	0	0	4	4	4
- высокотемпературная межкристаллитная	0	0	4	4	4
- поверхностная	0	0	4	4	0
Металлургические дефекты сварного шва	4	3	0	2	4
Науглероживание	0	4	0	4	0
Непровар	3	3	0	0	4
Несоответствие заданной структуре	0	3	0	4	0
Газовая пористость	4	2	2	4	3
Разнотолщинность (листов)	3	3	0	3	5
Растрескивание коррозионное под напряжением	0	3	4	4	4
Трещины:					
- поверхностные, внутренние	2	2	2	2	4
- сварочные	4	3	0	2	5
- термической усталости	0	0	4	4	4
- ползучести	0	3	4	4	4

3.3. БЕЗОБРАЗЦОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА СТАЛЕЙ

3.3.1. Безобразцовый контроль микроструктуры структуры металла

Неразрушающий контроль микроструктуры металла непосредственно в изделиях выполняется с помощью переносных микроскопов и метода оттисков. Переносные микроскопы устанавливаются на съемные предметные столики и жестко прикрепляются к деталям. На трубопроводах микроскопы могут быть закреплены цепным приспособлением. Перед контролем микроструктуры подготавливают поверхность металла. Вначале пневмо- или электроинструментом зачищают плоскую

площадку размером 30x20 мм. Толщина удаляемого слоя должна быть не больше отрицательных допусков, предусмотренных техническими условиями на изделие. Поверхность площадки шлифуют и полируют кругами: корундовым крупнозернистым на керамической или бакелитовой основе, затем корундовым мелкозернистым. Применяют также электрополирование с помощью специальных переносных устройств. Электрополирование представляет собой процесс растворения металла, в результате которого получается блестящая полированная поверхность. Процесс электрополирования происходит в электролизной ванне между катодом и анодом-шлифом (контролируемой деталью). Катод обеспечивает электролитический контакт и удерживает электролит при электрохимическом процессе полирования и травления. Качество электрополированной поверхности зависит от состава и температуры электролита, плотности тока, продолжительности полирования и предварительной подготовки поверхности.

После подготовки исследуемой поверхности детали для контроля микроструктуры металла устанавливается и закрепляется микроскоп. С помощью микроскопа можно не только наблюдать микроструктуру, но и фотографировать ее. Для фотографирования на подвижной части корпуса микроскопа укрепляют соединительное кольцо с фотокамерой.

Основным недостатком методики контроля микроструктуры переносными микроскопами является невозможность их использования в труднодоступных местах изделий, где сложно установить и закрепить микроскоп. В связи с этим широкое распространение получил метод контроля микроструктуры с помощью пластиковых реплик, т.е. метод оттисков. Для получения оттиска используют полистирол. Вначале блочный полистирол нарезают кубиками, толщина ребра которых составляет 15–20 мм. На контролируемую сторону кубика наносят несколько капель ацетона и через 20–30 с выдержки, размягченной поверхностью прижимают к объекту обследования на 2–3 с, после чего выдерживают без нагрузки 20–30 мин. Затем кубик отделяют от поверхности детали. Рельеф контролируемого металла, зафиксированный на размягченной поверхности кубика, анализируют с помощью оптического микроскопа в лабораторных условиях при заданном увеличении.

На рис.3.41 представлены этапы получения оттиска для контроля микроструктуры металла. Микроструктура металла, наблюдаемая под микроскопом на шлифе, и микроструктура оттиска на полистироле практически не различаются.

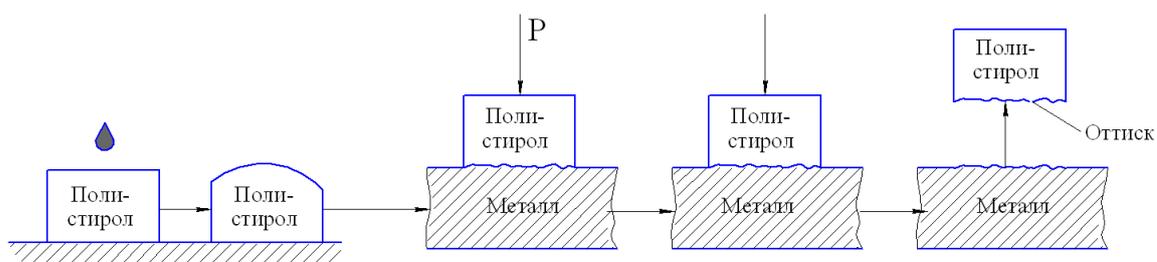


Рис.3.41. Этапы получения оттиска для контроля микроструктуры металла

3.3.2. Контроль химического и марочного состава сталей без разрушения объектов котроля

Контроль стилоскопированием – качественный спектральный анализ на наличие легирующих элементов, которому подвергаются элементы теплоэнергетического оборудования и трубопроводов, изготовленные из легированной стали, а также наплавленный металл сварных соединений этих элементов.

При стилоскопировании между электродом меди, угля или чистого железа и деталью возбуждается электрический разряд. Световые лучи от разряда направляются в систему линз и призм, в которых они разлагаются по длинам волн в линейчатый спектр. Раскаленные пары каждого металла имеют свои вполне определенные линии в спектре, свойственные только одному этому металлу (рис. 3.42).

Спектр сплава складывается из спектров металлов-компонентов. Если, например, в состав сплава входит хром, то в спектре паров обязательно имеются линии хрома. Чем выше содержание хрома, тем ярче его линия. Качественное определение наличия легирующих примесей при помощи портативного переносного стилоскопа в заводских или монтажных условиях занимает доли минуты.

Спектральный анализ проводят с помощью стилоскопов. Стилоскопы используют как непосредственно в цехах, так и в лаборатории и делятся на переносные и стационарные.

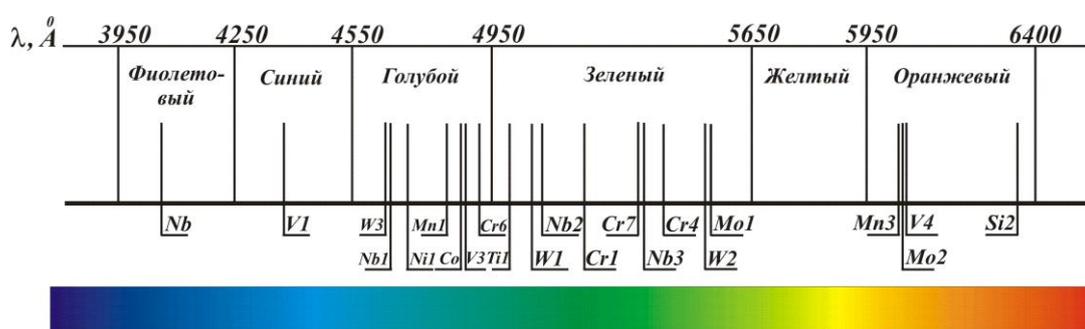


Рис.3.42. Линии спектра металлов

Решение об отнесении металла к той или иной марке принимает оператор (стилоскопист) визуально по интенсивности свечения каждого элемента.

К недостаткам стилоскопирования относят:

- необходимость хорошей подготовки операторов;
- невозможность определения примесей;
- субъективность результатов, влияние человеческого фактора;
- длительная работа на стилоскопе вредна для здоровья оператора (влияет на зрение).

В настоящее время на производстве используют новые методы экспресс анализа, идентификации и определения марки металлов, например *рентгено-флюорисцентный*.

Рентгено-флуоресцентные анализаторы (РФА) с использованием рентгеновского излучения, используют явление флуоресценции, при котором атомы химических элементов излучают фотоны строго определенной энергии. В последнее время распространение получили портативные приборы. РФА применяются для контроля широкого спектра материалов (любые типы металлических сплавов, жидкости, бумага, порошки, пленки, гранулы).

К преимуществам РФА относят:

- исключение влияния человеческого фактора на результат испытания;
- простота работы с прибором (отсутствует необходимость в высококвалифицированных кадрах).

К недостаткам можно отнести их высокую стоимость.

Стилоскоп, как и рентгено-флуоресцентный анализатор, не дает информации о содержании углерода, серы и фосфора в сталях. Это ограничение не позволяет проводить полную сортировку и анализ углеродистых и низколегированных сталей. Для этих целей используются *оптико-эмиссионные анализаторы*, которые использует тот же (спектральный) принцип работы, что и стилоскоп. Современная цифровая автоматическая обработка спектра и использование инертного газа (аргона) позволяют проводить точный количественный анализ любых типов сталей с высокой точностью в условиях лабораторных, цеховых и полевых условиях.

Для оценки химического состава металлов и сплавов применяются также *лазерные анализаторы*. Эти приборы основаны на принципе глубинного сканирования образца с использованием квантового лазерного излучения. К преимуществам лазерных анализаторов можно отнести высокую производительность и чувствительность. Лазерный анализатор позволяет идентифицировать сплав даже с процентным содержанием элемента менее 0,0005% со скоростью лазерного сканирования, которое занимает доли секунд.

На рис. 3.43 показан внешний вид радиационно-люминесцентного и лазерного портативных анализаторов производства XRF Technology (США).



Рис.3.43. Внешний вид радиационно-люминесцентного и лазерного портативных анализаторов производства XRF Technology (США): а – радиационно-люминесцентный; б – лазерный

ТЕМА 4. КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛАТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

4.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Основные термины и определения в области диагностики и контроля технического состояния объектов устанавливает [ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения»](#).

Техническая диагностика – область знаний, охватывающая, теорию, методы и средства определения технического состояния объекта.

Техническое состояние объекта – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

К факторам, под воздействием которых изменяется техническое состояние объекта, можно отнести действия климатических условий, старение с течением времени, операции регулировки и настройки в ходе изготовления или ремонта, замену отказавших элементов и т. п.

Об изменении технического состояния объекта судят по значениям диагностических (контролируемых) параметров, позволяющих определить техническое состояние объекта без его разборки.

Видами технического состояния объекта являются, например, исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и т.п. в зависимости от значений параметров в данный момент времени.

Контроль технического состояния – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Термин «контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

В зависимости от сроков проведения контроль оборудования ТЭС подразделяют на первичный, внеочередной и периодический.

Первичный контроль проводится до пуска в эксплуатацию оборудования, внеочередной – в случае аварии, отказа или неисправности оборудования, периодический – в определенно установленные сроки в процессе эксплуатации оборудования (сроки устанавливаются технической документацией).

Контроль проводится с целью отбраковки дефектных деталей, получения достоверной информации о состоянии металла и обеспечения надежной эксплуатации элементов и узлов оборудования.

Контроль неразрушающими методами должны проводить специалисты, аттестованные в соответствии с «Правилами аттестации специалистов по неразрушающему контролю» и имеющие квалификационный уровень не ниже второго.

Аппаратура, средства и методики, применяемые для контроля диагностических параметров, должны соответствовать требованиям действующих нормативно-технических документов на конкретные виды контроля.

Все виды неразрушающего контроля, измерения, определение механических свойств, исследование микроструктуры металла, расчеты на прочность следует проводить в соответствии с требованиями государственных и отраслевых стандартов, заводских или отраслевых инструкций.

Элементы оборудования считаются пригодными к дальнейшей эксплуатации, если по результатам контроля окажется, что состояние металла удовлетворяет требованиям действующих нормативных документов.

Контроль металла производится преимущественно во время плановых остановов оборудования.

Техническое диагностирование – определение технического состояния объекта.

Задачами технического диагностирования являются:

- 1) контроль технического состояния объекта;
- 2) поиск места и определения причин отказа (неисправности, аварии);
- 3) прогнозирование технического состояния объекта.

Термин «техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности).

Прогнозирование технического состояния – определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохраняется работоспособное (исправное) состояние объекта или вероятность сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

Техническое диагностирование оборудования следует проводить после отработки паркового ресурса оборудования, истечения назначенного (расчетного) срока службы или после аварии.

Парковый ресурс – наработка однотипных по конструкции, маркам стали и условиям эксплуатации элементов теплоэнергетического оборудования, в пределах которой обеспечивается их безаварийная работа при соблюдении требований действующей нормативной документации. [Парковый ресурс оборудования ТЭС определяется в соответствии с СТП 09110.17.400-15 «Инструкция по контролю и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов турбин и трубопроводов ТЭС»](#).

Назначенный (расчетный) срок службы – срок службы в календарных годах, исчисляемый со дня ввода оборудования в эксплуатацию. Назначенный срок службы устанавливает предприятие-изготовитель и указывает его в паспорте на оборудование.

Парковый ресурс и назначенный срок службы не являются предельными сроками эксплуатации оборудования.

По результатам технического диагностирования после отработки паркового ресурса (назначенного срока службы) принимается решение о дальнейшей эксплуатации оборудования.

Техническое диагностирование оборудования включает в себя:

- наружный и внутренний осмотры;
- контроль геометрических размеров;
- измерение выявленных дефектов (коррозионных язв или эрозионных повреждениях, трещин, деформаций и других);
- контроль сплошности сварных соединений и зон основного металла неразрушающими методами дефектоскопии;
- контроль толщины стенки неразрушающим методом;
- измерение твердости с помощью переносных приборов;
- лабораторные исследования (при необходимости) химического состава, свойств и структуры материала основных элементов;
- гидравлические испытания;
- прогнозирование на основании анализа результатов технического диагностирования и расчетов на прочность возможности, допустимых рабочих параметров, условий и сроков дальнейшей эксплуатации оборудования.

После аварии следует проводить досрочное (внеочередное) техническое диагностирование сосуда, которое может быть полным или частичным в зависимости от места, характера и степени повреждения оборудования.

При положительных результатах технического диагностирования оборудование может быть допущено в дальнейшую эксплуатацию. Допускаемый срок продления эксплуатации устанавливает (с учетом результатов обследования) выполняющая техническое диагностирование организация.

Разрешение на дальнейшую эксплуатацию оборудования на основании выводов и рекомендаций заключения по результатам технического диагностирования выдается инспектором Госпронадзора.

На ТЭС контроль и техническое диагностирование оборудования выполняются силами лабораторий (служб) металла электростанции, или энергоремонтных предприятий (например, «Белэнергоремналадка») с привлечением в случае необходимости (в том числе при отсутствии лицензии на техническое диагностирование) организаций, специализирующихся на техническом диагностировании поднадзорного Госпромнадзору оборудования и имеющих соответствующую лицензию.

Техническое диагностирование оборудования проводится либо по типовой программе, либо по индивидуальной программе в зависимости от конкретного типа оборудования, его технического состояния и условий эксплуатации.

Решение о программе обследования оборудования принимается *организацией* (предприятием), выполняющей данное техническое диагностирование.

Методы, сроки, порядок и объем проведения контроля металла оборудования ТЭС регламентированы соответствующими нормативными документами.

В которых рассматриваются вопросы контроля и оценки состояния металла поверхностей нагрева котлоагрегатов, паропроводов, барабанов, деталей турбин, сварных соединений и крепежа. Требования к проведению контроля и технической диагностики оборудования ТЭС устанавливают [Правила по промышленной безопасности оборудования работающего под избыточным давлением](#).

4.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ ТЭС

Сварные соединения являются наиболее ответственными элементами деталей и конструкций энергоустановок.

Влияние дефектов на работоспособность сварных соединений определяется многими конструктивными и эксплуатационными факторами. Так, например, при статической нагрузке и пластичном материале влияние размера непровара на потерю прочности примерно пропорционально относительному размеру этого непровара или его площади. При малопластичном материале, а также при динамической или вибрационной нагрузке влияние дефектов усиливается.

Основными методами НК металла и сварных соединений являются: визуальный и измерительный контроль, радиографический, ультразвуковой; капиллярный или магнитопорошковый, а также измерение твердости, стилоскопирование, гидравлические испытания. Кроме этого могут применяться другие методы (акустическая эмиссия, вихретоковый контроль и др.).

Объем контроля монтажных и сварочных работ устанавливается проектом или технической документацией для каждого вида технологического оборудования и трубопроводов в соответствии с категорией их сварных соединений.

Акустический (ультразвуковой) контроль сварных соединений регламентирован [ГОСТ 14782 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые»](#). Его проводят с помощью универсальных дефектоскопов, как правило, эхо-методом. Угол ввода акустических колебаний выбирают так, чтобы расстояние от искателя до сварного шва было минимальным, а направление акустического луча – как можно ближе к нормали по отношению к сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальна. Контроль ведут прямым (рис.4.1, а) и однократно отраженным лучом (рис.4.1, б) .

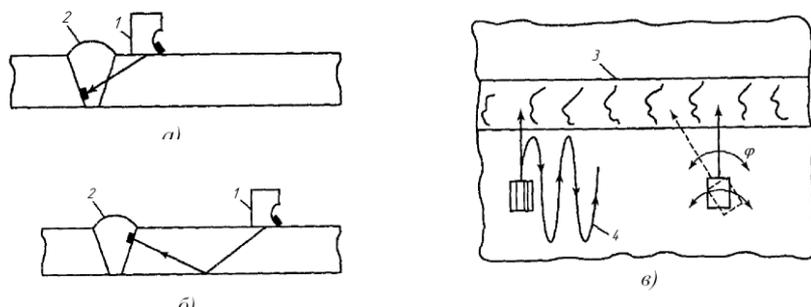


Рис. 4.1. Схема ультразвукового контроля стыкового сварного шва: а – прямым лучем; б – однократно отраженным лучом; в – траектория и угол сканирования; 1 – искатель; 2 – датчик; 3 – сварной шов; 4 – траектория сканирования

Для повышения надежности контроля в процессе сканирования искатель непрерывно поворачивают на угол $\varphi = 10 - 15^\circ$ (рис.4.1, в), а шов прозвучивают с двух сторон.

Режимы контроля стыковых швов из углеродистых сталей представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Режимы ультразвукового контроля стыковых швов

Толщина шва, мм	Частота УЗ, МГц	Угол наклона призмы, град	Порог чувствительности (по эквивалентной площади), мм ²
3 – 10	5	50 – 55	1 – 2
10 – 50	2,5	40 – 50	2 – 7
50 – 150	1,5 – 2	30 – 40	7 – 15
150 – 200	0,1 – 1,5	0 – 30	15 – 80

Швы нахлесточных сварных соединений контролируют со стороны основного листа однократно отраженным лучом..

Радиационный контроль сварных соединений регламентирован ГОСТ 7512-82 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод». Используют гамма-, рентгеновские дефектоскопы и ускорители. Время просвечивания выбирают либо по номограммам экспозиции, либо с помощью автоматических экспонометров. Для повышения надежности обнаружения дефектов применяют просвечивание одного участка шва с нескольких направлений.

Магнитный контроль сварных соединений используют для выявления дефектов ферромагнитных ОК. Наибольшее применение находит магнитографический метод контроля, который широко используется для обнаружения дефектов сварных швов трубопроводов. С помощью магнитографических дефектоскопов выявляются поверхностные дефекты глубиной более 10% толщины стенки трубы и дефекты глубиной 10 – 15% толщины стенки – на глубине 20 – 25 мм. Магнитопорошковый метод для контроля сварных швов применяют в основном для контроля швов, прошедших зачистку, при этом шероховатость поверхности шва должна быть не ниже четвертого класса.

Капиллярный контроль применяют для обнаружения дефектов выходящих на поверхность. При контроле сварных соединений обследуют сварной шов и околошовную зону. Капиллярные методы эффективны при контроле швов со снятым усилением и шероховатостью поверхности не грубее Rz20. Швы с несколько большей шероховатостью можно контролировать люминесцентным методом, который дает наивысшую чувствительность.

Контроль течением применяют для проверки герметичности сварных соединений. В сварных швах, выполненных путем плавления, герметичность может быть нарушена свищами, прожогами, сквозными трещинами и не-

проварами.

Контроль стилоскопированием – качественный спектральный анализ на наличие легирующих элементов, которому подвергаются все элементы котла и трубопроводов, изготовленные из легированной стали, а также наплавленный металл сварных соединений этих элементов. При стилоскопировании между электродом меди, угля или чистого железа и деталью возбуждается электрический разряд. Световые лучи от разряда направляются в систему линз и призм, в которых они разлагаются по длинам волн в линейчатый спектр. Раскаленные пары каждого металла имеют свои вполне определенные линии в спектре, свойственные только одному этому металлу. Спектр сплава складывается из спектров металлов-компонентов. Если, например, в состав сплава входит хром, то в спектре паров обязательно имеются линии хрома. Чем выше содержание хрома, тем ярче его линия. Качественное определение наличия легирующих примесей при помощи портативного переносного стилоскопа в заводских или монтажных условиях занимает доли минуты.

Контроль твердости металла шва сварных соединений проводится для проверки качества термической обработки в объеме 100% на сварных соединениях труб с наружным диаметром 150 мм и более и в объеме 20% соединений труб с наружным диаметром от 100 до 150 мм. Твердость измеряется при помощи переносных твердомеров с предварительной зачисткой поверхности.

Результаты НК дополняют результатами лабораторного РК, включающего в себя исследования механических свойств, металлографические исследования и испытания на межкристаллитную коррозию (для сталей аустенитного класса). РК ведут на образцах, вырезаемых из производственных или контрольных сварных соединений и наплавов. Контрольными служат специально выполненные сварные соединения, однотипные с производственными и выполненные на том же оборудовании и теми же сварщиками, что и производственные.

Результаты по каждому виду контроля и места должны фиксироваться в отчетной документации (журналах, формулярах, протоколах, маршрутных паспортах и т.д.).

Изделие признается пригодным, если при любом виде контроля в нем не будут обнаружены внутренние и поверхностные дефекты, выходящие за пределы допустимых норм, установленных правилами и НД на изделие и сварку.

4.3. КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТРУБОПРОВОДОВ И ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ

4.3.1. Контроль трубопроводов

В соответствии с действующими ТНПА контролю и наблюдению в процессе эксплуатации подлежат все трубопроводы, коллекторы, трубы поверхностей нагрева, арматура, фасонные детали, фланцевые соединения и крепеж ра-

ботающие при температуре пара 450°C и выше. Металл трубопроводов с температурой среды от 250 до 450°C с давлением 1,6 МПа и выше контролируется выборочно, с периодичностью не реже чем через каждые 100 тыс. ч.

Объемы, периодичность и методы контроля металла паропроводов, питательных линий, котлов и турбин определены инструкцией.

Трубы поверхностей нагрева котлов контролируют при каждом ремонте и гидравлическом испытании путем визуального осмотра с целью выявления труб, имеющих большую остаточную деформацию, коррозию, золовой износ, трещины в сварных соединениях, недопустимую овальность и другие дефекты. Трубы поверхностей нагрева котлов, изготавливаемые по проекту из легированных сталей, контролируют перед монтажом (или перед установкой во время ремонта).

Трубы поверхностей нагрева, изготовленные из хромоникелевых аустенитных сталей, должны иметь размеры зерна 3–7 баллов. Для массового контроля размеров зерен в трубах из аустенитных сталей, поступающих на изготовление и монтаж, а также находящихся в эксплуатации, применяют ультразвуковые приборы, измеряющие затухание ультразвука. Степень поражения металла межкристаллитной коррозией определяют ультразвуковым методом согласно ГОСТ 6032-2003 «Стали и сплавы коррозионностойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии».

