

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики»  
Кафедра «Метрология и энергетика»

СОГЛАСОВАНО  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Новиков А.А.  
\_\_\_\_\_ 2017 г.

СОГЛАСОВАНО  
Директор института  
\_\_\_\_\_ О.П. Реут  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

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

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ  
ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

специальности переподготовки  
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание  
энергооборудования организаций»

Составитель:  
доцент Новиков А.А., к.т.н., доцент;  
доцент Герасимова А.Г., к.т.н., доцент;  
доцент Пономаренко Е.Г., к.т.н., доцент

Рассмотрено и утверждено  
на заседании Совета института «29» декабря 2016 г.,  
протокол № 4

## ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ

### **Теоретический раздел:**

– «Методы диагностики и контроля энергооборудования» – курс лекций;

### **Практический раздел:**

– «Методы диагностики и контроля энергооборудования» – перечень тем практических занятий;

### **Контроль знаний:**

– «Методы диагностики и контроля энергооборудования» – перечень вопросов, выносимых на зачет, контрольные тесты;

### **Вспомогательный раздел:**

– «Методы диагностики и контроля энергооборудования» – учебная программа для учреждения высшего образования, перечень нормативных документов в области контроля и диагностики теплоэнергетического оборудования.

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

### *Цели создания ЭУМК*

ЭУМК по дисциплине «Методы диагностики и контроля энергооборудования» предназначен для помощи слушателям курсов переподготовки при изучении дисциплины «Методы диагностики и контроля энергооборудования». 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 дисциплине «Методы диагностики и контроля энергооборудования»;
- практическая часть состоит из перечня тем практических занятий;
- раздел контроля знаний содержит вопросы к зачету и контрольные тесты;
- вспомогательный раздел содержит учебную программу по дисциплине «Методы диагностики и контроля энергооборудования».

### *Рекомендации по организации работы с ЭУМК:*

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

ЭУМК можно использовать слушателям курсов переподготовки для подготовки к лекциям, практическим занятиям и различным формам аттестации по дисциплине «Методы диагностики и контроля энергооборудования»

Курс лекций .....	7
Тема 1. Контроль и диагностика технического состояния теплоэнергетического оборудования. Основные положения. ....	7
1.1. Основные Термины и определения в области контроля и технической диагностики .....	7
1.2. Классификация видов контроля.....	9
1.3. Виды дефектов и причины их образования .....	11
1.4. Условия работы конструкционных материалов теплоэнергетического оборудования .....	13
1.5. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам теплоэнергетического оборудования .....	16
1.6. Основные служебные свойства металла теплоэнергетического оборудования .....	17
1.6.1. Жаропрочность.....	17
1.6.2. Жаростойкость .....	18
1.6.3. Коррозионная стойкость.....	19
1.6.4. Эрозионная стойкость.....	23
Тема 2. Разрушающие методы контроля.....	25
2.1. Механические испытания.....	26
2.1.1. Испытания на растяжение .....	27
2.1.2. Испытания на твердость .....	31
2.1.3. Испытания на трещиностойкость .....	34
2.1.4. Испытания на ударную вязкость .....	35
2.1.5. Испытания на хладноломкость и критическую температуру хрупкости .....	38
2.1.6. Усталостные испытания .....	39
2.1.7. Испытания на жаропрочность.....	41
2.2. Методы исследования строения металлов и сплавов .....	45
2.2.1. Изучение макроструктуры металла .....	45
2.2.2. Изучение микроструктуры металла.....	46
2.3. Оценка коррозионной стойкости материалов .....	47
2.3.1. Испытания на общую коррозию .....	47
2.3.2. Испытания на межкристаллитную коррозию .....	48
2.3.3. Испытания на коррозионное растрескивание.....	49
Тема 3. Методы неразрушающего контроля, применяемые при диагностике металлоконструкций теплоэнергетического оборудования .....	49
3.1. Физические методы неразрушающего контроля .....	50
3.1.1. Акустические методы неразрушающего контроля .....	52
3.1.2. Методы акустико-эмиссионной диагностики .....	60
3.1.3. Вихретоковые методы контроля .....	62
3.1.4. Магнитные методы контроля .....	66
3.1.4. Капиллярные методы контроля .....	72
3.1.5. Радиационные методы неразрушающего контроля .....	77
3.2. Безобразцовые методы контроля микроструктуры структуры и состава сталей .....	82
3.2.1. Безобразцовый контроль микроструктуры структуры металла.....	82
3.2.2. Контроль химического и марочного состава сталей без разрушения деталей .....	83
Тема 4. Системы диагностического мониторинга и непрерывного контроля.....	85
4.1. Вибродиагностика .....	85
4.2. Термографический контроль.....	91

4.3. Оптические системы .....	94
Тема 5. Задачи и методы профилактического контроля и диагностики изоляции электрического оборудования.....	97
5.1. Основные задачи контроля изоляции в условиях эксплуатации.....	97
5.2. Виды дефектов в электрической изоляции, причины и динамика их развития .....	97
5.3. Виды и методы контроля изоляции. Неразрушающие и разрушающие испытания.....	98
5.4. Стратегии, объем и периодичность неразрушающего контроля электрической изоляции. ....	98
5.5. Методы комплексного автоматизированного контроля .....	100
5.6. Разрушающие испытания и экономическое обоснование испытаний..	101
5.7. Вопросы техники безопасности при проведении испытаний и профилактических мероприятий .....	101
Тема 6. Физические основы и методы неразрушающих испытаний изоляции .....	103
6.1. Контроль изоляции по электрическим характеристикам.....	103
6.2. Общая схема замещения изоляции.....	103
6.3. Измерение сопротивления изоляции и критерии состояния по сопротивлению и токам абсорбции. ....	104
6.4. Контроль изоляции по диэлектрическим потерям. Измерительные мосты и методы их применения в лабораторных и эксплуатационных условиях.....	106
6.5. Емкостные методы оценки увлажнения изоляции. Приборы контроля влажности и методы их применения. ....	107
Тема 7. Выявление и измерение частичных разрядов в изоляции .....	108
7.1. Причины возникновения частичных разрядов в изоляции и их параметры. Частичные разряды на переменном напряжении .....	108
7.2. Схемы и приборы для регистрации частичных разрядов. Трудности при регистрации частичных разрядов в условиях эксплуатации .....	111
Тема 8. Контроль изоляции трансформаторов и других маслонаполненных аппаратов путем анализа состояния масла и методами хроматографического анализа газов (ХАГ).....	116
8.1. Причины и источники появления газов в трансформаторном масле ...	116
8.2. Газовыделение при термическом разложении изоляции и разложении под воздействием частичных разрядов.....	116
8.3. Критерии, нормы и периодичность диагностики методами ХАГ .....	117
8.4. Идентификация дефекта и обоснование оперативных и профилактических мер.....	118
Тема 9. Нагрев электрооборудования и контроль его температурного режима .....	120
9.1. Влияние температуры на свойства изоляции и составных частей электрооборудования .....	120
9.2. Уравнение теплового баланса и его решение.....	120

9.3. Предельные температуры и превышения температур.....	122
9.4. Тепловое старение изоляции. Перегрузки оборудования по условиям нагрева.....	124
9.4. Перегрузки неизолированных проводников.....	125
9.5. Перегрузки трансформаторов .....	126
9.6. Аварийные перегрузки.....	128
9.7. Перегрузки оборудования по критерию износа изоляции .....	129
9.8. Способы и методы измерения рабочих температур и их превышений в элементах электрооборудования в эксплуатации .....	130
9.9. Инфракрасная термодиагностика электрооборудования.....	132
9.10. Нагрев контактных соединений и контроль их температурного режима. ....	135
Темы практических занятий.....	140
Вопросы к зачету, контрольные тесты.....	143
Учебная программа .....	155
Перечень ТНПА, используемых при аккредитации специалистов в области контроля и диагностики теплоэнергетического оборудования.....	167

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Теоретический раздел**

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ  
ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

**Курс лекций**

**Минск 2016 г.**

## КУРС ЛЕКЦИЙ

### **ТЕМА 1. КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.**

#### **1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Основные термины и определения в области диагностики и контроля технического состояния объектов устанавливает ГОСТ 20911-89.

*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 энергетического оборудования 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 не-

разрушающему 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 теплоэнергетического оборудования ТЭС определяется в соответствии с [СТП 09110.17.400-15 «Инструкция по контролю металла и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС ГПО "Белэнерго"»](#).

*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 повреждений, 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.

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ КОНТРОЛЯ

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. *При-*

*емочный 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 в зависимости от воздействия на объект контроля и влияния на его дальнейшие эксплуатационные характеристики

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

пластические 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 контролируруемыми 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.

### **1.3. 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 неустраиваемые. 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).

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 теплоэнергетического 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, эррозионный) Трещины механической усталости Трещины термической усталости Трещины коррозионной усталости Выкрашивание и трещины контактной усталости
Термические напряжения	Дефекты при воздействии термических напряжений

#### 1.4. УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Металл в теплоэнергетике работает в тяжелых условиях под воздействием многочисленных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

К *конструктивно-технологическим факторам* относят:

– концентраторы напряжений и деформаций, вызванные геометрией деталей отверстия, малые радиусы скруглений, резкие переходы от сечения к сечению и т.п.);

– остаточные напряжения и деформации, возникающие в результате технологической обработки деталей; габаритные размеры и массу конструкций;

– качество металла и изготовления деталей конструкций и т.п.

*Эксплуатационными факторами* являются повышенная температура, давление рабочей среды, коррозия, эрозия, стационарные и периодически меняющиеся нагрузки, длительность эксплуатации. В период эксплуатации возможны случаи, когда работа энергоустановок происходит в более тяжелых условиях по сравнению с расчетными (в пиковых и остропиковых режимах). Многие элементы энергоустановок работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, вызванного сочетанием весовых нагрузок, термических расширений, циклических воздействий и т.п.

*Металл элементов паровых или водогрейных котлов и трубопроводов* работает в разнообразных и в ряде случаев тяжелых условиях.

Каркас котла, его обшивка, детали котельно-вспомогательного оборудования эксплуатируются при комнатной или умеренно повышенной температуре и относительно невысоких напряжениях. Для изготовления деталей каркаса чаще всего используются углеродистые стали обыкновенного качества, которые являются наиболее дешевым и технологичным конструкционным материалом.

В более тяжелых условиях находится металл элементов котлов и трубопроводов, работающих под давлением. Повреждение этих элементов связано с повышенной опасностью. Основные положения по технологии изготовления, требования к конструкции и безопасной эксплуатации элементов котлов и трубопроводов регламентированы «Правилами устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов» и «Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды».

Внутреннее давление и дополнительные усилия, вызванные весовыми нагрузками, тепловыми расширениями и рядом других трудно учитываемых факторов, приводят к тому, что элементы котлов работают в сложнапряженном состоянии.

Детали котлов и трубопроводов имеют конструкционные концентраторы напряжений в виде отверстий для приварки штуцеров, патрубков, резкие переходы сечений и т. п. При пусках, остановах, переходных режимах в трубной системе и барабанах котлов возникают циклические напряжения. Поэтому для

снятия пиков местных напряжений в условиях сложного напряженного состояния без опасности образования трещин металл этих элементов должен обладать высокими пластическими свойствами.

Трубы поверхностей нагрева омываются горячими топочными газами с одной стороны и паром или водой с другой стороны. В современных паровых котлах пар перегревается до температуры 545-570° С. Температура металла труб поверхностей нагрева существенно выше температуры пара на выходе из котла. Это определяется неравномерной раздачей пара по змеевикам и неравномерным обогревом труб газами, а также неизбежным перепадом температур между наружной обогреваемой и внутренней охлаждаемой поверхностями труб и теплоносителем.

В тяжелых температурных условиях работают необогреваемые стойки и подвески труб поверхностей нагрева и элементы конструкций горелок.

Металл при высоких рабочих температурах снижает прочность, возникают новые явления, которые не наблюдаются при комнатной температуре: металл начинает накапливать пластическую деформацию при относительно низких напряжениях, снижаются его пластические свойства при длительном нагружении, ухудшается структура, а на поверхности интенсивно протекают коррозионные процессы.

Хвостовые поверхности нагрева и стальные газоходы паровых котлов, в которых сжигаются топлива с большим содержанием серы, подвержены низкотемпературной сернистой коррозии. На этих относительно холодных поверхностях происходит конденсация паров серной кислоты.

При сжигании сильно забалластированных топлив происходит интенсивный эрозионный износ труб поверхностей нагрева в результате воздействия абразивных частиц золы.

Эрозионному износу из-за влияния потоков воды или пара подвержены регулирующие и запорные органы пароводяной арматуры, рабочие элементы питательных насосов и т. п.

На внутренних поверхностях труб котла, барабанов, камер и трубопроводов протекает коррозия в воде или паре, происходит образование отложений, забивание гибов труб поверхностей нагрева продуктами коррозии. При этом ухудшается теплообмен, так как слой оксидов, обладающий низкой теплопроводностью, вносит добавочное термическое сопротивление.

При длительном воздействии рабочих нагрузок и температуры металл оборудования и трубопроводов испытывает постоянно накапливающуюся пластическую деформацию при напряжениях ниже предела текучести. Это явление, называемое ползучестью, может происходить с различной скоростью в зависимости от температуры, действующих напряжений и структуры металла, а на заключительной стадии приводит к образованию трещин и разрушению деталей. Наиболее опасно одновременное воздействие ползучести и усталости, что должно учитываться при оценке долговечности ответственных деталей и конструкций.

*Детали турбин и компрессоров* при работе подвержены силовым, тепловым воздействиям и износу. Ответственные детали турбин: лопатки, ротора и

корпуса работают в условиях высоких температур в сочетании с значительными нагрузками, обусловленными центробежными силами инерции и разностями давлений. Неравномерность распределения температур в деталях вызывает неоднородные температурные деформации и связанные с ними напряжения.

Нагрузки от центробежных сил и разностей давлений называют силовыми воздействиями в отличие от тепловых воздействий, вызываемых температурными разностями. Силовые и тепловые воздействия в турбомашине по признаку их изменения во времени можно подразделить на стационарные (постоянные во времени), медленно меняющиеся и быстро меняющиеся.

Постоянные (не меняющиеся) воздействия вызывают напряжения в деталях при установившейся работе турбомашин. При умеренных температурах такие напряжения должны быть допустимы по условиям кратковременной прочности. В сочетании с высокими температурами в этих условиях появляется ползучесть и накапливается повреждение материала во времени, что ограничивает время работы детали из-за исчерпания запаса длительной прочности.

При умеренных температурах в условиях коррозионно-активной среды (например, в среде влажного пара, содержащего примеси) в ряде конструктивных элементов наблюдается трещинообразование. Зарождение и развитие трещин может происходить в этих условиях и при постоянных нагрузках. Время эксплуатации детали должно оцениваться с учетом трещиностойкости.

Медленно меняющиеся воздействия характерны для переходных режимов – пуска, нагружения, разгрузки и остановки турбомашин. Повторные медленно меняющиеся режимы связаны с малоцикловой усталостью. При этом возникают ограничения по допустимому числу пусков турбомашин, так как при каждом пуске (и при каждом изменении режима) в материале накапливаются повреждения, которые при достаточном числе изменений режима приводят к разрушению детали вследствие проявления малоцикловой усталости.

Чередование стационарных и переходных режимов вызывает накопление повреждений от ползучести и малоцикловой усталости. Взаимодействие повреждений таково, что чем больше число часов работы на стационарном режиме, тем меньше возможное число пусков и наоборот.

Быстроменяющиеся воздействия обусловлены, в основном, двумя причинами: неуравновешенностью и различными технологическими отклонениями в изготовлении и сборке ротора (механические причины) и взаимодействием потока пара или газа с элементами проточной части турбомашин (аэродинамические причины).

Быстроменяющиеся воздействия вызывают колебания элементов турбомашин. При определенной интенсивности воздействия возможны повреждения (разрушение) деталей турбомашин вследствие многоцикловой усталости.

Если в потоке пара или газа присутствуют жидкие или твердые частицы, при столкновении с деталью вызывающие поверхностное ее повреждение, то наблюдается эрозия элементов турбомашин. Наиболее серьезной проблемой считается эрозия деталей в потоке влажного пара, при которой повреждаются лопатки и другие элементы проточной части паровых турбин.

Загрязнения (примеси в воде, паре, газе) оказывают многостороннее действие на детали турбомашин: они могут вызывать коррозию различного вида: общую, язвенную, коррозионно-эрозионный износ; они служат причиной коррозионного растрескивания под напряжением и коррозионной усталости.

### **1.5. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Выбор конструкционных материалов, используемых в теплоэнергетике, и основные требования, предъявляемые к ним, определяются условиями эксплуатации энергооборудования и трубопроводов.

Эти условия характеризуются высокими температурой и давлением, агрессивностью рабочей среды. Например, металл поверхностей нагрева котлов должен обладать не только хорошей прочностью и пластичностью, но и достаточно высоким сопротивлением электрохимической коррозии со стороны пароводяной среды и химической коррозии от продуктов сгорания топлива. В таких условиях металл энергоустановок должен надежно работать длительное время. Обычно расчетный срок службы энергетического оборудования принимают равным  $10^5$  ч. Это срок службы обусловлен процессами ползучести при высоких температурах и сохранением характеристик длительной прочности на необходимом уровне. При увеличении скорости ползучести, снижении длительной прочности может возникнуть опасность разрушения металла элементов оборудования.

Исходя из сложных условий, в которых работают современные энергоустановки, к микроструктуре и свойствам металла предъявляют следующие основные требования:

- жаропрочность;
- жаростойкость;
- сопротивление усталости;
- коррозионная стойкость;
- эрозионная стойкость;
- стабильность структуры и механических свойств при рабочих температурах.

Кроме того, металл оборудования и трубопроводов должен обладать высокими технологическими свойствами (хорошо свариваться, поддаваться механической обработке и обработке давлением, не иметь металлургических дефектов и т.п.). Высокие технологические свойства металла, которые закладываются при его выплавке на металлургических заводах, обеспечивают высокое качество оборудования и трубопроводов на стадиях их изготовления на машиностроительных заводах, монтажа на стройплощадках и ремонта в цеховых условиях.

## 1.6. ОСНОВНЫЕ СЛУЖЕБНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Исходя из специфических эксплуатационных условий теплоэнергетического оборудования к основным служебным свойствам относят: жаропрочность, жаростойкость, коррозионную и эрозионную стойкость.

### 1.6.1. Жаропрочность

*Жаропрочность* – способность металлов и сплавов длительно работать без разрушения под воздействием внешних нагрузок и повышенных температур. Чем выше рабочая температура, действующее напряжение и длительность эксплуатации, тем более высокие требования предъявляются к жаропрочности металла.

В процессе эксплуатации металла при высоких температурах ускоряются диффузионные процессы, изменяются исходные микроструктура и механические свойства материалов.

В основе явлений, характеризующих жаропрочность, лежат процессы, происходящие при ползучести.

*Ползучесть* – это медленная и непрерывная пластическая деформация металла, длительно работающего при высоких температурах под воздействием постоянных во времени напряжений. В результате ползучести увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб, происходит удлинение лопаток и наблюдается прогиб ротора.

Чем медленнее увеличивается деформация, а следовательно меньше скорость ползучести, тем выше будет жаропрочность материала при заданных напряжении и температуре.

Повышение рабочих температур на тепловых электростанциях привело к тому, что многие детали работают в условиях, в которых проявляется ползучесть. Длительная эксплуатация в условиях ползучести приводит к образованию и накоплению микропор, образованию трещин и разрушению материала. Как правило, процесс образования и накопления пор и образования трещин происходит по границам зерен.

Факторы, влияющие на жаропрочность материала:

1) рабочая температура (с повышением температуры увеличивается скорость ползучести);

2) напряжения (с увеличением напряжения снижается жаропрочность);

3) структура металла ( при относительно низких температурах благоприятна мелкозернистая структура, при высоких температурах, когда преимущественно наблюдается диффузная ползучесть – крупнозернистая);

4) химический состав (для повышения жаропрочности в состав сталей вводят тугоплавкие металлы *Mo*, *V*, *W*, *Ni* и пр., т.к. тугоплавкие материалы повышают температуру рекристаллизации и прочность межатомных связей, и следовательно снижают скорость ползучести);

5) термическая обработка ( в результате термической обработки происходит упрочнение металла, вследствие выделения из пресыщенных растворов

упрочняющих фаз; такие фазы в виде карбидов, нитридов, интерметаллидов создают препятствия и затрудняют пластическую деформацию, что приводит к снижению скорости ползучести).

### 1.6.2. Жаростойкость

*Жаростойкость(окалиностойкость)* – способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой коррозии при высоких температурах. При низкой жаростойкости происходит преждевременное разрушение поверхностных слоев металлов и сплавов, что вызывает большие проблемы при эксплуатации деталей и конструкций в коррозионных газовых средах.

Железо с кислородом может образовывать оксиды трех видов FeO (магнетит,  $\rho = 7,24 \text{ г/см}^3$ ), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (гематит,  $\rho = 5,7 \text{ г/см}^3$ ), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (вюстит,  $\rho = 5,2 \text{ г/см}^3$ ).

До 560 – 600°C окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла. Выше 600°C происходит растрескивание этих оксидов и вместо их защита металла осуществляется лишь рыхлым слоем оксида FeO, что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев при температурах выше 600° приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Жаростойкость зависит от многих внешних и внутренних факторов. На жаростойкость материалов существенное влияние оказывает состояние поверхности металла. Чем более тщательно обработана поверхность (например, шлифовкой и полировкой), тем медленнее идет процесс окисления, так как оксиды распределены равномерно и более прочно сцеплены с поверхностью металла. Образующаяся на поверхности оксидная пленка защищает металл от дальнейшего окисления. Защитные свойства оксидной пленки повышаются, если она плотная, не пропускает ионы кислорода и не отслаивается при механическом воздействии.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав металла, определяющий защитные свойства оксидной пленки. В табл. 1.4. приведена сравнительная оценка жаростойкости ряда чистых металлов, определяемая по 5-ти бальной шкале скорости окисления в воздушной среде в интервале рабочих температур. Металлы четвертой группы благодаря плотной оксидной пленке с высокими защитными свойствами при нагреве имеют хорошую жаростойкость. Хром, алюминий наряду с кремнием используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Они обладают большим сродством с кислородом чем железо и благоприятным образом изменяют состав и строение окалины. В процессе окисления на поверхности образуются плотные окислы Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub> диффузия сквозь которые происходит с трудом.

Чем выше содержание хрома, алюминия или кремния, тем выше окалиностойкость сталей и тем выше рабочая температура.

Таблица 1.4. Жаростойкость металлов на воздухе при рабочих температурах

Балл	Металл	Оценка жаростойкости			Определяющий фактор
		качественная	температурный интервал, °С	Скорость окисления, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	
1	Mg	Очень плохая	500–600	10 <sup>-1</sup> –10 <sup>1</sup>	Рыхлая оксидная пленка
2	Nb, Mo, W, Ti, Zr	Плохая	700–800	10 <sup>1</sup> –10 <sup>3</sup>	Разрушение оксидной пленки
3	Cu, Fe, Ni, Co	Удовлетворительная	500–600 700–800	10 <sup>-3</sup> –10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-1</sup>	Высокая дефектность сравнительно плотной оксидной пленки
4	Al, Zn, Sn, Pb, Cr, Be	Хорошая	400–600 700–800	менее 10 <sup>-6</sup> 10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-3</sup>	Плотная оксидная пленка
5	Ag, Au, Pt	Отличная	–	–	Низкое сродство к кислороду

Структура жаростойкого материала должна быть однородной и однофазной. Термическая обработка изменяет строение сплавов и, следовательно, их жаростойкость. Отжиг и нормализация приводят к формированию однофазной структуры и способствуют увеличению жаростойкости металла.

Величина зерна практически не влияет на жаростойкость металла. Пластическая деформация снижает жаростойкость, приводит к образованию остаточных напряжений и увеличению их градиента в структуре металла.

### 1.6.3. Коррозионная стойкость

*Коррозионная стойкость* – способность металлов и сплавов сопротивляться коррозии. В зависимости от характера и свойств окружающей среды и условий взаимодействия с ней металла существует два основных вида коррозии – химическая и электрохимическая. *Химическая коррозия*, как правило, происходит при взаимодействии металла с газовой средой. *Электрохимическая коррозия* происходит в жидких электролитах. Характерными средами для ее протекания являются влажные атмосфера и почва, вода, водные растворы солей, щелочей и кислоты.

Скорость химической коррозии определяется кинетикой химических реакций. При электрохимической коррозии окисление металла является результатом действия двух взаимосвязанных электрохимических процессов: ионизации атомов металла (анодный процесс) и восстановления окислителя (катодный процесс). Скорость этих процессов зависит от электродного потенциала.