При контроле металла труб поверхностей нагрева котлов для выявления зоны повышенного риска преждевременных разрушений проводится ультразвуковая толщинометрия и магнитная диагностика, по результатам которых выбирают места вырезки образцов из труб. На вырезанных образцах измеряют наружный и внутренний диаметры трубы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, толщину стенки с лобовой и тыловой сторон, глубину коррозионных повреждений, а также проводят анализ микроструктуры металла.

Если механические свойства или структура образцов окажутся неудовлетворительными, то труба, из которой проводилась вырезка, должна быть удалена и проверено удвоенное количество вырезок из других труб той же партии. При неудовлетворительных свойствах металла этих вырезок возможность дальнейшей эксплуатации трубопровода и режимы его работы определяются технической комиссией, назначенной районным энергетическим управлением. Возможность дальнейшей эксплуатации паропровода с рабочей температурой 450 °С и выше и периодичность наблюдений после 100 тыс. ч работы устанавливаются экспертно-технической комиссией по результатам исследований металла, дефектоскопии сварных соединений, литья и других деталей паропровода.

Для труб, работающих при температуре выше 450 °С, дополнительно определяют химический и фазовый составы металла, твердость НВ металла по поперечному сечению трубы, длительную прочность.

Для труб из стали 12Х1МФ, работающих при температуре ниже 450 °С, и из стали 20, работающих при температуре ниже 400 °С, дополнительно определяют механические свойства при кратковременном разрыве.

Для труб поверхностей нагрева из легированных сталей допускается увеличение наружного диаметра не более, чем на 2,5 %, а из углеродистых сталей не более, чем на 3,5 %. Не допускается наличие трещин, участков с обезуглероженным слоем и развитым коррозионным повреждением, а также продольных борозд глубиной 1 мм и более на внутренней поверхности труб.

Контрольная вырезка образцов из *паропровода* производится после исчерпания паркового ресурса, накопления остаточной деформации отдельными элементами паропровода более половины допустимой, образования микроповрежденной структуры металла до четвертого балла и выше.

Вырезку проводят изгиба паропровода с максимальной остаточной деформацией. Длина вырезки должна быть не менее 300 мм. Из отрезанного участка трубы паропровода изготавливают образцы для механических испытаний, карбидного и металлографического анализов металла. Схема вырезки образцов для механических испытаний, карбидного и металлографического анализов представлена на рис. 4.2.

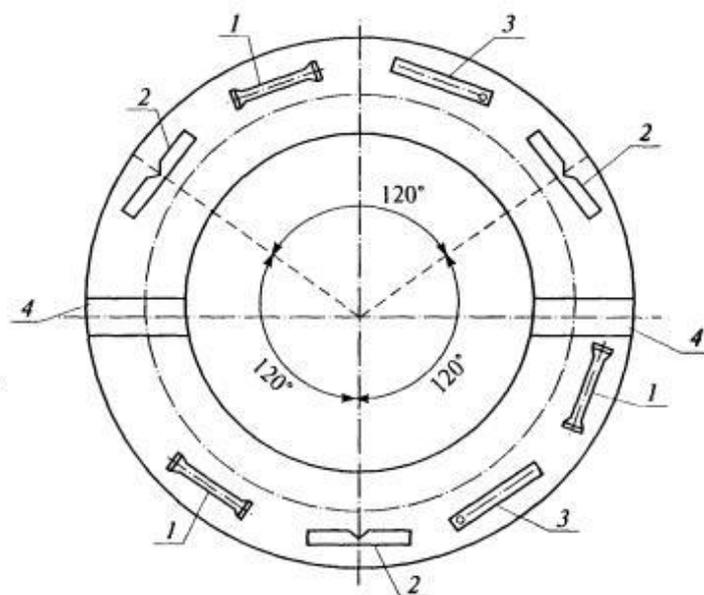


Рис. 4.2. Схема вырезки образцов из паропровода для механических испытаний, карбидного и металлографического анализов металла: 1 – образцы для испытания на растяжение; 2 – образцы для испытания на ударную вязкость; 3 – образцы для карбидного анализа; 4 – образцы для металлографического анализа

Образцы для испытаний на длительную прочность вырезают вдоль трубы. Механические свойства металла паропроводов определяют при комнатной и рабочей температурах. При этом испытывают не менее двух образцов на растяжение и трех образцов на ударную вязкость для каждого значения температуры. Твердость металла НВ определяют по поперечному сечению трубы. Микроструктуру, наличие неметаллических включений и микроповрежденность контролируют по толщине стенки трубы.

Контроль ползучести металла паропроводов и коллекторов, проявляющейся в непрерывном росте диаметра паропровода под действием напряжений при высокой температуре, проводят путем периодических измерений прироста

диаметра паропровода в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эти измерения осуществляются двумя механическими способами по приварным реперам: с помощью измерительного устройства МЭИ или микрометром с точностью шкалы до 0,05мм.

Репера устанавливаются на прямых трубах длиной 500 мм и более и на гибох, имеющих прямые участки длиной не менее 500 мм. Репера следует располагать по двум взаимно перпендикулярным диаметрам в средней части прямых труб, а на прямых участках гибов – на расстоянии 250 мм от гнутой части. Измерение ползучести коллекторов производится в произвольном сечении по их длине.

Места приварки реперов должны быть отмечены указателями, выступающими над поверхностью изоляции. Измерения остаточной деформации проводятся при температуре не выше 50°С.

На рис. 4.3 приведена схема расположения реперов на паропроводе. Конструкции простого репера и репера с резьбовой втулкой представлены на рис.4.4.

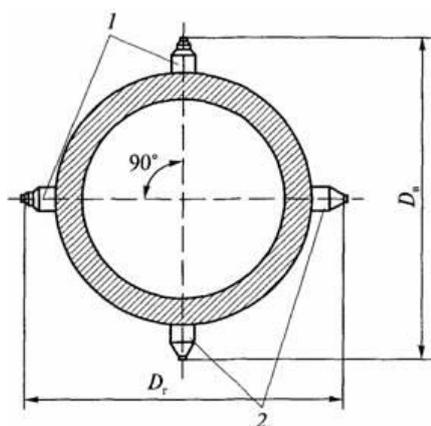


Рис. 4.3. Схема расположения реперов на паропроводе: 1 – реперы с втулкой; 2 – простые реперы

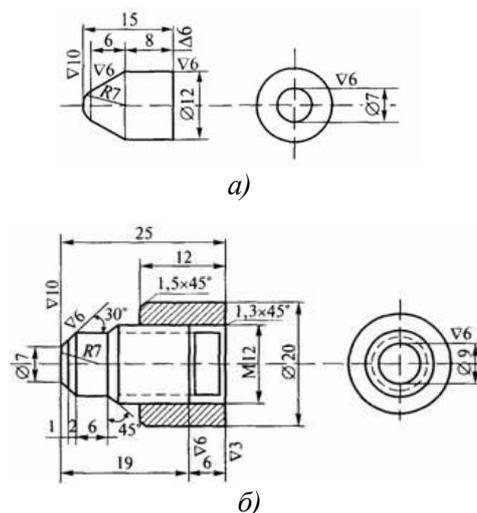


Рис. 4.4. Конструкции простого репера (а) и репера с резьбовой втулкой (б)

Остаточную деформация от начала эксплуатации до i -го измерения определяют по формуле

$$E = \frac{D_i - D_{исх}}{D_{mp}} \cdot 100\%$$

где E – остаточная деформация в %;

D_i – диаметр трубы, измеренный по реперам при i -м измерении, мм;

$D_{исх}$ – диаметр трубы, измеренный в исходном состоянии, мм;

D_{mp} – наружный диаметр трубы, измеренный вблизи реперов в исходном состоянии в двух взаимно перпендикулярных направлениях (среднеарифметиче-

ское значение из полученных результатов), мм.

Наибольшее значение остаточной деформации трубы, полученное по вышеприведенной формуле, принимается за расчетное для определения скорости ползучести.

Контролю подлежат все действующие паропроводы с внутренним диаметром не менее 100 мм, длительность работы которых превышает 3 тыс. ч в год, и паропроводы, работающие при температуре пара 450°C и выше. Методы контроля определяются инструкцией.

По механическим свойствам металл паропроводов должен удовлетворять требованиям технических условий на поставку. После 100 тыс. ч эксплуатации допускается снижение предела текучести и временного сопротивления на 30 МПа, а ударной вязкости на 0,15 МДж/м² по сравнению с нижними пределами на поставку.

Предел текучести при температуре 550 °С стали 12Х1МФ должен быть не ниже 180 МПа и для стали 15Х1М1Ф не ниже 200 МПа. Для сталей 12МХ и 15ХМ предел текучести при температуре 510 °С должен быть не менее 200 МПа. Остаточная деформация от ползучести не должна превышать для прямых труб из стали 12Х1МФ 1,5 % диаметра, для прямых труб из сталей других марок 1 % диаметра, для прямых участков гнутых труб независимо от марки стали 0,8 % диаметра.

Предел длительной прочности для конкретной марки стали на базе 10⁵ и 2·10⁵ ч не должен отклоняться более чем на 20 % в меньшую сторону по сравнению со средними значениями этой характеристики в исходном состоянии.

Минимальный уровень длительной пластичности должен быть не ниже 5 % результатов испытаний образцов до разрушения на базе, условно соответствующей периоду продления срока эксплуатации паропровода.

Микрповрежденность, определенная на оптическом микроскопе при 500-кратном увеличении, должна быть не выше четвертого балла по стандартной шкале микрповрежденности.

Снижение плотности металла вблизи наружной поверхности паропровода по сравнению с исходным состоянием не должно превышать 0,3 %.

Трещины любого вида на гихах паропроводов не допускаются.

В таблице 4.2. приведены методы, объемы и сроки проведения контроля паропроводов и трубопроводов питательной воды.

Таблица 4.2. Методы, объемы и сроки проведения контроля паропроводов и трубопроводов питательной воды с наружным диаметром 76 мм и более

Объект контроля	Парам среды	Метод контроля	Объем контроля	Периодичность контроля	Примечания
1. Штампованные и штампосварные колена.	независимо от параметров	ВК, УЗК, МПД (или КК, или ВТК).	25% общего количества.	После наработки 100 тыс. час, а далее через 25 тыс. час.	1. Контролируется 100% продольных сварных швов штампосварных колен. 2. В каждый последующий контроль должны проверяться колена, не проконтролированные ранее. 3. При обнаружении недопустимых дефектов контроль увеличивается до 100%
2. Крутоизогнутые отводы.	независимо от параметров	ВК, УЗК, МПД (или КК, или ВТК).	50% общего количества.	После наработки 100 тыс. час, а далее через 25 тыс. час.	1. В последующий контроль должны проверяться отводы, не проконтролированные ранее. 2. При выявлении трещин объем контроля увеличивать до 100%.
3. Участки паропроводов в местах приварки штуцеров, дренажей, импульсных линий, байпасов, врезок РОУ и БРОУ.	450 °С и выше независимо от марки стали.	ВК, УЗК, МПД (или КК, или ВТК).	100% штуцеров с прилегающей зоной 50 мм по наружной (ВК) и внутренней (УЗК) поверхностям	Через 50 тыс. час, но не реже, чем через 300 пусков.	1. При выявлении трещин контролировать в каждый капремонт, если после ремонта участки оставлены для дальнейшей эксплуатации. 2. При вырезке штуцеров проводить ВК внутренней поверхности паропроводов на длине не менее 3 диаметров трубопровода.
4. Питательные трубопроводы от напорного патрубка питательного насоса до котла.	Независимо от параметров	УТ	Участки длиной не менее 10 диаметров по ходу среды от дросселирующего органа. Гибы байпасных линий, зоны установки шайбовых наборов и щелевых дросселей. Тупиковые участки в зонах возможного коррозионного износа	Через 50 тыс. час.	1. Не менее 50% контролируемых гибов должны быть расположены в горизонтальной плоскости. 2. При выявлении недопустимых дефектов хотя бы в одном гibe, подтвержденных осмотром вырезки, объем контроля увеличивать вдвое. При повторном обнаружении дефектов объем контроля увеличивается до 100%. 3. При обнаружении местного утонения стенки трубопровода в пределах 20% номинального значения и более поврежденные участки трубы должны быть заменены.
		УЗК	Гибы 10% (в т.ч. крутоизогнутые штампованные и штампосварные)	После 100 тыс. часов., далее через 50 тыс. час., но не реже чем через 150 пусков.	1. На штампосварных коленах контролировать 100% продольных швов. При обнаружении трещин контролировать в каждый капремонт.

4.3.2. Контроль барабанов котлов

Барабаны котлоагрегатов высокого давления контролируют визуально, магнитопорошковым и ультразвуковым методами. Контролю подлежат все отверстия водоопускных труб, не менее 15 % отверстий всех остальных труб в наиболее ослабленных местах барабана; участки внутренней поверхности барабана размером 200 x 200 мм на каждом листе обечайки; все внутренние поверхности днищ; не менее 15 % наружной поверхности днищ; не менее 15 % длины сварных швов; все участки с ремонтными сварными соединениями. Поверхности металла барабана, его трубных гнезд и штуцеров, а также сварные швы контролируют визуально и магнитопорошковым методом, а основные швы – ультразвуковым методом. На рис. 4.5 показана схема намагничивания металла барабана котлоагрегата для магнитопорошкового контроля.

В основном металле и сварных соединениях барабана не допускаются дефекты типа трещин всех видов. Допускаются одиночные коррозионные язвы, эрозионные повреждения, раковины и другие подобные дефекты пологового профиля глубиной не более 10 % толщины стенки. Допускается оставлять скопления коррозионных язв, а также одиночные коррозионно-эрозионные дефекты на кромках отверстий глубиной не более 3 мм. При допуске в эксплуатацию барабанов с перечисленными выше дефектами требуется подтвердить отсутствие трещин в местах этих дефектов дополнительным контролем методами МПД, КК, или ТР, или ВТК.

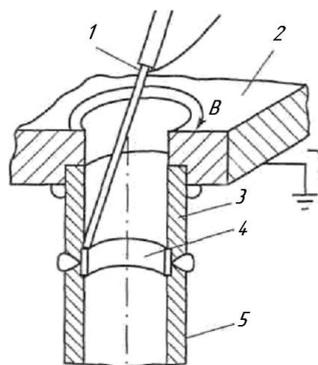


Рис. 4.5. Схема намагничивания металла барабана для обнаружения осевых трещин в стенках трубных отверстий и штуцеров: 1 – контактный штырь; 2 – обечайка барабана; 3 – штуцер; 4 – подкладное кольцо; 5 – трубка

Структура металла по результатам металлографического анализа (на репликах, сколах или вырезках) не должна иметь микротрещин и (или) графитизации второго балла и более.

При обнаружении недопустимых дефектов по результатам выборочного контроля назначается 100% контроль металла барабана и сварных швов. При наличии значительных повреждений из барабана высверливают пробки, диаметром не менее 80 мм, из которых вырезают образцы для механических испы-

таний и более детального металлографического анализа.

По механическим свойствам, определенным при комнатной температуре на образцах из пробок основных элементов барабана, металл должен удовлетворять следующим требованиям:

- предел текучести и временное сопротивление не должны отличаться более чем на 5% в меньшую сторону от значений в исходном состоянии;
- отношение предела текучести к временному сопротивлению не должно превышать 0,7 для углеродистых сталей и 0,8 для легированных сталей;
- относительное удлинение должно быть не менее 16%;
- ударная вязкость, определенная на образцах Шарпи (с острым надрезом) должна составлять не менее 0,25 МДж/м²;
- твердость металла должна находиться в следующих пределах: для сталей марок 20, 15М, 16М, 15К, 20К, 22К: НВ 120–180; для сталей марок 16ГНМ, 16ГНМА: НВ 130–200.

Методы, объемы и сроки контроля барабанов котлов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Методы, объемы и сроки проведения контроля барабанов сварных цельнокованных

Объект контроля	Парам среды	Метод контроля	Объем контроля	Периодичность контроля	Примечания
Обечайки, днища и лазовые отверстия, основные продольные и ольцевые сварные швы, швы приварки сепарации, все швы приварки деталей к обечайкам и днищам, ремонтные заварки внутри барабана.	независимо от температуры (Т) и (Р) давления	ВК	100%	После наработки 25 тыс. часов, затем через 50 тыс. часов.	В сомнительных местах использовать неразрушающие методы контроля.
Основные продольные и поперечные сварные швы с околшовоной зоной по 60-80 мм на сторону.	$P \geq 9,0 \text{ МПа}$	ВК, УЗК, МПД(или КК, или ТР, или ВТК).	По внутренней Или наружной поверхности 10% каждого продольного и поперечного шва с прилегающими зонами по 40 мм.	После наработки 25 тыс. часов, далее через 50 тыс. часов.	1. В следующий контроль проверять другие 10%. 2. МПД проводить по внутренней поверхности. 3. При выявлении дефектов объем контроля увеличивается до 100% протяженности дефектного шва. 4. При обнаружении
	$P \leq 9,0 \text{ МПа}$			Через 50 тыс. часов	

Обечайки, днища и лазерные отверстия, швы приварки сепарации и креплений лазерного затвора.	$P \geq 9,0 \text{ МПа}$	МПД (или КК, или ТР, или ВТК)	15% протяженности швов приварки сепарации; контрольные участки размером 200x200 мм по одному на каждом листе; 25% внутренней поверхности днища; шов приварки креплений лазерного отверстия; 100% поверхности лаза и уплотнительной поверхности	После наработки 100 тыс. часов, затем через 50 тыс. час, далее каждый капремонт	1. Контрольный участок должен располагаться в водяном объеме барабана. 2. При обнаружении дефектов объем контроля увеличивается вдвое в водяном объеме и контролируется 2 участка в паровом объеме. 3. При обнаружении трещин контролировать в каждый капремонт.
	$P \leq 9,0 \text{ МПа}$			Через 50 тыс. часов	

4.4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН



4.4.1. Методы контроля состояния роторов

Обеспечение надежной эксплуатации роторов в первую очередь определяется выбором методов контроля, позволяющих получать достоверную информацию о состоянии металла.

Высоконагруженными зонами цельнокованых роторов, в которых образование эксплуатационных трещин наиболее вероятно, являются:

- осевой канал;
- обода дисков первых двух наиболее высокотемпературных ступеней;
- галтели дисков первых двух наиболее высокотемпературных ступеней;
- разгрузочные отверстия дисков первых двух наиболее высокотемпературных ступеней;
- тепловые канавки концевых, диафрагменных и промежуточных уплотнений, расположенных в зоне ротора с температурой металла выше 400 °С.

На основе результатов расчетов теплонапряженного состояния роторов,

опыта их эксплуатации и данных исследований сформулированы основные требования к методам дефектоскопического контроля, основных элементов ротора, приведенные в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Требования к методам дефектоскопического контроля роторов

Зона ротора	Дефекты	Браковочный размер (глубина), мм	Перспективный метод	Примечание
Осевой канал	Поверхностные продольный, кольцевой	1,0	ВК и ВТК, МПД, КК или ДАО и УЗК	Требуется подготовка поверхности
	Внутренние продольный, кольцевой	2,0 (эквивалентный диаметр)	УЗК	
Галтели дисков, тепловые канавки	Поверхностный кольцевой	1,0	ВК и ВТК, МПД, КК или ДАО и УЗК	Для всех методов требуется подготовка поверхности
		3,0	АЭ	Без вскрытия цилиндров
		10 % диаметра вала	ВД	На работающем оборудовании
Ободья дисков	Поверхностный кольцевой	1,0	ВК и ВТК, МПД, КК или ДАО УЗК	С разлопачиванием. Для всех методов, кроме ВТК, требуется подготовка поверхности
				Без разлопачивания
Низкотемпературные зоны (полумуфта, диски и валы в зоне фазового	Поверхностный любой ориентации	1,0	ВК и ВТК, МПД, КК или ДАО и УЗК	Для всех методов, кроме ВТК, требуется подготовка поверхности

Примечание. ДАО – дефектоскопия аммиачным отгиском; АЭ - акустическая эмиссия; ВД – вибродиагностика

Для каждой зоны ротора существуют свои специфические требования к методам контроля.

Контроль осевого канала. Наиболее опасные дефекты, выявляемые в области осевого канала, – это дефекты, ориентированные вдоль оси ротора (исходные металлургические дефекты, трещины, образовавшиеся под действием центробежных сил по механизму ползучести). Кольцевые дефекты могут появиться в исключительных случаях. Наиболее вероятно их присутствие в случае, когда, зародившись на наружной поверхности по механизму усталости, трещина развивается и доходит до осевого канала.

Контроль металла в районе осевого канала включает:

- визуальный осмотр поверхности канала, зачищенной от окалины, для оценки качества зачистки поверхности, выявления уступов, технологических выборок, рисок, коррозионных повреждений и других видимых дефектов поверхности;
- магнитопорошковую дефектоскопию или вихретоковый контроль или ультразвуковой контроль, контроль поверхностными волнами для выявления поверхностных эксплуатационных или металлургических дефектов;
- ультразвуковой контроль объемными волнами для выявления скрытых дефектов различной ориентации в объеме поковки ротора.
- измерение остаточной деформации ползучести для оценки величины, накопленной в поврежденном в металле.

Последовательность проведения операций по контролю ротора со стороны осевого канала следующая:

- ротор устанавливается на козлах в доступном для контроля месте на высоте, удобной для визуального осмотра канала (1,0 – 1,5 м) со свободным доступом к обоим концам (4– 5 м от каждого конца) рис.;



Рис. 4.6. Установка ротора на козлах

- снимается автомат безопасности, и удаляются пробки, закрывающие с двух сторон осевой канал. При невозможности удаления пробок их высверливают;
- из осевого канала удаляются частицы металла, стружка, масло и пр. Поверхность его протирают ветошью, обдувают сжатым воздухом, обезжиривают ацетоном или другим растворителем;
- проводится предварительный визуальный осмотр поверхности для выявления уступов, выборок и пр.;
- осуществляется измерение остаточной деформации ползучести (где эта операция запланирована);
- с помощью хонинговальной головки (или иным способом) производится удаление окалины и обработка поверхности до шероховатости с размером $R_z = 10$ мкм по действующим нормативным документам, обдувка ее сжатым

воздухом и обезжиривание ацетоном или другим растворителем;

- проводится визуальный осмотр поверхности для оценки ее качества и выявления видимых дефектов;

- осуществляется контроль для выявления поверхностных дефектов методами магнитопорошковой, вихретоковой или ультразвуковой (поверхностными волнами) дефектоскопии;

- при необходимости производится фотографирование выявленных дефектов;

- производится ультразвуковой контроль металла ротора для выявления скрытых дефектов в объеме поковки;

- для получения исходных данных для последующих измерений повторно измеряется диаметр канала по специальной методике.