При высокотемпературной эксплуатации теплоэнергетического оборудо-

вания наиболее проблемной является *газовая коррозия*, развивающаяся при взаимодействии с газовой средой. Этот вид коррозии происходит при температурах, превышающих 550 °С в кислородосодержащих газовых средах, на воздухе, в углекислом газе, сухом водяном паре, чистом кислороде и в топочных газах котельного оборудования.

Главной причиной разрушения поверхности деталей является термодинамическая неустойчивость металла, находящегося в рабочей газовой среде. В связи с этим окислительный компонент среды, отнимая у металла валентные электроны, образует оксид, который обладает высокой стабильностью в данной среде. Сформировавшийся оксид образует на поверхности детали пленку. Защитными свойствами обладают пленки, которые покрывают поверхность металла сплошным слоем. Интенсивность процесса дальнейшего окисления поверхности детали зависит от строения образовавшейся оксидной пленки, главным образом, от степени ее плотности или сплошности.

Условием сплошности пленки является отношение молекулярного объема оксида  $V_{ок}$  к объему металла  $V_{м}$ , из которого образовался оксид. Если отношение  $2,5 > V_{ок} / V_{м} > 1$ , то пленка имеет хорошие защитные свойства.

При  $V_{ок} / V_{м} < 1$  образуется рыхлый оксид. Однако, если  $V_{ок} / V_{м} > 2,5$ , то под влиянием возникающих внутренних напряжений пленка растрескивается и скалывается, после чего снова происходит окисление металла. Возникновение внутренних напряжений является следствием большой разницы объемов металла и оксида.

Предельное значение температуры наружной поверхности нагреваемых деталей в основном зависит от химического состава стали. Например, для стали 12Х1МФ в большинстве случаев оно составляет 585 °С, а для сталей 12Х11В2МФ и 12Х18Н12Т – соответственно 630 °С и 640 °С. Глубина окисления стали 12Х1МФ в воздушной среде за время  $10^5$  ч при температуре 585 °С составляет примерно 0,5 мм. Однако развитие процесса газовой коррозии зависит от нескольких факторов, среди которых основным является вид сжигаемого топлива. Например, глубина коррозии изделия из стали 12Х1МФ при температуре 585 °С за  $10^5$  ч для антрацитового штыба составляет 0,7 мм, назаровского угля – 0,55 мм, экибастузского угля – 0,85 мм, мазута марки 100 – 0,8 мм, природного газа – 0,34 мм.

При *электрохимической коррозии* возникает коррозионный ток и металл, погруженный в электролит, растворяется в результате электрохимического взаимодействия его поверхности с электролитом. При этом на поверхности металла образуются коррозионные микрогальванические элементы типа анод-катод. На аноде происходят ионизация и растворение в электролите атомов металла, а на катоде восстановление окислительного компонента, содержащегося в окружающей металл коррозионной среде (электролите).

В результате перемещения электронов и ионов в электролите возникает коррозионный ток, значение которого характеризует интенсивность *электрохимической коррозии*. Другими факторами, влияющими на интенсивность этой коррозии, являются температура, давление среды, скорость потока коррозион-

ной жидкости или газа, напряжения в металле, чистота обработки его поверхности и т.п. При увеличении скорости потока и чистоты обработки поверхности металла интенсивность электрохимической коррозии снижается, а с увеличением других перечисленных факторов – повышается.

Для защиты от электрохимической коррозии широко применяют явление пассивации. Пассивность – это состояние повышенной коррозионной устойчивости металлов и сплавов, вызванное преимущественным торможением анодных процессов. Пассивное состояние возникает при образовании тонких прочных и непрерывных пленок, равномерно покрывающих поверхность материала. Переход от активного состояния к пассивному связан с ростом электродного потенциала.

Устойчивость против коррозии повышается при введении в состав сталей *хрома (Cr), алюминия (Al) и кремния (Si)*. Эти элементы образуют непрерывную прочную оксидную пленку и повышают электродный потенциал, т.е. увеличивают электроположительность стали. Алюминий и кремний повышают хрупкость стали, поэтому их применяют реже хрома. Сталь, содержащая 12–14% Cr устойчива против коррозии в атмосфере, морской воде, ряде кислот, щелочей и солей. Кроме хрома в состав коррозионно-стойких сталей вводят также другие элементы – чаще никель. С ростом содержания хрома коррозионная стойкость сталей растет

Скорость коррозии характеризуется качественными и количественными показателями. К первым относят: изменение внешнего вида поверхности металла; изменение его микроструктуры и др. Количественными показателями служат: время до появления первого коррозионного очага, число коррозионных очагов за определенный промежуток времени; уменьшение толщины металла, отнесенное к единице времени и т.п.

Коррозионную стойкость металла можно оценить по уменьшению массы детали или ее размеров, изменению физико-механических свойств и другими способами.

Специфическими видами коррозии энергетического оборудования являются: стояночная, язвенная, подшламовая, газовая высокотемпературная, водородная, термоусталостная, коррозия под напряжением и межкристаллитная коррозия.

*Стояночная коррозия* является одним из типов электрохимической коррозии. Эта коррозия происходит при останове котла. Причиной возникновения стояночной коррозии является воздух, попадающий в трубу, частично заполненную водой. На границе раздела воды и воздуха происходят коррозионные процессы, следствием которых являются язвы. Микроструктура металла практически не изменяется и остаточная деформация на поврежденных местах не наблюдается. Чаще всего стояночная коррозия происходит в металле законсервированного оборудования, в полости которого проникают вода и воздух. Поэтому для своевременной защиты металла от стояночной коррозии необходимы следующие мероприятия: высушивание оборудования, применение защитных антикоррозионных пленок, создание инертной или восстановительной

атмосферы и др.

*Язвенная коррозия.* Если поражение металла от воздействия коррозии происходит в отдельных точках поверхности металла, то такую коррозию называют язвенной. Язвы являются не только видимыми дефектами, но и концентраторами напряжений. При активном развитии язвенной коррозии, сопровождающейся скоплением язв, в металле могут образовываться трещины.

*Подшламовая коррозия.* Язвы могут образовываться и развиваться на внутренней поверхности труб под слоем отложений в контакте с пароводяной смесью. Язвы заполняются продуктами коррозии и трудно обнаруживаются. Такой тип коррозии еще называют подшламовой. В пористом слое отложений происходит постоянное повышение концентрации солей, в результате чего образуется коррозионный электролит. Язвы подшламовой коррозии являются опасными дефектами, которые могут привести к образованию трещин.

*Газовая высокотемпературная коррозия.* Этому типу коррозии подвержены трубы ширмовых и конвективных пароперегревателей, находящихся в окислительной среде топочных газов. Интенсивность газовой коррозии зависит от состава топочных газов, их скорости движения и температуры. В топке котла и газоходах газовая коррозия наружных поверхностей труб и стоек пароперегревателей происходит под воздействием кислорода, диоксида углерода, водяных паров, сернистых и других газов. Газовая коррозия труб поверхностей нагрева включает в себя физико-химические процессы взаимодействия топочных газов и наружных отложений с оксидными пленками и металлом.

*Термоусталостная коррозия.* При воздействии изменяющихся и повторяющихся во времени термических напряжений проявляется термическая усталость. Термические напряжения возникают при наличии перепада температур в сечении металла или по толщине стенки трубы из-за различного теплового расширения нагретых и менее нагретых слоев металла, а также при высоких скоростях нагрева и охлаждения котла.

Термическая усталость в сочетании с коррозией (термоусталостная коррозия) может привести к образованию кольцевых или продольных трещин, а затем и к разрушению. Поверхность разрыва разрушившихся труб от термоусталостной коррозии носит хрупкий характер без заметных следов пластической деформации.

Легированные и жаропрочные стали лучше сопротивляются термоусталостной коррозии, чем углеродистые стали.

*Коррозия под напряжением.* Распространенным типом электрохимической коррозии является коррозионное растрескивание или коррозия под напряжением. Этот тип коррозии возникает на поверхности деталей, находящихся под нагрузкой или имеющих остаточные напряжения. При наличии коррозионной среды образуются тонкие трещины, проходящие в основном по телу зерен-кристаллитов. В этом случае коррозию называют транскристаллитной. Если трещины проходят по границам зерен-кристаллитов, то коррозию называют межкристаллитной.

*Межкристаллитная коррозия* – это наиболее опасный вид электрохими-

ческой коррозии. Она почти незаметна с поверхности и распространяется вглубь металла по границам зерен.

Межкристаллитной коррозии подвержены многие стали, которые в коррозионно-агрессивных средах имеют высокую стойкость к общей коррозии. Из применяемых в теплоэнергетике сталей, межкристаллитной коррозии подвержены хромоникелевые, хромоникельмолибденовые, хромоникельмарганцевые коррозионностойкие стали аустенитного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов, а также высоколегированные никелевые сплавы.

Основной причиной межкристаллитной коррозии коррозионностойких материалов является нагрев при обработке давлением или сварке, а также длительная эксплуатация оборудования при температурах выше 450С°, что приводит к электрохимической гетерогенности между приграничными участками и объемом зерен.

В результате межкристаллитной коррозии нарушается связь между зёрнами, металл теряет свою прочность и пластичность, при постукивании по металлу пропадает характерный металлический звук и после приложения нагрузки металл легко разрушается.

Межкристаллитная коррозия обусловлена диффузионными процессами в структуре стали, приводящими к образованию карбидов хрома по границам зерен и одновременным обеднением хромом участков, непосредственно прилегающих к границам зерен. Скорость диффузии зависит от содержания углерода в стали.

Стойкость материала против межкристаллитной коррозии повышают выбором режима термообработки, снижением содержания примесей, легированием элементами, предотвращающими образование нежелательных фаз по границам зерен.

Эффективным средством, подавляющим межкристаллитную коррозию, является максимальное снижение содержания углерода и введением в сталь таких элементов как титан или ниобий, обладающих большим сродством с углеродом, чем хром.

#### **1.6.4.Эрозионная стойкость**

В основе *эрозии* лежит разрушение поверхностного слоя металла под воздействием, ударяющихся в него твердых частиц, капель или потока жидкости, а также потока пара. Если эрозия происходит в воде или влажном паре, то проявляется сложный коррозионно-эрозионный процесс, так как при ударе потока или капелек влаги разрушается оксидная пленка.

*Эрозионному износу* в той или иной степени подвержены конструкционные материалы турбин, парогенераторов, теплообменников, запорной и регулирующей арматуры, насосов и другого оборудования.

Эрозионный износ возможен на наружной и внутренней поверхностях труб и деталей. При эрозионном процессе поверхность металла становится ре-

льефной, в результате чего утонение стенок труб неравномерно. Утонение стенок может привести к потере прочности и разрушению трубы. Разрушение под воздействием эрозии носит хрупкий характер и не вызывает микроструктурных изменений в металле.

В общем случае эрозионный износ может происходить от воздействия пароводяной среды и твердых частиц топлива.

При работе энергетического оборудования наблюдается три вида эрозионного износа: капельная эрозия, кавитационная эрозия и абразивная эрозия.

*Капельная эрозия* – это разрушение поверхности металла оборудования под действием потока влажного пара. Наиболее интенсивно изнашиваются от этой эрозии рабочие и направляющие лопатки последних ступеней паровых турбин. Основными мероприятиями, применяемыми на ТЭС, повышающими стойкость материалов к капельной эрозии являются:

- правильный выбор начальных параметров пара, обеспечивающих умеренную влагу в конце процесса расширения пара;
- применение внутриканальной сепарации (измельчения частиц влаги);
- выполнение противоэрозионной защиты лопаток (стеллитовые наплавки);
- выполнение лопаток из титановых сплавов.

*Кавитационная эрозия* – разрушение потоком воды. Кавитация – это процесс образования и быстрого исчезновения пузырьков паров жидкости вследствие локального изменения давления в потоках жидкости. При исчезновении пузырьков поверхность испытывает локальный гидравлический удар. Вначале удары вызывают локальную пластическую деформацию металла, а затем под воздействием многократных ударов возникают очаги усталостного разрушения и отслаивание поверхностного слоя.

Кавитационной эрозии наиболее часто подвержены детали питательных насосов высокого и сверхкритического давления, регулирующая и запарная арматура питательного пароводяного тракта.

*Абразивная эрозия* энергетического оборудования может происходить под действием частиц золы и твердого топлива и частиц магнетита.

Эрозии частицами золы подвержены стальные газоходы, конвективные пароперегреватели, экономайзеры, воздухоподогреватели, элементы устройств пылеприготовления и золоудаления котлов, работающих на твердом топливе. Процесс износа при таком разрушении зависит от размера, формы и свойств твердых частиц, а также от скорости и угла их соударения с поверхностью элементов оборудования.

Основными мероприятиями, позволяющими увеличить стойкость к данному виду эрозии, являются:

- рациональная компоновка газоходов котла;
- рациональное размещение поверхностей нагрева;
- снижение скорости уходящих газов.

Эрозии частицами магнетита подвержены лопатки первых ступеней ЧВД и ЧСД паровых турбин в местах ввода пара.

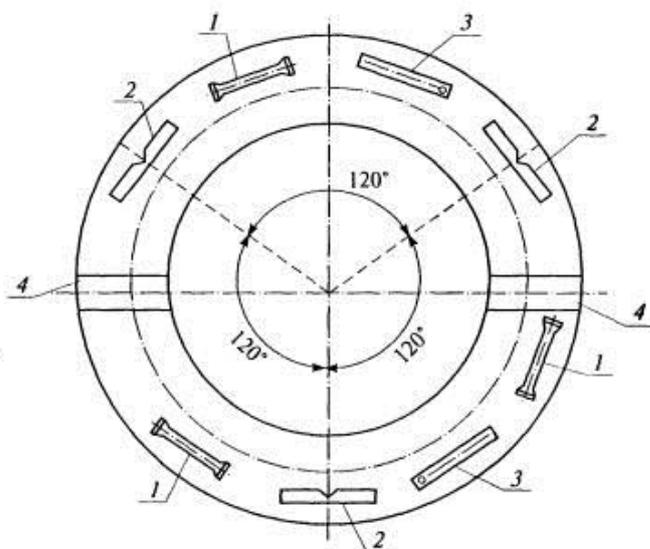
Природа эрозионно-абразивного износа, по мнению большинства исследователей, заключается в ударном воздействии абразивных частиц с поверхностью лопаток.

Основным источником абразивных частиц являются поверхности труб основного и промежуточного пароперегревателей котла, коллекторов котла и паропроводов, на которых естественным образом образуются окислы, в частности магнетит ( $Fe_3O_4$ ). В процессе эксплуатации слой окислов увеличивается и, достигнув критической толщины, начинает отслаиваться. Наиболее легко окисляются трубы, выполненные из перлитных сталей. Чем выше температура пара, тем интенсивнее идет процесс коррозии. Имеются примеры из практики, когда снижение температуры пара приводило к прекращению износа. Отслаиванию окислов также способствуют переходные режимы работы, при которых в паропроводах действуют циклические температурные напряжения.

Для повышения стойкости к абразивному износу частиц магнетита существует ряд мероприятий, основными из которых являются: правильный выбор материала паропроводов; увеличение зазора между рабочими и направляющими лопатками; сепарация пара; нанесение на поверхность лопаток износостойких покрытий.

## **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 поврежде-

нию 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.

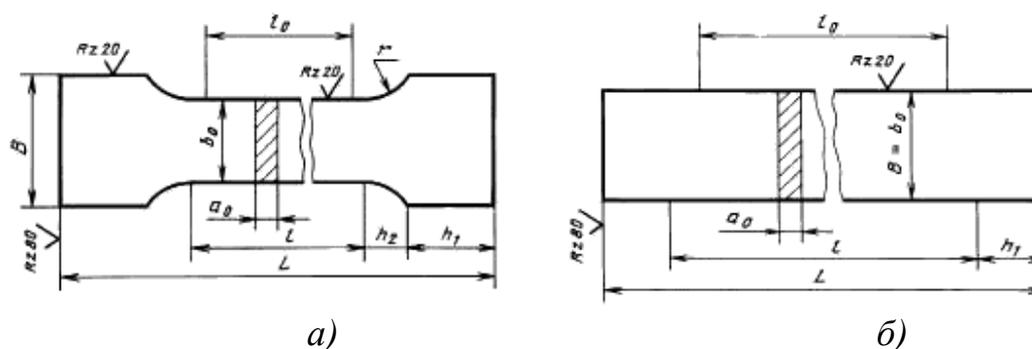
В результате механических испытаний материалов определяют следующие характеристики: упругость, пластичность, прочность, твердость, вязкость, усталость, трещиностойкость, хладноломкость, жаропрочность.

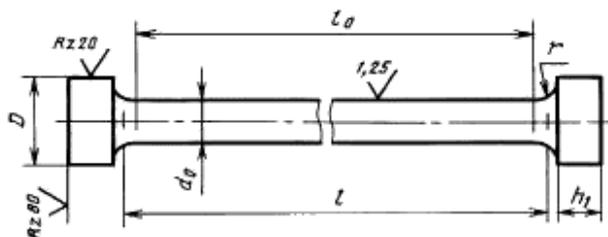
При диагностике энергетического оборудования проводят следующие виды механических испытаний:

- 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.

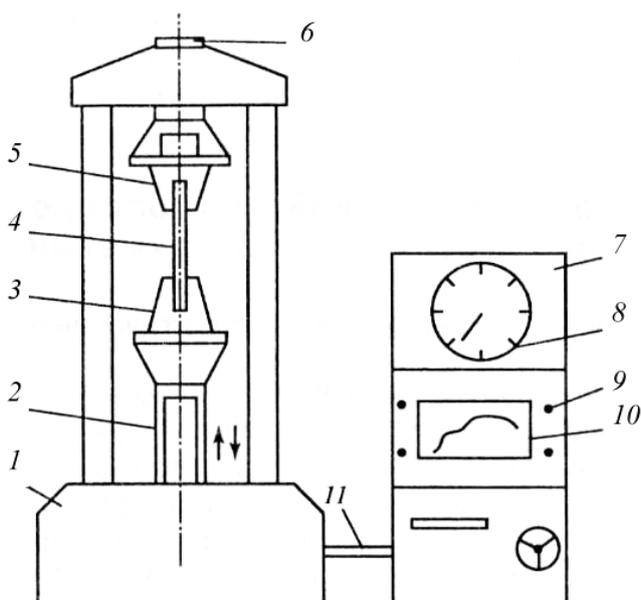


Рис.2.3. Схема испытательной машины: 1 – остов машины; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец; 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятка управления; 10 – диаграммный механизм; 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  $\Delta l$  (рис.2.5).

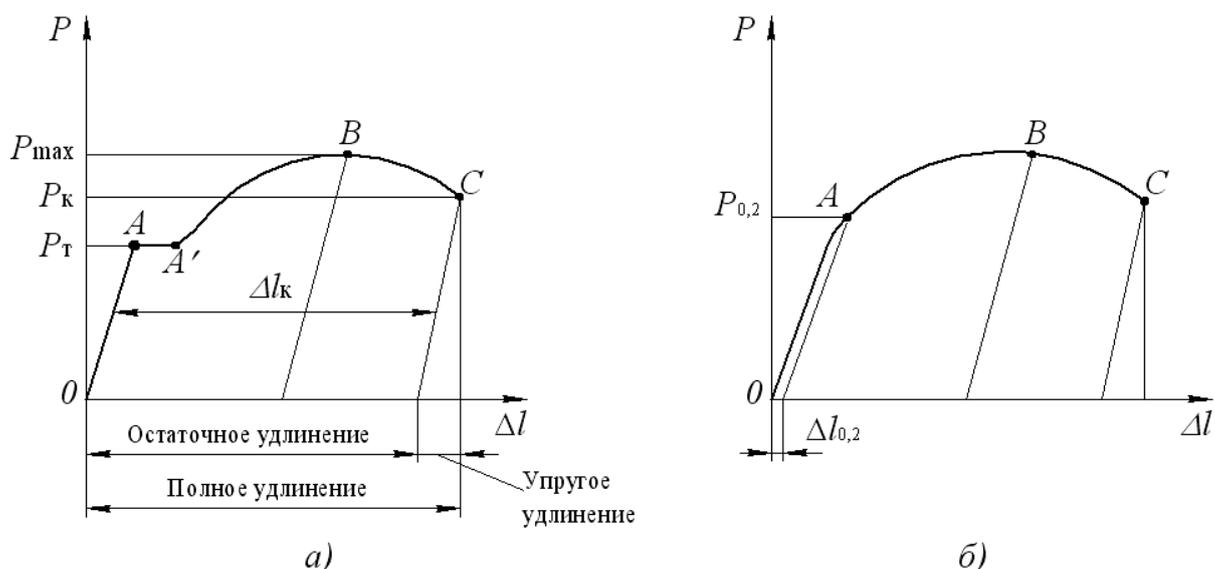


Рис.2.5. Схемы диаграмм растяжения пластичных материалов: *а* – с площадкой текучести; *б* – без площадки текучести

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  $\Delta l_{0,2} = 0,002l_0$ .

*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  $\delta$  и относительное сужение  $\psi$ .

*Относительное удлинение после разрыва* – это отношение приращения расчетной длины образца после разрыва  $\Delta l_k$  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  $\delta$ . Это объясняется влиянием шейки образца, где имеет местососредоточенное удлинение. Поэтому индекс  $\delta$  указывает на кратность образца, например  $\delta_5$ ,  $\delta_{10}$ . Если значения  $\delta$  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  $\Delta F_k$  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. Твердость определяется глубиной внедрения в испытываемый материал закаленного стального или вольфрамового шарика, алмазных конуса или пирамиды.

Значения твердости выражаются *числами твердости* в различных шкалах.

*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 испытываемый материал, используют стальной шарик определенного диаметра  $D$ , который вдавливается в испытываемый материал с усилием  $P$  (рис.2.6). После снятия нагрузки на поверхности материала остается шаровой отпечаток диаметром  $d$ .

Показателем твердости является число твердости по Бринеллю, обознача-

емое 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  $d$ .

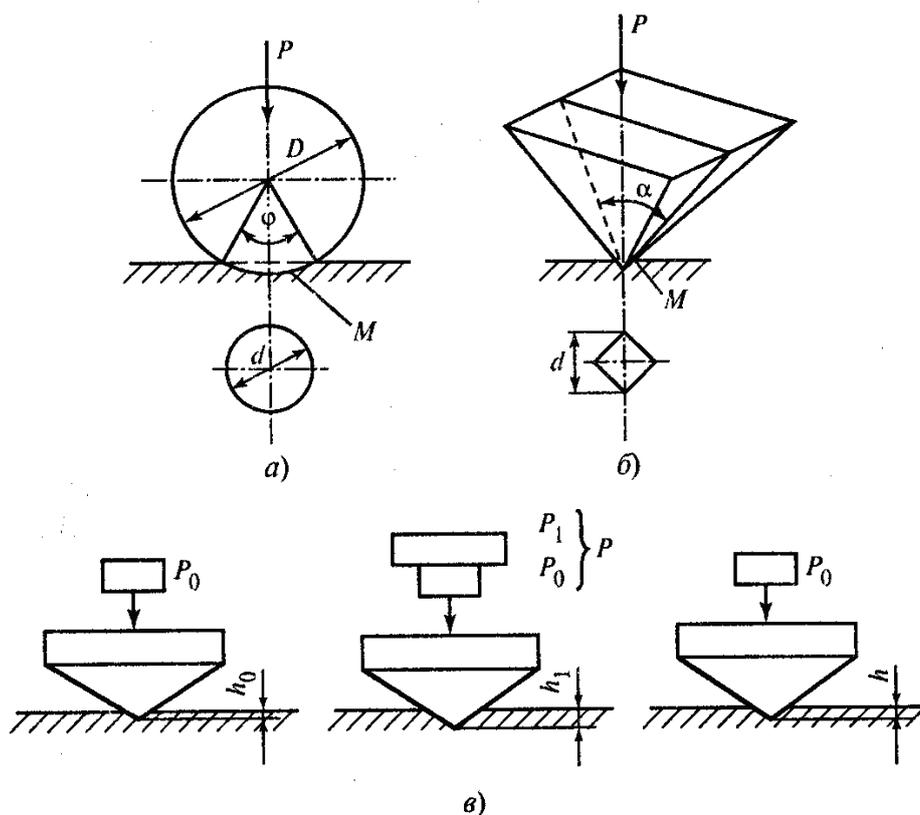


Рис. 2.6. Схемы испытания на твердость:  
а – по Бринеллю; б – по Виккерсу; в – по Роквеллу

Твердость по Бринеллю выражается в кгс/мм<sup>2</sup> (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 че-

тырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $136^\circ$  (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  $F$ :

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

Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV, указываются нагрузка  $P$  и время выдержки под нагрузкой, причем размерность числа твердости, кгс/мм<sup>2</sup>, не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10–15 с, а для цветных металлов – 30 с. Например, HV<sub>10/15</sub> 450 означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при  $P = 10$  кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15с.