Визуальный осмотр. В задачи визуального осмотра входят:

- оценка контролепригодности ротора со стороны канала (наличие уступов, выборок и др.);

- оценка качества подготовки поверхности после зачистки для последующего контроля (наличие окалины, рисок, следов коррозии);

- качественный анализ выявленных поверхностных дефектов.

Сложность проведения ВК связана с трудной доступностью объекта осмотра. Диаметр осевого канала обычно составляет 80 – 60 мм, длина ротора (канала) иногда превышает 6 м. Осматриваемая поверхность должна быть освещена. Желательно использовать 2–10-кратное увеличение. Изображения поверхности рекомендуется регистрировать.

Наиболее удобным прибором для проведения ВК осевого канала является перископ. Большинство энергосистем оснащены перископами марки РВП-456, которые удовлетворяют названным требованиям. Регистрация дефектов может осуществляться с помощью фотонасадки.

Визуальный осмотр можно также осуществлять с применением эндоскопов и видеокамеры. При использовании эндоскопов регистрация дефектов осуществляется с помощью фото- или видеонасадок. Видеоизображение может записываться на магнитную ленту или вноситься в компьютер.

Магнитопорошковый и капиллярные методы контроля.

Магнитопорошковый контроль обеспечивает выявление продольных поверхностных и подповерхностных дефектов типа трещин, усредненные параметры которых превышают следующие значения: раскрытие – 10 мкм, глубина – 100 мкм, протяженность – 1000 мкм.

Магнитопорошковым методом рекомендуется контролировать паровые турбины, роторы которых изготовлены из низко- и среднелегированных (хромомолибденовых, хромомолибденованадиевых и хромомолибденовольфрамованадиевых) сталей перлитного класса по действующей нормативной документации, например 34ХМА, 25Х1 М1ФА(Р2, Р2МА), 20Х3МВФА (ЭИ415А).

Перед проведением контроля необходимо:

- выбрать способ контроля по магнитным характеристикам стали контролируемого ротора;

- выбрать способ и схему намагничивания в соответствии с размерами и формой изделия;
- провести выбор и расчет поля и тока намагничивания;
- подготовить аппаратуру, собрать схему и провести намагничивание металла ротора в зоне осевого канала.

Магнитопорошковый контроль металла в зоне осевого канала ротора осуществляется способом остаточной намагниченности.

Магнитная суспензия наносится краскопультом. Индикаторные следы осевшего на дефекты порошка изучаются с помощью перископа или иных оптических систем.

К недостаткам магнитопорошкового метода относится его высокая трудоемкость. В значительной степени достоверность контроля зависит также от квалификации дефектоскописта и его опыта проведения подобных работ.

Не исключена возможность применения для контроля состояния поверхности осевого канала метода *цветной дефектоскопии*. При применении всех капиллярных методов регистрируется только длина дефекта, оценка его глубины не осуществляется. В настоящее время утвержденной методики по капиллярному контролю не существует.

В последние годы появилась новая технология – *дефектоскопия аммиачным оттиском* (ДАО-технология). Суть метода заключается в следующем:

- внутренняя полость ротора заполняется аммиаком;
- после определенной выдержки, позволяющей аммиаку испариться с поверхности, в канал вводится приспособление, прижимающее индикаторную бумагу к контролируемой поверхности;
- Если на поверхности канала имеется несплошность, в которой скопился аммиак, то на бумаге фиксируется индикаторный след.

Достоинства метода ДАО-технологии заключаются в возможности хранить информацию о выявленных дефектах. Варьируя время выдержки после насыщения полости аммиаком, в первом приближении можно оценивать глубину имеющихся несплошностей.

К недостаткам ДАО-технологии относится следующее:

- метод не стандартизирован;
- технология подготовки индикаторной бумаги и порядок проведения контроля подробно не изложены, что ограничивает возможность широкого применения этого метода;
- результаты контроля в значительной степени зависят от четкого выдерживания технологических параметров (концентрация и состав аммиака, качество подготовки индикаторной бумаги, время выдержки с учетом диаметра канала).

Вихретоковый контроль. Применение вихретокового метода контроля позволяет производить автоматизированный контроль осевого канала ротора. В настоящее время разработано множество автоматизированных систем ВТК. Наиболее популярный в настоящее время комплекс вихретоковой аппаратуры типа «Ротор» состоит из транспортно-сканирующего механизма, электронного

блока управления, вихретокового дефектоскопа, компьютера. С помощью комплекса могут выявляться продольные и кольцевые дефекты в виде несплошностей длиной более 2 мм и глубиной более 0,5 мм. При контроле осуществляется автоматическое сканирование поверхности с шагом не более одного эффективного радиуса вихретокового преобразователя. В этом случае наличие необнаруженных дефектов маловероятно. Предусмотрена возможность регистрации дефектов в памяти компьютера, определение их координат. Методика предусматривает также оценку глубины выявленного дефекта.

Недостатком комплекса «Ротор» является отсутствие возможности изучения дефекта во время контроля. Результаты контроля анализируются только после завершения сканирования и расшифровки накопленных в компьютере данных.

Ультразвуковой контроль. В настоящее время действуют два утвержденных альтернативных метода УЗК ротора со стороны осевого канала: иммерсионный и контактный. Ввод ультразвука в металл может осуществляться контактным или иммерсионным методом.

При иммерсионном методе пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) погружают в контактную жидкость, которая заполняет осевой канал ротора. Иммерсионный метод УЗК реализуют с помощью специального координатного механизма, показанного на рис.4.7.

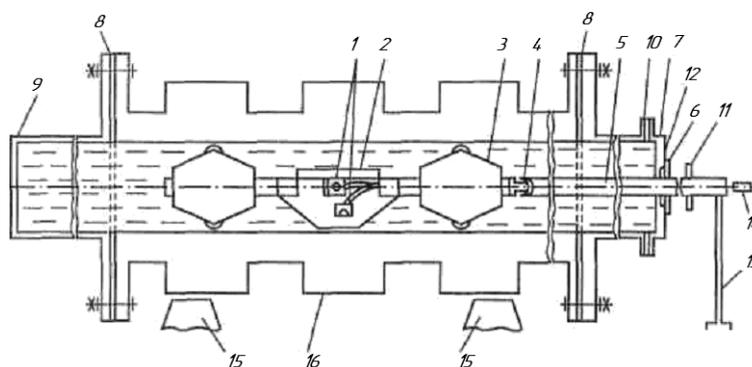


Рис. 4.7. Общий вид устройства для ультразвукового контроля ротора:

1– пьезоэлектропреобразователь; 2– каретка; 3– центратор; 4– шарнир; 5– штанга; 6– резиновая манжета; 7– проходное доннышко; 8– резиновые прокладки; 9– глухое доннышко; 10– патрубок; 11– рукоятка подачи; 12– азимутальный диск; 13– тренога; 14– кабель к дефектоскопам; 15– опоры; 16– ротор

Контактный метод реализуют с помощью призматических ПЭП, перемещаемых в канале ротора с помощью ориентирующей рамки и легкой трубы диаметром 18 – 25 мм. Схема контактного метода показана на рис. 4.8.

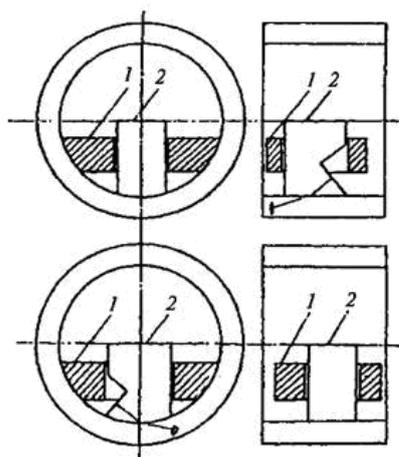


Рис.4.8. Схема контактного метода контроля ротора при вводе ультразвука в осевой (а) и азимутальной (б) плоскостях: 1 - ориентирующее устройство; 2 - ПЭП

Для создания акустического контакта ПЭП с металлом ротора применяют дегазированные жидкости (водопроводную воду или минеральное масло, например турбинное).

Измерение остаточной деформации ползучести. Измерения остаточной деформации в осевой расточке производятся на роторах высокого и среднего давления, работающих при температуре пара перед цилиндрами $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше. На многих роторах производства ОАО «Турбоатом» в связи с наличием локальных расточек, выборок, уступов, препятствующих перемещению нутромера по поверхности канала, а также на роторах с диаметром осевого канала менее 80 и более 140 мм других заводов-изготовителей измерение деформации не производится.

Измерение накопленной деформации осуществляется до зачистки поверхности канала от окалины хонинговальной головкой. Допускается применение приборов, обеспечивающих точность измерения диаметра канала не менее 0,01 мм на расстоянии от торца ротора не менее 4 м и позволяющих фиксировать положение датчика по длине ротора с точностью не менее 5 мм. Для этой цели обычно используются механические или электронные нутромеры.

Все измерения проводятся дважды: первый раз при движении прибора в глубь канала до четвертой ступени включительно; второй раз при движении прибора в обратном направлении. При этом измеряется минимальный диаметр осевого канала с точностью до 0,01 мм. Измерения выполняются на расстоянии 50–60 мм от торца ротора.

Обработка результатов измерений обычно производится с помощью специальной компьютерной программы, в которую заложены необходимые исходные данные, позволяющие осуществлять обработку результатов измерений для роторов турбин. Программа выдает в графической форме данные о распределении остаточных деформаций ползучести по длине ротора, а также о максимальной деформации для двух взаимно перпендикулярных сечений, в которых выполнялись измерения.

Для оценки надежности роторов используются оба критерия: накоплен-

ная деформация ползучести и скорость накопления остаточной деформации. Решение о работоспособности ротора принимается по более консервативному из двух критериев. Если измерение остаточной деформации осуществляется после зачистки поверхности канала, то для оценки эксплуатационной надежности ротора используется только допустимая скорость ползучести.

Результаты контроля могут быть применены для экспериментальной оценки накопленной в роторе поврежденности от ползучести. При этом накопленная поврежденность соответствует отношению измеренной деформации ползучести к предельно допустимой для данной марки стали.

Контроль галтелей и тепловых канавок. Образование и развитие эксплуатационных трещин в галтелях дисков, уплотнительных выступах и тепловых канавках (рис. 4.9) происходят преимущественно в плоскости, перпендикулярной оси ротора, по механизмам малоциклового (при пусках и остановах турбины) и многоциклового (вибрационной) усталости.

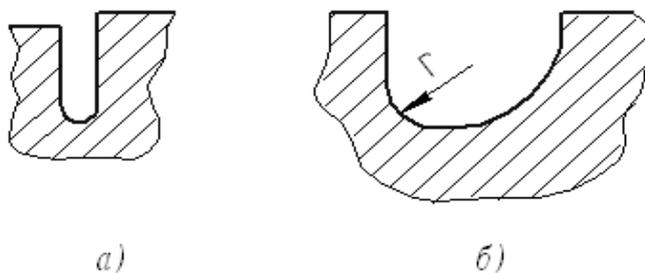


Рис.4.9. Схемы контролируемых участков ротора: а – тепловая канавка; б – галтельный переход

Цветная дефектоскопия (капиллярный контроль). Основная проблема применения капиллярных методов контроля для выявления дефектов глубиной до 1 мм связана с подготовкой поверхности. При длительной эксплуатации ротора при температуре выше 450 °С на поверхности металла образуется плотная оксидная пленка толщиной 200-300 мкм. Удаление ее требует значительных усилий. Если учесть, что радиусы некоторых галтельных переходов для отдельных конструкций роторов оказываются меньше 3 мм, а расстояния между дисками – меньше 100 мм, то решение этой задачи в условиях станции становится затруднительным.

Применение методов капиллярной дефектоскопии целесообразно, если контроль этих зон совмещается с операцией по восстановлению металла ротора путем снятия поврежденного поверхностного слоя в зонах концентрации напряжений. В этом случае проточка радиусных переходов осуществляется на токарном станке. Поверхность ротора после этой операции становится пригодной для контроля капиллярными методами.

Вихретоковый контроль. Сложностей, связанных с подготовкой поверхности, можно избежать, применяя вихретоковый контроль. Но в этом случае должны использоваться дефектоскоп и преобразователи, обладающие необходимой разрешающей способностью.

Ультразвуковой контроль. Для выявления глубоких трещин развиваю-

щихся от наружной поверхности ротора, может быть также использован ультразвуковой контроль. Методика ультразвукового контроля предусматривает «прозвучивание» ротора различными методами (рис.4.10):

- теньевым методом с торцов;
- эхо-методом с торцов;
- эхо-методом с цилиндрической поверхности, свободной для перемещения преобразователя;
- эхо-методом с поверхностями дисков.

Конструкция ротора создает некоторые ограничения к применению этого метода, особенно при прозвучивании ротора с торцов. Образуются мертвые зоны, недоступные для контроля, однако этот метод позволяет оперативно выявить глубокие трещины. Более детальный контроль ротора может быть осуществлен другими методами.

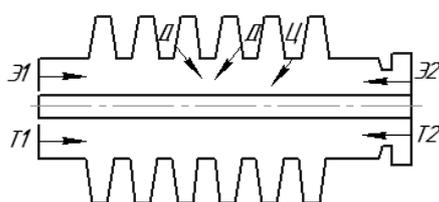


Рис.4.10. Схема прозвучивания ротора различными методами:

Т1 и Т2 – теньевой метод с торцов; Э1 и Э2 – эхо-метод с торцов;

Ц – эхо-метод с цилиндрической поверхности, свободной для перемещения преобразователя; Д – эхо-метод с поверхности дисков

Контроль ротора методом акустической эмиссии. Описанные методы контроля могут быть применены только в период ремонтной кампании турбины, т.е. 1 раз в 4-6 лет. Однако с учетом старения оборудования существует необходимость оценки состояния металла роторов через более короткие промежутки времени.

Для этой цели используют метод акустической эмиссии (рис.4.11). Контроль методом акустической эмиссии может проводиться на остановленном оборудовании без вскрытия цилиндра. Для некоторых конструкций турбин требуется вскрытие корпусов подшипников, а для некоторых и этого не требуется.

Датчики акустической эмиссии устанавливаются на магнитах с обоих концов вала ротора в области подшипников. С помощью валоповоротного устройства или иным способом ротор проворачивается в собственных подшипниках. Если на поверхности ротора в любой его зоне имеется трещина, ориентированная перпендикулярно его оси, то при периодическом смыкании и размыкании ее берегов будет генерироваться акустико-эмиссионный сигнал, регистрируемый приборами. Подобным образом можно надежно выявлять поперечные трещины глубиной более 3 мм с определением дефектной зоны.

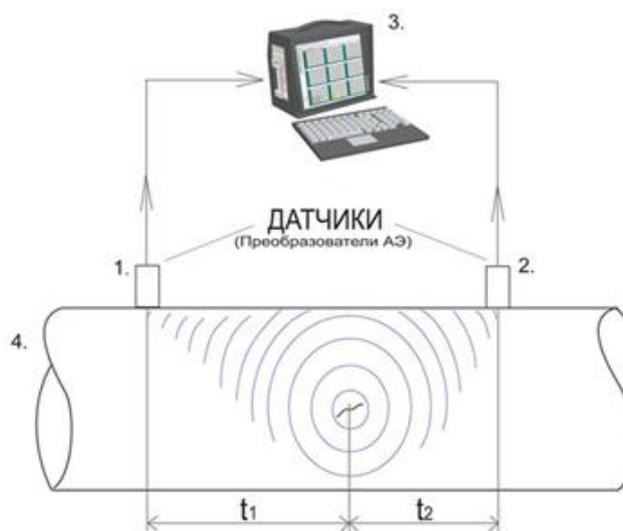


Рис.4.11. Акустико-эмиссионный контроль ротора паровой турбины:

1, 2 – преобразователи АЭ; 2 – преобразователь АЭ (приемник 2); 3 – центральный блок сбора и обработки на базе промышленного компьютера; 4 – объект контроля; t_1 – время прихода сигнала на первый приемник; t_2 – время прихода сигнала на второй приемник.

Контроль ободьев дисков. В цельнокованных роторах обычно используются два вида конструкции ободьев дисков высокотемпературных ступеней: Т-образным и грибовидным позом. Образование эксплуатационных трещин в ободьях с Т-образным пазом наиболее вероятно от верхних концентраторов со стороны внутренней поверхности паза. Возможно также образование трещин на наружной поверхности в остром угле выступа, фиксирующего положение лопатки (защелки). Но разрушение выступа не приведет к вылету лопаток, а следовательно, отрицательные последствия для турбины в этом случае будут незначительные.

В грибовидном ободе образование трещин возможно в углах концентраторов под грибками и в защелках.

Максимальные напряжения на ободе возникают в области замкового соединения. Поэтому для выявления поверхностных трещин при ревизии обода достаточно разлопатить призамковые пакеты и провести контроль опасных участков любыми известными методами дефектоскопии.

Разлопачивание обода является непростой и достаточно трудоемкой ремонтной операцией. Обычно в этом случае демонтированные лопатки подлежат замене, отверстия под заклепки растачиваются на больший диаметр. Многократно проводить такую операцию не рекомендуется. В связи с этим возникла задача осуществления контроля критических зон ободьев ротора без разлопачивания (и только при отрицательных результатах такого экспресс-контроля производить разлопачивание обода).

Для контроля ободьев дисков с Т-образным пазом применяется метод УЗК. Методика контроля разработана ВТИ совместно с ЛМЗ позволяет осуще-

ствлять контроль металла в верхних концентраторах паза (РД 34.17.450-98). Эта методика позволяет надежно выявлять кольцевые дефекты, развивающиеся от углов внутренних верхних концентраторов, глубиной 1 мм и более.

Контроль грибовидных ободьев проводится с их разлопачиванием после того, как размер зазора между буртом диска и нижней кромкой хвостовика лопатки превысит определенное значение (принято 0,2 мм) при равномерном его распределении по всей окружности обода (РД 34.17.440-97). На рис.4.12 Показаны некоторые дефекты дисков паровых турбин, выявленные при контроле.

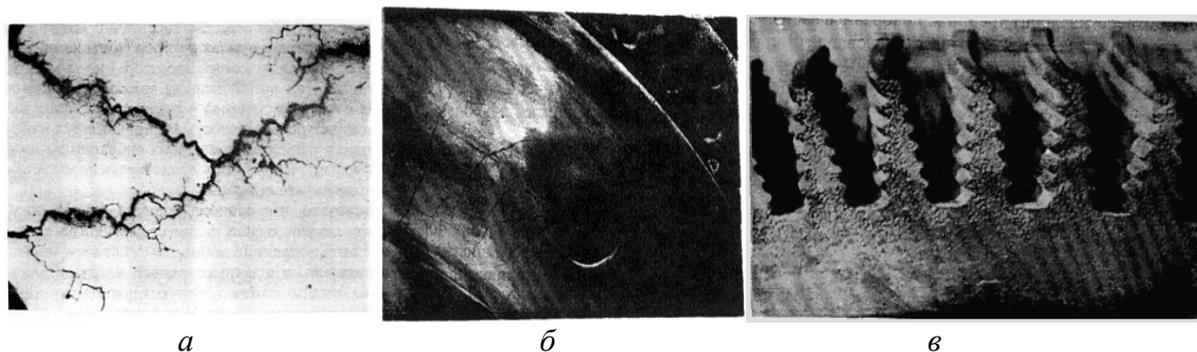


Рис.4.12. Дефекты, выявление при контроле дисков паровых турбин:

а – вид межзеренного развития микротрещин в результате коррозии под напряжением; *б* – трещины от коррозии под напряжением в металле дисков в зоне фазовых переходов; *в* – питтинговая коррозия в металле дисков в зоне фазовых превращений пара

4.4.2. Контроль состояния металла корпусных деталей

Контроль поверхности корпусных деталей турбин осуществляется в соответствии с формулярами контроля сплошности – эскизами деталей, на которых очерчены и пронумерованы зоны контроля.

В случае отсутствия формуляров контролю подвергаются все радиусные переходы на наружной поверхности и доступные радиусные переходы на внутренней поверхности.

Контроль металла корпусной детали включает в себя:

- визуальный осмотр поверхности зоны контроля, зачищенной от окалины;
- магнитопорошковый или вихретоковый контроль; при наличии ремонтных аустенитных заварок – травление;
- ультразвуковой контроль объемными волнами для определения толщины стенки детали и выявления объемных металлургических дефектов в зоне обнаруженных трещин;
- измерение глубины обнаруженных трещин различными методами.

Результаты контроля оформляются в виде формуляра детали, в котором условным цветом отмечаются места расположения дефектов, обнаруженных при каждом капитальном ремонте, исходные размеры дефекта, размеры выборки, принятое решение по ремонту (выбран, заварен, закернен, засверлен и др.) и

толщина стенки в трещиноватой зоне.

Магнитопорошковая дефектоскопия. В зависимости от размеров выявляемых поверхностных несплошностей устанавливаются три условных уровня чувствительности, определяемых минимальной шириной и длиной условного дефекта (А, Б, В). Контроль корпусов турбин обычно проводят на уровне чувствительности Б.

В качестве индикаторов несплошностей при МПД используются черные или цветные магнитные порошки или их суспензии.

Контроль корпусов турбин, как правило, осуществляется способом приложенного поля, так как металл корпусов относится к магнитомягким материалам. Выполняется циркулярное или полюсное намагничивание.

Ложные индикаторные следы, как правило, возникают по линии сплавления заварок, выполненных аустенитными электродами. В этом случае используется цветная дефектоскопия или травление.

Капиллярный контроль. Поверхностные дефекты обнаруживаются по ярко окрашенным индикаторным следам, которые образуются на проявляющем покрытии (проявителе) в местах расположения несплошностей. Выявление дефектов, имеющих ширину раскрытия более 0,5 мм, капиллярными методами контроля не гарантируется.

Капиллярному контролю подлежат поверхности изделия, принятые по результатам визуального контроля. Перед проведением капиллярного контроля места контроля тщательно очищаются и шлифуются.

Для капиллярного контроля в зависимости от ширины раскрытия минимальной из выявляемых единичных трещин установлены три класса чувствительности, определяемые средним раскрытием неразветвленной трещины длиной не менее 3 мм.

Чувствительность контроля, соответствующая определенному классу, обеспечивается применением конкретных наборов дефектоскопических материалов в зависимости от заданного класса чувствительности и температуры окружающей среды при соблюдении технологической последовательности операций контроля, требований к подготовке и освещенности контролируемой поверхности. Для контроля корпусных деталей турбин должна быть обеспечена чувствительность, соответствующая классу II – ширина дефекта в пределах 1–10 мкм.

Нанесение дефектоскопических материалов на поверхность контроля обычно производится распылением с использованием аэрозольных баллончиков.

Вихретоковая дефектоскопия. Применение вихретокового контроля не требует подготовки поверхности контроля, т.к. загрязненная поверхность не влияет на выявляемость дефектов.

Перед контролем поверхность объекта контроля должна быть очищена. Допускается проведение контроля по необработанной поверхности изделия при условии достижения заданной чувствительности (порогового уровня).

Сканирование в процессе контроля осуществляется, как правило, перпендикулярно предполагаемому направлению развития дефекта. Современные

вихретоковые дефектоскопы имеют звуковую или световую индикацию превышения порогового уровня, что повышает выявляемость дефектов и надежность контроля.

Измерение глубины трещин. Для измерения глубины трещин применяют электропотенциальный, вихретоковый и механический методы.

Электропотенциальный метод (ЭПМ) – электрический метод контроля, основанный на регистрации падения потенциала. При приложении к металлическому телу электрического напряжения в нем образуется электрическое поле. Если напряжение стабилизировано, то поле будет также стабильным.

При наличии трещин снижается площадь поперечного сечения, занятого линиями тока, и изменяется разность потенциалов по сравнению с участком, где трещин нет. Между глубиной трещин и разностью потенциалов при неизменности других факторов (материала изделия, его формы, расстояния между электродами, значения и стабильности напряжения на токовых электродах и др.) существует корреляционная зависимость.

Для определения глубины трещин ЭПМ специальных приборов в принципе не требуется. Измерение разности потенциалов можно выполнять с помощью стандартной схемы с нуль-гальванометром. В качестве источника питания можно использовать стабилизированные источники тока низкого напряжения. Главное, что требуется при измерениях, – это соответствующие образцы, копирующие изделие.

Один из вариантов применения ЭПМ – наблюдение за развитием трещины в процессе эксплуатации с помощью электродов, приваренных к корпусу в месте трещины и выведенных через изоляцию.

При оценке глубины трещины механическим способом сначала методами неразрушающего контроля (магнитопорошковым, ультразвуковым, капиллярным, вихретоковым и др.) уточняется длина дефекта. После этого осуществляется фиксирование трещины путем сверления глухих отверстий, служащих исходными отметками для последующего контроля, а также являющихся препятствием для дальнейшего развития дефекта. Сверления проводятся на глубину до 10 мм. Максимальная глубина трещины оценивается по результатам сверления трех-пяти глухих отверстий диаметром 12–18 мм, равномерно расположенных по длине трещины и удаленных одно от другого не более чем на 100 мм, причем одно-два отверстия должны быть выполнены посередине трещины и на участке ее максимального раскрытия.

Сверление прекращается, когда визуально в результате контроля с подсветкой при углублении сверла на каждые 3–4 мм устанавливается, что дно гнезда сверления очистилось от дефекта. Для проверки отсутствия трещины в дне глухого отверстия применяется токовихревой метод контроля.

При расположении дефекта на обработанной поверхности, где глухие отверстия большого диаметра недопустимы, глубина трещины h определяется экспериментальным соотношением

$$h = 0,25 c,$$

где c – длина трещины.

Одновременно в зоне трещины должна быть определена толщина стенки детали, что необходимо для оценки остаточного ресурса. Ее значение оценивается обычно с помощью ультразвукового толщиномера. При этом в качестве эталона следует использовать фланцы и лапы этой же детали, толщина которых определяется штангенциркулем или другим измерительным инструментом. Допускается определять толщину стенки с помощью измерительных скоб и других механических приспособлений.

Исследование структуры и механических свойств металла.

Исследование *микроструктуры и измерения твердости* можно проводить непосредственно на детали с применением переносных микроскопов или методом реплик с предварительным снятием поверхностного слоя толщиной не менее 3 мм в месте подготовки шлифа.

Твердость металла на деталях измеряется с помощью переносных твердомеров, обеспечивающих погрешность измерения $\pm 10\%$. С учетом экспериментально установленного влияния поверхностного слоя литого корпуса и качества подготовки поверхности на показания переносных приборов для получения более достоверных данных по твердости рекомендуется удалить слой металла толщиной 3,0 мм. Число измерений должно зависеть от того, снят ли поверхностный слой и каков характер обработки поверхности.

Исследование структуры металла литых деталей осуществляется в целях выявления изменений, связанных с исчерпанием их ресурса в процессе эксплуатации, а также определения характера образовавшихся трещин. Характер структуры изучается на поперечных шлифах, изготовленных из спилов лодочек (сколов) треугольного сечения площадью не менее 20 мм². При исследовании характера трещины ее продольная ось должна быть ориентирована вдоль лодочки. В качестве дополнения желательно также исследование структуры на шлифах непосредственно на детали в наиболее напряженных зонах.

В процессе микроструктурного анализа металла оцениваются следующие показатели: загрязненность неметаллическими включениями, число и размер пор от ползучести, размер ферритного зерна, особенности распределения карбидов по границам зерен и их средний размер и др.

Размер пор от ползучести оценивается на шлифах после 3–5-кратного травления 3 %-ным раствором HNO₃ в спирте, при этом производится осмотр не менее 10 полей зрения при увеличении в 500 раз.

Получить точную информацию о состоянии металла непосредственно в зоне трещины, как правило, затруднительно, так как взять пробу там обычно не удастся. Тем не менее, заготовки вырезаются из наиболее представительной зоны ближе к трещине, в то же время стараются не снижать конструкционную прочность детали. Габаритные размеры заготовок определяются конструктивными особенностями детали и размером образцов, которые планируется изготовить. В случае выборки глубоких трещин (выборка большого объема) для получения более достоверной информации об уровне свойств в дефектной зоне, желательно получение сколов или вырезок сравнительно небольшого размера непосредственно из зоны образования трещины.

Для исследования корпусов цилиндров обычно вырезка производится в области фланца в зоне регулирующей ступени с внутренней стороны, где температура металла максимальна. Для корпусов клапанов лучше всего вырезать заготовки в области приливов или наружной поверхности кромки фланца по возможности ближе к паровпускным патрубкам, где температура металла также максимальна.

На вырезках проводятся испытания на растяжение и ударную вязкость в соответствии с действующими стандартами.

4.4.3. Контроль лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации

Методы и сроки проведения контроля. Контроль и испытания лопаточного аппарата в процессе эксплуатации осуществляется в соответствии [Методическими указаниями о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта.](#)

Контроль и испытания лопаточного аппарата в процессе эксплуатации осуществляется следующими основными методами:

- визуальный контроль;
- вихретоковый контроль;
- цветная дефектоскопия;
- магнитопорошковая дефектоскопия;
- травление;
- ультразвуковой контроль;

Могут быть также использованы дополнительные методы контроля:

- эндоскопирование без вскрытия и с вскрытием цилиндра;
- вибрационный контроль на работающей турбине с применением дискретно-фазового метода;
- вибрационные испытания на извлеченном из турбины роторе;
- акустико-эмиссионный контроль;
- диагностирование с помощью образцов-свидетелей усталостного разрушения.

Решение о возможности дальнейшей эксплуатации лопаток принимается на основании результатов контроля основными методами. Отрицательные результаты диагностики состояния лопаток дополнительными методами являются основанием для внеочередного и (или) более углубленного их контроля основными методами. Перед проведением контроля рабочие лопатки очищаются от солевых отложений. Дополнительная подготовка поверхности для дефектоскопического контроля производится в соответствии с конкретной методикой.

Контроль основными методами проводится при каждом капитальном ремонте турбины. Для ступеней, на которых повреждения фиксировались и ранее на данной турбине или других турбинах такого же типа, или при эксплуатации лопаток с дефектами, превышающими установленные нормы, контроль рабочих лопаток может осуществляться с меньшей периодичностью. В этом случае объем, методы и периодичность контроля устанавливаются индивидуально

специализированной организацией и (или) заводом-изготовителем турбины.

Визуальному контролю подвергается 100% лопаток в доступных местах. При визуальном контроле фиксируются обрывы лопаток, ленточных бандажей, проволочных связей, механические повреждения лопаточного аппарата в виде забоин, деформации кромок и следов задеваний, нарушения плотности сборки ступеней, выходы лопаток из ряда, их разворот, вылезание из посадочного места, отсутствие противоэрозионных пластин на входных кромках лопаток, работающих во влажном паре, коррозионные и эрозионные повреждения и др.

Дефектоскопическому контролю подвергаются 100% рабочих лопаток, работающих в зоне фазового перехода и лопаток последних ступеней;

УЗК проводится для выявления в лопатках эксплуатационных дефектов, не выходящих на поверхность, в следующих зонах:

- входные и выходные кромки лопаток части низкого давления с вогнутой стороны при наличии эрозионного износа на выпуклой стороне;
- внутренние концентраторы хвостовиков с грибовидным креплением на ободке (для лопаток, работающих в зоне фазового перехода);
- Т-образные и вильчатые хвостовики (при конструктивной возможности для лопаток, работающих в зоне фазового перехода).

Диагностирование рабочих лопаток дискретно-фазовым методом.

При диагностике рабочих лопаток в процессе эксплуатации с помощью дискретно-фазового метода выявляются отклонения от нормы параметров состояния рабочих лопаток и бандажа. Параметрами состояния рабочих лопаток и бандажа являются амплитуды колебаний вершин лопаток и статические координаты вершин лопаток.

Сущность дискретно-фазового метода диагностики и контроля состояния рабочих лопаток заключается в определении амплитуд колебаний вершин лопаток и их статических координат с использованием для этого сигналов:

- от периферийного датчика;
- от датчика опорного импульса.

Периферийный датчик устанавливается над вершиной рабочей лопатки, в козырьке диафрагмы без выступа в проточную часть турбоагрегата. Датчик опорного сигнала дает один импульс за один оборот. Принимаемые сигналы подвергаются обработке, в результате чего устанавливаются размах колебаний вершин лопаток и положение вершины лопатки на ступени.

Порядок проведения работ по диагностике лопаток дискретно-фазовым методом следующий:

- на турбоагрегате устанавливается аппаратура (датчики, программно-аппаратурные средства, соединительные линии);
- на режимах холостого хода, синхронизации, малорасходных, частичных и номинальных нагрузок, срывах вакуума, колебаниях реактивной нагрузки определяются параметры состояния рабочих лопаток;
- контролируются параметры состояния рабочих лопаток в процессе эксплуатации агрегата с последующей архивацией данных;
- при изменении параметров состояния рабочих лопаток в процессе экс-

плутации, в случае их отклонений от типовых предельных значений выдаются рекомендации по останову турбоагрегата, профилактическому осмотру лопаточного аппарата, ограничениям в несении агрегатом электрических и тепловых нагрузок.

Нормы контроля состояния лопаточного аппарата формируются для каждого типа турбоагрегата индивидуально. На первом этапе набирается статистика параметров состояния рабочих лопаток для контролируемой ступени. Далее контролируется отклонение параметров состояния рабочих лопаток от средне-статистического уровня. Обработанные результаты принимаются за нормативные.

ТЕМА 5. ВИБРОДИАГНОСТИКА

5.1. ВИБРОДИАГНОСТИКА, ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПАРАМЕТРЫ

Вибродиагностика – метод диагностирования оборудования, основанный на анализе параметров вибрации. Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта.

Вибрация – движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин (рис. 5.1).

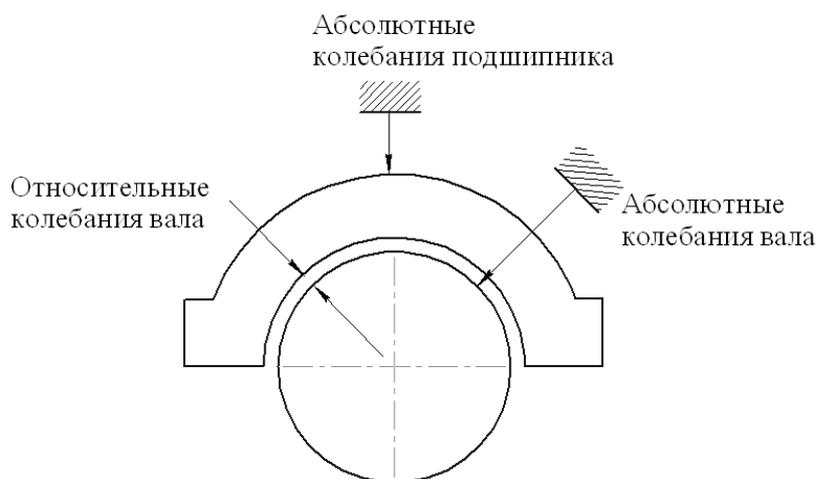


Рис. 5.1. Виды колебаний и места их измерений (на примере подшипника скольжения)

Абсолютная вибрация – колебания тела около положения своего равновесия (например, вибрация корпусов машин, корпусов подшипников валов роторов, фундаментов, трубопроводов).

Относительная вибрация – колебания одного тела относительно другого (например, вибрация вала относительно корпуса подшипника).

Абсолютные колебания валов – быстрые движения вала ротора по отношению к жестко установленной опорной точке в пространстве.

Абсолютная вибрация контролируется у машин, имеющих подшипники качения и машин на подшипниках скольжения в тех случаях, когда масса ротора соизмерима с массой подшипника.

Вибрация может характеризоваться несколькими колебательными величинами:

- мгновенное значение координаты положения точки при механической вибрации называют *виброперемещением* и обозначают $s(t)$, мкм (мм);
- первую производную перемещения по времени называют *виброскоростью*

$$v = \frac{ds(t)}{dt} = \dot{s} \quad ; \text{ мм/с (м/с)};$$

- вторую производную виброперемещения по времени называют *виброускорением*

$$a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} = \ddot{s} \quad , \text{ мм/с}^2 \text{ (м/с}^2\text{)}.$$

5.2. ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Измерение параметров вибрации осуществляется с помощью вибропреобразователей, причем чаще других применяются пьезоэлектрические преобразователи виброускорения (акселерометры), оптические (лазерные) преобразователи виброскорости (велометры) и токовихревые преобразователи относительного виброперемещения (проксиметры). Кроме них для обеспечения синхронных видов анализа вибрации часто используются либо оптические или токовихревые датчики оборотов, либо датчики тока (напряжения) синхронных электрических машин, в том числе генераторов электроэнергии. Внешний вид вибропреобразователей показан на рис.5.2.



Рис. 5.2. Внешний вид вибропреобразователей

Современные виброизмерительные приборы позволяют измерять все три кинематические характеристики колебательных процессов, при этом нет необходимости пользоваться различными датчиками, т.к. в приборе осуществляется

преобразование одной характеристики в другую. Следует отметить, что все датчики работают в ограниченном температурном диапазоне. Для обычного акселерометра рабочий диапазон температур составляет от -30°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Для установки на горячие поверхности необходимо использовать высокотемпературный *пьезоакселерометр*, в котором электронная часть выносится в отдельный корпус. Эта мера позволяет расширить температурный диапазон до $+260^{\circ}\text{C}$ (или даже до $+450^{\circ}\text{C}$ при использовании специальной керамики).

5.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВИБРАЦИИ

Реакции механических систем на возбуждение механическими колебаниями определяются сложными физическими процессами и при измерении даже на одном элементе агрегата в близких друг к другу точках ввода может наблюдаться различный характер исследуемых колебаний.

Измерения проводят на элементах конструкции, которые в максимальной степени реагируют на динамические силы и характеризуют общее вибрационное состояние машины: *на подшипниковых опорах агрегата, корпусе агрегата и на анкерных фундаментных болтах*.

Примеры расположения точек измерения вибрации приведены на рис.5.3 и рис.5.4.

Важно производить замеры вибрации в одних и тех же местах, называемых *контрольными (штатными) точками* измерения вибрации.

Наиболее просто и надежно осуществляется вибродиагностика подшипников. Поэтому в настоящее время оценка неуравновешенности по результатам измерения вибропараметров подшипников получила наиболее широкое распространение.

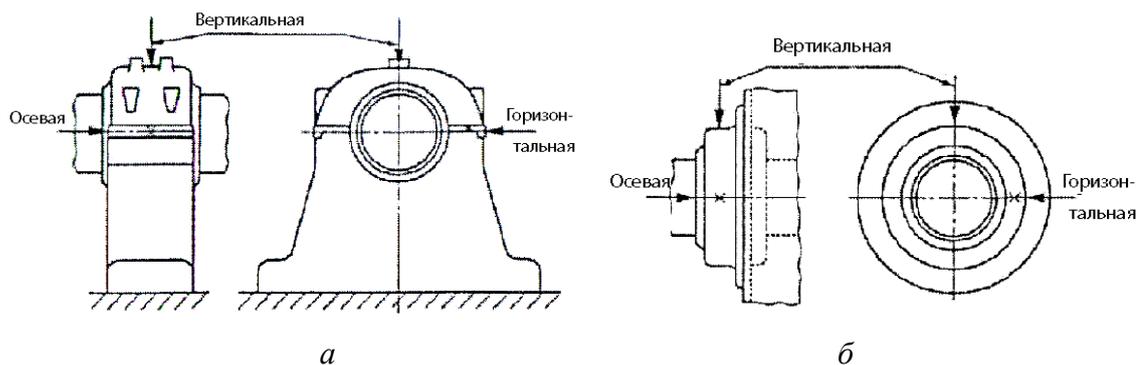


Рис.5.3. Точки измерения вибрации: а – на опоре подшипника; б – на корпусе подшипника

Обычно измерения проводят в различных точках в двух или трех взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет получить набор значений параметров вибрации. Под уровнем вибрации машины понимают максимальное значение вибрации, измеренной в одной определенной точке или группе точек

в выбранных направлениях, при определенных условиях и установившемся режиме работы.

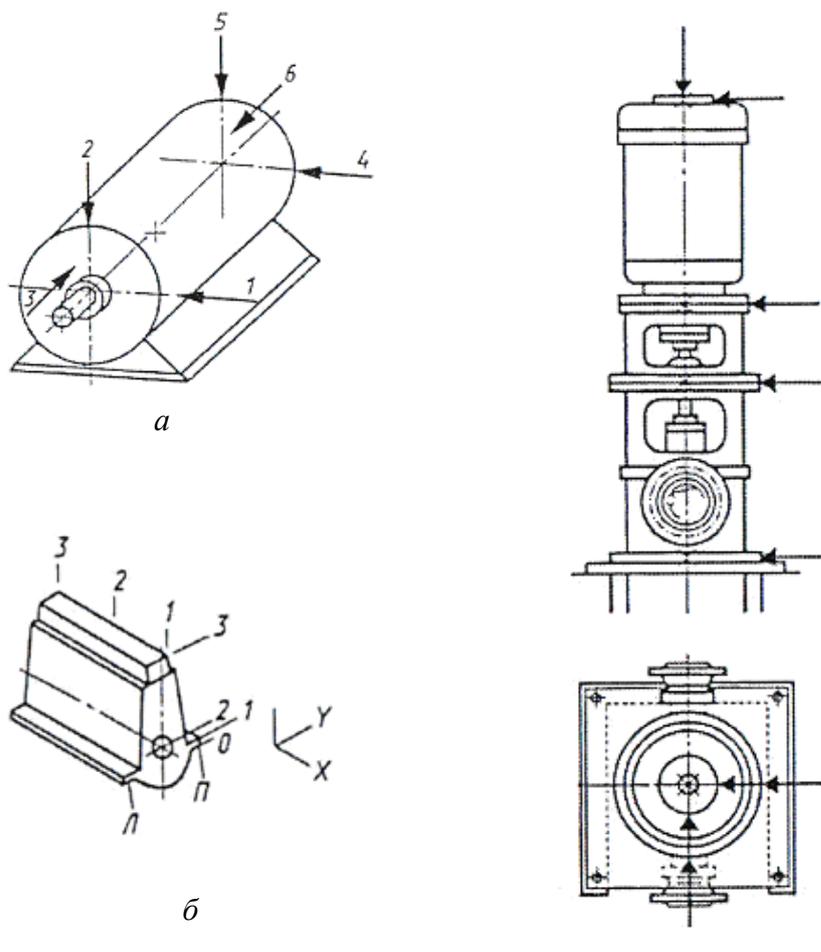


Рис. 5.4. Точки измерения вибрации: а – на малых электрических машинах; б – на двигателе; в – на вертикально установленной машине

Абсолютную вибрацию (при диагностировании большинства механических дефектов) рекомендуется измерять в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтально – поперечном и осевом. Горизонтально – поперечную составляющую вибрации следует измерять на уровне оси вала против середины опорного вкладыша подшипника. Осевую составляющую вибрации следует измерять в точке, максимально приближенной к оси вала на корпусе опоры подшипника вблизи горизонтального разъема между крышкой и корпусом. Вертикальную составляющую вибрации измеряют на верхней части крышки подшипника над серединой его вкладыша.

В силу экономических соображений при изучении виброконтролепригодности каждого конкретного агрегата и подготовке контрольных точек всегда возникает вопрос о пространственном направлении измерений, оптимальном с точки зрения распознавания состояния определенного узла агрегата. Решающего правила или общего ответа на этот вопрос нет, но если невозможно проведе-

ние измерений по трем главным направлениям в зоне одного подшипника или требуется минимизация количества замеров, то допускается измерение вибрации по двум направлениям: осевом и одном из поперечных направлений. Предпочтение отдается горизонтальному направлению, как правило, соответствующему направлению минимальной жесткости системы. Допускается также осевую вибрацию привода, нагнетателя и других узлов агрегата измерять только у подшипника свободного вала.

Методику измерения вибрации паровых турбин регламентируют [ГОСТ 25364–97](#) и [ГОСТ ИСО 108816-1-97](#).

Результаты измерения вибрации существенно зависят от способа крепления датчиков на исследуемой поверхности, т.к. в них вибрация измеряется контактным способом.

Места установки вибродатчиков должны быть чистым и плоским. Шероховатость поверхности должна быть минимальной. Краска в месте установки датчика должна отсутствовать и место установки датчика должно быть промаркировано соответствующим образом.

Применяется три способа крепления вибродатчиков: *на шпильку, магнитом, ручным щупом*.

При креплении датчика *на шпильку* обеспечивается максимальная жесткость крепления (за счет затяжки резьбового соединения), при этом колеблющаяся масса преобразователя является минимальной и определяется только весом датчика. Поэтому, при таком креплении, обеспечиваются частотные характеристики датчика, указанные в его паспорте.

Установка измерительного преобразователя с помощью *магнита*, на сегодняшний день является наиболее удобным и распространенным способом крепления. Очевидно, что резонансная частота крепления будет зависеть от силы и массы магнита, и собственно массы самого датчика и будет гораздо ниже, чем при креплении датчика на шпильку. Однако, анализируемый частотный диапазон обычно не превышает нескольких килогерц и поэтому данный способ крепления считается приемлемым. Крепление датчика с помощью магнита имеет несколько существенных недостатков. Преобразователь невозможно установить на немагнитную поверхность. Датчик на таком креплении неудобно размещать в труднодоступных местах. У пользователя могут быть проблемы с повторяемостью измеряемой вибрации, вследствие того, что, при установке возникают трудности с попаданием датчика в одну и ту же контролируемую точку. Необходимо принять меры к маркировке места установки датчика. Но тем не менее, в 90% случаев погрешности, вносимые этим обстоятельством пренебрежимо малы.