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 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу») в поверхность материала вдавливается алмазный конус, угол, при вершине которого составляет  $120^\circ$ , 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 необходимо количественно оценивать размеры допустимых трещиноподобных дефек-

тов. 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  $K_{Ic}$ .

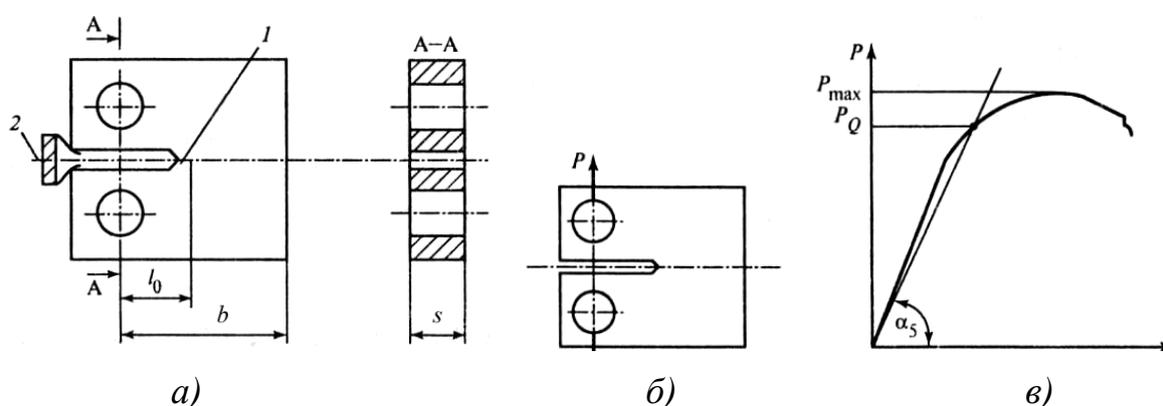


Рис.2.8. Испытание на трещиностойкость: а – схема прямоугольного компактного образца для определения  $K_{Ic}$  (1 – трещина усталости; 2 – датчик раскрытия); б – схема компактного образца; в – диаграмма его внецентренного растяжения  $P$ – $V$

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

ми 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.

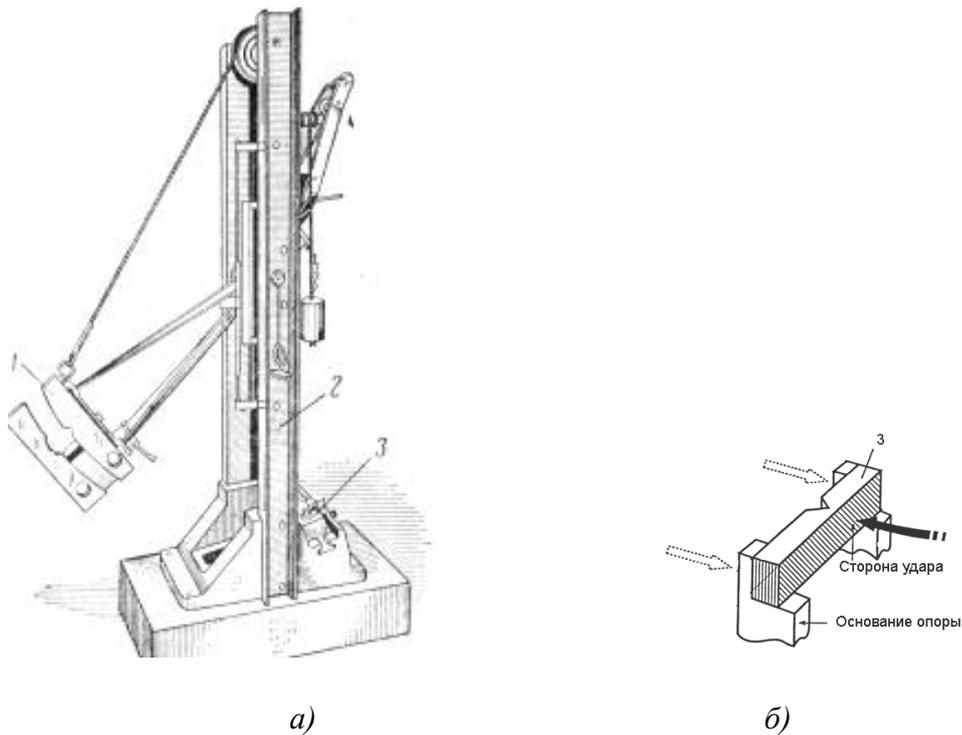


Рис. 2.9. Схема испытаний на ударную вязкость: а – схема маятникового копра; б – расположение образца на копре; 1 – маятник; 2 – корпус; 3 – образец

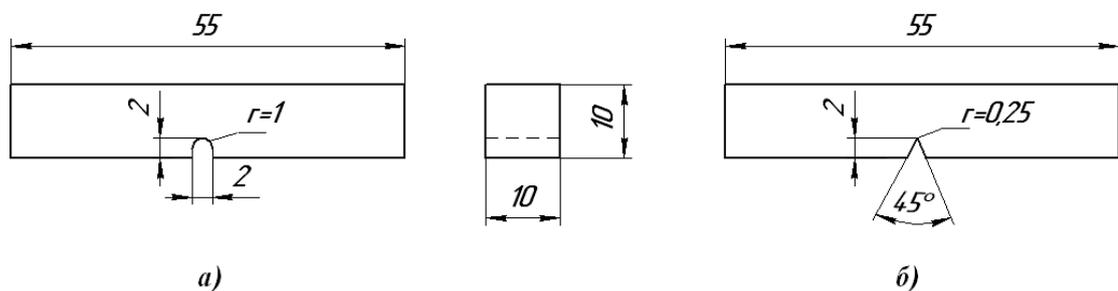


Рис.2.10 Образцы для испытаний на ударную вязкость: а – с U-образным надрезом (образец Менаже); б – с V-образным надрезом (образец Шарпи)

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/м<sup>2</sup>, 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  $KC_р$ :

$$KC = KC_з + KC_р.$$

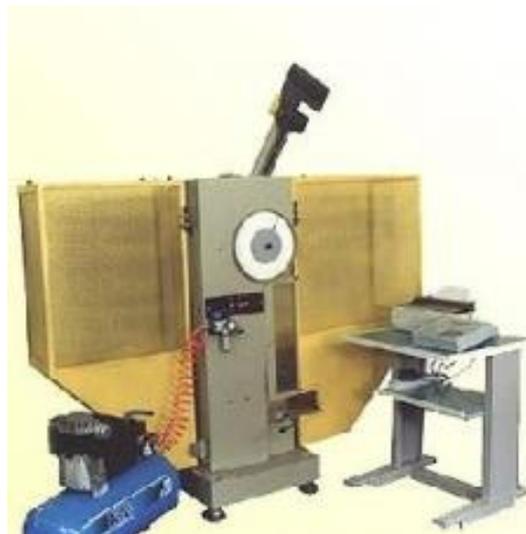
В охрупченных материалах основная часть работы совершается на зарождение трещины, при этом работа распространения трещины незначительна. В пластичных материалах преобладает работа на распространение трещины. Анализ составляющих ударной вязкости позволяет более рационально выбрать материал и определить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



а)



б)

Рис.2.11. Внешний вид копра для проведения испытаний образцов на ударную вязкость:

а – маятниковый копер Zwick/Roell, Германия; б – маятниковый копер Точприбор,

### 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,  $Fe_\alpha$  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  $Fe_\gamma$ , 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.

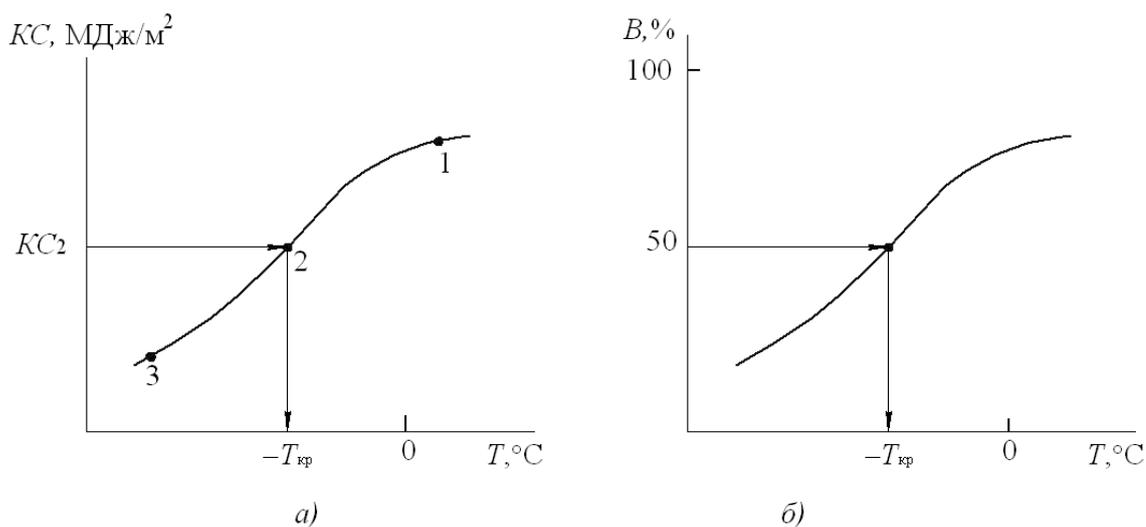


Рис.2.12. Схемы низкотемпературного изменения ударной вязкости (а) и волокнистости в изломе ударного образца (б)

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  $\sigma_{max}$  принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение, а за минимальное  $\sigma_{min}$  – 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*.

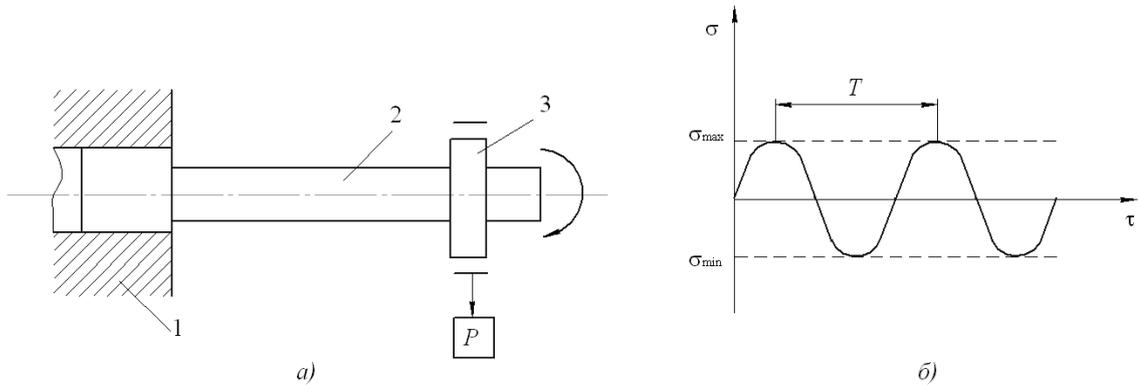


Рис.13. Испытания на усталость: а – схема нагружения образца; б – циклическое изменение напряжения а в образце; 1 – вращающийся шпиндель; 2 – образец; 3 – нагружающий подшипник

Сопротивление усталости характеризуется *пределом выносливости*  $\sigma_R$ , 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  $\sigma_{-1}$ .

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  $\sigma_{\max}$  – число циклов  $N$  (рис.2.14).

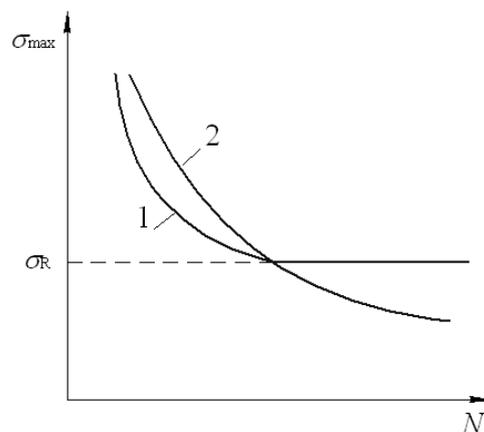


Рис.2.14. Диаграмма усталости: 1 – материалы, имеющие физический предел выносливости; 2 – материалы, не имеющие физический предел выносливости образец

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  $\sigma_{\max}$ , 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. Измерение 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.

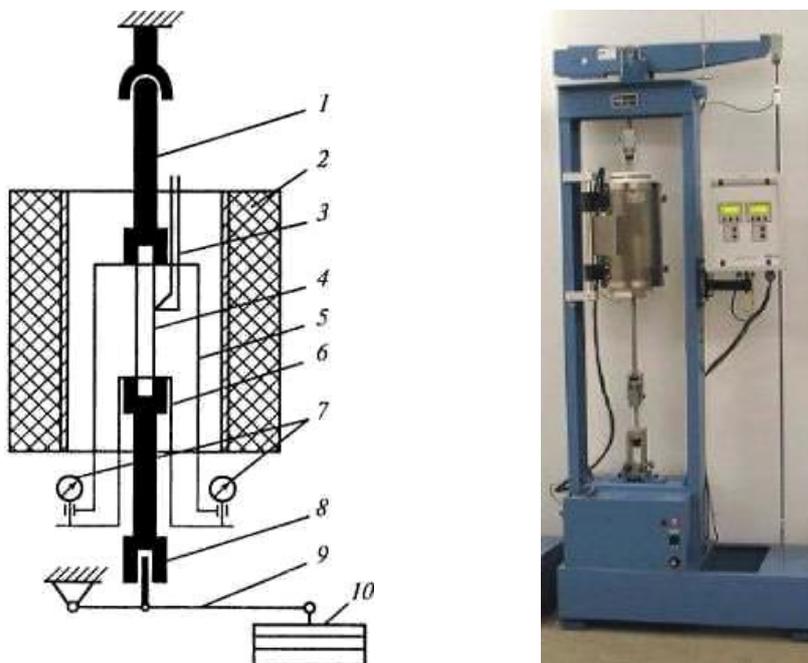


Рис.2.15. Схема и внешний вид установки для испытания металла на ползучесть:

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

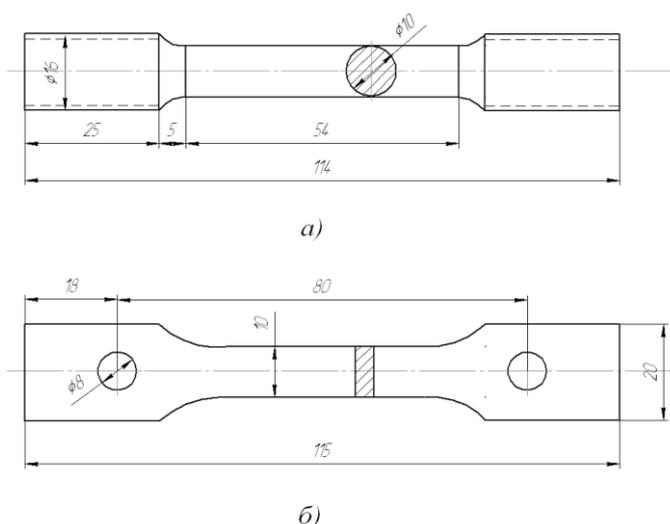


Рис. 2.16 Форма и размеры образцов для испытания на ползучесть на ползучесть: а – цилиндрический; б – плоский

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  $\varepsilon$  – время  $\tau$ . (рис.2.17).

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

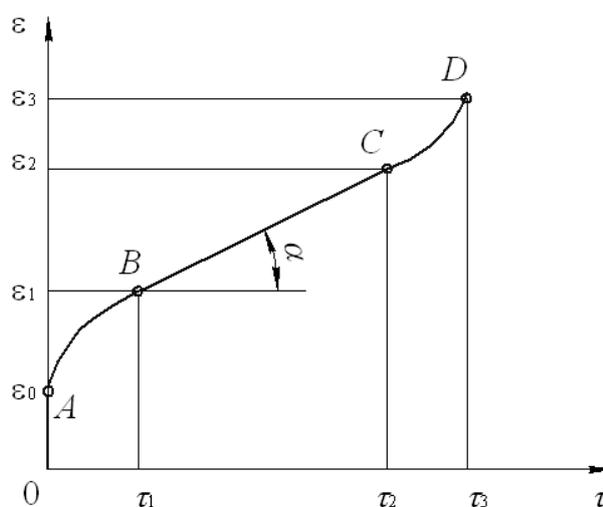


Рис.2.17. Схема диаграммы ползучести

Участок  $AB$  характеризует неустойчивую ползучесть, где металл деформируется с неустойчивой скоростью, участок  $BC$  – устойчивую 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;  $\tau$  – время, ч;  $\varepsilon$  – 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  $\sigma$  – время до разрушения  $\tau$  (рис.2.18). При уменьшении  $\sigma$  время до разрушения  $\tau$  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.

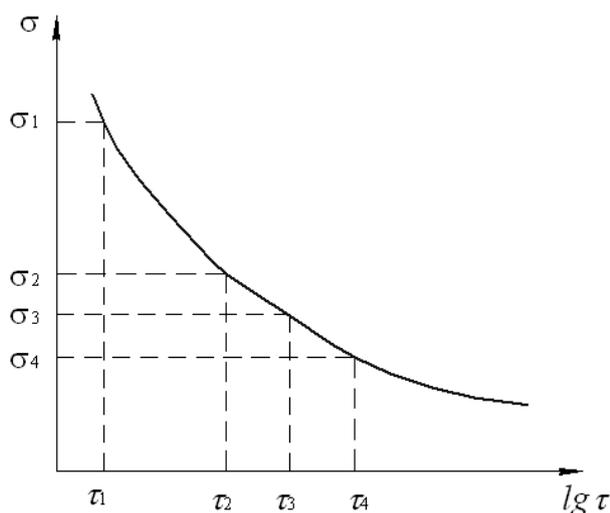


Рис.2.18. Кривая длительной прочности

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

$\sigma_{\tau}^t$ , где  $t$  – температура, °С;  $\tau$  – время до разрушения, ч. Так, для теплоэнергетического оборудования значения  $\sigma_{\tau}^t$  находят по времени, равному  $10^5$  ч. В этом случае величина  $\sigma_{\tau}^t$  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.

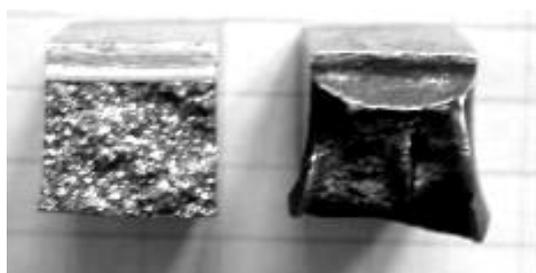


Рис. 2.19. Макроструктурный и микроструктурный анализ металлов и сплавов

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 участ-

ки, 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.

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. 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 растворя-

ются 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/(м<sup>2</sup>·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

Пересчет обоих показателей проводят по формуле

$$v_{\text{кор}} = 8,76K / \gamma,$$

где  $v_{\text{кор}}$  – скорость коррозии, мм/год;  
 $\gamma$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  
 $K$  – потеря массы образца, г/(м<sup>2</sup>·ч).

### 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;

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 серноокислой меди или серной кислоты в присутствии металлической меди.

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

Раствор для испытаний готовят следующим образом: к  $1000 \pm 3$  см<sup>3</sup> воды добавляют сернокислую медь ( $50 \pm 0,1$ ) г, небольшими порциями серную кислоту ( $250 \pm 3$ ) см<sup>3</sup> 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  $8,00 \pm 0,25$  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  $20^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$ .

По окончании испытаний для обнаружения МКК образцы изгибают на оправке на угол  $90^\circ \pm 5^\circ$ , 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 солей  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaNO}_3$ . Агрессивность сред должна быть не меньше той, в которой должны служить испытываемые материалы.

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

## **ТЕМА 3. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### 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, радиоволновой, 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
<b>Акустический</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. <b>Примечание.</b> При использовании упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический»
<b>Вихретоковый</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых к контролируемому объекту.
<b>Магнитный</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом
<b>Оптический</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом
<b>Проникающими веществами</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта. <b>Примечание.</b> При выявлении невидимых или слабо видимых глазом поверхностных дефектов, термин «проникающими веществами» может изменяться на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефекта – на «течеискание»
<b>Радиоволновой</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируе-

	мым объектом
<b>Тепловой</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов, вызванных дефектами
<b>Радиационный</b>	Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. <b>Примечание.</b> В наименовании методов контроля слово «радиационный» может заменяться словом, обозначающим конкретный вид ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т.д.)
<b>Электрический</b>	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 20Гц;
- 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 50Гц до 50МГц. Интенсивность колебаний обычно невелика: не превышает  $1 \text{ кВт/м}^2$ . 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 $c, 10^3 \text{ м/с}$		Плотность $\rho, 10^3, \text{ кг/м}^3$	Волновое сопротивление $z, 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$	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
Трансформаторное 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).



Рис.3.1. Внешний вид пьезоэлектрических преобразователей

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

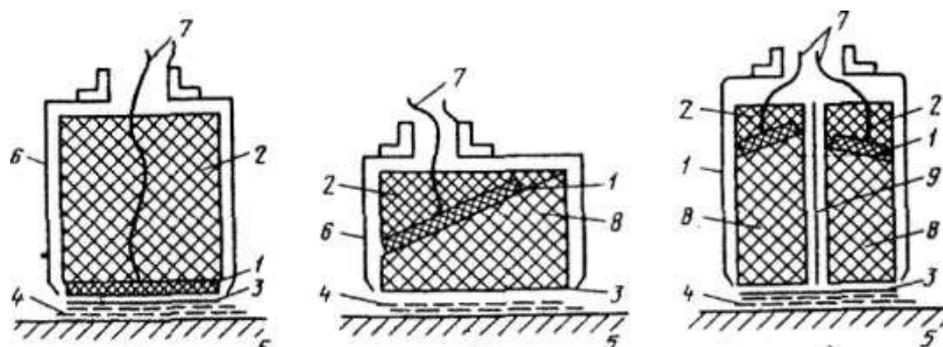
*По направлению ввода упругих колебаний* в исследуемый объект ПЭП бывают прямые, наклонные, комбинированные.

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

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 контактом *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 показана 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.

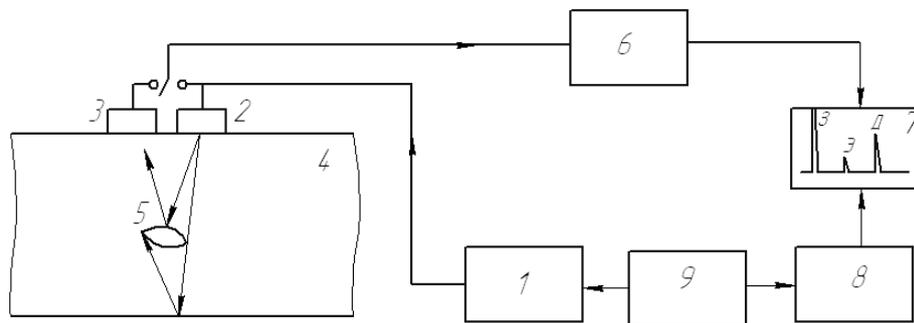


Рис.3.4. Упрощённая структурная схема ультразвукового эхо-дефектоскопа:

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.

*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).

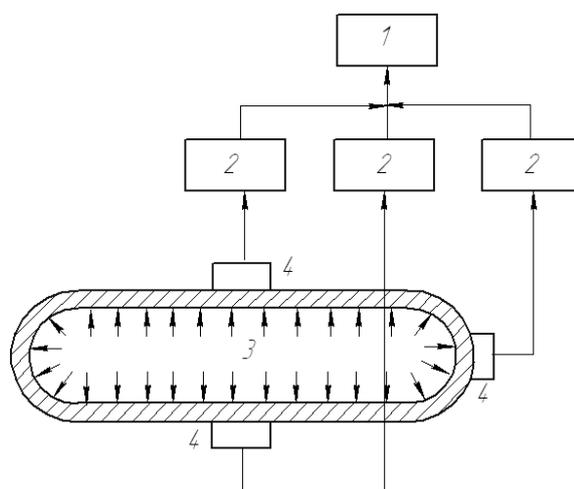


Рис.3.7. Акустико-эмиссионный метод контроля: 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – объект контроля; 4 – приемник; 5 – усилитель; 6 – блок обработки информации с индикатором

Приборы для контроля акустико-эмиссионным методом обычно выполняют многоканальными. Контактующие 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.

На тепловых электростанциях метод акустической эмиссии применяется для контроля ротора паровой турбины (рис.3.8). Контроль, как правило, проводится на остановленном оборудовании без вскрытия цилиндра. 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.

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);

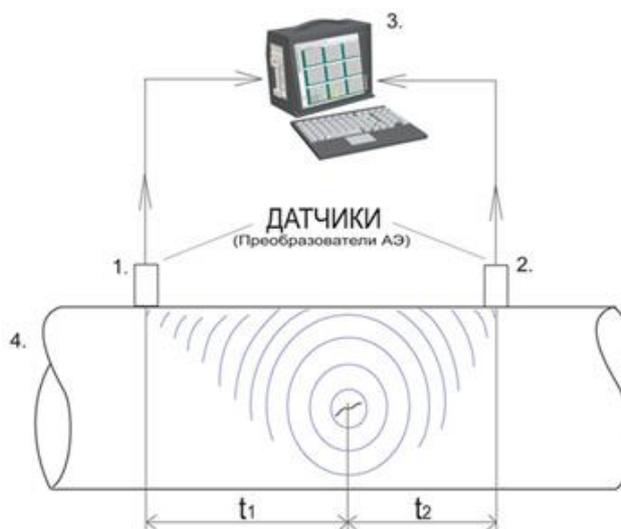


Рис.3.8. Акустико-эмиссионный контроль ротора паровой турбины:

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.

– 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.3.9). 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).

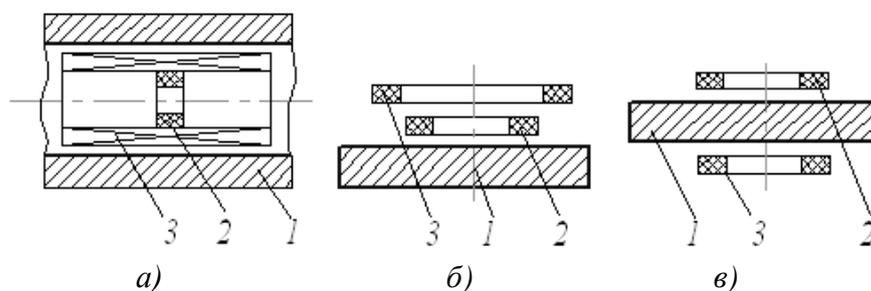


Рис.3.9. Разновидности вихретоковых преобразователей:

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

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.

Конструкция и размеры датчика зависят от формы и размеров изделия и целей контроля. Конструктивные схемы некоторых типов датчиков показаны на рис.3.10.

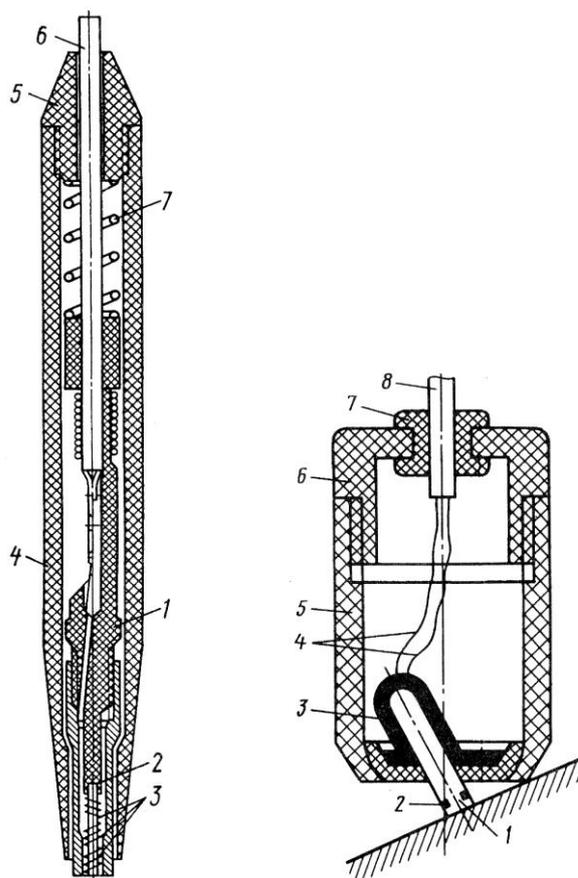


Рис 3.10. Конструкция накладных ВТП:

*a* – 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.3.11. 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.

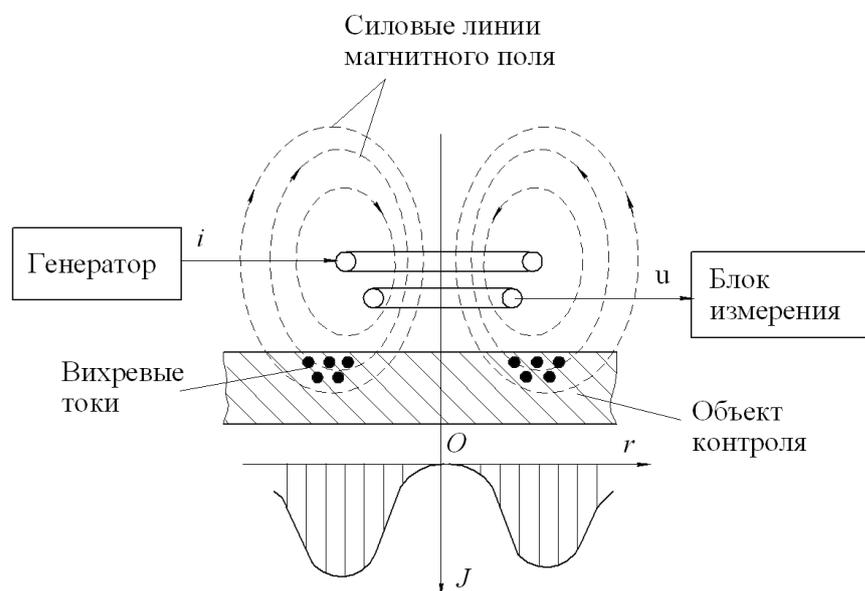


Рис. 3.11. Обобщенная функциональная схема, прибора реализующего метод вихревых токов

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.3.11 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, плены, 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.3.12.



Рис.3.12. 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.3.13).

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 свой-

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

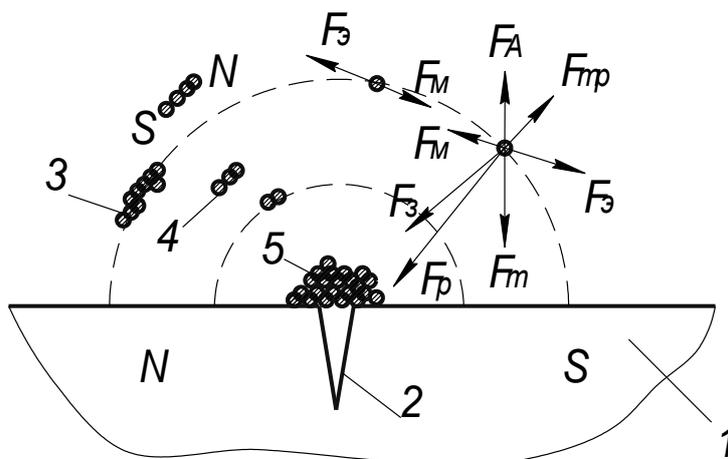


Рис.3.13. Магнитное поле над трещиной:

1 – объект контроля; 2 – трещина; 3,4 – цепочки из частиц порошка; 5 – порошок над трещиной;  $F_z$  – сила магнитного поля, направленная к месту трещины;  $F_m$  – сила тяжести;  $F_A$  – сила выталкивающего действия жидкости;  $F_{mp}$  – сила трения;  $F_{z, m}$  – силы электростатического и магнитного взаимодействия между частицами;  $F_p$  – 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, волосяны 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.3.14.

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);

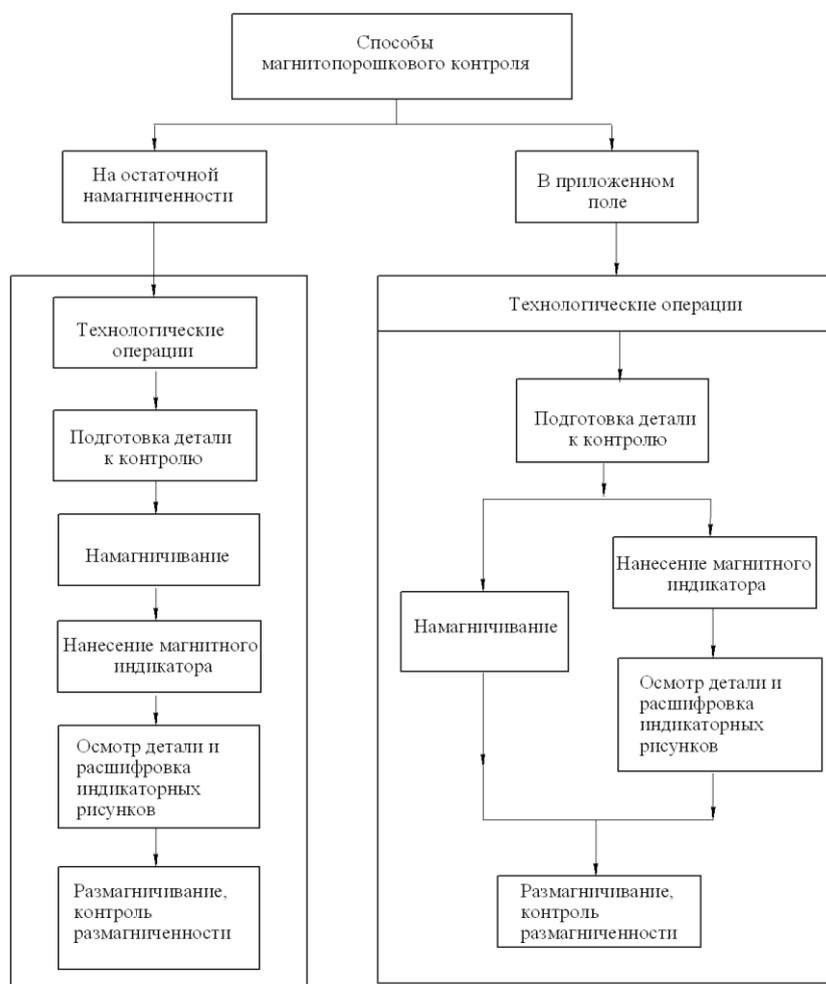


Рис.3.14. Последовательность выполнения технологических операций при контроле деталей магнитопорошковыми способами

– нанесение магнитного индикатора, в качестве которого могут быть использованы: черный магнитный порошок закиси-оксида железа  $Fe_3O_4$ , красноватый 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. 3.15.

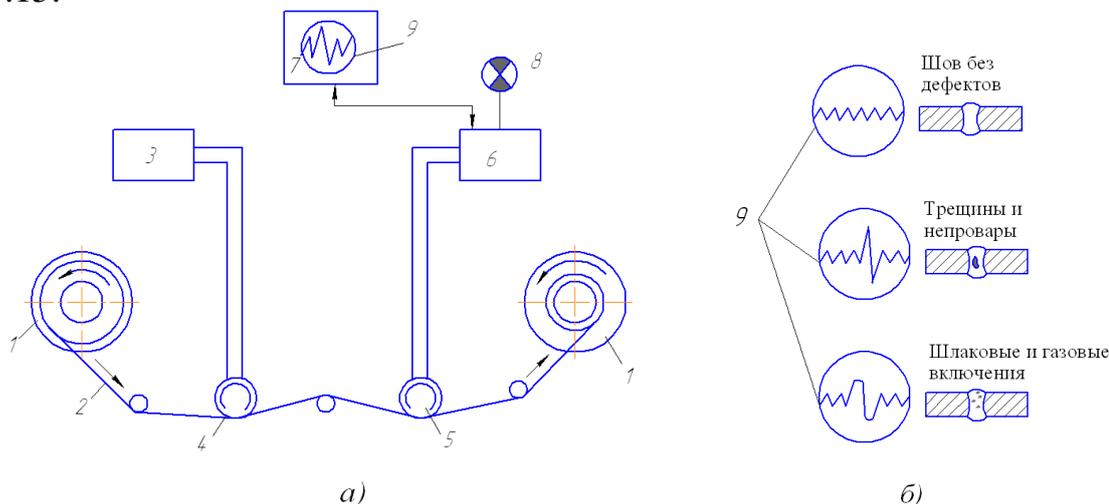


Рис.3.15. Схема магнитографического дефектоскопа: а – воспроизведение записи на экране дефектоскопа, б – характер импульсов на индикаторном экране; 1 – кассета с магнитной лентой; 2 – магнитная лента; 3 – генератор для стирания записи; 4 – «стирающая» головка; 5 – «воспроизводящая» головка; 6 – усилитель; 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. 3.15, 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 достоинствами 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.3.16а).

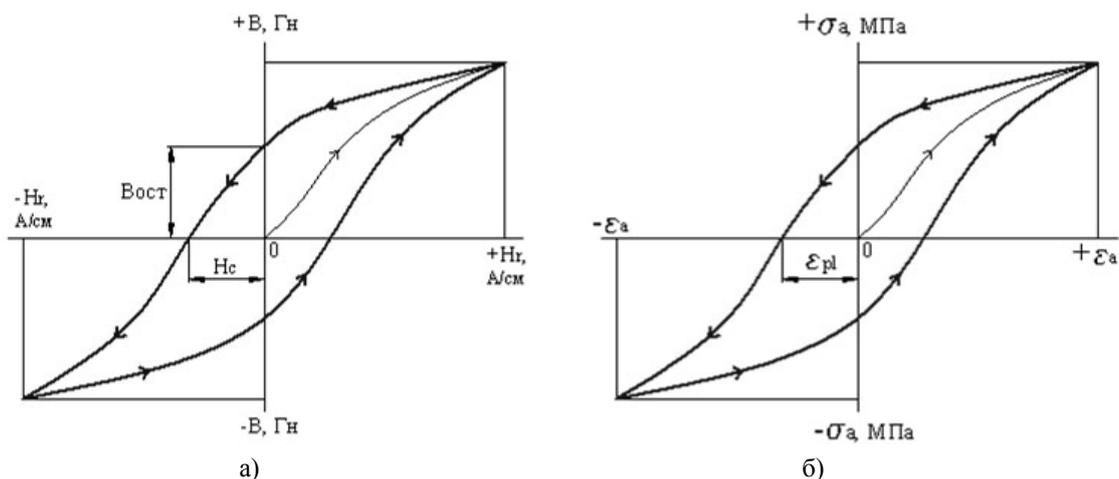


Рис. 3.16. Зависимость коэрцитивной силы и пластической деформации:

а – магнитная петля гистерезиса; б – деформационная петля гистерезиса;  $H_c$  – коэрцитивная сила, А/см;  $B_{ост}$  – остаточная индукция, Гн;  $\epsilon_{пл}$  – остаточная деформация;  $\sigma_a$  – 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.

### 3.1.4. 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.3.17.

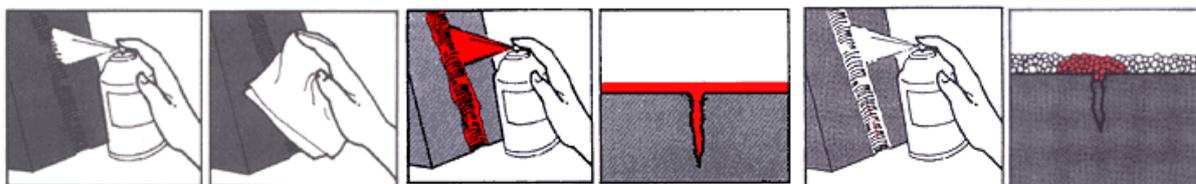


Рис. 3.17. Технологический процесс капиллярного контроля

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  $\sigma$ , 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 $\sigma$ , $10^{-2}$ 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  $\theta$  (рис. 3.18).

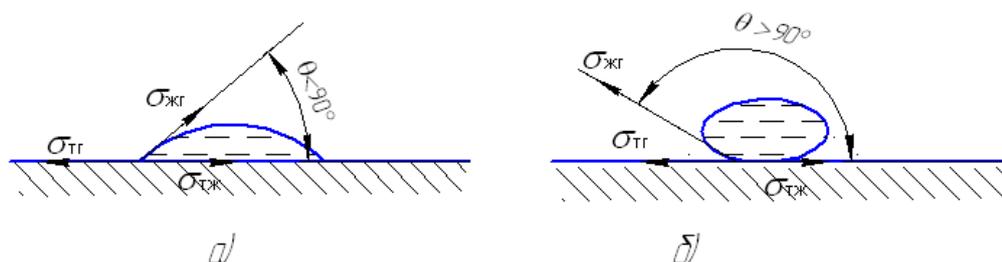


Рис.3.18. Смачивание поверхности твердого тела жидкостью: *a* – смачивание поверхности твердого тела жидкостью; *б* – несмачивание;

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;  
 $\rho$  – 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.3.19.

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.

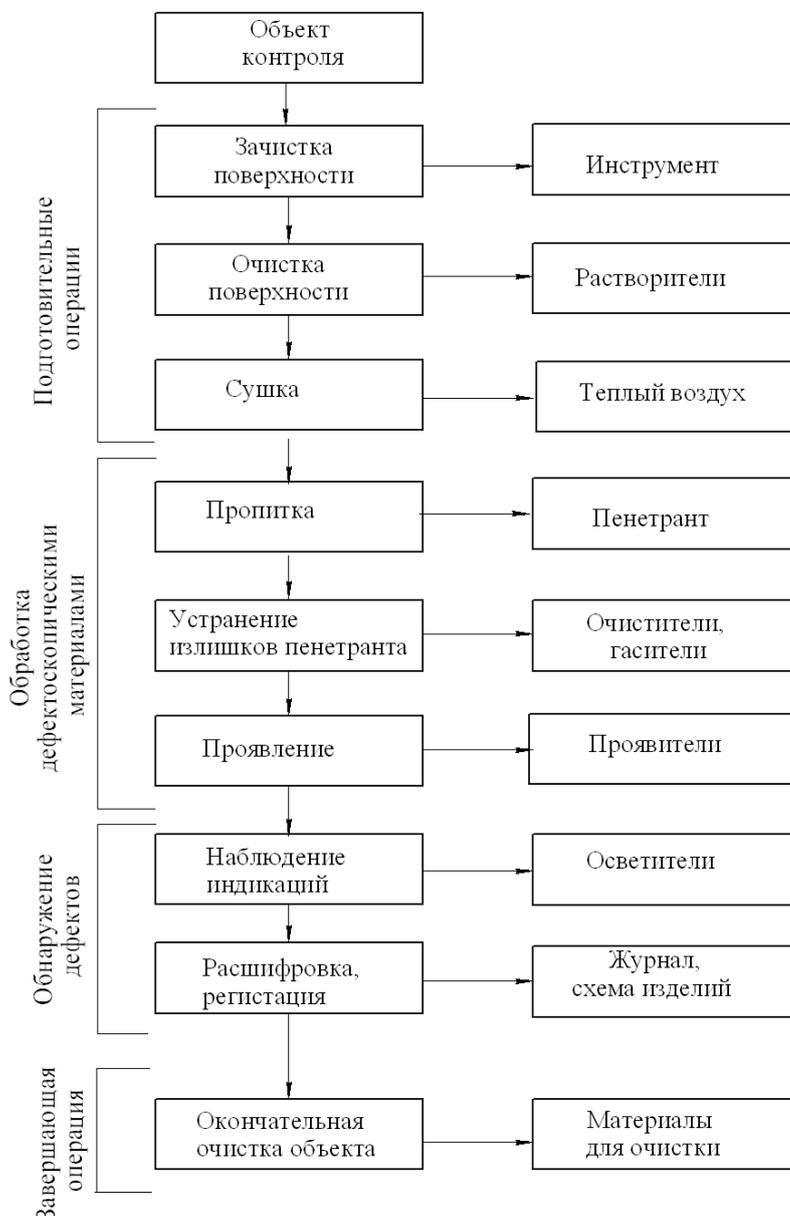


Рис.3.19. Технологическая схема проведения капиллярного контроля

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.

### 3.1.5. 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.3.20): источник ионизирующего излучения; контролируемый объект; детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

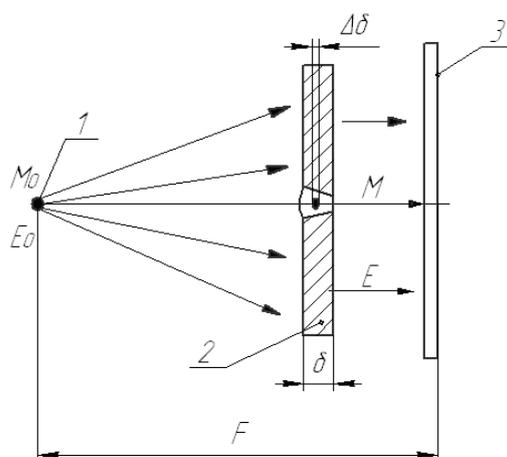


Рис. 3.20. Схема просвечивания: 1 – источник; 2 – объект контроля; 3 – детектор

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется, поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины  $\delta$  и плотности  $\rho$  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.3.21) и соответственно делятся на: радиографический, радиоскопический, радиометрический.



Рис. 3.21. 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.3.22).



Рис. 3.22. 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).

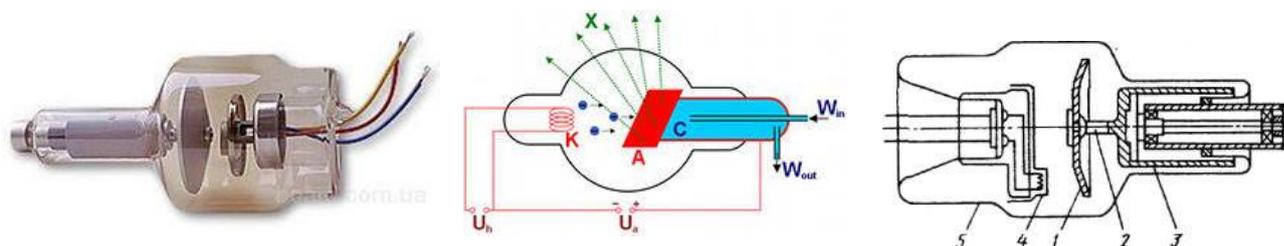


Рис.3.23. Рентгеновская трубка с вращающимся анодом: 1 – анод; 2 – стержень анода; 3 – ротор; 4 – катод; 5 – баллон

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

**Гамма-дефектоскопы.** Значительный объем радиационного контроля осуществляется с помощью гамма-дефектоскопов (рис.3.24), которые заряжают радионуклидными изотопами.



Рис.3.26. Внешний вид гамма-дефектоскопов разных производителей

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

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.3.27) 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.

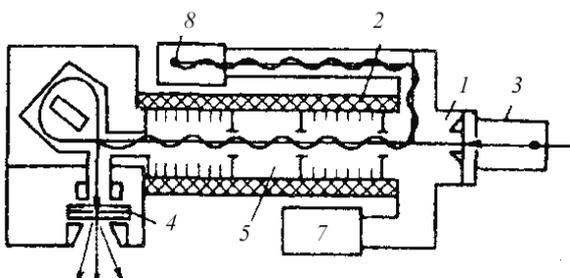


Рис. 3.27. Схема линейного ускорителя: 1 – камера; 2 – электромагнит; 3 – электронная пушка; 4 – мишень; 5 – волновод; 6 – резонатор; 7 – вакуумный насос; 8 – генератор

Для непрерывного увеличения энергии электронов необходимо, чтобы электромагнитная волна двигалась вдоль волновода с такой скоростью, при ко-

торой электрон не выходит за пределы ускоряющей полуволны. С целью получения необходимой для ускорения электронов скорости электромагнитной волны внутри волновода устанавливаются диафрагмы. Таким образом, диафрагмированный волновод является основным узлом линейного ускорителя электронов.

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

Для обнаружения и регистрации ионизирующего рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, потоков нейтронов, позитронов,  $\alpha$ - и  $\beta$ -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  $\gamma$ -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.

### **3.2. БЕЗОБРАЗЦОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА СТАЛЕЙ**

#### **3.2.1. 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.3.28 представлены этапы получения оттиска для контроля микроструктуры металла. Микроструктура металла, наблюдаемая под микроскопом на шлифе, и микроструктура оттиска на полистироле практически не различаются.

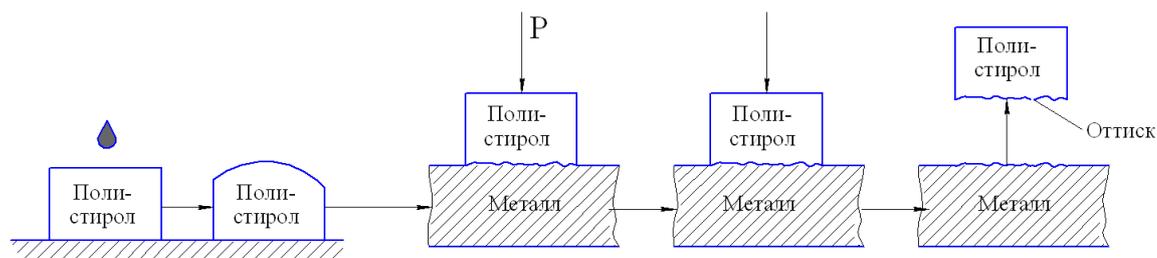


Рис.3.28. Этапы получения оттиска для контроля микроструктуры металла

### 3.2.2. Контроль химического и марочного состава сталей без разрушения деталей

*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. 3.29).