Ручным щупом пользуются тогда, когда жесткая установка датчика невозможна. Это может произойти в случае, если нам необходимо установить измерительный преобразователь в труднодоступном месте или на немагнитном материале. Такой способ крепления также поможет выполнить замер на горячей поверхности.

5.4. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ

В ГОСТ ИСО 10816-1-97 «Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования» рассматриваются критерии двух видов, распространяющиеся на эксплуатационный контроль и приемочные испытания и предназначенные для оценки уровней вибрации машин различных типов.

Критерий 1 – определяет зоны качества *A, B, C, D*, состояния агрегата по уровню вибрации в соответствии с общепринятыми пределами (данный критерий условно можно назвать статический);

Критерий 2 – определяет динамику изменения вибрации агрегата («скачки», тренды вибрации).

Общепринято, разделять все множество существующих агрегатов на четыре класса по мощности и характеристикам опор (фундаментов).

1 класс – отдельные части двигателей и машин, соединенные с агрегатом (например, моторы мощностью до 15 кВт):

2 класс – машины средней величины (моторы 15–875 кВт) без специальных фундаментов; жестко установленные двигатели или машины (до 300 кВт) на специальных фундаментах;

3 класс – мощные первичные двигатели и другие мощные машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундаментах, относительно жестких в направлении измерения вибрации (например, турбоагрегаты);

4 класс – мощные первичные двигатели и другие мощные машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундаментах, относительно податливых в направлении измерения вибрации.

По качеству вибросостояния принята следующая градация:

зона А – в эту зону попадают, как правило, новые машины, только что введенные в эксплуатацию;

зона В – машины, попадающие в эту зону, обычно считают пригодными к эксплуатации без ограничения срока;

зона С – машины, попадающие в эту зону, обычно рассматривают как непригодные для длительной непрерывной эксплуатации. Обычно данные машины могут функционировать ограниченный период времени, пока не появится подходящая возможность для проведения ремонтных работ.

зона D – уровни вибрации в данной зоне рассматривают как достаточно серьезные, для того, чтобы вызвать повреждения машины (аварийный уровень).

ГОСТ ИСО 10816-1-97 является базовым документом для разработки руководств по измерению и оценке вибрации машин. Критерии оценки для машин конкретных типов должны быть установлены в соответствующих отдельных стандартах.

В табл.5.1 приведены только временные, примерные критерии, которыми можно пользоваться при отсутствии подходящих нормативных документов. По ней можно определить верхние границы зон от *A* до *C*, выраженные в средних

квадратических значениях виброскорости V_{rms} , мм/с, для машин различных классов:

Таблица 5.1. Примерные границы зон для машин различных классов

V_{rms} , мм/с	Класс I	Класс II	Класс III	Класс IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				
71				

5.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА ВИБРАЦИИ

Общая структура систем измерения и анализа вибрации включает в себя:

- первичные измерительные преобразователи;
- согласующие устройства;
- линии связи;
- собственно средства анализа;
- базу данных (в простейшем случае – пороговые устройства);
- средства (программы) обработки информации.

При периодическом контроле оборудования применяется *переносная аппаратура*. Сбор, хранение и анализ вибраций осуществляется с помощью переносных коллекторов – виброанализаторов (рис.5.5). В современных приборах предусмотрена возможность перегружать данные измерений в ПК для хранения и анализа.

Широкое распространение получили диагностические системы, включающие переносные коллекторы-анализаторы и совместимые с ними ПК, оснащённые целевым программным обеспечением. По результатам мониторинга генерируется отчётная документация.



Рис.5.5. Переносные вибронализаторы разных производителей

Стационарная аппаратура применяется для непрерывного контроля технического состояния оборудования. Различают контрольно – сигнальную (для контроля предельно-допустимого уровня) и диагностическую аппаратуру (для определения вида и степени развития дефекта, выявления тенденций к изменению диагностических признаков).

Стационарные измерительные комплексы состоят из компьютера с платами ввода и обработки вибросигнала, а также блоков преобразования, коммутации, согласования и т.д. Непосредственно в цеху устанавливаются блоки с оборудованием, к которым подсоединяются кабели с вибропреобразователями и датчиками оборотов. Структурная схема стационарной системы непрерывного контроля приведена на рис. 5.6.

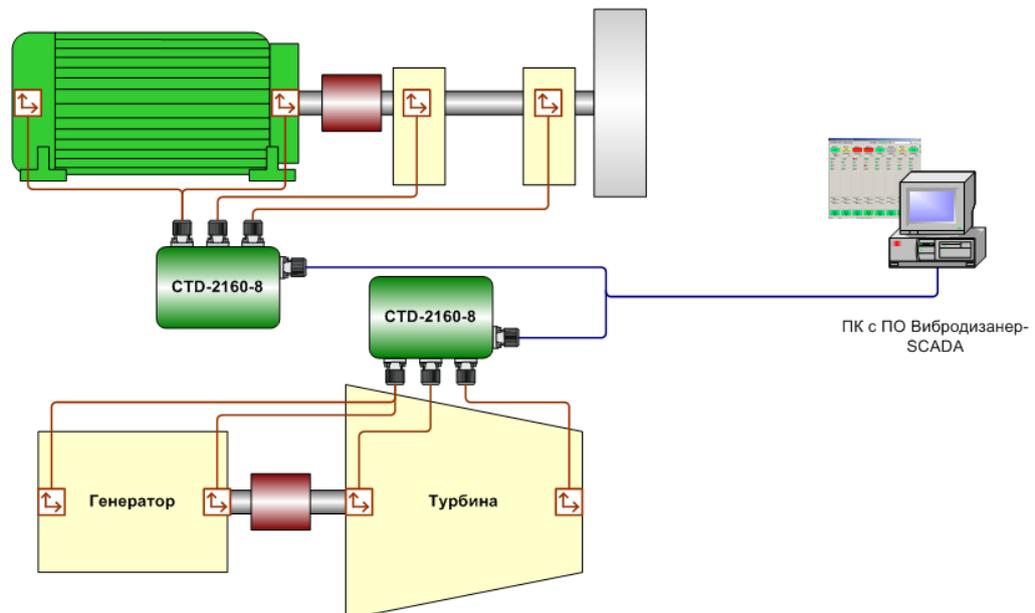


Рис. 5.6. Структурная схема системы непрерывного вибродиагностического контроля

Стационарные системы подразделяются на два вида:

– собственно стационарные системы, которые постоянно работают на одной и той же машине, их датчики стационарно закреплены, обычно резьбовым соединением (на шпильки), кабельные трассы проложены в кабель-каналах, второй тип систем;

– стендовые системы, обычно ими комплектуются испытательные стенды, в таких системах датчики устанавливаются на машину только на период испытаний. В таких системах датчики обычно устанавливаются на магнитах.

В любом типе стационарных систем все измерения проводятся автоматически, система сама следит за режимами работы оборудования, переключает каналы, в зависимости от обнаруженных дефектов регулирует частоту измерений и контроля состояния оборудования. В то же время в любой момент оператор может провести любое измерение по требованию и провести дополнительный анализ данных.

В настоящее время находят широкое применение экспертные системы постановки диагноза и прогноза. *Экспертная система* – это система, в которую включены знания специалистов о некоторой проблемной области и, которая в пределах этой области способна принимать экспертные решения. Заложенный в систему алгоритм диагностики с решающими правилами распознавания технического состояния позволяют ставить диагноз с максимальной точностью.

ТЕМА 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Автоматизация процессов контроля оборудования ТЭС является одним из перспективных направлений научно-исследовательской деятельности. Многообразие объектов контроля, широкий диапазон конструкционных материалов, конструкций и состояний поверхности, дефектоскопических критериев и требований нормативных документов делает достижение этой задачи весьма проблематичной.

В настоящее время в различных научно-исследовательских институтах развивается направление деятельности, связанное с разработкой автоматизированных систем неразрушающего контроля. Некоторые их рассмотрены ниже.

Вопросы автоматизации неразрушающего контроля рассмотрены на примерах автоматизированных систем и комплексов, разработанных специалистами УралВТИ (РФ). Все рассмотренные автоматизированные системы успешно применяются на практике.

Материалы подобраны из сборника докладов Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2009».

6.1. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСЕВОГО КАНАЛА РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Ротор является одним из ответственных элементов паровой турбины, определяющий ресурс ее работы. В процессе эксплуатации он подвергается воз-

действиям значительных статических и динамических нагрузок, поэтому важно вовремя обнаружить дефекты в металле ротора. Согласно действующим нормативно-техническим документам, ротора турбин после наработки соответствующего службы должны подвергаться обследованию со стороны осевого канала.

В Уральском всероссийско-техническом институте (УралВТИ) разработан автоматизированный комплекс «РОТОР-К», предназначенный для контроля роторов турбин со стороны осевого канала. Комплекс позволяет проводить визуальный, вихретоковый и ультразвуковой контроль, а также измерение остаточной формации. В настоящее время комплекс успешно применяется для неразрушающего контроля различных типов паровых турбин.

Комплекс «РОТОР-К» состоит из:

- транспортного механизма (ТМ);
- сменных сканирующих модулей (СМ);
- блока управления и преобразования (БУП);
- ПЭВМ со специальным программным обеспечением.

На рис 6.1 и 6.2 показан внешний вид элементов комплекса «РОТОР-К».

Программа посылает команды в блок управления и преобразования, обеспечивает позиционирование транспортного механизма и сменных сканирующих модулей и принимает оцифрованные информационные сигналы с первичных преобразователей. В состав блока управления и преобразования входят блоки питания, микроконтроллера, вихретокового дефектоскопа, ультразвуковой коммутатор и силовые блоки управления шаговыми двигателями ТМ и СМ.

Транспортный механизм обеспечивает перемещение сканирующего модуля внутри осевого канала на заданное расстояние. СМ осуществляют сканирование поверхности осевого первичными преобразователями. Первичные преобразователи имеют возможность аксиального и радиального перемещений, благодаря чему, возможно осуществлять 100% контроль поверхности осевого канала ротора.



Рис.6.1. Универсальный транспортный механизм с блоком управления для перемещения модулей поисковых систем внутри осевого канала (а), вихретоковый и визуально-оптический сканирующий модуль (б)



Рис.6.2. Ультразвуковой сканирующий модуль (а), модуль измерения диаметра осевого канала и оценки остаточной деформации металла (б)

Отличительной особенностью комплекса является использование специально разработанного вихретокового дефектоскопа. Дефектоскоп обеспечивает формирование возбуждающего и прием информационного сигнала с вихретоковых преобразователей, выделение полезной информации в различной форме (амплитудной, фазовой и комплексной). Позволяет осуществлять отстройку от «мешающих факторов» путем автоматического переноса начала координат комплексной плоскости.

Ультразвуковой контроль осуществляется в иммерсионном варианте ввода ультразвука. Сканирующий модуль УЗК содержит 2 пары ПЭП установленных в специальных каретках прозвучивания металла ротора по схеме «тандем». Возможность варьировать базу тандема позволяет оператору заложить требуемый порог чувствительности к глубине трещин и надежно выявлять трещины которые развиваются с наружной поверхности ротора.

Визуальный СМ содержит видеокамеру стандартного ТВ-разрешения, которая в комбинации с вихретоковым СМ позволяет наблюдать за зоной контроля и получать изображения дефектов, выявленных вихретоковым методом.

Модуль измерения диаметра построен на основе высокоточных лазерных дальномеров и обеспечивает бесконтактное измерение диаметра канала вдоль длины ротора.

6.2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН ПОД СТЕЛЛИТОВЫМИ ПЛАСТИНАМИ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Одной из наиболее частых причин остановов турбоагрегата является разрушение лопаточного аппарата турбины.

Лопатки паровых турбин работают в тяжелых условиях: резонансные колебания, в процессе которых возникают большие напряжения; воздействие влажного пара, и как следствие эрозионный износ входных кромок; коррозия.

Существуют различные методы защиты входных кромок лопаток последних ступеней турбин от этих воздействий. Наиболее распространен метод наплавки противозерозионных стеллитовых пластин.

Практика эксплуатации турбин с лопатками упрочненными таким способом показывает, что в ряде случаев на входных кромках лопаток в

области припайки стеллитовых пластин начинают развиваться трещины. Имеющимися в наличии средствами неразрушающего контроля подобные несквозные дефекты не могут быть выявлены из-за отсутствия непосредственного доступа. Специалистами УралВТИ был разработан автоматизированный комплекс «Лопатка-2» для выявления таких дефектов. Комплекс позволяет выявлять дефекты, как в стыках стеллитовых пластин, так и под самими пластинами на ранней стадии их развития.

В комплексе реализован совместный вихретоковый и магнитный методы контроля в автоматическом режиме сканирования с компьютерным управлением и анализом результатов контроля. Блок-схема комплекса представлена на рис.6.3.

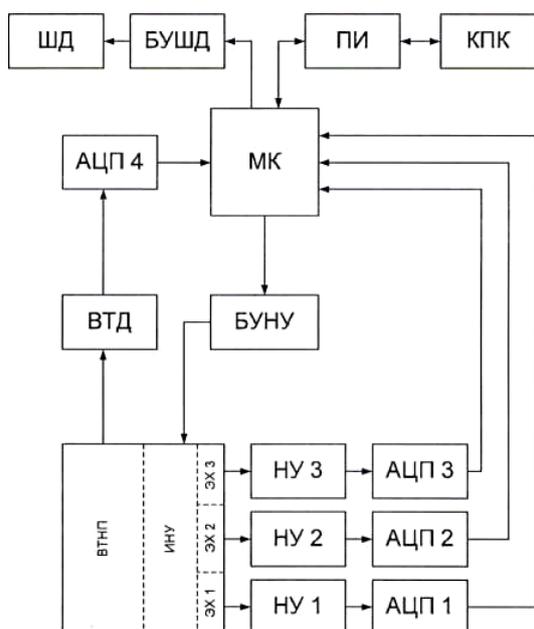


Рис.6.3. Блок-схема автоматизированного комплекса «Лопатка-2»:

МК – микроконтроллер; БУШД – блок управления шаговым двигателем; ШД – шаговый двигатель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ВТД – вихретоковый дефектоскоп; БУНУ – блок управления намагничивающим устройством; ИМУ – импульсное намагничивающее устройство; ЭХ1, ЭХ2, ЭХ3 – элементы Холла; НУ – нормирующие усилители; ПИ – преобразователь интерфейса; КПК – персональный компьютер.

Комплекс состоит из транспортно сканирующего механизма (ТСМ) и блока управления и преобразования (БУП).

На ТСМ закреплен вихретоковый преобразователь (ВТП), импульсное намагничивающее устройство, магнитные преобразователи на элементах Холла (ЭХ 1,2,3). Элементы Холла позволяют фиксировать нормальную и тангенциальную составляющую поля рассеяния над трещиной. ВТП фиксирует наличие трещины в стыке пластин.

На рис.6.4 представлена принципиальная кинематическая схема сканирующего механизма.

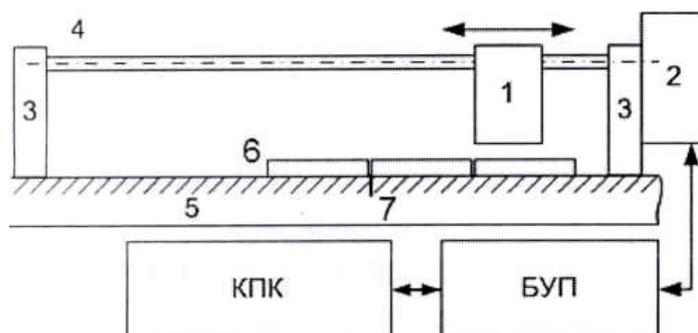


Рис. 6.4. Принципиальная кинематическая схема сканирующего механизма:

1 – каретка с блоком первичных преобразователей и импульсным намагничивающим устройством; 2 – двигатель; 3 – магнитные фиксаторы; 4 – направляющая каретки; 5 – объект контроля, блок управления и преобразования; КПК – карманный персональный компьютер, 6 – стеллитовые пластины; 7 – трещина

Автоматизированный комплекс «Лопатка-2» работает следующим образом. Сканирующий механизм устанавливается на лопатку и удерживается на ней магнитными фиксаторами. Каретка перемещает закрепленные на ней преобразователи вдоль кромки пера лопатки с заданным зазором и расстоянием от края. Двигатель сканирующего механизма выполнен на основе шагового двигателя, что дает возможность определять координаты преобразователей с требуемой точностью и позиционировать их в необходимом месте.

Блок управления и преобразования совместно с КПК и программным обеспечением выполняют следующие функции:

- управление шаговым двигателем сканирующего механизма;
- синхронизация движения каретки сканирующего механизма с частотой и длительностью включения намагничивающего устройства. Синхронизация обеспечивает прерывистое движение каретки и осуществление следующего ряда последовательных действий:

- 1) перемещение по лопатке на заданную величину;
- 2) измерение вихретоковых параметров с ВТП, передача их на вихретоковый дефектоскоп далее через АЦП4 на МК (рис.6.3);

- 3) по сигналу с МК блок управления намагничивающим устройством с помощью импульсного намагничивающего устройства намагничивает зону контроля; сигналы с измерительных элементов Холла через нормирующие усилители НУ1-3 и АЦП1-3 поступают на МК;

- 4) МК передает полученную информацию с вихретокового и магнитных преобразователей и данные о текущем состоянии ТСМ через преобразователь интерфейса в компьютер КПК.

- 5) КПК осуществляет анализ полученной информации за текущий шаг, предоставляет эту информацию оператору в графическом виде, сохраняет ее в базе данных. Формирует команду следующего цикла.

6.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ВОДООПУСКНЫХ ОТВЕРСТИЙ БАРАБАНОВ КОТЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Барабаны являются одним из наиболее ответственных элементов паровых котлов. При обследовании барабанов в них обнаруживаются различные дефекты: трещины около трубных отверстий, на поверхности обечаек и днищ, в основных сварных соединениях, в местах приварки сепарационных устройств и др.

Работа дефектоскописта при ручном контроле осложнена тем, что поверхность отверстия труднодоступна. Даже при диаметре 100 мм достаточно трудно обеспечить надежный контакт преобразователя с поверхностью контроля и сохранение траектории сканирования. Помимо этих факторов, результаты контроля оказывают влияние стесненные условия работы дефектоскописта. Устранить влияние вышеуказанных факторов можно только при использовании автоматизированных систем контроля.

Еще с 80-х годов прошлого века специалистами УралВТИ ведутся работы по разработке полуавтоматических и автоматических систем контроля поверхностей отверстий. Постоянное усовершенствование механической и электронной частей автоматических систем контроля водоотпускных отверстий барабанов привело к созданию автоматизированного комплекса контроля отверстий «АККО-2». В устройстве применены оригинальные механические узлы и современные электронные блоки. Комплекс обеспечивает 100 % сканирование поверхности отверстий барабанов с использованием *вихретокового* преобразователя. Основные технические характеристики «АККО-2» следующие:

- минимальная глубина выявляемой трещины – 0,5 мм;
- минимальная протяженность выявляемой трещины – 2 мм;
- относительная погрешность глубины трещины – 20%;
- средняя производительность контроля – 10 отверстий/час.

6.4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОЛЛЕКТОРОВ И ГИБОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Автоматизированный комплекс для контроля коллекторов стороны внутренней поверхности. В настоящее время для визуального контроля внутренней поверхности коллектора применяются эндоскопы. К недостаткам этого способа, в первую очередь, следует отнести ограниченность зоны контроля.

Автоматизированный комплекс «КОЛЛЕКТОР-1», разработанный специалистами УралВТИ позволяет проводить 100% визуальный контроль внутренней поверхности коллектора. Комплекс помещают в коллектор через один из входных патрубков. Гусеничный двигатель обеспечивает перемещение устройства вдоль всего коллектора.

Специальный управляемый кронштейн позволяет произвольно ориентировать видеокамеру и получать изображение и фотографию контролируемого участка.

Автоматизированный комплекс для контроля гибов необогреваемых труб плов со стороны их внутренней поверхности. Для контроля водоперепускных и водоопускных труб и их гибов со стороны внутренней поверхности разработан комплекс ГИБ-ЗМ. Контроль проводится визуальным и вихретоковым методами.

Между транспортным и сканирующим механизмом существует гибкая связь, которая обеспечивает перемещение устройства по прямым гнутым участкам трубопровода. Специальный механизм обеспечивает беспрепятственный переход каретки с преобразователем через подкладное кольцо сварного соединения. Благодаря этому комплекс может перемещаться по трубопроводам от барабана до коллектора и осуществлять визуальный и вихретоковый контроль их внутренней поверхности. Комплекс вводится в трубу со стороны барабана через водоопускное отверстие. Снятие теплоизоляции и зачистка наружной поверхности гибов трубопроводов не требуются.

Автоматизированный комплекс контроля гибов паропроводов. Комплекс «ГИБ09» позволяет автоматизировать процесс проведения следующих видов контроля гибов паропроводов:

- визуальный осмотр и измерение овальности;
- вихретоковую дефектоскопию наружной поверхности;
- измерение толщины стенки ультразвуковым методом;
- ультразвуковую дефектоскопию сварного соединения.

Транспортно-сканирующий механизм комплекса фиксируется на поверхности гiba с помощью магнитных присосок. Комплекс снабжен системой цифровых пьезогироскопов и бесконтактных лазерных датчиков перемещения. Совокупность системы датчиков обеспечивает ориентацию и точное тоположение комплекса на гibe. Перемещение комплекса осуществляется по программе, задаваемой оператором. В процессе контроля производится сканирование всей поверхности гiba первичными образователями (визуальным, измерительным, вихретоковым и ультразвуковым). Информационные сигналы с преобразователей и сигналы координатной привязки непрерывно записываются на жесткий диск управляющего компьютера, обрабатываются по заданной программе и отображаются на экране в режиме реального времени.

Применение комплекса «ГИБ09» позволяет увеличить производительность контроля и повысить достоверность результатов. Описанные комплексы доказывают практическую возможность и целесообразность применения автоматизированных средств контроля тепломеханического оборудования ТЭС.

Электронный учебно-методический комплекс

Практический раздел

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Темы практических и лабораторных занятий

Минск 2017 г.

ТЕМЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

1. Изучение устройства и принципа действия ультразвуковых приборов неразрушающего контроля.
2. Ультразвуковой контроль толщины изделий.
3. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений.
4. Обнаружение дефектов вихретоковым методом контроля.
5. Определение толщины покрытий вихретоковым методом.
6. Обнаружение дефектов магнитопорошковым методом контроля.
7. Обнаружение поверхностных дефектов капиллярным методом контроля.
8. Определение остаточной напряженности магнитного поля феррозондовым методом.
9. Определение твердости металла динамическим методом переносным твердомером.
10. Контроль параметров вибрации роторного оборудования.

ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1. Физическая основа и принцип действия ультразвуковых приборов (толщиномеров, дефектоскопов, структуроскопов, томографов).
2. Изучение основ настройки и калибровки ультразвуковых приборов, основные параметры контроля.
3. Ультразвуковая толщинометрия сварных соединений.
4. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений и основного металла элементов оборудования ТЭС.
5. Магнитные методы контроля при диагностике теплотехнического оборудования ТЭС.
6. Магнитопорошковый контроль основного металла и сварных соединений.
7. Магнитная структуроскопия (коэрциметрия) для определения напряженного состояния, механических свойств и химического состава.
8. Изучение технологии проведения капиллярного контроля, оценка качества дефектоскопических материалов.
9. Выявление поверхностных дефектов методом цветной дефектоскопии.
10. Физическая основа и принцип действия вихретоковых приборов (толщиномеров, дефектоскопов, структуроскопов), настройка и калибровка вихретоковых приборов.
11. Использование вихретокового метода контроля для обнаружения поверхностных дефектов.
12. Применение вихретоковой толщинометрии для оценки толщины покрытий и качества поверхности металлов.
13. Оценка механических свойств металлов неразрушающими методами контроля. Определение твердости динамическим методом.

14. Технические средства вибродиагностики: коллекторы, стендовые системы, стационарные системы вибромониторинга.
15. Изучение основ вибродиагностики и балансировки с использованием модели роторного оборудования и стендовой системы.
16. Исследование параметров вибрации на моделях паровых турбин с использованием стационарного вибродиагностического комплекса.

При выполнении лабораторных и практических заданий студенты могут пользоваться методическими материалами из разработанного автором лабораторного практикума: Герасимова А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС: лабораторный практикум/ А.Г.Герасимова.– Минск: Выш. шк., 2013.– 170с.

Электронный учебно-методический комплекс

Раздел контроля знаний

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Вопросы к зачету, экзамену, контрольные тесты

Минск 2017 г.

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Виды и методы контроля металла.
2. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
3. Акустические методы НК, область применения и классификация.
4. Основные параметры УЗК.
5. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
6. Классификация ПЭП.
7. Эхо-метод ультразвукового контроля.
8. Технология проведения УЗК.
9. Область применения УЗК.
10. Классификация магнитных методов контроля.
11. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
12. Магнитографический метод контроля сварных швов.
13. Метод магнитной памяти металлов.
14. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
15. Физические явления капиллярного контроля.
16. Технология проведения капиллярного контроля.
17. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
18. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
19. Классификация вихретоковых преобразователей.
20. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
21. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
22. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
23. Тепловой контроль.
24. Оптический метод контроля.
25. Классификация средств НК.
26. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
27. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
28. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
29. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.
30. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
31. Определение критической температуры хрупкости методом РК.
32. Структурный анализ металлов и сплавов методами РК.
33. Коррозионные испытания.
34. Безобразцовые методы контроля микроструктуры.
35. Определение марочного состава сталей методом стилоскопирования.
36. Контроль сварных соединений неразрушающими методами контроля.
37. Контроль состояния металла трубопроводов ТЭС.
38. Контроль ползучести металла паропровода по приварным реперам.
39. Методы контроля состояния роторов паровых турбин.
40. УЗК осевого канала ротора паровой турбины.
41. Контроль состояния осевого канала ротора паровой турбины методом ДАО-технологии.
42. Контроль ротора паровой турбины методом акустической эмиссии.
43. Контроль состояния металла корпусных деталей.
44. УЗК лопаток паровых турбин.
45. Вихретоковый контроль лопаток паровых турбин.
46. Вибродиагностика паровых турбин: назначение и специфика.
47. Основные параметры вибрации.
48. Критерии оценки вибрационного состояния роторного оборудования.
49. Типы вибродатчиков, способы крепления и места установки при вибродиагностике паровых турбин.
50. Технические средства измерения и анализа вибрации.

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Условия работы конструкционных материалов тепломеханического оборудования ТЭС под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.
2. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам тепломеханического оборудования ТЭС.
3. Классификация и маркировка углеродистых сталей.
4. Классификация и маркировка легированных сталей.
5. Основные служебные свойства металла оборудования ТЭС.
6. Виды и методы контроля металла.
7. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
8. Акустические методы НК, область применения и классификация.
9. Основные параметры УЗК.
10. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
11. Классификация ПЭП.
12. Эхо-метод ультразвукового контроля.
13. Технология проведения УЗК.
14. Область применения УЗК.
15. Классификация магнитных методов контроля.
16. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
17. Магнитографический метод контроля сварных швов.
18. Метод магнитной памяти металлов.
19. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
20. Физические явления капиллярного контроля.
21. Технология проведения капиллярного контроля.
22. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
23. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
24. Классификация вихретоковых преобразователей.
25. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
26. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
27. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
28. Классификация средств НК.
29. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
30. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
31. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
32. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.
33. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
34. Определение критической температуры хрупкости методом РК.
35. Структурный анализ металлов и сплавов методами РК.
36. Коррозионные испытания.
37. Безобразцовые методы контроля микроструктуры.
38. Определение марочного состава сталей методом стилоскопирования.
39. Контроль сварных соединений неразрушающими методами контроля.
40. Контроль состояния металла трубопроводов ТЭС.
41. Контроль ползучести металла паропровода по приварным реперам.
42. Методы контроля состояния роторов паровых турбин.
43. УЗК осевого канала ротора паровой турбины.
44. Контроль состояния осевого канала ротора паровой турбины методом ДАО-технологии.
45. Контроль ротора паровой турбины методом акустической эмиссии.
46. Контроль состояния металла корпусных деталей.
47. УЗК лопаток паровых турбин.
48. Вихретоковый контроль лопаток паровых турбин.
49. Вибродиагностика паровых турбин: назначение и специфика.
50. Основные параметры вибрации.
51. Критерии оценки вибрационного состояния роторного оборудования.
52. Типы вибродатчиков, способы крепления и места установки при вибродиагностике паровых турбин.
53. Технические средства измерения и анализа вибрации.
54. Автоматизированные системы контроля тепломеханического оборудования ТЭС.
55. Автоматизированный комплекс для контроля осевого канала ротора паровой турбины.
56. Автоматизированный комплекс по контролю лопаток паровых турбин.
57. Система автоматизированного контроля водопускных отверстий барабанов котлов.
58. Автоматизированные комплексы для контроля коллекторов и гибов трубопроводов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №1

<p>1. Прибор, который превращает энергию одного вида в другой, называется:</p> <p>а) передатчик; б) излучатель; в) разрешающее устройство; г) преобразователь.</p>	<p>2. Ультразвуковые волны имеют частоту:</p> <p>а) до 20 Гц; б) от 20 до $2 \cdot 10^4$ Гц; в) от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^9$ Гц; г) более $2 \cdot 10^9$ Гц.</p>
<p>3. Расстояние, преодолеваемое упругой волной за время, равное одному периоду колебаний называется:</p> <p>а) частота; б) длина волны; в) скорость звука; г) длительность импульса.</p>	<p>4. Неоднородность химического состава в различных зонах детали называется:</p> <p>а) раковина; б) питтинг; в) ликвация; г) мартенсит.</p>
<p>5. Узел эхо-дефектоскопа (толщиномера), используемый для возбуждения излучающего пьезоэлемента ультразвукового преобразователя, называется:</p> <p>а) генератор импульсов; б) синхронизатор; в) приемник; г) усилитель.</p>	<p>6. Какой из перечисленных ниже методов наиболее подходит для измерения толщины детали:</p> <p>а) прохождения; б) свободных колебаний; в) отражения; г) акустической эмиссии.</p>
<p>7. Длина волны L, выраженная через скорость c и частоту f равна:</p> <p>а) $L = c/f$; б) $L = cf$; в) $L = 1/cf$; г) $L = c + f$.</p>	<p>8. Ультразвуковой прибор, предназначенный для определения механических свойств материалов, называется:</p> <p>а) дефектоскоп; б) структуроскоп; в) пирометр; г) толщиномер.</p>
<p>9. Эхо-импульсный метод основан на:</p> <p>а) возбуждении в изделиях постоянной толщины незатухающих ультразвуковых колебаний и определении частот, при которых имеют место резонансы этих колебаний; б) прозвучивании изделий зондирующими импульсами упругих волн; в) посылке в контролируемое изделие упругих колебаний и регистрации изменения их интенсивности; г) ни на одном из вышеперечисленных.</p>	<p>10. Сжатие и расширение материала под влиянием переменного электрического поля называется:</p> <p>а) пьезоэлектрический эффект; б) рефракция; в) магнитоскрипция; г) магнитная индукция.</p>

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2

<p>1. Источник ультразвуковых колебаний обычно используется в преобразователях действует по:</p> <p>а) магнитострикционному принципу; б) пьезоэлектрическому принципу; в) электродинамическому принципу; г) ни один из вышеперечисленных.</p>	<p>2. Какой метод наиболее подходит для контроля крупнозернистого материала:</p> <p>а) отражения; б) прохождения; в) импедансный; г) вынужденных колебаний.</p>
<p>3. Скорость распространения упругих волн в однородном слое:</p> <p>а) пропорциональна hf; б) пропорциональна частоте f; в) не зависит от частоты; г) пропорциональна $1/f$.</p>	<p>4. Усталостные трещины в металлах возникают:</p> <p>а) в процессе литья; б) при термообработке деталей; в) под действием длительных знакопеременных нагрузок при эксплуатации деталей; г) в процессе холодной обработки.</p>
<p>5. Какой из перечисленных методов подходит для контроля дефектов соединения слоистых изделий типа металл-неметалл;</p> <p>а) импедансный; б) эхо-метод; в) метод свободных колебаний; г) реверберационный.</p>	<p>6. Операция, в результате которой пьезоэлементы из пьезоэлектрической керамики приобретают пьезоэлектрические свойства:</p> <p>а) поляризация; б) термообработка; в) электризация; г) тренировка.</p>
<p>7. При контроле велосимметрическим методом основным признаком дефекта служит:</p> <p>а) изменение амплитуды; б) изменение частотного спектра сигнала; в) уменьшение скорости волны; г) появление многократных эхо-сигналов</p>	<p>8. Процесс выставления характеристик прибора по стандартному образцу называется:</p> <p>а) сканирование узла; б) развертка; в) проверка чувствительности; г) калибровка.</p>
<p>9. Какой тип датчиков наиболее подходит для выявления вертикальных дефектов:</p> <p>а) раздельно-совмещенный; б) наклонный; в) прямого действия; г) вертикальный.</p>	<p>10. Для выявления, каких дефектов предназначен метод акустической эмиссии:</p> <p>а) типа нарушений сплошности; б) поверхностных трещин; в) горизонтальных; г) концентрации напряжений.</p>

МАГНИТНЫЙ И КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №3

<p>11. Магнитные методы контроля можно применять:</p> <p>а) для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов;</p> <p>б) дефектов, имеющих выход на поверхность;</p> <p>в) глубинных дефектов.</p>	<p>12. Какие из перечисленных металлов относятся к ферромагнитным:</p> <p>а) хром;</p> <p>б) железо;</p> <p>в) никель;</p> <p>г) алюминий.</p>
<p>13. Магнитная индукция, выраженная через длину проводника и силу тока равна:</p> <p>а) $B = IL/F$;</p> <p>б) $B = F/(IL)$;</p> <p>в) $B = I/LF$.</p>	<p>14. Какие материалы могут использоваться при магнитопорошковом методе контроля:</p> <p>а) порошок Fe_2O_3;</p> <p>б) порошок алюминия;</p> <p>в) порошок никеля;</p> <p>г) порошок чугуна.</p>
<p>15. При магнитном контроле используются в основном поля:</p> <p>а) 200...1000 мТл;</p> <p>б) 1000...2000 мТл;</p> <p>в) 1...20 Тл;</p> <p>г) $1 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3}$ Тл.</p>	<p>16. Индикаторный рисунок при магнитопорошковом методе проявляется:</p> <p>а) через 5-60 мин;</p> <p>б) незамедлительно;</p> <p>в) 2-5 мин;</p> <p>г) 5-6 часов.</p>
<p>17. Магнитографический метод основан на:</p> <p>а) на использовании капиллярных свойств жидкости;</p> <p>б) на регистрации магнитных полей рассеяния;</p> <p>в) на регистрации изменении электромагнитного поля токов Фуко;</p> <p>г) на определении магнитных свойств объектов.</p>	<p>18. Какой проявитель для капиллярного метода контроля будет наиболее эффективен:</p> <p>а) крупнопористый;</p> <p>б) мелкопористый;</p> <p>в) мелкодисперсный;</p> <p>г) крупнодисперсный.</p>
<p>19. Благодаря какому физическому явлению возможен контакт между дефектом и дефектоскопическим материалом при капиллярном контроле:</p> <p>а) капиллярности;</p> <p>б) смачивания;</p> <p>в) магнитной проницаемости.</p>	<p>20. При капиллярном методе контроля в качестве пенетранта выбирают жидкости с:</p> <p>а) большим поверхностным натяжением;</p> <p>б) относительно низким поверхностным натяжением;</p> <p>в) поверхностное натяжение не имеет значения.</p>

МАГНИТНЫЙ И КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №4

<p>11. Магнитографический метод наиболее часто применяют для:</p> <p>а) определения механических свойств объектов; б) измерения толщины детали; в) контроля сплошности сварных швов.</p>	<p>12. Значения относительной магнитной проницаемости у ферромагнитных материалов:</p> <p>а) $\mu_r > 1$; б) $\mu_r < 1$; в) $\mu_r \gg 1$.</p>
<p>13. Какие факторы влияют на чувствительность магнитопорошкового контроля:</p> <p>а) скорость намагничивания; б) время намагничивания; в) форма детали; г) направление намагничивания.</p>	<p>14. В каких случаях деталь контролируют способом приложенного поля:</p> <p>а) для выявления поверхностных дефектов; б) для выявления подповерхностных дефектов; в) деталь имеет сложную форму; г) при небольшой мощности дефектоскопа.</p>
<p>15. Напряженность магнитного поля, которую необходимо наложить на предмет для полного его намагничивания называется:</p> <p>а) остаточная магнитная индукция; б) гистерезис; в) коэрцитивная сила; г) индукция.</p>	<p>16. Какой из методов магнитного контроля позволяет контролировать структуру металла:</p> <p>а) феррозондовый; б) магнитографический; в) магнитопорошковый; г) магнитной памяти.</p>
<p>17. Жидкость, с каким углом смачивания будет наиболее эффективна в качестве пенетранта:</p> <p>а) $0^\circ < \theta < 90^\circ$; б) $90^\circ < \theta < 180^\circ$; в) $0^\circ < \theta < 45^\circ$; г) $180^\circ < \theta < 360^\circ$.</p>	<p>18. Дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их, называется:</p> <p>а) проявителем; б) пенетрантом; в) индикатором; г) очистителем.</p>
<p>19. Какой из методов не требует обязательной подготовки поверхности контроля:</p> <p>а) магнитопорошковый; б) магнитографический; в) магнитной памяти; г) капиллярный.</p>	<p>20. Какой из методов капиллярного контроля обладает наибольшей чувствительностью к дефектам:</p> <p>а) ахроматический; б) цветной; в) фильтрующихся суспензий; г) люминесцентный.</p>

ВИХРЕТОКОВЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №5

<p>1. В качестве источника электромагнитного поля при вихретоковом контроле применяется:</p> <p>а) излучатель; б) преобразователь; в) индуктивная катушка; г) пьезоэлектрическая пластина.</p>	<p>2. Какие материалы можно контролировать вихретоковым методом:</p> <p>а) стали; б) цветные сплавы; в) пластмассы; г) бетон.</p>
<p>3. Какие из перечисленных методов контроля относятся к бесконтактным:</p> <p>а) магнитопорошковый; б) ультразвуковой; в) вихретоковый; г) радиационный.</p>	<p>4. Какие виды контроля можно осуществлять с помощью метода вихревых токов:</p> <p>а) выявление и оценка глубинных дефектов б) определение толщины покрытий; в) измерение диаметра трубы; г) обнаружение поверхностных дефектов.</p>
<p>5. Изменение какого параметра при вихретоковом контроле сигнализирует о наличии дефекта в ОК:</p> <p>а) напряжение на катушках ВТП; б) магнитная индукция; в) время; г) электрическое сопротивление</p>	<p>6. При радиометрическом методе контроля способом детектирования дефектоскопической информации является:</p> <p>а) телескопическое изображение на экране; б) регистрация электрических сигналов; в) фиксация изображения на пленке или бумаге;</p>
<p>7. Какой из методов радиационного контроля обладает наибольшей достоверностью:</p> <p>а) радиографический; б) радиометрический; в) радиоскопический</p>	<p>8. Какие из методов НК требуют обязательного двухстороннего доступа к ОК:</p> <p>а) вихретоковый; б) ультразвуковой; в) магнитографический г) радиационный</p>
<p>9. От каких характеристик ОК зависят результаты радиационного контроля:</p> <p>а) химического состава; б) толщины; в) плотности; г) прочности</p>	<p>10. Основным параметром, характеризующим наличие дефекта при радиационном методе контроля является:</p> <p>а) напряжение; б) интенсивность излучения; в) ЭДС; г) активность источника ионизирующего излучения.</p>

ВИХРЕТОКОВЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №6

<p>1. Взаимодействие ВТП и объекта контроля происходит:</p> <p>а) на значительном расстоянии;</p> <p>б) при прямом контакте;</p> <p>в) на небольших расстояниях;</p> <p>г) через слой контактной смазки</p>	<p>2. Какие материалы можно контролировать вихретоковым методом:</p> <p>а) полупроводники;</p> <p>б) электропроводящие;</p> <p>в) ферромагнитные;</p> <p>г) все вышеперечисленные.</p>
<p>3. Для контроля внутренней поверхности труб используются вихретоковые преобразователи:</p> <p>а) накладные;</p> <p>б) проходные;</p> <p>в) раздельно-совмещенные;</p> <p>г) наклонные.</p>	<p>4. Какие дефекты относятся к дефектам эксплуатации:</p> <p>а) усадочные раковины;</p> <p>б) трещины ползучести;</p> <p>в) закаты;</p> <p>г) неметаллические включения.</p>
<p>5. Для дефектоскопии ОК большой толщины при радиационном методе НК в качестве источников излучения используются:</p> <p>а) гамма-дефектоскоп;</p> <p>б) линейный ускоритель;</p> <p>в) рентгеновский аппарат</p>	<p>6. Активной частью гамма-дефектоскопа является:</p> <p>а) рентгеновская трубка;</p> <p>б) электромагнит;</p> <p>в) ампула с радионуклидом.</p>
<p>7. При радиоскопическом методе контроля детектирование дефектоскопической информации осуществляется:</p> <p>а) на экране;</p> <p>б) на пленке;</p> <p>в) в виде импульсов;</p> <p>г) появлением многократных эхо-сигналов</p>	<p>8. Какой из источников ионизирующего излучения обладает наибольшей энергией излучения:</p> <p>а) рентгеновский аппарат;</p> <p>б) микротрон;</p> <p>в) радиоактивный изотоп;</p> <p>г) гамма-дефектоскоп.</p>
<p>9. Можно ли с помощью радиографического метода контроля оценить глубину нахождения дефекта:</p> <p>а) можно;</p> <p>б) нельзя;</p> <p>в) можно, если увеличить время просвечивания ОК.</p>	<p>10. Как на рентгеновской пленке будет выглядеть дефект в виде несплошности сварного шва:</p> <p>а) светлым пятном на темном фоне;</p> <p>б) темным пятном на светлом фоне;</p> <p>в) не виден вообще;</p>

Электронный учебно-методический комплекс

Вспомогательный раздел

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

УЧЕБНЫЕ ПРОГРАММЫ

Минск 2017 г.

193

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Белорусского национального
технического университета

 О.К. Гусев

25.09.2017

Регистрационный № УД- ЭРЛ-2-101 /уч.

**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА
ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1- 43 01 04 «Тепловые электрические станции»

Минск 2017

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта
ОСВО 1-13 01 04-2013

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.Г. Герасимова, доцент кафедры «Тепловые электрические станции»
Белорусского национального технического университета, кандидат
технических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

В.А. Седнин, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и тепло-
техника» Белорусского национального технического университета, доктор тех-
нических наук, профессор;

М.В. Кузин, начальник научно-исследовательской части гражданской авиации
УО «Белорусская государственная академия авиации», кандидат технических
наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального
технического университета
(протокол № 12 от 05.04.2017 г.)

Заведующий кафедрой



И.И. Карвицкий

Методической комиссией энергетического факультета Белорусского
национального технического университета
(протокол № 8 от 27.04.2017 г.)

Председатель методической комиссии



К.В. Доброго

Научно-методическим советом Белорусского национального технического уни-
верситета (протокол № 7 секции №1 от 31.08.2017г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» разработана для специальности 1- 43 01 04 «Тепловые электрические станции».

Поддержание достаточно высокой эксплуатационной надежности оборудования ТЭС – одна из актуальнейших в настоящее время задач. Особенно важна роль повышения надежности оборудования и продления его сроков службы в условиях продолжающегося процесса старения основных производственных фондов предприятий отечественной энергетики. Минимизации возможных последствий старения можно достичь за счет своевременной и квалифицированной диагностики технического состояния оборудования.

Целью преподавания дисциплины «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» является приобретение студентами знаний о современных методах, методиках и средствах контроля и технической диагностики тепломеханического оборудования ТЭС.

Основными задачами преподавания дисциплины является подготовка специалистов для проектно-конструкторской, исследовательской деятельности, эксплуатационной и диагностической работы на всех типах ТЭС.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Материаловедение», «Физика», «Турбины ТЭС», «Парогенераторы ТЭС», «Вспомогательное оборудование ТЭС» и «Материалы оборудования ТЭС».

Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для выполнения дипломного проектирования и дальнейшей профессиональной деятельности, связанной с техническим обслуживанием и диагностированием тепломеханического оборудования ТЭС.

В результате освоения дисциплины «Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС» студент должен:

знать:

- условия эксплуатации тепломеханического оборудования ТЭС;
- виды дефектов и причины повреждаемости тепломеханического оборудования ТЭС;
- методы контроля состояния металла и методики технической диагностики тепломеханического оборудования ТЭС;
- современные средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС;
- действующие ТНПА в области контроля и технической диагностики оборудования ТЭС;

уметь:

- правильно выбирать метод контроля, схему и основные режимы в зависимости от задач контроля;
- на основании расчетов на прочность определять остаточный ресурс работы оборудования ТЭС;

- использовать полученную информацию для предотвращения разрушения при эксплуатации оборудования ТЭС.

владеть:

- навыками работы с приборами неразрушающего контроля и технической диагностики.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно. СЛК-6. Уметь работать в коллективе.

СЛК-6. Уметь работать в коллективе.

СЛК-7. Самостоятельно приобретать и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности.

ПК-4. Осуществлять современными устройствами диагностику и мониторинг состояния энергооборудования.