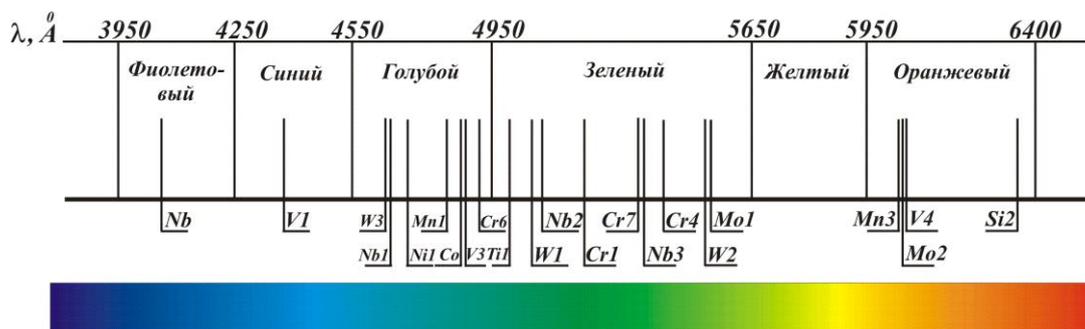


Рис.3.29. Линии спектра металлов

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.

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-флуорисцентный*.

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



а)

б)

Рис.3.30. Внешний вид радиационно-люминесцентного и лазерного портативных анализаторов производства XRF Technology (США): а – радиационно-люминесцентный; б – лазерный

## **ТЕМА 4. СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ**

### **4.1. ВИБРОДИАГНОСТИКА**

*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. 4.1).

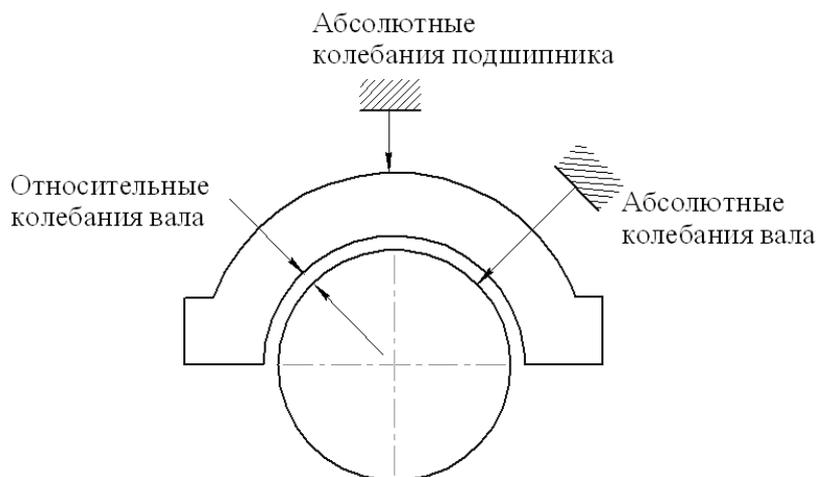


Рис. 4.1. Виды колебаний и места их измерений (на примере подшипника скольжения)

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.

К основным параметрам вибрации относят *виброперемещение, виброскорость, виброускорение*.

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.



Рис. 4.2. Внешний вид вибродатчиков

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  $-30^{\circ}\text{C}$  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).

**Контрольные точки и направления вибрации.** Поскольку реакции механических систем на возбуждение механическими колебаниями определяются сложными физическими процессами, то 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.4.3.

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.

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.

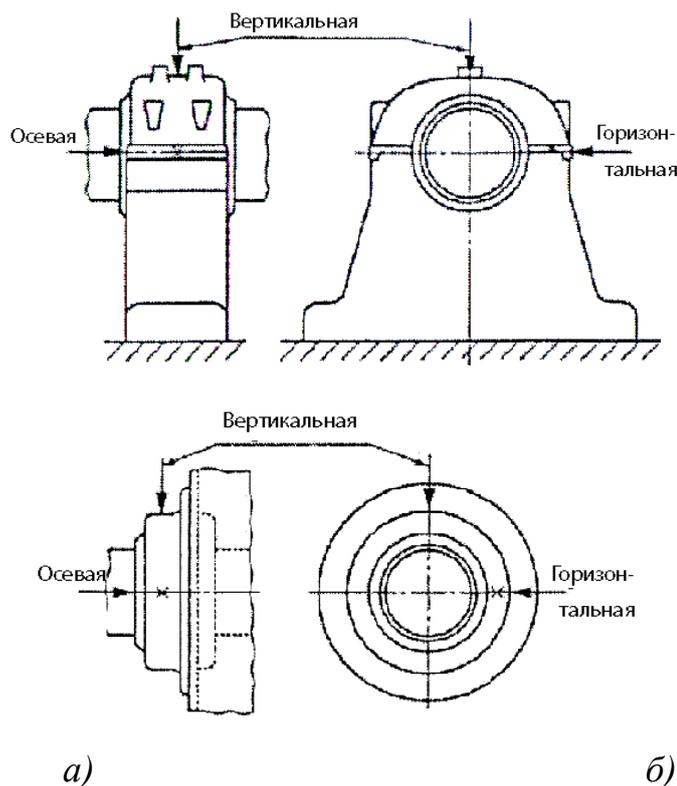


Рис.4.3. Точки измерения вибрации: а – на опоре подшипника; б – на корпусе подшипника

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-

имение, 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.

**Технические средства измерения и анализа вибрации.** Общая структура систем измерения и анализа вибрации, будь то технические средства вибрационного контроля и защиты, вибрационного мониторинга или диагностики, 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.4.4). В современных приборах предусмотрена возможность перегружать данные измерений в ПК для хранения и анализа.



Рис.4.4. Переносные виброанализаторы разных производителей

Широкое распространение получили диагностические системы, включающие переносные коллекторы-анализаторы и совместимые с ними ПК, оснащенные целевым программным обеспечением. По результатам мониторинга генерируется отчетная документация.

*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. 4.5.

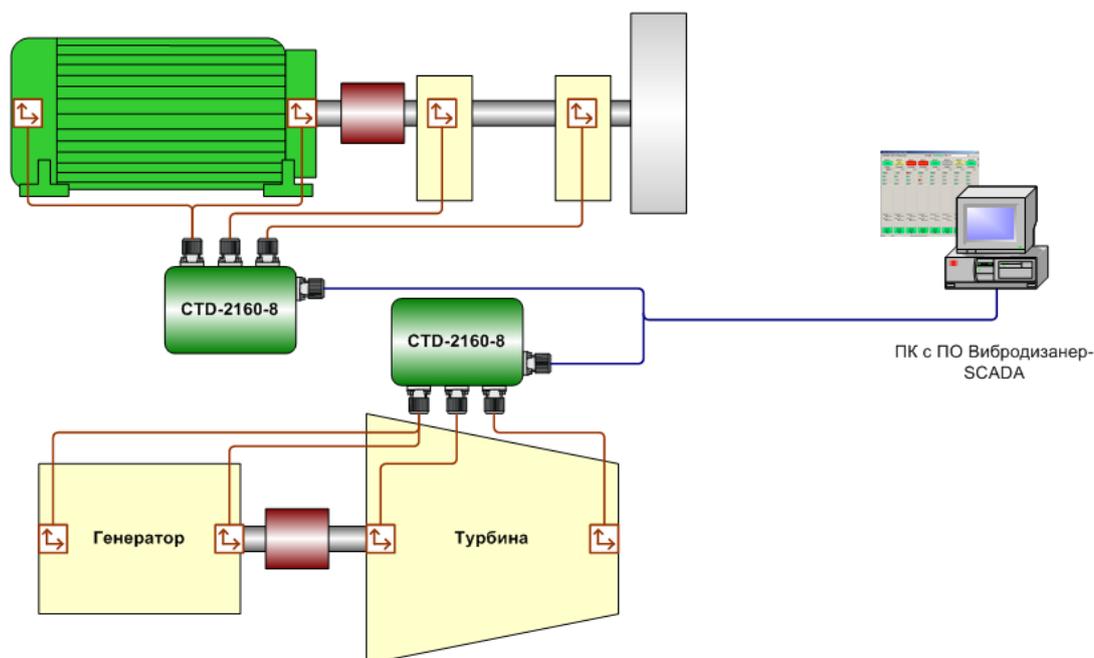


Рис. 4.5. Структурная схема системы непрерывного вибродиагностического контроля

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.

## 4.2. ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ 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.

Результаты термографического контроля, как правило, представляют в виде инфракрасных термограмм, на которых отражается распределение теплового излучения (температуры) объекта (рис.4.6).

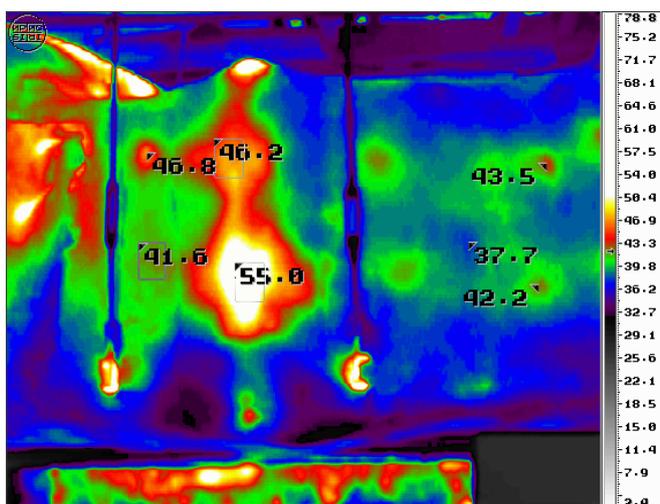


Рис. 4.6. Внешний вид инфракрасной термограммы контролируемого объекта

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.

**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. 4.7.



Рис.4.7. 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. 4.8.

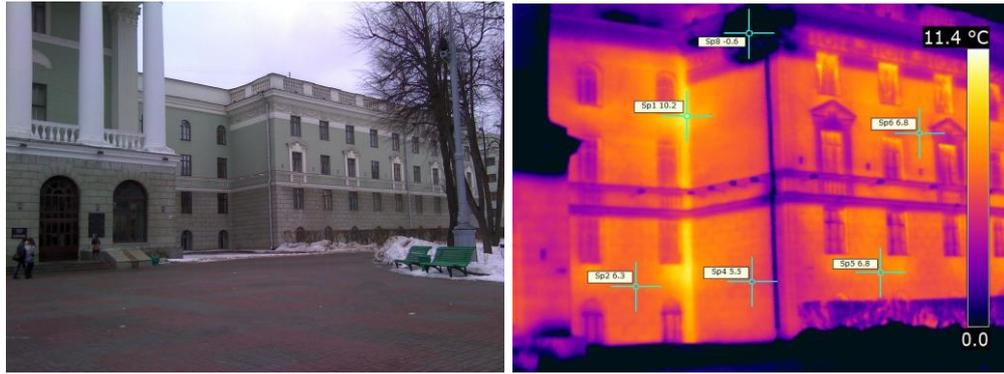


Рис.4.8. Фотография и термограмма здания, полученные в результате контроля тепловизором FLIR T365

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.4.9. представлены результаты тепловизионной диагностики тепловой изоляции паровой турбины и состояния дымовой трубы.

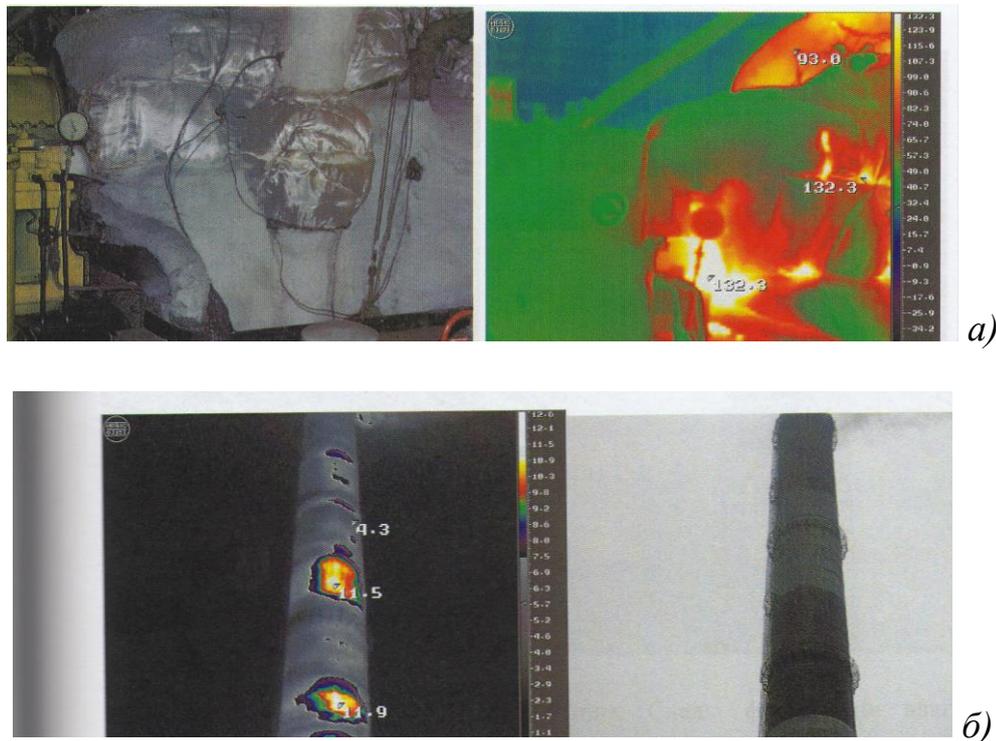


Рис.4.9. Картограммы теплового контроля: а – изоляция паровой турбины (в аварийном состоянии) ; б – дымовая труба с незначительным поверхностным разрушением бетона

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.

#### 4.3. 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;
- бинокулярные, 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 зави-

симости 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  $40\times$ , поле зрения около 5 мм, разрешающую способность  $\sim 3,5$  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 экране. 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. 4.10 показан внешний вид эндоскопов разных производителей.



а)



б)

Рис.4.10. Видеоэндоскопы: 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, кино съемку 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.

## **ТЕМА 5. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **5.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Основной задачей эксплуатационного профилактического контроля изоляции является определение ее состояния и обнаружение скрыто развивающихся дефектов, которые могут привести, в конечном итоге, к аварийному отключению. При обнаружении дефекта необходимо выявить его характер, степень развития, опасности и место расположения. Информация должна быть достаточной для обоснования технически правильного решения. Эта задача включает в себя:

- 1) своевременное отключение оборудования для предупреждения аварии и ремонта изоляции;
- 2) ремонт и восстановление изоляции;
- 3) усиление контроля за изоляцией. При необходимости изменение режима: снижение нагрузки, усиление охлаждения.

Дополнительные задачи:

- 1) накопление опыта;
- 2) установление связей между характером дефекта и электрическими характеристиками изоляции;
- 3) разработка методов восстановления изоляции.

### **5.2. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ, ПРИЧИНЫ И ДИНАМИКА ИХ РАЗВИТИЯ**

Качество изоляции, даже при правильной ее эксплуатации, постепенно снижается в результате действия высокого напряжения, механических и тепловых нагрузок, окружающей среды, химических реакций. В изоляции возникают дефекты.

Дефекты бывают сосредоточенные (местные) и распределенные.

Сосредоточенные – это трещины, локальное увлажнение, загрязнение, местное обугливание, дендриты (ветвистые проводящие каналы), пузырьки и полости.

Распределенные дефекты обычно охватывают большой объем изоляции (условно 5 % и более). Это общее увлажнение изоляции, появление примесей, деструкция изоляции. Распределенные дефекты возникают как в результате эксплуатационных просчетов (перегрев, перегрузка), так и по причине естественного старения изоляции.

### 5.3. ВИДЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ И РАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ

По степени воздействия на изоляцию различают испытаний двух видов: разрушающие и неразрушающие.

Испытания изоляции электрооборудования различного рода регламентируются СТП ГПО «Белэнерго» СТП 09110.20.366-08 «Нормы и объем испытаний электрооборудования белорусской энергосистемы».

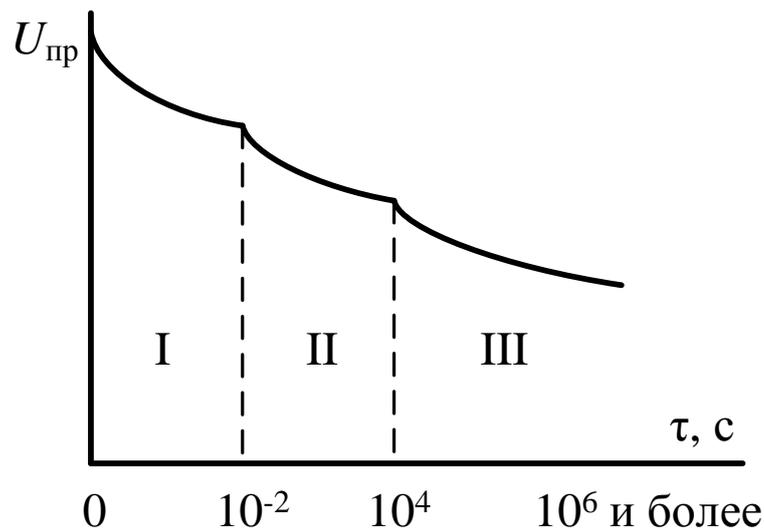
Методы неразрушающего контроля:

- 1) Контроль по электрическим характеристикам – сопротивлению, емкости, тангенсу угла диэлектрических потерь, характеристикам ЧР.
  - 2) Контроль по физико-химическим показателям анализа масла в силовых трансформаторах и маслонаполненном оборудовании;
  - 3) Температурный контроль (тепловизоры);
  - 4) Распределение напряжения по элементам изоляции;
  - 5) По количеству и составу примесных компонентов, выделяющихся при разложении изоляции (ХАГ)
- а также другие специальные методы контроля.

### 5.4. СТРАТЕГИИ, ОБЪЕМ И ПЕРИОДИЧНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ.

В течение длительного времени происходит старение изоляции и снижение ее главного параметра – электрической прочности. Однако, если рассматривать зависимость пробивного напряжения на большом промежутке времени (0 – 10<sup>6</sup> с), то выясняется, что на отдельных интервалах времени механизм разрушения изоляции имеет различную физическую природу. При этом границы действия того или иного механизма разрушения весьма условны и зависят от конструкции изоляции, вида материала и условий работы. Кроме того, зависимость пробивного напряжения от времени его воздействия  $U_{пр} = f(\tau)$  – кривая «жизни» изоляции (рисунок 7.1), является статистической характеристикой, для которой среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  может достигать значительной величины.

Зависимость  $U_{пр} = f(\tau)$  можно разбить на несколько областей, в каждой из которых главную роль будет играть определенный механизм разрушения. Отметим, что границы разделения носят ориентировочный характер и для различных видов изоляции могут отличаться.



**Рисунок 5.1** – Зависимость пробивного напряжения от времени воздействия напряжения

В интервале времени от микросекунд до нескольких миллисекунд главную роль в разрушении изоляции играют электрические процессы. В этом интервале свободные электроны под действием электрического поля приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул и образования лавины электронов. Для развития электрического пробоя в этом случае необходимо, чтобы время приложения напряжения  $\tau$  было больше времени развития разряда  $\tau > \tau_p$ . Очевидно, что это время будет зависеть от толщины и свойств материала, а также от наличия примесей.

Так, для жидких диэлектриков при  $\tau = 10^{-3}$  с снижение электрической прочности можно объяснить влиянием твердых частиц, вокруг которых происходит некоторое увеличение напряженности электрического поля. Электрические процессы, аналогичные рассматриваемым, могут развиваться в изоляции при воздействии атмосферных и внутренних перенапряжений. Поэтому для обеспечения надежной работы оборудования, импульсная прочность внутренней изоляции должна быть больше возможных атмосферных и внутренних перенапряжений с учетом их ограничения защитной аппаратурой.

В интервале II (от долей секунд до нескольких часов) главным механизмом пробоя являются тепловые процессы. Реальная изоляция обладает конечным значением проводимости, кроме того в изоляции протекают поляризационные процессы, связанные с потерей энергии. Поэтому при длительном воздействии напряжения имеет место разогрев изоляции, что в свою очередь приводит к дальнейшему увеличению диэлектрических потерь и дальнейшему увеличению мощности рассеиваемой в диэлектрике.

При нарушениях баланса выделяющейся в изоляции и отводимой от нее тепловой энергии процесс может приобретать лавинный характер. В этом диапазоне времени возможно старение изоляции и от возникновения частичных

разрядов в газовых включениях и расслоениях изоляции, которые могут возникать в изоляции в результате импульсных перенапряжений.

В интервале времени от нескольких часов до нескольких лет (зоны III и IV) старение изоляции и пробивные напряжения определяются медленно протекающими процессами. Главную роль здесь играют частичные разряды слабой интенсивности. В жидкой изоляции процесс медленного старения связан с окислительными процессами, которые развиваются при соприкосновении жидкости с металлами, кислородом и озоном.

Электрическая прочность внутренней изоляции при длительном воздействии напряжения должна быть выше уровня возможных отклонений рабочего напряжения. Однако, определение электрической прочности изоляции при длительном воздействии напряжения экспериментально невозможно, т.к. для этого требуется длительный срок. Поэтому прочность изоляции в больших интервалах определяют по результатам измерения интенсивности процесса старения ( $R_{из}$ ,  $\text{tg } \delta$ , ЧР и т.п.).

В связи с изложенным можно говорить о прочности изоляции при атмосферных перенапряжениях, внутренних перенапряжениях и длительном воздействии напряжения.

Возможны следующие стратегии контроля:

1) дискретный контроль с определенной расчетной периодичностью, которая устанавливается необходимостью сохранения некоторого запаса прочности изоляции к воздействию напряжению. Такой контроль подразумевает знание кривой жизни оборудования и воздействующих перенапряжений.

2) дискретный контроль при плановых (текущих и капитальных) ремонтах. Контроль проводится независимо от состояния изоляции и иногда неоправданно часто.

3) Самый совершенный способ контроля: непрерывный контроль определенных параметров оборудования. Производится на работающем оборудовании и позволяет в отличие от предыдущих способов контроля выявить быстроразвивающиеся дефекты. Подразумевается использование широкого круга датчиков на работающем электрооборудовании и использование компьютерных программ.

## **5.5. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ**

В автоматизированных комплексных системах контроля с использованием электронно-вычислительной техники параметры электрооборудования, а также их изменение во времени поступают с датчиков через преобразователи на компьютер и затем обрабатываются с помощью компьютерных программ, систематизируются и анализируются в соответствии с существующими критериями и нормами оценок.

Для составления компьютерных программ привлекаются специалисты с

опытом практических и теоретических исследований, используется метод экспертных оценок и рекомендаций, применяются принципы математической статистики, теории вероятности и надежности. Такая система контроля изоляции электрооборудования должна входить в состав комплексной системы с регистрацией нагрузки, частичных разрядов, перенапряжений, периодическим контролем масла, измерением вибрации и т.д.

## **5.6. РАЗРУШАЮЩИЕ ИСПЫТАНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ**

Испытания повышенным напряжением обычно проводятся после того, как с помощью комплекса неразрушающих испытаний выявлена предварительная исправность изоляции. Необходимость таких испытаний диктуется тем, что при неразрушающих испытаниях могут остаться не выявленными сосредоточенные дефекты, которые затем при перенапряжениях приведут к пробое. К сожалению, разрушающие испытания негативно влияют и на здоровую изоляцию.

Контроль, диагностика, испытания и профилактические работы – это материальные и трудовые затраты, целесообразность которых должна быть экономически обоснована. Делается это путем расчета приведенных затрат, где учитывается ущерб при отказах электрооборудования и стоимость профилактических и ремонтных мероприятий.

Во многих случаях целесообразность проведения таких мероприятий вызывает вопросы, т.к. затраты значительно больше эффекта. Однако, если говорить о возможном предотвращении таких аварий, как на Чернобыльской АЭС, любые материальные затраты будут оправданы.

## **5.7. ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Устройство, эксплуатация и ремонт энергетического оборудования, должны отвечать требованиям правил техники безопасности. Каждый работник должен знать и строго выполнять правила техники безопасности, относящиеся к обслуживаемому оборудованию.

Руководящие сотрудники обязаны обеспечить проведение организационных и технических мероприятий по созданию безопасных условий труда, инструктаж и обучение персонала безопасным методам работы и контроль за выполнением правил техники безопасности.