ПК-20 Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК-24 Анализировать и оценивать тенденции развития техники и технологий.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для очной формы получения высшего образования всего 80 ч., из них аудиторных - 48 часов;

- для заочной формы получения высшего образования всего 80 ч., из них аудиторных - 16 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
5	9	32	16	-	зачет

Таблица 2

Заочная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
6	11	10	-	6	зачет

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Методы и средства контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС

Тема 1.1. Введение

Предмет и задачи курса. Краткий анализ технического состояния оборудования ТЭС Республики Беларусь. Пути повышения надежности и долговечность работы оборудования ТЭС. Закон РБ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Основные положения. Требования промышленной безопасности. Основные нормативные документы в области контроля и технической диагностики тепломеханического оборудования ТЭС.

Тема 1.2. Виды и методы контроля

Основные термины и определения. Виды контроля. Разрушающий и неразрушающий, выборочный и сплошной контроль. Понятие входного, периодического и внеочередного контроля.

Виды дефектов и причины их образования. Влияние дефектов на эксплуатационные характеристики оборудования.

Тема 1.3. Разрушающие методы контроля

Основные положения о разрушающем контроле и условия проведения разрушающих методов контроля.

Механические испытания. Испытания на растяжение. Показатели прочности материалов. Испытания на твердость. Определение твердости по методам Бринелля, Роквелла и Виккерса. Испытания на трещиностойкость. характеристики трещиностойкости. Испытания на ударную вязкость. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости. Усталостные испытания. Испытания на жаропрочность: ползучесть и длительную прочность.

Металлографические методы испытаний. Макроскопический анализ. Способы макроанализа: метод травления, метод отпечатков, метод анализа излома. Микроскопический анализ. Изучение микроструктуры. Электронная микроскопия.

Оценка коррозионной стойкости материалов. Испытания на общую и межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание. Шкала оценки коррозионной стойкости металлов и сплавов.

Тема 1.4. Неразрушающий контроль технического состояния оборудования. Общие положения

Общая характеристика неразрушающего контроля и диагностики. Классификация физических методов неразрушающего контроля. Чувствительность неразрушающих методов контроля. Автоматизация неразрушающего контроля и диагностики. Экспертные системы. Эффективность применения методов и средств неразрушающего контроля и диагностики.

Тема 1.5. Акустические методы неразрушающего контроля

Типы акустических волн, особенности их распространения; акустические свойства сред. Классификация методов акустического контроля: активные и пассивные методы. Основные характеристики методов акустического контроля и области их применения. Пьезоэлектрические преобразователи: классификация и особенности конструкции. Типы пьезоматериалов и их основные технические характеристики. Чувствительность акустического контроля, максимальная и минимальная глубина прозвучивания, разрешающая способность. Ультразвуковая толщинометрия. Ультразвуковая дефектоскопия. Ультразвуковая томография. Структурная схема эхо-импульсного ультразвукового дефектоскопа. Достоинства и недостатки ультразвуковых методов контроля.

Тема 1.6. Вихретоковые методы контроля

Физическая основа вихретокового метода контроля. Классификация вихретоковых методов контроля. Вихретоковые преобразователи: классификация и конструктивные особенности. Вихретоковая толщинометрия, дефектоскопия и структуроскопия. Применение вихретоковых методов контроля при диагностике энергетического оборудования. ТЭС. Достоинства и недостатки вихретокового метода контроля.

Тема 1.7. Капиллярные методы контроля

Физические основы капиллярного контроля. Классификация методов капиллярного контроля. Область применения, производительность и чувствительность яркостного, цветного, люминесцентного и люминесцентно-цветного методов контроля. Дефектоскопические материалы, используемые при капиллярном контроле деталей энергетического оборудования. Технологическая схема капиллярного неразрушающего контроля. Достоинства и недостатки капиллярных методов контроля.

Тема 1.8. Магнитные методы неразрушающего контроля

Основные понятия о магнитных величинах. Классификация методов магнитного контроля. Задачи, решаемые магнитными методами (дефектоскопия, структуроскопия, толщинометрия, фазовый анализ, контроль напряженного состояния и др.) при диагностике энергетического оборудования. Характеристики ферромагнитных материалов. Магнитная дефектоскопия. Магнитное поле дефекта. Способы магнитной дефектоскопии. Магнитопорошковый контроль. Выбор условий намагничивания. Технологии нанесения магнитного порошка. Разрешающая способность. Магнитопорошковые дефектоскопы. Магнитографический контроль. Выбор режимов намагничивания. Особенности магнитографического контроля сварных соединений. Магнитографические дефектоскопы. Физические основы магнитной структуроскопии. Взаимосвязь между основными магнитными и механическими характеристиками сталей. Метод коэр-

цитиметрии. Контроль структуры и физико-механических свойств по остаточной намагниченности. Магнитная толщинометрия. Достоинства и недостатки магнитных методов контроля.

Тема 1.9. Радиационные методы контроля

Физическая основа радиационных методов контроля. Классификация радиационных методов контроля (радиографический, радиоскопический, радиометрический), применяемых на при диагностике энергетического оборудования. Источники ионизирующего излучения для неразрушающего контроля. Индикаторы и первичные преобразователи ионизирующего излучения. Радиографический метод контроля. Способы регистрации излучения. Схемы просвечивания при радиографическом контроле. Оценка чувствительности и качества изображения. Сущность и схемы радиоскопического метода контроля. Сущность радиометрического метода контроля. Радиационная толщинометрия. Радиационный контроль физических свойств материалов. Достоинства и недостатки радиационных методов контроля.

Тема 1.10. Тепловые и оптические методы неразрушающего контроля

Тепловые методы контроля. Основные положения теплового контроля. Виды теплового контроля: активный и пассивный. Приборы теплового контроля. Достоинства теплового метода контроля. Инфракрасная термография (тепловизионный контроль). Технология проведения тепловизионного контроля. Погрешности при инфракрасном контроле.

Оптические методы контроля. Физическая сущность оптических методов контроля. Оптические системы: лупы, микроскопы, эндоскопы. Применение оптических методов контроля при диагностике состояния металла тепломеханического оборудования ТЭС.

Тема 1.11. Средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС

Классификация средств неразрушающего контроля. Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные дефектоскопы: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики дефектоскопов. Средства для дефектоскопического контроля методом проникающих веществ.

Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные толщинометры: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики тощинометров.

Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные структуроскопы: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики структуроскопов.

Устройства для контроля ползучести энергетических сталей.

Раздел II. Контроль и диагностика металла оборудования ТЭС

Тема 2.1. Техническое диагностирование оборудования ТЭС.

Основные понятия и общие положения

Основные термины и определения области контроля и технической диагностики. Техническое состояние и виды технического состояния. Техническое диагностирование и задачи технического диагностирования. Периодичность проведения технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС. Прогнозирование технического состояния. Парковый ресурс и назначенный срок службы тепломеханического оборудования ТЭС.

Организация проведения технического диагностирования. Типовые и индивидуальные программы технического диагностирования. Разработка программы технического диагностирования. Подготовка к техническому диагностированию.

Требования нормативно-технических документов в области контроля и технического диагностирования трубопроводов и тепломеханического оборудования ТЭС.

Тема 2.2. Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС

Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС. Типы сварных соединений. Виды сварки трубопроводов пара и горячей воды, на которые распространяются Правила Госпромнадзора. Виды контроля, применяемые при оценке качества сварных соединений: визуальный и измерительный контроль, стилоскопирование деталей и металла сварного шва, измерение твердости сварного шва, ультразвуковая и радиационная дефектоскопия сварного шва, механические испытания, металлографические исследования, контроль прогонкой металлического шара, капиллярный и магнитопорошковый контроль, гидравлические испытания.

Тема 2.3. Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов

Порядок, объемы и периодичность эксплуатационного контроля металла основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций. Основные методические требования по проведению контроля металла основных элементов котлов и трубопроводов ТЭС. Критерии оценки состояния металла элементов котлов и трубопроводов ТЭС.

Контроль трубопроводов ТЭС. Категории и группы трубопроводов пара и горячей воды (по Правилам Госпромнадзора). Оценка состояния паропроводов ТЭС. Контроль ползучести металла паропроводов и коллекторов. Контроль структуры и механических свойств металла трубопроводов.

Методические рекомендации по диагностике труб поверхностей нагрева и барабанов котлов. Методы объемы и сроки проведения контроля барабанов

паровых котлов.

Тема 2.4. Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин

Порядок, объемы и периодичность эксплуатационного контроля металла основных элементов паровых турбин тепловых электростанций. Основные методические требования по техническому диагностированию основных элементов паровых турбин ТЭС. Критерии оценки состояния металла элементов паровых турбин.

Контроль состояния роторов паровых турбин. Требования к методам дефектоскопического контроля роторов паровых турбин. Контроль осевого канала ротора: методы и методики проведения контроля (визуальный, магнитополюсковый, капиллярный, вихретоковый, ультразвуковой, ДАО-технология, акустико-эмиссионный). Измерение остаточной деформации ползучести роторов высокого и среднего давления. Контроль галтелей, уплотнительных выступов и тепловых канавок, используемые методы и методики контроля. Контроль ободьев дисков паровых турбин.

Контроль состояния металла корпусных деталей паровых турбин. Требования к проведению контроля корпусных деталей паровых турбин. Методы и методики, применяемые при диагностике корпусных деталей паровых турбин.

Контроль лопаток паровых турбин. Подготовка к контролю лопаток паровых турбин. Методы и методики, применяемые при диагностике лопаток паровых турбин. Оценка состояния лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации.

Раздел III. Вибродиагностика

Тема 3.1. Вибродиагностика паровых турбин

Назначение и специфика вибродиагностики паровых турбин. Параметры вибрации. Типы и конструкции вибродатчиков. Способы крепления вибродатчиков на подшипниковых узлах и корпусах турбин. Нормирование вибрации. Оценка вибрации паровых турбин. Диагностические признаки дефектов паровых турбин. Критерии оценки вибрационного состояния. Технические средства измерения и анализа вибрации.

Тема 3.2. Вибродиагностика насосов

Причины возникновения вибрации насосов. Точки и направления контроля вибрации на подшипниковых узлах и корпусах насосов. Диагностические признаки дефектов насосов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Методы и средства контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС							
1.1	Введение	1						
1.2	Виды и методы контроля	1						
1.3	Разрушающие методы контроля	2						
1.4	Неразрушающий контроль технического состояния оборудования. Общие положения	2						
1.5	Акустические методы неразрушающего контроля	2			4			контрольные тесты, отчет по лабораторным работам
1.6	Вихретоковые методы контроля	2			2			контрольные тесты, отчет по лабораторным работам
1.7	Капиллярные методы контроля	2			2			контрольные тесты, отчет по лабораторным работам
1.8	Магнитные методы неразрушающего контроля	2			4			контрольные

								тесты, отчет по лабораторным работам
1.9	Радиационные методы контроля	2						
1.10	Тепловые и оптические методы неразрушающего контроля	2						
1.11	Средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС	2						
2.	Контроль и диагностика металла оборудования ТЭС							
2.1	Техническое диагностирование оборудования ТЭС. Основные понятия и общие положения	2						
2.2	Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС	2						
2.3	Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов	2						
2.4	Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин	2						
3.	Вибродиагностика							
3.1	Вибродиагностика паровых турбин	2			4			контрольные тесты, отчет по лабораторным работам
3.2	Вибродиагностика насосов	2						
	Итого за семестр	32			16			зачет
	Всего аудиторных часов	32			16			

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
заочная форма получения высшего образования¹

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Методы и средства контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС							
1.1	Введение							
1.2	Виды и методы контроля	1						
1.3	Разрушающие методы контроля							
1.4	Неразрушающий контроль технического состояния оборудования. Общие положения	1						
1.5	Акустические методы неразрушающего контроля	1	1					контрольные тесты
1.6	Вихретоковые методы контроля		1					
1.7	Капиллярные методы контроля	1	1					контрольные тесты
1.8	Магнитные методы неразрушающего контроля	1	1					контрольные тесты
1.9	Радиационные методы контроля							
1.10	Тепловые и оптические методы неразрушающего контроля		1					

¹ Темы учебного материала, не указанные в Учебно-методической карте, отводятся на самостоятельное изучение студентом.

1.11	Средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС							
2.	Контроль и диагностика металла оборудования ТЭС							
2.1	Техническое диагностирование оборудования ТЭС. Основные понятия и общие положения	1						
2.2	Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС	1						
2.3	Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов	1						
2.4	Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин	1						
3.	Вибродиагностика							
3.1	Вибродиагностика паровых турбин	1	1					
3.2	Вибродиагностика насосов							
	Итого за семестр	10	6					зачет
	Всего аудиторных часов	10	6					

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС: учеб. пособие/ А.Г.Герасимова. – Минск: Выш.шк., 2011. – 272 с.
2. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС. Лабораторный практикум: учеб. пособие/ А.Г.Герасимова. – Минск: Выш.шк., 2013. – 222 с.
3. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика теплового оборудования ТЭС: учебно-методическое пособие для студентов дневной формы обучения специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» / А.Г.Герасимова, Н.Б. Карницкий. – Минск: БНТУ, 2009. – 123с.
4. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ В.В.Ключев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалев и др.; под общ. ред. В.В.Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656с.
5. Матюнин, В.М. Металловедение в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов / В.М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
6. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов/ П.А.Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440с.
7. Костюк, А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов/ А.Г.Костюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476с.
8. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344с.

Дополнительная литература

1. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочная серия: В 4 кн. / под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 528 с.: ил. – Кн.1.
2. Правила по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением. Утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 28.01.2016 №7 – Минск: Экономэнерго, 2016. –200 с.
3. СТП 09110.17.400-2015. Инструкция по контролю металла и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС ГПО «Белэнерго». – Минск.: ОАО «Белэнергоремналадка», 2015. – 92 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- защита выполненных на практических или лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача зачета по дисциплине.

Перечень тем практических занятий

1. Ультразвуковая толщинометрия сварных соединений.
2. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений и основного металла элементов оборудования ТЭС.
3. Магнитные методы контроля при диагностике тепломеханического оборудования ТЭС.
4. Капиллярная дефектоскопия.
5. Вихретоковая дефектоскопия и толщинометрия.
6. Вибродиагностика паровых турбин.

Перечень тем лабораторных работ

1. Ультразвуковая дефектоскопия.
2. Ультразвуковой контроль толщины изделий.
3. Обнаружение дефектов вихретоковым методом.
4. Определение толщины покрытий вихретоковым толщиномером.
5. Обнаружение дефектов магнитопорошковым методом.
6. Определение остаточной напряженности магнитного поля феррозондовым методом.
7. Магнитная структуроскопия. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния деталей оборудования.
8. Капиллярная дефектоскопия.
9. Измерение твердости динамическим методом.
10. Контроль параметров вибрации.

Тематика рефератов

1. Визуально-измерительный контроль лопаточного аппарата паровых турбин.
2. Визуально-измерительный контроль сварных соединений.
3. Ультразвуковой контроль дисков паровых турбин.
4. Ультразвуковой контроль сварных соединений.
5. Радиационный контроль сварных соединений.
6. Магнитографический контроль сварных соединений.
7. Магнитопорошковый контроль сварных соединений.
8. Капиллярный контроль сварных соединений.
9. Контроль сварных соединений методом стилоскопирования.
10. Контроль состояния металла паропровода.
11. Визуально-измерительный контроль ротора паровой турбины.
12. Контроль состояния металла ротора паровой турбины с использованием ДАО-технологии.
13. Магнитопорошковый контроль осевого канала ротора паровой турбины.
14. Вихретоковый контроль осевого канала ротора паровой турбины.
15. Ультразвуковой контроль осевого канала ротора паровой турбины.
16. Контроль ротора паровой турбины методом акустической эмиссии.
17. Контроль галтелей и тепловых канавок ротора паровой турбины.
18. Исследование микроструктуры и измерение твердости роторов паровых турбин обработавших парковый ресурс.
19. Контроль состояния металла корпусных деталей паровых турбин.
20. Контроль и диагностика состояния рабочих лопаток паровых турбин.
21. Вихретоковый контроль лопаток паровых турбин.
22. Цветная дефектоскопия лопаток паровых турбин.
23. Магнитопорошковая дефектоскопия лопаток паровых турбин.
24. Ультразвуковой контроль лопаток паровых турбин.
25. Испытания на межкристаллитную коррозию.
26. Оценка показателей жаропрочности металла.
27. Разрушающий контроль механических свойств при диагностике энергетического оборудования.
28. Безобразцовый контроль структуры металлов и сплавов.
29. Стационарные системы вибрационного состояния паровых турбин.

Перечень контрольных вопросов

для самостоятельной работы студентов

1. Виды и методы контроля металлоконструкций теплоэнергетического оборудования.
2. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
3. Акустические методы НК, область применения и классификация.
4. Основные параметры УЗК.

5. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
6. Классификация ПЭП.
7. Эхо-метод ультразвукового контроля.
8. Технология проведения УЗК.
9. Область применения УЗК.
10. Классификация магнитных методов контроля.
11. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
12. Магнитографический метод контроля сварных швов.
13. Метод магнитной памяти металлов.
14. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
15. Физические явления капиллярного контроля.
16. Технология проведения капиллярного контроля.
17. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
18. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
19. Классификация вихретоковых преобразователей.
20. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
21. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
22. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
23. Классификация средств НК.
24. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
25. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
26. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
27. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.
28. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
29. Структурный анализ металлов и сплавов методами РК.
30. Коррозионные испытания.

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- выполнение патентно-информационного поиска;
- подготовка рефератов по индивидуальным темам;
- подготовка сообщений, тематических докладов, презентаций по заданным темам;
- составление тематической подборки нормативно-технической документации, литературных источников, интернет-источников;
- проработка тем (вопросов), вынесенных на самостоятельное изучение.

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Белорусского национального
технического университета

 О.К. Гусев

25.09.2017

Регистрационный № УД- 9949-102 /уч.

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Учебная программа для специальности

1- 53 01 04 Автоматизация и управление

теплоэнергетическими процессами

Минск 2017

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта
ОСВО 1-53 01 04-2013

СОСТАВИТЕЛЬ:

А.Г. Герасимова, доцент кафедры «Тепловые электрические станции»
Белорусского национального технического университета, кандидат
технических наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

В.А. Сельвин, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника и тепло-
техника» Белорусского национального технического университета, доктор тех-
нических наук, профессор;

М.В. Кудин, начальник научно-исследовательской части гражданской авиации
УО «Белорусская государственная академия авиации», кандидат технических
наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального
технического университета
(протокол № 12 от 05.04.2017 г.)

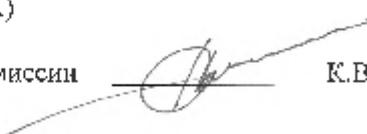
Заведующий кафедрой



Н.Б.Карницкий

Методической комиссией энергетического факультета Белорусского
национального технического университета
(протокол № 8 от 27.04.2017 г.)

Председатель методической комиссии



К.В.Доброго

Научно-методическим советом Белорусского национального технического уни-
верситета (протокол № ____ секции №1 от _____ 2017 г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Контроль и диагностика технологического оборудования ТЭС» разработана для специальности 1- 53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами».

Целью преподавания дисциплины «Контроль и диагностика технологического оборудования ТЭС» является приобретение студентами знаний для решения задач увеличения наработки технологического оборудования ТЭС за пределами расчетного срока эксплуатации.

Особое внимание в программе уделено изучению современных методов и средств неразрушающего контроля технического состояния и вопросам проведения диагностики с целью повышения сроков безопасной эксплуатации оборудования ТЭС.

Базой для изучения дисциплины являются такие дисциплины как «Физика», «Турбомашины», «Котельные установки», «Вспомогательное оборудование электростанций» и «Конструкционные материалы».

Основной задачей преподавания дисциплины является подготовка специалистов для проектно-конструкторской, исследовательской деятельности и эксплуатационной и диагностической работы на всех типах ТЭС.

В результате освоения дисциплины «Контроль и диагностика технологического оборудования ТЭС» студент должен:

знать:

- условия эксплуатации тепломеханического оборудования ТЭС;
- методы технической диагностики оборудования ТЭС;
- физическую сущность современных методов неразрушающего контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС;
- области применения методов и средств неразрушающего контроля для технологического оборудования ТЭС;
- современные средства технического диагностирования;
- действующие ТНПА в области контроля и технической диагностики оборудования ТЭС;

уметь:

- правильно выбирать метод контроля, схему и основные режимы в зависимости от задач контроля;
- на основании расчетов на прочность определять остаточный ресурс работы оборудования ТЭС;
- использовать полученную информацию для предотвращения разрушения при эксплуатации оборудования ТЭС.

владеть:

- навыками работы с приборами неразрушающего контроля и технической диагностики.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для реше-

ния теоретических и практических задач.

АК-10. Владеть современными информационными технологиями.

ПК-2. Создавать условия для соответствия режимов технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической и тепловой энергии действующим стандартам, нормам и правилам.

ПК-6. Осуществлять диагностирование и мониторинг состояния теплоэнергетического оборудования, средств защиты и автоматизации.

ПК-9. Обеспечивать обучение правилам техники безопасности и технической эксплуатации персонала, работающего с электрическим и тепловым оборудованием, осуществлять проверку.

ПК-4. Осуществлять современными устройствами диагностику и мониторинг состояния энергооборудования.

ПК-23. Составлять производственную и отчетную документацию.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено для очной формы получения высшего образования всего 140 ч., из них аудиторных – 64 часов;

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
5	9	32	–	32	экзамен

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел 1. Методы и средства контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС

Тема 1.1. Введение

Предмет и задачи курса. Краткий анализ технического состояния оборудования ТЭС Республики Беларусь. Пути повышения надежности и долговечность работы оборудования ТЭС. Закон РБ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Основные положения. Требования промышленной безопасности. Основные нормативные документы в области контроля и технической диагностики тепломеханического оборудования ТЭС. Автоматизация неразрушающего контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС.

Тема 1.2. Виды и методы контроля

Основные термины и определения. Виды контроля. Разрушающий и неразрушающий, выборочный и сплошной контроль. Понятие входного, периодического и внеочередного контроля.

Виды дефектов и причины их образования. Влияние дефектов на эксплуатационные характеристики оборудования.

Тема 1.3. Разрушающие методы контроля

Основные положения о разрушающем контроле и условия проведения разрушающих методов контроля.

Механические испытания. Испытания на растяжение. Показатели прочности материалов. Испытания на твердость. Определение твердости по методам Бринелля, Роквелла и Виккерса. Испытания на трещиностойкость. характеристики трещиностойкости. Испытания на ударную вязкость. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости. Усталостные испытания. Испытания на жаропрочность: ползучесть и длительную прочность.

Металлографические методы испытаний. Макроскопический анализ. Способы макроанализа: метод травления, метод отпечатков, метод анализа излома. Микроскопический анализ. Изучение микроструктуры. Электронная микроскопия.

Оценка коррозионной стойкости материалов. Испытания на общую и межкристаллитную коррозию и коррозионное растрескивание. Шкала оценки коррозионной стойкости металлов и сплавов.