Организационными мероприятиями, обеспечивающими безопасность работ являются: оформление работы нарядом или распоряжением; допуск к работе; надзор во время работы; оформление перерыва в работе; порядок перевода на другое рабочее место; оформление окончания работы.

Технические мероприятия, производимые в электроустановках – это производство отключений, наложение заземлений, ограждение рабочего места и вывешивание предупредительных плакатов, проверка отсутствия напряжения. Состав технических мероприятий в каждом конкретном случае определяет лицо, выдающее наряд. Это же лицо несет ответственность за их полноту.

## ТЕМА 6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗОЛЯЦИИ

### 6.1. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Контроль изоляции по электрическим характеристикам – это дискретный метод контроля, требующий отключения оборудования. Поэтому проведение и периодичность такого контроля определяется плановыми остановами или выводом агрегата в ремонт по показателям непрерывного параметрического контроля. Методы и приборы оценки изоляции по электрическим характеристикам достаточно разработаны, многократно апробированы практикой и основываются на сравнительно изученных физических процессах, протекающих в изоляции при включении на постоянное или переменное напряжение.

### 6.2. ОБЩАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Схема замещения изоляции имеет следующий вид (рисунок 6.1)

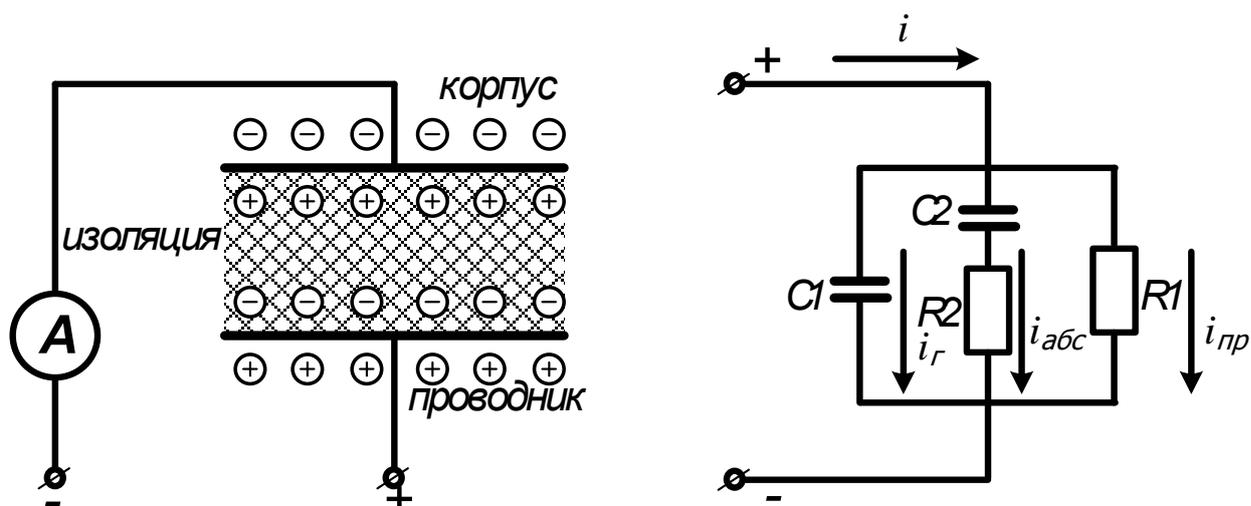


Рисунок 6.1 – Схема замещения изоляции при испытаниях постоянным током

При приложении к изоляции напряжения она будет представлять собой конденсатор сложной формы. Емкость конденсатора определяется поверхностью соприкосновения изоляции с корпусом и обмоткой, а также толщиной и диэлектрической проницаемостью изоляции. При приложении напряжения эта емкость с заряжается. На поверхности обмотки и корпуса расположатся положительные и отрицательные заряды. Под действием их поля возникают поляризационные явления.

Ток через геометрическую емкость  $C_1$   $i_r$  – это ток заряда геометрической емкости и электронной и ионной поляризации. Он мгновенно затухает. Ток абсорбции  $i_{abc}$ , протекающий по цепи  $C_2$  и  $R_2$ , является результатом межслоевой

и дипольной поляризации. Через сопротивление  $R_1$  протекает ток сквозной проводимости  $i_{скв}$  (рисунок 6.2).

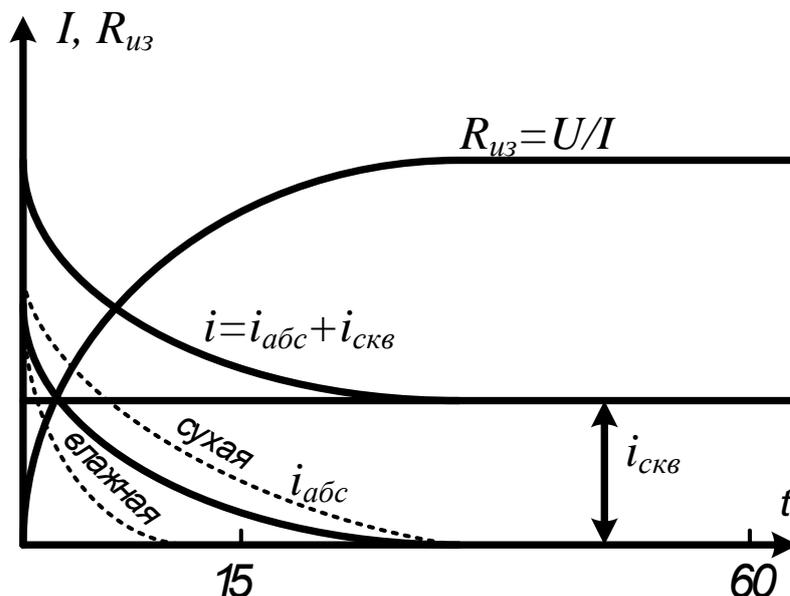


Рисунок 6.2 – Изменение полного тока через изоляцию во времени

Ток абсорбции  $i_{абс}$  убывает по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T = C_2 R_2$ . Чем лучше диэлектрические свойства изоляции, тем выше  $R_2$  и тем медленнее затухает ток абсорбции. Отношение сопротивлений, измеренных через 60 с и через 15 с после приложения напряжения, называется коэффициентом абсорбции

$$k_{абс} = \frac{R_{60}}{R_{15}}. \quad (6.1)$$

$k_{абс}$  является показателем степени внутренней увлажненности изоляции. При сухой изоляции его величина больше 2, при влажной – стремится к 1.

$k_{абс}$  не зависит от наружного увлажнения, которое оказывает большое влияние на величину сквозной проводимости.

Также сопротивление изоляции сильно зависит от температуры.

### 6.3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И КРИТЕРИИ СОСТОЯНИЯ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ И ТОКАМ АБСОРБЦИИ.

Для измерения сопротивления изоляции используется мегомметр. Мегомметры выпускаются на напряжение 500, 1000 и 2500 В. К изоляции прикладывается более низкое напряжение из-за применения ограничивающего сопротивления  $r_2$ . (рис. 6.4)

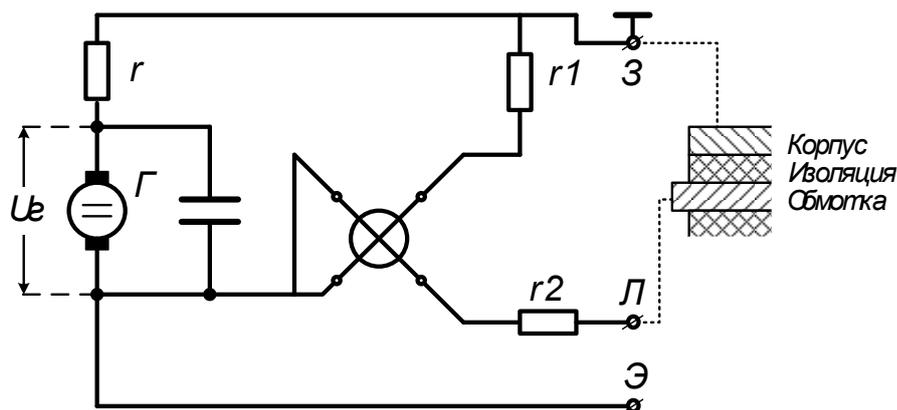


Рисунок 6.3 – Принципиальная схема мегомметра:

$r$  и  $r_2$  – ограничивающее сопротивление в цепи тока;  $r_1$  – добавочное (защитное) сопротивление в цепи напряжения;  $\Gamma$  – генератор с постоянными магнитами;  $\mathcal{L}$  – логометр

$$U_{\text{из}} = U_{\Gamma} \frac{R_{\text{из}}}{r_{\Sigma} + R_{\text{из}}} \quad (6.2)$$

где  $r_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление включенное с генератором последовательно в измерительную цепь.

Каждому положению стрелки логометра на шкале соответствует определенная величина сопротивления.

Логометр обладает высокой чувствительностью. Это важно в связи с тем, что изоляция имеет большое сопротивление  $R_x$  и токи в измерительной цепи могут исчисляться [мкА]. Кроме того, для создания достаточного тока в измерительной цепи требуется большое напряжение. В качестве источника тока высокого напряжения применяют генератор постоянного тока с ручным приводом. Для исключения колебаний напряжения, неизбежных при использовании ручного привода, используется центробежный регулятор скорости. Колебания объясняются зарядно-разрядными процессами в емкости измеряемого объекта. Чем больше емкость, тем больше колебания стрелки.

Добавочное сопротивление  $r_1$  подбирают так, чтобы при закороченных Л и З и номинальной скорости вращения стрелка устанавливалась в нулевое положение. При разомкнутых Л и З стрелка должна устанавливаться на «∞». Э используется при измерениях с экранированием.

При измерении сопротивления мегомметром объект отключают, снимают остаточный заряд. При измерении сопротивления главной изоляции зажим З соединяется с заземленным корпусом, Л – с токоведущими частями; при измерении сопротивления междуфазной изоляции Л и З присоединяются к токоведущим частям разных фаз. Зажим Э заземляется. Рукоятка вращается со ско-

рость 120 об/мин (2 об/сек). При измерении коэффициента абсорбции рукоятка должна быть предварительно раскручена.

Измерения следует производить одним и тем же прибором при одинаковой температуре, снимая показания через один и то же промежуток времени. Результаты измерений сопоставляются с прежними.

Сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции характеризуют **среднее состояние изоляции**. Местные дефекты выявляются только в том случае, если они значительны и место повреждения загрязнено.

Если местные дефекты незначительны, то напряжения мегомметра не хватит для пробоя изоляции.

#### 6.4. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОТЕРЯМ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ И МЕТОДЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

При переменном токе через изоляцию кроме тока абсорбции  $i_{абс}$  и сквозной проводимости  $i_{скв}$  протекает емкостный ток  $I_{C\sim}$ . Суммарный ток разлагается на две составляющие  $I_a$  и  $I_C$ , соотношение которых дает  $\text{tg } \delta$ . Тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  характеризует структуру и качество изоляции. Т.к. угол  $\delta$  мал,  $\text{tg } \delta \approx \delta$ . По  $\text{tg } \delta$  определяются наличие в изоляции посторонних включений, воды и пара, слоистости структуры. Угол диэлектрических потерь говорит о среднем состоянии изоляции и обычно не выявляет местные дефекты. Измерение  $\text{tg } \delta$  рекомендуется производить для вводов со сложной изоляцией, для обмоток трансформаторов, изоляционного масла и деталей электрических аппаратов. Для оценки качества изоляции генераторов  $\text{tg } \delta$  не является показателем, т.к. их изоляция обладает большой емкостью (измерения нечувствительны).

Чем меньше величина  $\text{tg } \delta$ , тем лучше качество изоляции.

Для измерения  $\text{tg } \delta$  применяется мост (рисунок 6.4).

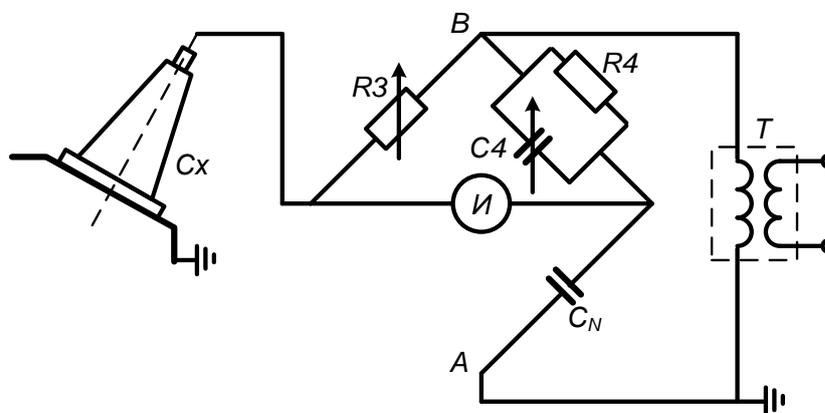


Рисунок 6.4 – Схема моста для измерения  $\text{tg } \delta$

$C_N$  – эталонная емкость.

Применяется высоковольтный мост, собранный по перевернутой схеме (узел  $A$  заземлен,  $B$  – под напряжением).

Регулированием  $R_3$  и  $C_4$  добиваются равновесия моста.

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4, \quad C_x = \frac{R_4}{R_3} C_N.$$

### 6.5. ЕМКОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ. ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ И МЕТОДЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ.

Для контроля увлажнения изоляции используется зависимость емкости изоляционной конструкции от температуры или от частоты. Емкость при увлажнении и нагреве увеличивается.

По методу «емкость-температура» измерения проводятся при 20 и 80°C. Допускается

$$C_{80}/C_{20} \leq 1,2.$$

Для сухой изоляции это отношение стремиться к 1. Нагрев и охлаждение контролируемого объекта занимают много времени, поэтому используется метод «емкость-частота».

В методе «емкость-частота» измерения проводятся при 2 и 50 Гц. Для сухой изоляции  $C_2 = C_{50}$ , для влажной  $C_2 > C_{50}$ . Допустимо

$$(C_2 - C_{50}) / C_2 = 0,2.$$

При влажной изоляции на процесс при 2 Гц успевают повлиять медленная поляризация. Измерения производятся прибором ПКВ.

## ТЕМА 7. ВЫЯВЛЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ

### 7.1. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ И ИХ ПАРАМЕТРЫ. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Частичными разрядами называются разрядные процессы, развивающиеся под действием приложенного напряжения на части изоляции. Наиболее интенсивный характер ЧР имеют в резко неоднородных полях на ослабленных участках изоляции – в газовых включениях. Такие участки возникают при технологических дефектах или механических повреждениях изоляции.

Частичный разряд – это искровой разряд очень маленькой мощности, который образуется внутри изоляции, или на ее поверхности, в оборудовании среднего и высокого классов напряжения. С течением времени, периодически повторяющиеся частичные разряды, разрушает изоляцию, приводя в конечном итоге к ее пробое. Обычно разрушение изоляции под действием частичных разрядов происходит в течение многих месяцев, и даже лет. Таким образом, регистрация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация места их возникновения, позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

Для выяснения сущности ЧР воспользуемся схемой замещения изоляции (рис. 7.1б).

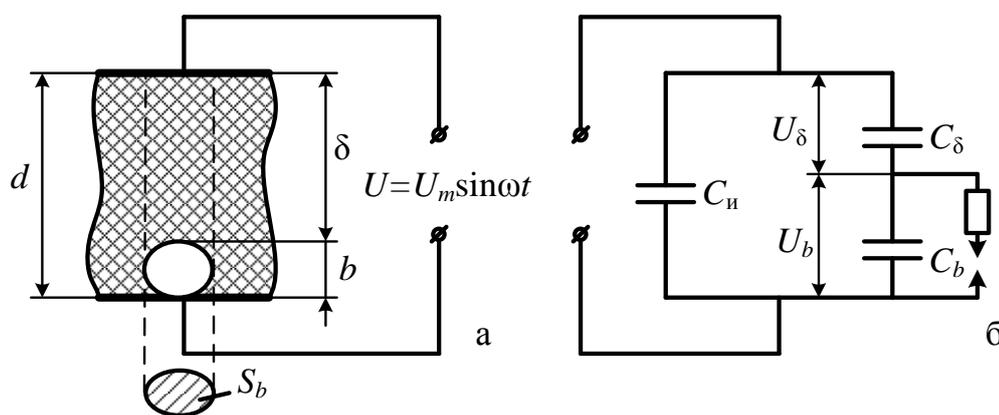


Рисунок 7.1 – Изоляция с повреждением (а) и ее схема замещения (б)

Частичные разряды в воздушном включении толщиной  $b$  (рис. 7.1а) возникнут, если напряжение на промежутке  $U_b$  будет равным или большим некоторого критического значения  $U_{крb}$ , при котором возникают ЧР ( $U_b \geq U_{крb}$ ). Если к изоляции приложено внешнее синусоидальное напряжение  $U = U_m \sin \omega t$ , при котором возникают ЧР на промежутке  $b$ , то

$$U_b = U_m \frac{C_\delta}{C_\delta + C_b}. \quad (7.1)$$

Тогда напряжение, приложенное к изоляции, при котором возникают ЧР на промежутке  $b$  из последнего выражения будет

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{\sqrt{2}} \frac{C_\delta + C_b}{C_\delta}. \quad (7.2)$$

Так как  $d \gg b$ , то  $\delta \approx d$  и для емкостей  $C_\delta$  и  $C_b$  можно записать

$$C_\delta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_b}{d}, \quad \text{и} \quad C_b = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_b S_b}{b}, \quad (7.3)$$

а напряжение возникновения ЧР, приложенное к изоляции, будет

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{\sqrt{2}} \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b}, \quad (7.4)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_b$  – соответственно диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика и газового включения;

$S_b$  – максимальная площадь в поперечном сечении газового включения.

В случае неоднородного поля

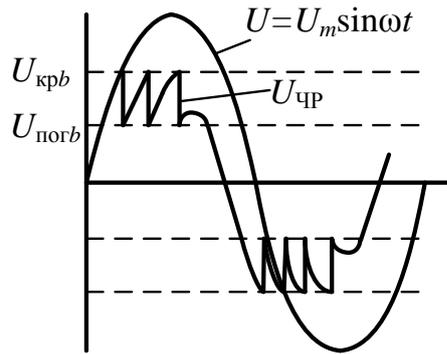
$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{кр}b}}{k_n \sqrt{2}} \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b}. \quad (7.5)$$

Из последнего выражения следует, что увеличить значение разрядного напряжения  $U_{\text{ЧР}}$  можно путем увеличения  $\varepsilon_b$ , т.е. пропиткой или более плотной намоткой изоляции.

Разряд в воздухе наступает при минимальном напряжении  $U = 300$  В, следовательно

$$U_{\text{ЧР}} = 0,2 \frac{\varepsilon_b \cdot d}{\varepsilon \cdot b \cdot k_n}, \text{ кВ}. \quad (7.6)$$

При воздействии синусоидального напряжения (рис. 3.4) ЧР могут возникать многократно в течение полупериода, если напряжение на газовом включении  $U_b > U_{\text{кр}b}$ , и погасать, если  $U_b < U_{\text{пог}b}$ , где  $U_{\text{пог}b}$  – напряжение погасания частичного разряда.



**Рисунок 9.2** – Изменение напряжения на газовом включении при ЧР

Если значения  $U_{прb}$  и  $U_{погb}$  не зависят от полярности, то число ЧР в единицу времени будет

$$n_f = 4f \frac{U - \eta U_{чр}}{U_{чр}(1 - \eta)}, \quad (7.7)$$

где  $U$  – воздействующее на изоляцию напряжения;

$$\eta = U_{погb} / U_{прb} = 0,5 \div 0,8.$$

При наличии в изоляции нескольких газовых включений

$$n_f = 4f \sum \frac{U - \eta U_{чр}}{U_{чр}(1 - \eta)}. \quad (7.8)$$

Выделяющаяся в канале энергия  $W_{чр}$  идет на разрушение изоляции

$$W_{чр} = C_{эж} \left( \frac{U_{крb}^2 - U_{погb}^2}{2} \right). \quad (7.9)$$

При оценке интенсивности ЧР пользуются величиной кажущегося заряда  $q_x$  единичного частичного разряда, который связан с нейтрализующимся при каждом частичном разряде зарядом, приводящим к уменьшению напряжения на электродах на величину  $\Delta U_x$

$$q_x = \Delta U_x C_x, \quad (7.10)$$

где  $C_x$  – емкость всего диэлектрика.

Также для оценки интенсивности пользуются величиной среднего тока ЧР  $I = n \cdot q_x$ , где  $n$  – число разрядов в секунду.

Разрушение изоляции имеет место, если  $q_x = 10^{-9} - 10^{-6}$  Кл. Начальные ЧР возникают при  $q_x = 10^{-14} - 10^{-11}$  Кл для бумажно-масляной изоляции (БМИ) и  $q_x = 10^{-12}$  Кл для маслосбарьерной (МБИ). Эти разряды возникают в местах с сильно неоднородным полем и, хотя не вызывают разрушения изоляции, но

увеличивают  $tg\delta$  и количество растворенных газов, особенно в МБИ и БМИ, что в конечном итоге может привести к тепловому пробую. При  $q_x = 10^{-7} - 10^{-9}$  Кл ЧР могут привести к пробую и считаются критическими. Такие ЧР недопустимы.

В сплошных изоляционных конструкциях (МБИ и БМИ) ЧР могут возникать вдоль поверхности твердой изоляции. В этом случае на поверхности могут возникать проводящие ветвистые каналы (дендриты), длина которых при перенапряжениях может увеличиться, что в конечном итоге приведет к пробую или перекрытию изоляции по поверхности. Эти процессы наиболее интенсивно развиваются в неоднородном электрическом поле и в том случае, если барьеры расположены не перпендикулярно силовым линиям электрического поля. Такие разряды могут возникать и в щелях между твердой изоляцией.

## 7.2. СХЕМЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ. ТРУДНОСТИ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В момент частичного разряда в полости изоляции напряжение на изоляции скачком снижается на величину  $\Delta U_x$ . Разряды периодически повторяются и скачкообразные колебания напряжения на объекте могут быть зарегистрированы с помощью чувствительных приборов. В лабораторной практике для исследования ЧР может применяться схема, приведенная на рисунке 7.3.

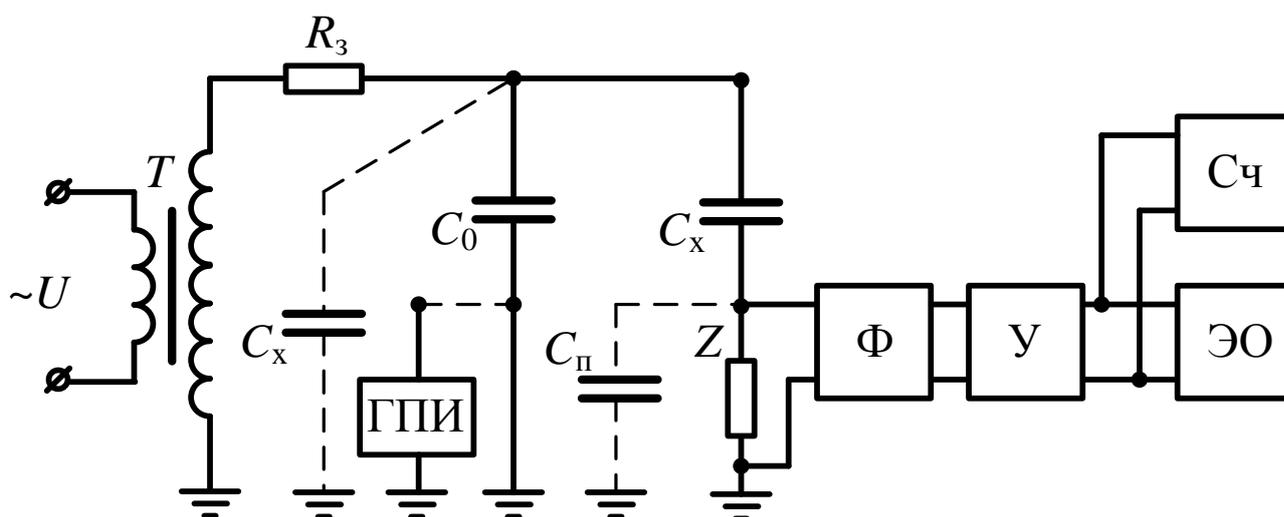


Рисунок 7.3 – Принципиальная схема установки для исследования ЧР

Параметры схемы выбираются такими, чтобы скачек напряжения на изоляции  $C_x$  привел к возникновению затухающего аperiodического процесса в контуре  $C_0 - C_x - Z \parallel C_{\Pi}$ .

Измерительная часть схемы включает в себя активно-емкостной фильтр (Ф), предупреждающий проникновение к усилителю напряжения промышленной частоты, широкополосный усилитель (У), осциллограф (ЭО), счетчик импульсов (Сч). Схема дает возможность зарегистрировать амплитуду отдельных импульсов ЧР и определить средний ток ЧР, который равен произведению числа импульсов и усредненного кажущегося заряда единичного ЧР. Схема позволяет регистрировать ЧР с зарядом  $q_x \geq 10^{-12} - 10^{-13}$  Кл.

ЧР разряды могут также быть обнаружены путем приема электромагнитных колебаний, излучаемых при разрядах. Приборы, основанные на этом принципе, называются дефектоскопами и представляют собой радиоприемник с рамочной антенной. Принятые колебания усиливаются и измеряются прибором на выходе.

Дефектоскопы могут использоваться для определения поврежденной гирлянды изоляторов и при поиске места повреждения кабелей. Однако этот прибор чувствителен к помехам и не дает возможности производить измерения для экранированной изоляции.

В настоящее время основной проблемой, возникающей при проведении измерений частичных разрядов в изоляции высоковольтных трансформаторов, является очень сложная отстройка от помех.

Причин этому несколько:

Во-первых, мощные силовые трансформаторы, по своему назначению, всегда являются узлами энергосистем, непосредственно вокруг которых устанавливается достаточно много другого, вспомогательного и измерительного высоковольтного оборудования, в котором также могут возникать частичные разряды. Все эти высокочастотные импульсы, в той или иной мере, по соединительным линиям, или путем электромагнитного излучения, наводятся в контролируемом трансформаторе.

Во-вторых, практически к каждому трансформатору подключены одна или несколько воздушных линий электропередачи, «собирающие» с большой территории грозовые и иные высокочастотные импульсы. Эти импульсы часто имеют большую амплитуду, регистрируются измерительными приборами, и существенно затрудняют анализ «внутренних» частичных разрядов, возникающих в изоляции самого трансформатора.

В-третьих, чаще всего, высоковольтные трансформаторы располагаются на открытых подстанциях, поэтому их работу всегда сопровождает большое количество коронных разрядов, интенсивность которых зависит от многих параметров – температуры и влажности воздуха, состояния поверхностей изоляторов и т. д. Чем выше рабочее напряжение трансформатора, тем больше проблем от коронных разрядов возникает при проведении измерений.

В-четвертых, работа трансформаторов часто сопровождается существенными изменениями нагрузочных и тепловых режимов. Кроме того, в трансформаторах присутствуют устройства, изменяющие их параметры в процессе работы, например, РПН. В результате частичные разряды в изоляции трансформаторов могут иметь нестационарный характер, увеличиваться и уменьшаться, и

даже появляться и исчезать.

Все эти четыре причины приводит к тому, что большое количество практических измерений частичных разрядов в трансформаторах являются некорректными.

В трансформаторном оборудовании наиболее информативным местом для установки датчиков частичных разрядов являются высоковольтные вводы.

Конструктивно, ввод представляет собой проводящий стержень, заключенный в изолирующий корпус из керамики или другого диэлектрика, по которому протекает ток. Внутри корпуса ввода находится изолирующая среда.

Для снижения напряженности поля внутри ввода вокруг проводящего стержня, располагаются изолированные друг от друга слои фольги, имеющие различную ширину, уменьшающуюся по ширине, по мере удаления от проводящего стержня (рисунок 7.4). В результате этого весь высоковольтный потенциал, приложенный к вводу, равномерно распределяется по высоте, вдоль изоляционной крышки, и максимальная удельная напряженность электрического поля, по высоте ввода, усредняется.

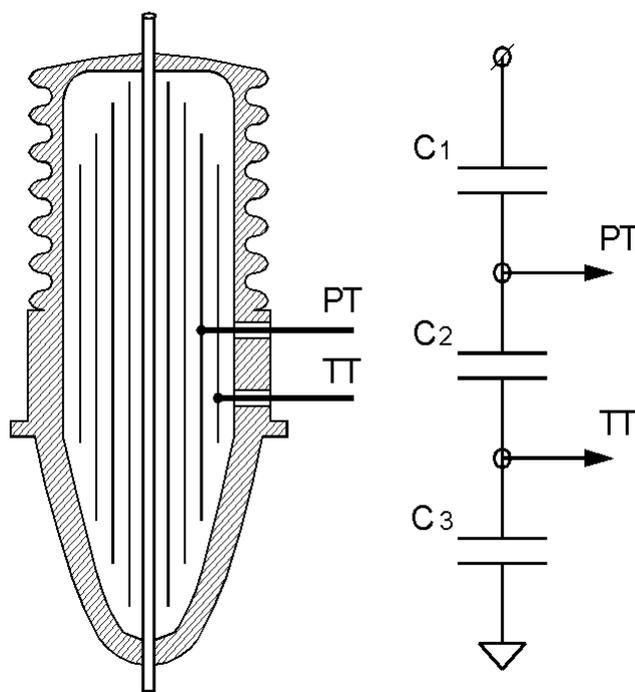


Рисунок 7.4 – Высоковольтный ввод трансформатора

Последняя, внешняя обкладка остова ввода, наиболее узкая, выводится на внешнюю поверхность ввода, где принудительно замыкается на корпус ввода (бака трансформатора). Этот вывод в нашей литературе называется ПИН, а в зарубежной литературе обозначается термином «Test Tap». Для безопасности вывод ПИН ввода всегда закрывается защитным колпаком.

Высоковольтный ввод трансформатора, имеющий вывод от крайней обкладки на внешний вывод типа ПИН, является лучшим датчиком и конденсаторо-

ром связи, предназначенным для измерения частичных разрядов. Измерительным ПИН снабжаются все вводы, с рабочим напряжением 110 кВ и выше.

Суммарная емкость ввода между токоведущим стержнем и обкладкой, выведенной на ПИН,  $C_1$  для стандартных вводов разных напряжений примерно одинакова и составляет 500–600 пФ.

На практике встречаются вводы, имеющие по два вывода на внешний разъем, от последней обкладки ввода, и от предпоследней обкладки. В зарубежной литературе они называются «Test Tap», это вывод от последней обкладки, о котором мы уже упоминали, и «Potential Tap», вывод от предпоследней обкладки. Назначение вывода «Test Tap» вполне понятно, с его помощью, обычным образом, контролируется состояние изоляции ввода. Вывод «Potential Tap» предназначается для отбора небольшой мощности от ввода, используемой на цели управления и защиты трансформатора. В стандартных условиях эксплуатации оба эти вывода обычно заземляются, т. к. отбор мощности от ввода, на практике, применяется достаточно редко. Если вывод «РТ» у ввода отсутствует, то емкость «С2» автоматически суммируется с емкостью «С1».

Все выводы ПИН ввода должны всегда быть заземлены, или подключены к земле через «небольшое сопротивление». Подключение датчиков частичных разрядов к ПИН вводов трансформатора производится только на отключенном оборудовании. Наиболее эффективным и безопасным способом установки датчиков и регистрации частичных разрядов на ПИН вводов силовых трансформаторов является использование датчиков стационарной конструкции. Они предварительно монтируются на вводах, выводы датчиков находятся в защитном шкафу, устанавливаемом рядом с трансформатором.

В высоковольтных силовых трансформаторах, в зависимости от класса рабочего напряжения, уровень коронных разрядов может в десятки раз превышать допустимые предельные уровни частичных разрядов, возникающих от самых опасных дефектов в изоляции трансформаторов. Если не проводить эффективной отстройки от коронных разрядов, то возможность «пропуска» частичных разрядов при проведении измерений очень велика.

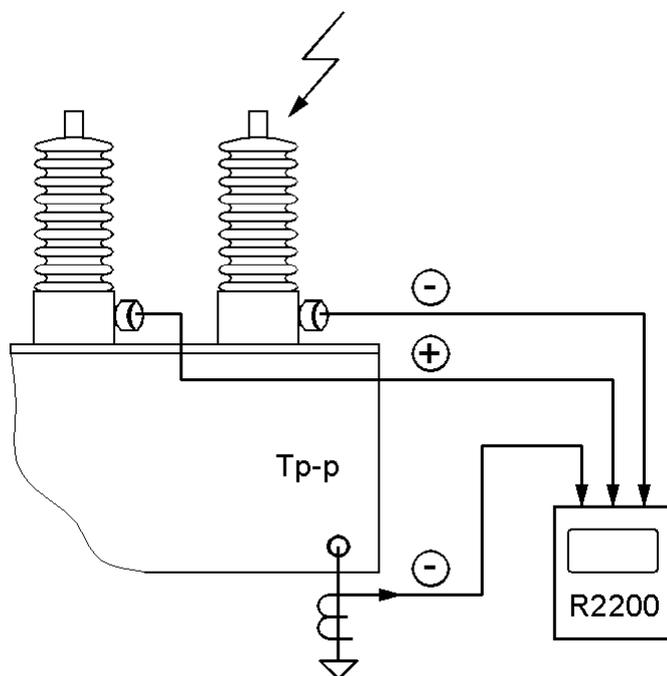
Одним из методов отстройки от импульсов коронных разрядов является сравнение полярности высокочастотных импульсов. Большая часть энергии на компенсацию регистрируемого частичного разряда поступает из энергосистемы. Поэтому

- если высокочастотный импульс (от частичного разряда) возник внутри трансформатора, то полярность импульсов на ПИН всех трех фаз трансформатора будет иметь одинаковый знак, неважно какой, но одинаковый.
- если высокочастотный импульс (например, от коронного разряда) возник вне трансформатора, то сигналы с ПИН вводов фаз будут иметь различный знак.

Для практической реализации этого метода «отстройки от короны» по полярности импульсов, необходимо воспользоваться многоканальной регистрирующей аппаратурой (рисунок 7.5). Это объясняется тем, что сравнение полярности импульсов обязательно должно производиться в режиме реального

времени, на аппаратном уровне.

Дополнительная отстройка от коронных разрядов может производиться при помощи алгоритмических и программных средств.



**Рисунок 7.5** – Схема установки датчиков ЧР на трансформаторе

## **ТЕМА 8. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ДРУГИХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ МАСЛА И МЕТОДАМИ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ГАЗОВ (ХАГ)**

### **8.1. ПРИЧИНЫ И ИСТОЧНИКИ ПОЯВЛЕНИЯ ГАЗОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ**

Даже при работе исправного трансформатора имеется некоторый фон растворенных в масле газов. Если в трансформаторе происходит аномальный процесс, например, электрические разряды в масле, перегрев контактных соединений или магнитопровода, одновременное их проявление, то газовыделение значительно усиливается. Состав газов, растворенных в масле, можно проанализировать (их количество, соотношение, скорость выделения) и сделать вывод о характере и степени развития дефекта.

В масле выделяются преимущественно водород  $H_2$ , оксид углерода  $CO$ , диоксид углерода  $CO_2$ , метан  $CH_4$ , ацетилен  $C_2H_2$ , этилен  $C_2H_4$ , этан  $C_2H_6$  и некоторые другие газы.

### **8.2. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ И РАЗЛОЖЕНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Местный перегрев и термическое разложение маслостойкой и бумажно-масляной изоляции приводят к выделению  $CO$  и  $CO_2$ .

При разложении только трансформаторного масла выделяются:

– при температуре до 300°C:	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	$C_2H_6$
при этом:	$C_2H_4 \leq C_2H_6$		$CH_4 > H_2$	
– при температуре от 300°C до 700°C:	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	$C_2H_6$
при этом:	$C_2H_4 \geq C_2H_6$		$CH_4 \approx H_2$	
– при температуре выше 700°C:	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	$C_2H_6$
при этом:	$C_2H_4 \gg C_2H_6$		возможно $C_2H_2$	

Частичные разряды сопровождаются изменением напряжения на электродах  $\Delta U_x$

$$\Delta U_x = \frac{q_x}{C_x}, \quad (8.1)$$

$C_x$  – емкость изоляции;

$q_x$  – кажущийся заряд единичного частичного разряда.

Величина  $q_x$  характеризует интенсивность ЧР.

При  $q_x = 10^{-12} - 10^{-11}$  Кл присутствуют ЧР слабой интенсивности. Изоляция при таких ЧР медленно разлагается с выделением  $H_2$  и  $CH_4$ .

При  $q_x = 10^{-11} - 10^{-10}$  Кл выделяется  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ , при этом  $C_2H_4 < CH_4$  и  $C_2H_4 \approx C_2H_6$ . Выделение газа идет в виде мелких пузырьков.

При  $q_x \approx 10^{-9}$  Кл выделяются те же газы, что и в предыдущем случае с добавлением  $C_2H_2$ . При этом  $C_2H_2 \leq CH_4$ ,  $C_2H_2 \approx C_2H_4$ ,  $C_2H_2 \leq C_2H_6$ .

Разряды с  $q_x \approx 10^{-8}$  Кл могут сопровождаться дугой. Газы выделяются те же, при этом  $C_2H_2 \geq CH_4$ ,  $C_2H_2 > C_2H_4$ ,  $C_2H_4 > C_2H_6$ .

Мощные ЧР сопровождаются искрением и выделением крупных пузырьков. При ЧР с  $q_x \geq 10^{-9}$  Кл в маслобарьерной изоляции происходит расслоение и разрушение картона барьеров. Такие разряды недопустимы.

### 8.3. КРИТЕРИИ, НОРМЫ И ПЕРИОДИЧНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ МЕТОДАМИ ХАГ

Хроматографический контроль должен проводиться в сроки, определенные нормами и объемом испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы (СТП 09110.46.300-05 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле).

– трансформаторы 6–35 кВ мощностью более 630 кВА с РПН подвергаются анализу через 3 суток, 1 месяц, 3 месяца и 6 месяцев после включения и затем не реже одного раза в 6 месяцев, а также при срабатывании газового реле или отключения защитой от внутренних повреждений;

– трансформаторы 110 кВ до 63 МВА через 3 суток, 1 месяц и 6 месяцев после включения и затем не реже одного раза в 6 месяцев, а также при срабатывании газового реле или отключения защитой от внутренних повреждений;

– трансформаторы 110 кВ мощность 63 МВА и более, а также трансформаторы напряжением 220, 330 и 750 кВ – через 3 суток, 10 суток, 1 месяц, 3 месяца и 6 месяцев после включения и затем не реже одного раза в 6

месяцев, а также при срабатывании газового реле или отключения защитой от внутренних повреждений.

Периодичность ХАРГ для трансформаторов с развивающимися дефектами определяется динамикой изменения концентраций газов и продолжительностью развития дефекта.

С помощью ХАГ можно выявить медленно развивающиеся дефекты и вероятно – быстроразвивающиеся. Нельзя – мгновенно развивающиеся.

#### **8.4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТА И ОБОСНОВАНИЕ ОПЕРАТИВНЫХ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕР**

Если по РУП Облэнерго нет достоверных статистических данных, то для идентификации дефекта можно использовать таблицу 7.1 (Граничные концентрации растворенных в масле газов) из СТП 09110.46.300-05. Если такая статистика имеется, то рекомендуется устанавливать граничные концентрации самостоятельно.

Если содержание газов в масле достигает граничных концентраций, то можно предположить, что в трансформаторе развивается дефект, и такой трансформатор берется под контроль с учащенным отбором проб масла

Вид развивающихся дефектов (тепловой или электрический) можно ориентировочно определить по отношению концентраций пар из четырех газов:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ .

1) Условия прогнозирования разрядов в масле (отношение концентраций газов в масле имеет следующие величины):

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \geq 0,1 \text{ и } \frac{CH_4}{H_2} \leq 0,5.$$

2) Условия прогнозирования перегрева

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1 \text{ и } \frac{CH_4}{H_2} > 0,5.$$

Если при этом концентрация  $CO < 0,05$  % об., то прогнозируется «перегрев масла», а если  $CO > 0,05$  % об., – «перегрев твердой изоляции».

3) Перегрев и разряд совместно имеют место при

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \geq 0,1 \text{ и } \frac{CH_4}{H_2} > 0,5.$$

или

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} < 0,1 \text{ и } \frac{CH_4}{H_2} \leq 0,5.$$

Дополнительную информацию дает соотношение содержания в масле  $CO_2/CO$ :

– если повреждением не затронута твердая изоляция, то

$$5 \leq \frac{CO_2}{CO} \leq 13;$$

– если твердая изоляция затронута

$$\frac{CO_2}{CO} < 13 \text{ или } \frac{CO_2}{CO} > 13.$$

В СТП 09110.46.300-05 имеется таблица 6.1 (Определение характера дефекта в трансформаторе по отношению концентраций пар газов).

Характер прогнозируемого дефекта может быть следующий:

- ЧР различной интенсивности;
- разряды разной мощности;
- термические дефекты при разных температурах.

## **ТЕМА 9. НАГРЕВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И КОНТРОЛЬ ЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА**

### **9.1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ И СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Электрооборудование и проводники при работе нагреваются за счет потерь энергии в токоведущих элементах и в магнитных сердечниках, что ведет к повышению их температуры. Повышение температуры выше определенных пределов, которые определяются классом изоляции, вызывает необратимые изменения в изоляции, ее ускоренное старение (понижение электрической и механической прочности). Из-за удлинения составных частей оборудования возникают дополнительные механические усилия в ряде деталей конструкции. Последствия нагревания отражаются на состоянии оборудования и его сроке службы. Нагревание оборудования является основным фактором, ограничивающим верхний предел его мощности. Поэтому для изготовления образцов электрооборудования большей мощности необходимо применять более дорогостоящую изоляцию, увеличивать интенсивность охлаждения, использовать электротехническую сталь с большей индукцией.

### **9.2. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА И ЕГО РЕШЕНИЕ**

Если принять следующие **допущения**:

- 1) отдача тепла в окружающую среду пропорциональна разности температур оборудования и среды;
- 2) теплоемкость окружающей среды неограниченна;
- 3) условия охлаждения по всей поверхности одинаковы;
- 4) потери мощности, коэффициенты теплоемкости и теплоотдачи постоянны (не зависят от температуры),

то можно записать **уравнение теплового баланса** в следующем виде

$$Pdt = K\theta dt + Cd\theta, \quad (9.1)$$

где  $P$  – потери мощности в оборудовании, **Вт**;

$K$  – теплоотдача в окружающую среду, **Вт/°С** (*количество тепла, отдаваемое оборудованием [Вт] при превышении его температуры на 1°С*);

$C$  – теплоемкость оборудования, **Вт·с/°С**;

$C = cM$ , где  $M$  – масса, **кг**;  $c$  – удельная теплоемкость, **Вт·с/(°С·кг)**.

$\theta = \vartheta - \vartheta_0$  – разность температуры оборудования и окружающей среды (перегрев или превышение температуры), °С;  $t$  – время, с.

Физический смысл выражения теплового баланса состоит в том, что энергия потерь частично отдается в окружающую среду ( $K\theta dt$ ) и поглощается электрооборудованием за счет его теплоемкости ( $Cd\theta$ ).  $\theta$  увеличивается до величины  $\theta_y$ , после чего не меняется. Тогда  $Cd\theta = 0$ , и выражение (1) принимает вид  $P = K\theta_y$ . Тогда установившийся перегрев

$$\theta_y = P / K = \frac{I^2 R_a}{kS}.$$

Установившийся перегрев  $\theta_y$  зависит от тока, протекающего по токоведущим элементам ( $P = I^2 R_a$ ) и условий охлаждения.

Если нагревание происходит без теплоотдачи в окружающую среду ( $K\theta dt = 0$ ), (9.1) принимает вид  $Pt = C\theta$ . Время, в течение которого  $\theta$  станет равным  $\theta_y$  в этих условиях, называется постоянной нагрева

$$T = \frac{\theta_y C}{P} = \frac{PC}{KP} = \frac{C}{kS},$$

где  $k$  – коэффициент теплоотдачи, **Вт/(°С·см<sup>2</sup>)** (Количество тепла [Вт], отдаваемого с единицы поверхности [см<sup>2</sup>, м<sup>2</sup>] при превышении температуры на 1°С);

$S$  – охлаждающая поверхность оборудования, **см<sup>2</sup>**;

При интегрировании (9.1) получается зависимость перегрева  $\theta$  от времени  $t$  в процессе нагревания оборудования от  $\theta_0$  до  $\theta_y$

$$\theta = \theta_0 + (\theta_y - \theta_0) \left(1 - e^{-t/T}\right). \quad (9.2)$$

**Интегрирование (2.1).** Разделим уравнение на  $kS$ , тогда

$$\theta_y dt = \theta dt + T d\theta; \quad (\theta_y - \theta) dt = T d\theta;$$

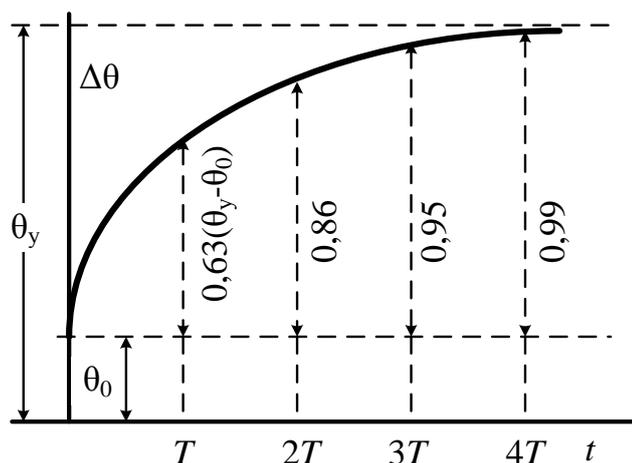
После интегрирования

$$\theta_y - \theta = B e^{-t/T}.$$

$B$  – постоянная интегрирования. При  $t = 0$   $\theta = \theta_0$ , тогда  $B = \theta_y - \theta_0$

$$\theta = \theta_y - (\theta_y - \theta_0) e^{-t/T} \quad \text{или} \quad \theta = \theta_y - (\theta_y - \theta_0) e^{-t/T} + \theta_0 - \theta_0,$$

что преобразуется к (9.2).



**Рисунок 9.1** – Кривая нагрева

Уравнение (9.2) справедливо как для нагрева, так и для охлаждения. Кривая охлаждения будет зеркальным охлаждением кривой нагрева.

По кривой нагрева видно, что установившееся состояние процесса наступает при времени равном  $4T$ . Постоянная нагрева  $T$  зависит от теплоемкости материала оборудования  $C$ , поверхности охлаждения  $S$  и коэффициента теплоотдачи  $k$ . Очевидно, что для разного оборудования сочетание всех этих факторов различно и  $T$  будет иметь различные значения для каждого электрооборудования. Для токоведущих частей  $T$  исчисляется минутами, а для крупных трансформаторов и электрических машин составляет несколько часов.

### 9.3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРЕВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Температура, при которой работают элементы оборудования может быть представлена как сумма температуры охлаждающей среды  $\vartheta_0$  и превышения температуры  $\theta$

$$\vartheta = \vartheta_0 + \theta.$$

Оборудование конструируется так, чтобы  $\vartheta_0$  и  $\theta$  в номинальном режиме не превышали нормированных предельных значений.

Самым слабым элементом оборудования в отношении стойкости к нагреву является его изоляция. Допустимые температуры в наиболее нагретых точках изоляции определяются классом изоляции. При превышении этой температуры увеличиваются износ изоляции и вероятность теплового пробоя.

Класс	У	А	Е	В	Ф	Н	...
Длительно допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	...

- У** – непропитанные и непогруженные в жидкий электроизоляционный состав волокнистые материалы из целлюлозы или шелка;
- А** – пропитанные и погруженные в жидкий электроизоляционный состав волокнистые материалы из целлюлозы или шелка;
- Е** – некоторые синтетические и органические пленки;
- В** – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами;
- Ф** – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами;
- Н** – материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
- С** – слюда, керамические материалы, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами.

В настоящее время буквенные обозначения класса изоляции не обязательно, достаточно значения предельной температуры. В настоящее время приведенная выше таблица расширена следующими классами изоляции:

Класс	...	200	220	250	...
Длительно допустимая температура, °С	...	200	220	250	...

Затем предельная температура изоляции повышается ступенями по 25°С с присвоением соответствующего класса изоляции.

В качестве изоляции также применяются электротехнические пластмассы. Их термостойкость зависит от типа примененных смол и наполнителей и лежит в пределах 110–300°С.

Предельные температуры относятся к наиболее нагретым участкам изоляции, которые в сложных конструкциях (например, в обмотках электрических машин) расположены в точке соприкосновения изоляции с обмоткой или в толще изоляции и, обычно, недоступны для проведения измерений.

Чаще всего можно измерить температуру на поверхности изоляции (термодетекторами) или среднюю температуру (по сопротивлению). Температура на поверхности будет меньше температуры наиболее нагретой точки (ННТ) на перепад температур в изоляции  $\theta_{\text{вс}}$ .

Во всех случаях температура наиболее нагретого участка изоляции будет выше измеренной. Поэтому нормированные предельные значения температур  $\vartheta$  и превышений температур  $\theta$ , которые можно измерить, должны быть ниже температур, принятых предельными для изоляции. Превышения температур и температура охлаждающей среды нормируются отдельно.