Тема 1.4. Неразрушающий контроль технического состояния оборудования. Общие положения

Общая характеристика неразрушающего контроля и диагностики. Классификация физических методов неразрушающего контроля. Чувствительность неразрушающих методов контроля. Автоматизация неразрушающего контроля и диагностики. Экспертные системы. Эффективность применения методов и средств неразрушающего контроля и диагностики.

Тема 1.5. Акустические методы неразрушающего контроля

Типы акустических волн, особенности их распространения; акустические свойства сред. Классификация методов акустического контроля: активные и пассивные методы. Основные характеристики методов акустического контроля и области их применения. Пьезоэлектрические преобразователи: классификация и особенности конструкции. Типы пьезоматериалов и их основные технические характеристики. Чувствительность акустического контроля, максимальная и минимальная глубина прозвучивания, разрешающая способность. Ультразвуковая толщинометрия. Ультразвуковая дефектоскопия. Ультразвуковая томография. Структурная схема эхо-импульсного ультразвукового дефектоскопа. Достоинства и недостатки ультразвуковых методов контроля.

Тема 1.6. Вихретоковые методы контроля

Физическая основа вихретокового метода контроля. Классификация вихретоковых методов контроля. Вихретоковые преобразователи: классификация и

конструктивные особенности. Вихретоковая толщинометрия, дефектоскопия и структуроскопия. Применение вихретоковых методов контроля при диагностике энергетического оборудования. ТЭС. Достоинства и недостатки вихретокового метода контроля.

Тема 1.7. Капиллярные методы контроля

Физические основы капиллярного контроля. Классификация методов капиллярного контроля. Область применения, производительность и чувствительность яркостного, цветного, люминесцентного и люминесцентно-цветного методов контроля. Дефектоскопические материалы, используемые при капиллярном контроле деталей энергетического оборудования. Технологическая схема капиллярного неразрушающего контроля. Достоинства и недостатки капиллярных методов контроля.

Тема 1.8. Магнитные методы неразрушающего контроля

Основные понятия о магнитных величинах. Классификация методов магнитного контроля. Задачи, решаемые магнитными методами (дефектоскопия, структуроскопия, толщинометрия, фазовый анализ, контроль напряженного состояния и др.) при диагностике энергетического оборудования. Характеристики ферромагнитных материалов. Магнитная дефектоскопия. Магнитное поле дефекта. Способы магнитной дефектоскопии. Магнитопорошковый контроль. Выбор условий намагничивания. Технологии нанесения магнитного порошка. Разрешающая способность. Магнитопорошковые дефектоскопы. Магнитографический контроль. Выбор режимов намагничивания. Особенности магнитографического контроля сварных соединений. Магнитографические дефектоскопы. Физические основы магнитной структуроскопии. Взаимосвязь между основными магнитными и механическими характеристиками сталей. Метод коэрцитиметрии. Контроль структуры и физико-механических свойств по остаточной намагниченности. Магнитная толщинометрия. Достоинства и недостатки магнитных методов контроля.

Тема 1.9. Радиационные методы контроля

Физическая основа радиационных методов контроля. Классификация радиационных методов контроля (радиографический, радиоскопический, радиометрический), применяемых на при диагностике энергетического оборудования. Источники ионизирующего излучения для неразрушающего контроля. Индикаторы и первичные преобразователи ионизирующего излучения. Радиографический метод контроля. Способы регистрации излучения. Схемы просвечивания при радиографическом контроле. Оценка чувствительности и качества изображения. Сущность и схемы радиоскопического метода контроля. Сущность радиометрического метода контроля. Радиационная толщинометрия. Ра-

диационный контроль физических свойств материалов. Достоинства и недостатки радиационных методов контроля.

Тема 1.10. Тепловые и оптические методы неразрушающего контроля

Тепловые методы контроля. Основные положения теплового контроля. Виды теплового контроля: активный и пассивный. Приборы теплового контроля. Достоинства теплового метода контроля. Инфракрасная термография (тепловизионный контроль). Технология проведения тепловизионного контроля. Погрешности при инфракрасном контроле.

Оптические методы контроля. Физическая сущность оптических методов контроля. Оптические системы: лупы, микроскопы, эндоскопы. Применение оптических методов контроля при диагностике состояния металла тепломеханического оборудования ТЭС. Оптико-телевизионный контроль топки котлов.

Тема 1.11. Средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС

Классификация средств неразрушающего контроля. Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные дефектоскопы: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики дефектоскопов. Средства для дефектоскопического контроля методом проникающих веществ.

Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные толщиномеры: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики толщиномеров.

Акустические, вихретоковые, магнитные, радиационные структуроскопы: назначение, основные конструктивные особенности, параметры, определяющие достоверность контроля, технические характеристики структуроскопов.

Устройства для контроля ползучести энергетических сталей.

Раздел 11. Контроль и диагностика металла оборудования ТЭС

Тема 2.1. Техническое диагностирование оборудования ТЭС. Основные понятия и общие положения

Основные термины и определения области контроля и технической диагностики. Техническое состояние и виды технического состояния. Техническое диагностирование и задачи технического диагностирования. Периодичность проведения технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС. Прогнозирование технического состояния. Парковый ресурс и назначенный срок службы тепломеханического оборудования ТЭС.

Организация проведения технического диагностирования. Типовые и индивидуальные программы технического диагностирования. Разработка программы технического диагностирования. Подготовка к техническому диагностированию.

Требования нормативно-технических документов в области контроля и технического диагностирования трубопроводов и тепломеханического оборудования ТЭС.

Тема 2.2. Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС

Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС. Типы сварных соединений. Виды сварки трубопроводов пара и горячей воды, на которые распространяются Правила Госпромнадзора. Виды контроля, применяемые при оценке качества сварных соединений: визуальный и измерительный контроль, стилоскопирование деталей и металла сварного шва, измерение твердости сварного шва, ультразвуковая и радиационная дефектоскопия сварного шва, механические испытания, металлографические исследования, контроль прогонкой металлического шара, капиллярный и магнитопорошковый контроль, гидравлические испытания.

Тема 2.3. Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов

Порядок, объемы и периодичность эксплуатационного контроля металла основных элементов котлов и трубопроводов тепловых электростанций. Основные методические требования по проведению контроля металла основных элементов котлов и трубопроводов ТЭС. Критерии оценки состояния металла элементов котлов и трубопроводов ТЭС.

Контроль трубопроводов ТЭС. Категории и группы трубопроводов пара и горячей воды (по Правилам Госпромнадзора). Оценка состояния паропроводов ТЭС. Контроль ползучести металла паропроводов и коллекторов. Контроль структуры и механических свойств металла трубопроводов.

Методические рекомендации по диагностике труб поверхностей нагрева

и барабанов котлов. Методы объемы и сроки проведения контроля барабанов паровых котлов.

Тема 2.4. Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин

Порядок, объемы и периодичность эксплуатационного контроля металла основных элементов паровых турбин тепловых электростанций. Основные методические требования по техническому диагностированию основных элементов паровых турбин ТЭС. Критерии оценки состояния металла элементов паровых турбин.

Контроль состояния роторов паровых турбин. Требования к методам дефектоскопического контроля роторов паровых турбин. Контроль осевого канала ротора: методы и методики проведения контроля (визуальный, магнитопорошковый, капиллярный, вихретоковый, ультразвуковой, ДАО-технология, акустико-эмиссионный). Измерение остаточной деформации ползучести роторов высокого и среднего давления. Контроль галтелей, уплотнительных выступов и тепловых канавок, используемые методы и методики контроля. Контроль ободьев дисков паровых турбин.

Контроль состояния металла корпусных деталей паровых турбин. Требования к проведению контроля корпусных деталей паровых турбин. Методы и методики, применяемые при диагностике корпусных деталей паровых турбин.

Контроль лопаток паровых турбин. Подготовка к контролю лопаток паровых турбин. Методы и методики, применяемые при диагностике лопаток паровых турбин. Оценка состояния лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации.

Раздел III. Автоматизация контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС. Вибродиагностика

Тема 3.1. Автоматизированные системы контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС

Перспективы применения автоматизированных систем неразрушающего контроля теплотехнического оборудования ТЭС. Система автоматизированного контроля водоотпускных отверстий барабанов котлов высокого давления. Автоматизированный комплекс для контроля роторов паровых турбин со стороны осевого канала. Автоматизированные комплексы для контроля внутренней поверхности трубопроводов и коллекторов.

Автоматизированные системы контроля и мониторинга температурного режима и остаточного ресурса поверхностей нагрева паровых котлов.

Автоматизированные системы контроля лопаток паровых турбин.

Диагностика тепловой экономичности турбин с использованием стационарных вычислительных комплексов.

Автоматизированные системы акустико-эмиссионного контроля оборудования и трубопроводов ТЭС.

Тема 3.2. Вибродиагностика паровых турбин

Назначение и специфика вибродиагностики паровых турбин. Параметры вибрации. Типы и конструкции вибродатчиков. Способы крепления вибродатчиков на подшипниковых узлах и корпусах турбин. Нормирование вибрации. Оценка вибрации паровых турбин. Диагностические признаки дефектов паровых турбин. Критерии оценки вибрационного состояния. Технические средства измерения и анализа вибрации. Обзор виброизмерительных автоматизированных систем

Тема 3.3. Вибродиагностика насосов

Причины возникновения вибрации насосов. Точки и направления контроля вибрации на подшипниковых узлах и корпусах насосов. Диагностические признаки дефектов насосов.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Методы и средства контроля и диагностики тепломеханического оборудования ТЭС							
1.1	Введение	1						
1.2	Виды и методы контроля	1						
1.3	Разрушающие методы контроля	1						
1.4	Неразрушающий контроль технического состояния оборудования. Общие положения	1						
1.5	Акустические методы неразрушающего контроля	2	6					контрольные тесты
1.6	Вихретоковые методы контроля	2	4					контрольные тесты
1.7	Капиллярные методы контроля	2	4					контрольные тесты
1.8	Магнитные методы неразрушающего контроля	2	4					контрольные тесты
1.9	Радиационные методы контроля	2						
1.10	Тепловые и оптические методы неразрушающего контроля	2	2					
1.11	Средства технического диагностирования тепломеханического оборудования ТЭС	2	2					
2.	Контроль и диагностика металла оборудования ТЭС							

2.1	Техническое диагностирование оборудования ТЭС. Основные понятия и общие положения	2						
2.2	Контроль качества сварных соединений оборудования и трубопроводов ТЭС	2	2					
2.3	Контроль и диагностика трубопроводов и основных элементов котлов	2	2					
2.4	Техническая диагностика состояния металла основных элементов паровых турбин	2	2					
3.	Автоматизация контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС. Вибродиагностика							
3.1	Автоматизированные системы контроля и диагностики технологического оборудования ТЭС	2	2					
3.2	Вибродиагностика паровых турбин	2	2					контрольные тесты
3.3	Вибродиагностика насосов	2						
	Итого за семестр	32	32					экзамен
	Всего аудиторных часов	32	32					

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

9. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС: учеб. пособие/ А.Г.Герасимова. – Минск: Выш.шк., 2011. – 272 с.
10. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС. Лабораторный практикум: учеб. пособие/ А.Г.Герасимова. – Минск: Выш.шк., 2013. – 222 с.
11. Герасимова, А.Г. Контроль и диагностика теплового оборудования ТЭС: учебно-методическое пособие для студентов дневной формы обучения специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» / А.Г.Герасимова, Н.Б. Карницкий. – Минск: БНТУ, 2009. – 123с.
12. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ В.В.Ключев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалев и др.; под общ. ред. В.В.Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656с.
13. Матюнин, В.М. Металловедение в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов / В.М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
14. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов/ П.А.Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440с.
15. Костюк, А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов/ А.Г.Костюк. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476с.
16. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344с.

Дополнительная литература

1. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочная серия: В 4 кн. / под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 528 с.: ил. – Кн.1.
2. Правила по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением. Утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 28.01.2016 №7 – Минск: Экономэнерго, 2016. –200 с.
3. СТП 09110.17.400-2015. Инструкция по контролю металла и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС ГПО «Белэнерго». – Минск.: ОАО «Белэнергоремналадка», 2015. – 92 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;
- защита выполненных на практических занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача экзамена по дисциплине.

Перечень тем практических занятий

1. Физическая основа и принцип действия ультразвуковых приборов (толщиномеров, дефектоскопов, структуроскопов, томографов).
2. Изучение основ настройки и калибровки ультразвуковых приборов, основные параметры контроля.
3. Ультразвуковая толщинометрия сварных соединений.
4. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений и основного металла элементов оборудования ТЭС.
5. Магнитные методы контроля при диагностике теплотехнического оборудования ТЭС.
6. Магнитопорошковый контроль основного металла и сварных соединений.
7. Магнитная структуроскопия (коэрциметрия) для определения напряженного состояния, механических свойств и химического состава.
8. Изучение технологии проведения капиллярного контроля, оценка качества дефектоскопических материалов.
9. Выявление поверхностных дефектов методом цветной дефектоскопии.
10. Физическая основа и принцип действия вихретоковых приборов (толщиномеров, дефектоскопов, структуроскопов), настройка и калибровка вихретоковых приборов.
11. Использование вихретокового метода контроля для обнаружения поверхностных дефектов.
12. Применение вихретоковой толщинометрии для оценки толщины покрытий и качества поверхности металлов.

13. Оценка механических свойств металлов неразрушающими методами контроля. Определение твердости динамическим методом.
14. Технические средства вибродиагностики: коллекторы, стендовые системы, стационарные системы вибромониторинга.
15. Изучение основ вибродиагностики и балансировки с использованием модели роторного оборудования и стендовой системы.
16. Исследование параметров вибрации на моделях паровых турбин с использованием стационарного вибродиагностического комплекса.

Тематика рефератов

1. Визуально-измерительный контроль лопаточного аппарата паровых турбин.
2. Визуально-измерительный контроль сварных соединений.
3. Ультразвуковой контроль дисков паровых турбин.
4. Ультразвуковой контроль сварных соединений.
5. Радиационный контроль сварных соединений.
6. Магнитографический контроль сварных соединений.
7. Магнитопорошковый контроль сварных соединений.
8. Капиллярный контроль сварных соединений.
9. Контроль сварных соединений методом стилоскопирования.
10. Контроль состояния металла паропровода.
11. Визуально-измерительный контроль ротора паровой турбины.
12. Контроль состояния металла ротора паровой турбины с использованием ДАО-технологии.
13. Магнитопорошковый контроль осевого канала ротора паровой турбины.
14. Вихретоковый контроль осевого канала ротора паровой турбины.
15. Ультразвуковой контроль осевого канала ротора паровой турбины.
16. Контроль ротора паровой турбины методом акустической эмиссии.
17. Контроль галтелей и тепловых канавок ротора паровой турбины.
18. Исследование микроструктуры и измерение твердости роторов паровых турбин обработавших паром ресурс.
19. Контроль состояния металла корпусных деталей паровых турбин.
20. Контроль и диагностика состояния рабочих лопаток паровых турбин.
21. Вихретоковый контроль лопаток паровых турбин.
22. Цветная дефектоскопия лопаток паровых турбин.
23. Магнитопорошковая дефектоскопия лопаток паровых турбин.
24. Ультразвуковой контроль лопаток паровых турбин.
25. Испытания на межкристаллитную коррозию.
26. Оценка показателей жаропрочности металла.
27. Разрушающий контроль механических свойств при диагностике энергетического оборудования.
28. Безобразцовый контроль структуры металлов и сплавов.
29. Стационарные системы вибрационного состояния паровых турбин.

30. Причины возникновения вибрации насосов.
31. Диагностические признаки дефектов насосов.
32. Перспективы применения автоматизированных систем неразрушающего контроля теплотехнического оборудования ТЭС.

Перечень контрольных вопросов для самостоятельной работы студентов

1. Виды и методы контроля металлоконструкций теплоэнергетического оборудования.
2. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
3. Акустические методы НК, область применения и классификация.
4. Основные параметры УЗК.
5. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
6. Классификация ПЭП.
7. Эхо-метод ультразвукового контроля.
8. Технология проведения УЗК.
9. Область применения УЗК.
10. Классификация магнитных методов контроля.
11. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
12. Магнитографический метод контроля сварных швов.
13. Метод магнитной памяти металлов.
14. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
15. Физические явления капиллярного контроля.
16. Технология проведения капиллярного контроля.
17. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
18. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
19. Классификация вихретоковых преобразователей.
20. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
21. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
22. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
23. Классификация средств НК.
24. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
25. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
26. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
27. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.
28. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
29. Структурный анализ металлов и сплавов методами РК.
30. Коррозионные испытания.

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- выполнение патентно-информационного поиска;
- подготовка рефератов по индивидуальным темам;
- подготовка сообщений, тематических докладов, презентаций по заданным темам;
- составление тематической подборки нормативно-технической документации, литературных источников, интернет-источников;
- проработка тем (вопросов), вынесенных на самостоятельное изучение.

**ПЕРЕЧЕНЬ ТИПА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ АККРЕДИТАЦИИ
СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

№ п/п	Обозначение	Наименование
1	2	3
1	ТКП 051-2007	Котлы водогрейные водотрубные промышленной энергетики с температурой нагрева воды свыше 388 К (115 С)
2	ТКП 053-2007	Котлы паровые водотрубные промышленной энергетики с рабочим давлением свыше 0,07 МПа до 4,0 МПа и производительностью свыше 2,5 т/ч. Порядок проведения технического диагностирования
3	ТКП 054-2007	Техническое диагностирование и продление назначенного ресурса (назначенного срока службы) безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах. Общие положения
4	СТБ 1133-98	Соединения сварные. Метод контроля внешним осмотром и измерениями. Общие требования
5	СТБ 1172-99	Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Общие положения
6	СТБ ЕН 1714-2002	Контроль неразрушающий сварных соединений. Ультразвуковой метод
7	СТБ ЕН 1289-2003	Контроль неразрушающий сварных соединений. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Границы допустимости
8	СТБ ЕН 1291-2003	Контроль неразрушающий сварных соединений. Магнитопорошковый метод. Границы допустимости
9	СТБ ISO 6520-1-2009	Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов по геометрическим параметрам в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением
10	СТБ 8026-2006	Измерение твердости. Методы оценивания неопределенности измерений
11	СТБ ЕН 1711-2006	Контроль неразрушающий сварных соединений. Контроль вихретоковый посредством анализа сигнала на комплексной плоскости
12	ГОСТ 30242-97	Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Квалификация, обозначение и определения
13	ГОСТ 5264-80	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
14	ГОСТ 14782-86	Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые
15	ГОСТ 23479-79	Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования
16	ГОСТ 21105-87	Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод
17	ГОСТ 24289-80 X	Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения
18	ГОСТ 24450-80	Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения
19	ГОСТ 24522-80	Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения
	ГОСТ 23829-85	Контроль неразрушающий акустический. Термины и оп-

		ределения
21	ГОСТ 17410-78	Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии
22	ГОСТ 9012-59	Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю
23	ГОСТ 9013-59	Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу
24	ГОСТ 20911-89	Техническая диагностика. Термины и определения
25	ГОСТ 3242-79	Соединения сварные. Методы контроля качества
26	ГОСТ 14771-76	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные
27	ГОСТ 12503-75	Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования
28	ГОСТ 16037-80	Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
29	ГОСТ 22761-77	Металлы и сплавы. Методы измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия
30	ГОСТ 18661-73	Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка
31	СТП 09110.17.400-15	Инструкция по контролю металла и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций концерна «Белэнерго»
32	СТП 09110.17.401-06	Инструкция о порядке обследования и продления срока службы паропроводов сверх паркового ресурса
33	СТП 34.15.027-89 (РТМ-1С-89)	Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже ремонте оборудования электростанций
34	СТП 34.17.205-90	Инструкция по приварке штуцеров к коллекторам из стали 12Х1МФ аустенитными электродами без термообработки
35	СТП 34.17.206	Инструкция по технологии ремонтной заварки корпусных деталей паровых турбин и арматуры перлитными электродами без термической обработки
36	СТП 34.17.207	Руководящий нормативный документ. Инструкция по оформлению технической документации на сварочные работы при ремонте оборудования ТЭС
37	СТП 09110.17.309-10	Типовая инструкция по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций и сетевых трубопроводов
38	СТП 34.17.307-89	Методические указания по ультразвуковой дефектоскопии угловых сварных соединений штуцеров с доньшками коллекторов паровых котлов тепловых электростанций
39	СТП 34.17.401-88	Положение о входном контроле металла теплоэнергетических установок с давлением 9 МПа и выше
40	СТП 34.17.402	Инструкция по контролю поверхности литых корпусных деталей паровых турбин электростанций до начала эксплуатации
41	СТП 34.17.403	Инструкция по ультразвуковой дефектоскопии металла камер пароохладителей в местах подвода впрыскиваемой воды
42	СТП 34.17.407	Инструкция по ультразвуковому контролю цельнокова-

		ных роторов паровых турбин со стороны осевого канала (И 34-70-005-82)
43	СТП 34.17.408	Методические указания по магнитопорошковой дефектоскопии металла дисков ротора турбины (МУ 34-70-054-83)
44	СТП 34.17.415	Методические указания по проведению ультразвукового контроля крепежа энергооборудования (МУ 34-70-081-84)
45	СТП 34.17.416	Методические указания по проведению спектрального анализа металла деталей энергетических установок с помощью стилоскопа
46	СТП 34.17.417	Положение об оценке ресурса, порядке контроля и замены гибов необогреваемых труб котлов с рабочим давлением 10 и 14 МПа (ПЗ4-70-005-85)
47	СТП 34.17.418	Инструкция по дефектоскопии гибов трубопроводов из перлитной стали (И № 23 СД-80)
48	СТП 34.17.423	Методические указания по магнитопорошковой дефектоскопии коррозионно-поврежденных рабочих лопаток паровых турбин в зоне фазового перехода (МУ 34-70-167-87)
49	СТП 34.17.427-89	Методические указания. Контроль неразрушающий на тепловых электростанциях. Общие требования
50	СТП 34.26.608	Основные положения по обследованию и технологии ремонта барабанов котлов высокого давления из стали 16 ГНМ, 16 ГНМА и 22К
51	СТП 34.15.401	Типовая инструкция по организации и проведению входного контроля энергетического оборудования и средств управления на энергопредприятиях Минэнерго СССР
52	СТП 09110.16.300-03	Положение о ведомственной аттестации испытательных лабораторий предприятий Белорусской энергосистемы
53	СТП 09110.17.429-09	Инструкция по продлению срока службы сосудов, работающих под давлением
54	СТП 09110.11.100-01	Методические указания о порядке перевода в разряд индикаторов рабочих средств измерений, применяемых на предприятиях Белорусской энергосистемы
55	ТР ТС 032/2013	О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением
56	ТКП 45 4 02 182-2009	Тепловые сети. Строительные нормы проектирования
57		Правила по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением. Утв. Постановлением МЧС РБ от 28.01.2019 №7