**Например:** По ГОСТ 183-74 (с изменениями 2010 г) для обмоток переменного тока машин мощностью более 5 МВА с изоляцией класса F допустимые превышения температуры  $\theta_{\text{пред}}$ , измеренное термоиндикатором, уложенным в пазу, не должно превышать 100 °С. Температура охлаждающего газа по нормам должна быть  $\vartheta_0 = +40^\circ\text{C}$ .  $\vartheta_0 + \theta_{\text{пред}} = 40 + 100 = 140^\circ\text{C}$ , что на 15°С меньше, чем длительно допустимая температура для изоляции класса F (155°С).

#### 9.4. ТЕПЛОВОЕ СТАРЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ. ПЕРЕГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО УСЛОВИЯМ НАГРЕВА

Для определения допустимости тех или иных режимов работы оборудования производят расчеты или испытания на нагрев. Наиболее просто можно произвести тепловые расчеты нагрева и охлаждения однородного неизолированного проводника, охлаждающегося равномерно со всех сторон

$$Pdt = K\theta dt + Cd\theta,$$

в установившемся режиме  $Cd\theta = 0$  и  $\theta = \theta_y$ .

$$P = K\theta_y; \quad \theta_y = \frac{I^2 R_a}{kS}; \quad \theta_y = \vartheta_y - \vartheta_0.$$

Для более сложного оборудования, такого как электрические машины и трансформаторы проводят **тепловые измерения и испытания**. При измерениях температура в наиболее нагретых точках не должна превышать температуры, допустимой для данного класса изоляции. Предельные температуры точек, доступных для измерения даны в инструкции по эксплуатации данного электрооборудования.

В установившемся режиме электрооборудование может работать с **перегрузкой**, т.е. с нагрузкой превышающей номинальную мощность. Критерием допустимости перегрузки может быть температура

электрооборудования. Такая перегрузка называется **перегрузкой, допустимой по критерию предельной температуры**. Она может быть длительной или кратковременной. **Длительная перегрузка** возможна, когда условия охлаждения отличны от номинальных. **Кратковременная** возможна за счет предшествующей недогрузки.

#### 9.4. ПЕРЕГРУЗКИ НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДНИКОВ

$P = I^2 R$ . При номинальном токе  $P_n = I_n^2 R$ . В установившемся режиме

$$1) I^2 R t = K(\vartheta_y - \vartheta_o)t; \quad 2) I_n^2 R t = K(\vartheta_n - \vartheta_{он})t.$$

Разделив (1) на (2) после преобразования получим

$$I = I_n \sqrt{\frac{\vartheta_y - \vartheta_o}{\vartheta_n - \vartheta_{он}}}.$$

По этой формуле при  $\vartheta_y = \vartheta_n$  может быть рассчитан ток, при котором токоведущая часть не будет перегреваться в условиях отличных от номинальных, в том числе и при перегрузке. Перегрузка токоведущих частей по току  $I > I_n$  может быть допущена в случае, если температура окружающей среды  $\vartheta_o$  меньше  $\vartheta_{он}$  ( $\vartheta_o < \vartheta_{он}$ ). **В случае необходимости временно** может быть допущена перегрузка за счет повышения температуры шин  $\vartheta_y$  выше номинальной  $\vartheta_n$ . При такой перегрузке увеличиваются потери и наблюдается повышенное окисление контактных поверхностей.

В соответствии с ПУЭ допустимая температура неизолированных шин  $\vartheta_n = 70^\circ\text{C}$  при температуре окружающей среды  $\vartheta_{он} = 25^\circ\text{C}$ . Номинальное превышение температуры  $\theta_n = 45^\circ\text{C}$ .

**Таблица 9.1** - Допустимый длительный ток для неизолированных проводов

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Сечение (алюминий/сталь), мм <sup>2</sup>	Ток для проводов марок АС, А	
		Вне помещений	Внутри помещений
185	185/24	520	430
300	300/39	710	600
500	500/27	960	830

Для кабелей с бумажной пропитанной изоляцией допустимая температура жилы  $\vartheta_n$  составляет от  $50^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$  (в зависимости от напряжения кабеля) при температуре

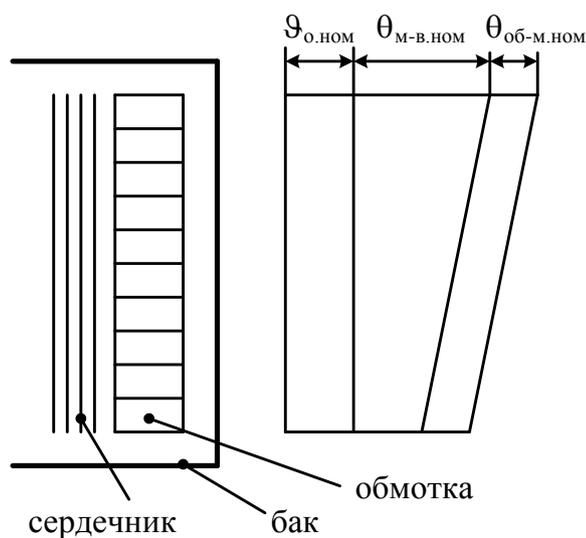
земли (воды)  $+15^{\circ}\text{C}$ . Для кабелей с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией температура жилы равна  $65^{\circ}\text{C}$ .

## 9.5. ПЕРЕГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

По критерию предельно-допустимой температуры для трансформаторов допускаются два вида перегрузки: **1) длительная**, за счет снижения температуры охлаждающей среды по отношению к номинальной; **2) кратковременная** – аварийная, которая используется в тех случаях, когда отключится один из параллельно работающих трансформаторов.

**При длительной перегрузке** температуру наиболее нагретой точки трансформатора при номинальных условиях можно представить следующим образом:

$$\vartheta_{\text{н.т.ном}} = \vartheta_{\text{о.ном}} + \theta_{\text{м-в.ном}} + \theta_{\text{об-м.ном}} + \theta_{\text{к.ном}}$$



**Рисунок 9.2** – Распределение превышений температур по высоте обмотки трансформатора

$\vartheta_{\text{о.ном}}$  – температура охлаждающего воздуха. По рекомендациям МЭК принимается равной  $20^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_{\text{к.ном}}$  – перепад температур между наиболее нагретой точкой верхней катушки и ее средней температурой,  $2^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_{\text{об-м.ном}}$  – перепад между медью обмотки и маслом,  $21^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_{\text{м-в.ном}}$  – перепад между маслом и воздухом,  $55^{\circ}\text{C}$ .

Температура наиболее нагретой точки  $\vartheta_{\text{н.т.}}$  **при длительной перегрузке** не должна превышать  $98^{\circ}\text{C}$ .

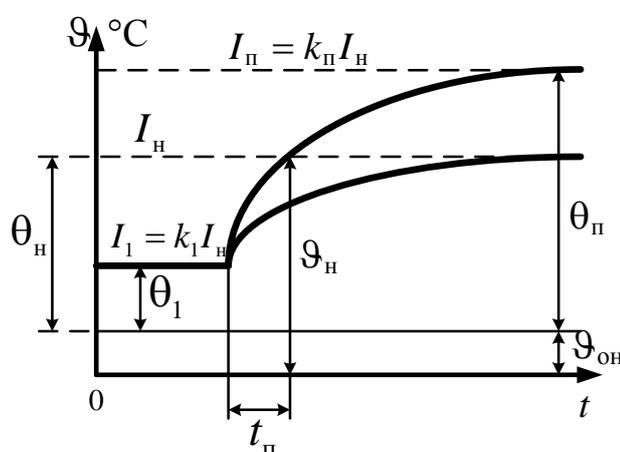
**Кратковременная перегрузка** возможна за счет предшествующей недогрузки (в аварийных условиях). Перегрузка может быть допущена на время  $t_{\text{п}}$ , за которое температура проводника достигнет предельно допустимой температуры  $\vartheta_{\text{н}}$  (или перегрева  $\theta_{\text{н}}$ ).

Уравнение нагревания  $\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \left(1 - e^{-t/T}\right)$  запишем для случая кратковременной перегрузки

$$\theta_{\text{н}} = \theta_1 + (\theta_{\text{п}} - \theta_1) \left(1 - e^{-t_{\text{п}}/T}\right).$$

$\theta_{\text{п}}$  – перегрев в конце перегрузки;

$\theta_1$  – начальный перегрев.



**Рисунок 9.3** – Определение допустимой длительности перегрузки

Из этого уравнения выражаем допустимую длительность перегрузки  $t_{\text{п}}$ .

$$t_{\text{п}} = T \ln \frac{\theta_{\text{п}} - \theta_1}{\theta_{\text{п}} - \theta_{\text{н}}}.$$

Начальному перегреву  $\theta_1$  соответствует ток  $I_1 = k_1 I_{\text{н}}$ , перегреву  $\theta_{\text{п}}$  –  $I_{\text{п}} = k_{\text{п}} I_{\text{н}}$ . С учетом того, что в установившемся режиме  $\theta = \frac{P}{K} = \frac{I^2 R}{K}$ , выражение для  $t_{\text{п}}$  можно переписать в виде

$$t_{\text{п}} = T \ln \frac{k_{\text{п}}^2 - k_1^2}{k_{\text{п}}^2 - 1}.$$

Кратковременная перегрузка может использоваться только для аппаратов с большой постоянной времени нагрева  $T$  как, например, трансформаторы.

## 9.6. АВАРИЙНЫЕ ПЕРЕГРУЗКИ

Для трансформаторов аварийные (длительные) перегрузки ГОСТ 14209-69 устанавливает следующим образом «В аварийных случаях, если коэффициент начальной нагрузки не более 0,93, трансформаторы с системами охлаждения М, Д, ДЦ и Ц допускают в течение не более 5 суток перегрузку на 40% сверх номинального тока на время максимума нагрузки общей продолжительность не более 6 часов».

*ПТЭ «Допускают перегрузку масляных трансформаторов (длительную) сверх номинального тока на 40% общей продолжительностью не более 6 часов в сутки в течение 5 суток подряд при условии, если коэффициент начальной нагрузки не более 0,93»*

При этом должны быть использованы полностью все устройства охлаждения трансформаторов. Как показывает практика, при средней суточной температуре в 10°C и работе с перегрузкой в 40% в продолжении 6 часов каждые сутки износ за одни сутки соответствует износу за 8 суток при номинальном режиме, а при температуре в 20°C – 40 суток. Вот почему требуется использовать все устройства охлаждения и принять дополнительные меры по охлаждению (например смачивание бака водой или обрызгивание трансформатора)

Для электрических машин допускаются кратковременные аварийные перегрузки. Их определяют исходя из предположения, что теплоотдача отсутствует, так как они кратковременны. Исходят из требования ГОСТ, что электрические машины до 100 МВА могут нести перегрузку в 50% в течение 2-х минут. Для генераторов с непосредственным охлаждением для обмотки статора устанавливается 50% перегрузка в течение 1 минуты. Такая же перегрузка устанавливается и для обмотки ротора.

Предполагая, что количество тепла  $Q$  пропорционально квадрату тока статора, для машин с косвенным охлаждением можно записать

$$Q_{\text{ном}}(1,5^2 - 1)120 = Q_{\text{ном}}(k_{\text{п}}^2 - 1)t_{\text{п}}, \quad (9.3)$$

где  $k_{\text{п}} = I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ ;  $Q_{\text{ном}}$  – количество теплоты, выделяющееся за одну секунду;  $Q_{\text{ном}}(1,5^2 - 1)120$  – дополнительное тепло, которое выделится за 2 минуты при 50%-ной перегрузке.

Допустимая продолжительность перегрузки

$$t_{\text{п}} = \frac{150}{(k_{\text{п}}^2 - 1)}; \quad (9.4)$$

*Длительные перегрузки генератора допускаются при понижении температуры окружающей среды ниже номинальной. Допустимые нагрузки при снижении температуры*

указывает завод-изготовитель. Их называют «номинальными токами при такой-то температуре».

## 9.7. ПЕРЕГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСА ИЗОЛЯЦИИ

Срок службы изоляции зависит от того, при какой температуре и сколько времени при этой температуре работает изоляция. При номинальных условиях ( $P_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном}}$ ,  $\vartheta_{\text{он}}$ ) изоляция имеет **номинальный срок службы**. Номинальным сроком службы изоляции считают 20 лет. Перегрузки в работе изоляции рассчитываются исходя из того, чтобы срок службы не превысил номинального, соответственно и износ изоляции не превысил бы номинального. Такие перегрузки возможны за счет предшествующей недогрузки. Перегрузки по этому критерию имеют большую величину, чем перегрузки, определенные по критерию температуры.

Для определения срока службы изоляции МЭК используется **6°C правило**: при каждом повышении температуры на 6°C срок службы изоляции сокращается вдвое.

*Например, если при работе изоляции с постоянной температурой 100°C срок ее службы равен 16 лет, то при 106°C – 8 лет, 112°C – 4 года и т.д. Такая зависимость наблюдается для температур 80°C – 150°C. При меньших температурах процесс износа существенно замедляется, при больших – идет более быстрыми темпами.*

Зависимость срока службы изоляции от температуры

$$v = v_0 e^{-a\vartheta}, \quad (9.5)$$

где  $v_0$  – срок службы при 0°C

$\vartheta$  – температура наиболее нагретой точки изоляции;

$a$  – постоянная. При использовании 6-тиградусного правила 0,112.

*Значение  $v_0$  точно не установлено, но его не обязательно знать для расчетов, если пользоваться относительными единицами. Ориентировочно  $v_0 = 1,5 \cdot 10^4 \dots 7,5 \cdot 10^4$  лет. Т.е. этот срок достаточно велик, т.к. изоляция не подвергается тепловым нагрузкам и ее старение в основном определяется медленно протекающими процессами разложения материала изоляции под действием условий окружающей среды.*

Относительный срок службы по сравнению с номинальным

$$v' = \frac{v}{v_{\text{ном}}} = \frac{v_0 e^{-a\vartheta}}{v_0 e^{-a\vartheta_{\text{ном}}}} = e^{-a(\vartheta - \vartheta_{\text{ном}})}. \quad (9.6)$$

При определении допустимых перегрузок принято исходить из относительной величины износа

$$L = \frac{1}{v'} = e^{a(\vartheta - \vartheta_{\text{ном}})}, \quad (9.7)$$

В нормальном режиме работы (без перегрузки)  $L \leq 1$ .

Используя приведенное выражение можно посчитать износ для любого графика нагрузки. Если суточный график нагрузки трансформатора разбить на 24 участка (по часам суток), то износ его изоляции за сутки определится

$$L = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{i=24} e^{a(\vartheta_i - \vartheta_{\text{ном}})}, \quad (9.8)$$

где  $\vartheta_i$  – температура наиболее нагретой точки за данный час.

Используя выражение (9.8) можно подобрать величину и длительность перегрузки, зная начальную нагрузку (которая меньше номинальной), так чтобы относительный износ был равен 1 (за сутки).

## 9.8. СПОСОБЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР И ИХ ПРЕВЫШЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

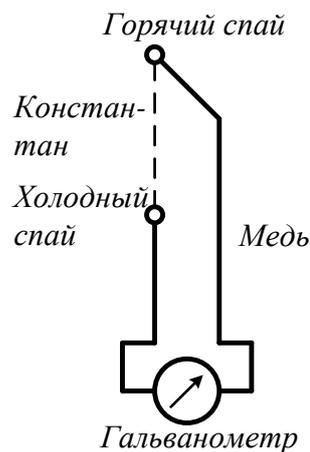
За температурами и превышениями температур наиболее ответственных элементов необходим систематический контроль. Для этого применяются приборы, позволяющие измерять местные и средние температуры и превышения температур. Они могут быть стационарными и переносными.

**1) Термометрами** измеряют: температуру масла трансформаторов, охлаждающего газа в электрических машинах и масла в подшипниках.

*Предпочтительно применение спиртовых термометров, т.к. ртуть может дополнительно нагреваться вихревыми токами.*

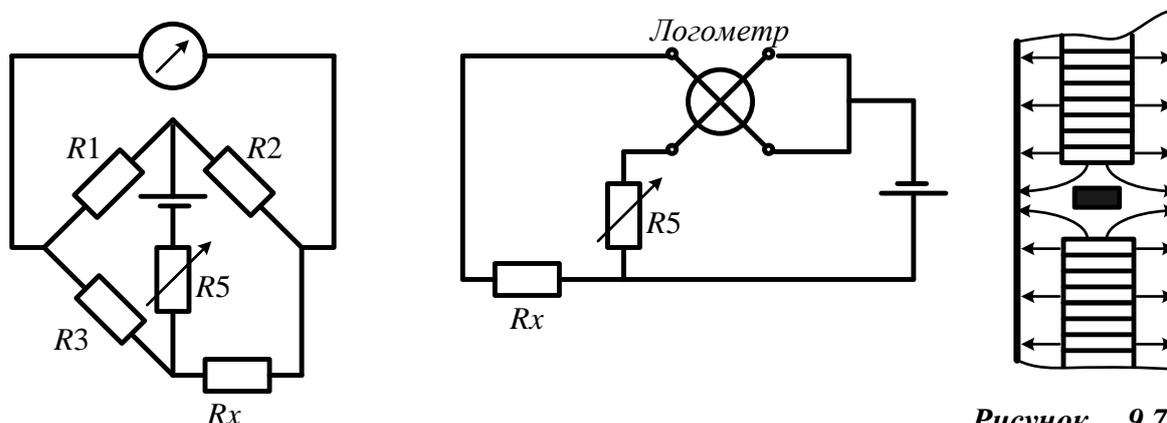
**2) Термопары** позволяют определить превышения температур и температуру (косвенно).

*«Горячий спай» плотно прижимается к месту измерения, «холодный спай» в охлаждающую среду (температура которой известна). Превышение температуры практически прямо пропорционально показаниям гальванометра (ЭДС термопары).*



**Рисунок 9.5** – медно-константановая термопара

3) С помощью **термосопротивлений** определяют температуру в заданных точках оборудования. Термосопротивления изготавливаются из платиновой или медной проволоки, помещенной в капсулу.



**Рисунок 9.6** – измерение температур термосопротивлением: а) мостиковая схема; б) схема с логометром

**Рисунок 9.7** – размещение термосопротивления в пазу

*Принцип действия термосопротивлений основан на наличии зависимости между величиной их сопротивления и температурой.*

Термосопротивления закладываются в пазы статора между обмотками (рисунок 9.7).

Термосопротивление может применяться в переносном приборе для измерения нагрева поверхностей электрооборудования и контактных соединений токоведущих частей. В последнем случае его укрепляют на изолирующей штанге.

5) **Измерение температуры по сопротивлению** применяется для определения температур обмоток трансформаторов, генераторов, двигателей.

Этот способ позволяет измерять среднюю температуру. Измерения сопротивления производятся двойным мостом в горячем и холодном состояниях

$$\vartheta_{\text{гор}} = \frac{R_{\text{гор}} - R_{\text{хол}}}{R_{\text{хол}}} (235(245) + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}}.$$

235 – для меди; 245 – для алюминия.

*Измерение сопротивления в горячем состоянии производится очень быстро, т.к. обмотка быстро остывает. Измерения в холодном состоянии производятся после того, как вся конструкция примет температуру окружающей среды (примерно через сутки).*

**б) Указатели для контроля нагрева** показывают не превышает ли нагрев допустимых пределов.

– **термосвечи** – используются для периодического контроля за нагревом. Свечи укрепляются на штанге, конец свечи прижимают к месту контроля. По оплавлению свечи судят о температуре.

*Термосвечи из чистого парафина имеют температуру плавления 50-55°C; из сплава парафина и воска – 70-80°C; из канифоли – 90-100°C; из сплавов свинца, висмута, олова – 120-160°C.*

– **термоуказатели с припоем** служат для контроля нагрева соединений в распределительных устройствах.

*В семафорном указателе используется легкоплавкий припой – висмут, свинец, олово. Температура плавления зависит от процентного состава материалов в припое.*

– **термокраски и термопленки** применяются для постоянного контроля за нагревом соединений токоведущих частей и др. При нагреве их цвет изменяется. Термопленки после снижения температуры восстанавливают свой цвет, поэтому могут использоваться многократно. Их целесообразно применять в электроустановках с постоянным дежурным персоналом. Термокраски однократного действия и их применяют в ЭУ без дежурного персонала.

*Термопленки до 70°C – красные; после 70°C – черные; при 120°C пленка разлагается, становится грязно-желтой и свой цвет не восстанавливает.*

*Термокраски из сернистого кобальта: 1) розовая, после 85°C – пурпурная; 2) оранжевая, после 85°C – темно-серая.*

## 9.9. ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Принцип работы приборов ИКТ** (инфракрасной техники) основан на преобразовании инфракрасного излучения тел, к которому нечувствителен

человеческий глаз, в видимое. Спектральный состав и интенсивность излучения любого предмета в ИК-области спектра определяются его температурой и излучательной способностью. Для обнаружения ИК-излучения в приборах ИКТ используются различные виды приемников: тепловые, фотоэлектрические и др. По своему построению и принципу действия большинство приборов ИКТ представляет собой оптико-электронные и оптико-механические устройства. Приборы ИКТ по принципу действия могут быть разделены на пассивные и активные.

В **пассивных ИК-приборах** используется собственное ИК-излучение объектов или отраженное от них излучение естественных источников. Большинство приборов ИКТ относится к этой группе приборов.

В **активных приборах ИКТ** используются различные встроенные искусственные источники ИК-излучения, освещающие исследуемые объекты.

В энергетике получили применение как **тепловизоры (термовизоры)**, так и **радиационные пирометры**. Тепловизоры обеспечивают возможность получения картины теплового поля исследуемого объекта и его температурного анализа. С помощью радиационного пирометра определяется только температура объекта контроля.

При ИК-контроле необходимо учитывать **погрешности**. Погрешности бывают систематические и случайные.

**Систематические погрешности** заключены в конструкции измерительного прибора. **Случайными погрешностями**, возникающими при проведении ИК-контроля, могут являться: воздействие солнечной радиации, излучательная способность и др.

Энергия инфракрасного излучения ослабляется при прохождении сквозь **атмосферу** за счет: поглощения газами, составляющими атмосферу; рассеяния на частицах, находящихся в атмосфере (аэрозолях, молекулах и др.).

При ИК-контроле токоведущих частей, расположенных в **небольших замкнутых объемах** (например, в КРУ), возможно получение ошибочных результатов из-за теплового отражения от нагревательных элементов, ламп освещения, соседних фаз и др. В результате термографическая съемка может показать горячую точку (пятно), хотя в действительности это просто тепловое отражение. Поэтому рекомендуется в подобных случаях производить ИК-обследование объекта под различными углами зрения и при изменении места положения оператора с ИК-прибором.

Для исключения **влияния солнечной радиации** рекомендуется осуществлять ПК-контроль в ночное время суток (предпочтительно после полуночи) или в облачную погоду.

Если ПК-контроль осуществляется **на открытом воздухе**, необходимо принимать во внимание возможность охлаждения контролируемого объекта **ветром**.

При работе с ИК-приборами **вблизи шин генераторного напряжения**, реакторов и вообще **в электроустановках с большими рабочими токами** возникает проблема защиты ИК-прибора от влияния магнитного поля. Последнее вызывает искажение картины теплового поля объекта на кинескопе тепловизора или нарушает работу радиационного пирометра.

**Тепловизоры**, используемые в промышленной технической диагностике, подразделяют на показывающие и измерительные; соответственно их заводская стоимость находится в пределах 7 – 17 тыс. и 25 – 50 тыс. дол. США. Внешне портативные тепловизоры напоминают видеокамеру и имеют возможность подключения к компьютеру, где хранятся и обрабатываются результаты измерений. Также термограммы могут храниться на картах памяти, встроенных в тепловизор.

**Таблица 9.2 – Технические возможности применения приборов инфракрасной техники в энергетике**

Оборудование электро-станций и сетей	Выявляемые неисправности
Генераторы	1. Межлистовые замыкания статора 2. Ухудшение паек обмоток 3. Оценка теплового состояния щеточного аппарата 4. Нарушение работы систем охлаждения статоров 5. Проверка элементов системы возбуждения
Трансформаторы	1. Очаги возникновения магнитных полей рассеивания 2. Образование застойных зон в баках трансформаторов за счет шламообразования, разбухания или смещения изоляции обмоток, неисправности масло-системы 3. Дефекты вводов
Коммутационная аппаратура	1. Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер 2. Состояние внутрибаковой изоляции 3. Дефекты вводов, делительных конденсаторов 4. Трещины опорносержевых изоляторов
Маслонаполненные трансформаторы тока	1. Перегревы наружных и внутренних контактных соединений 2. Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток
Вентильные разрядники и ОПН	1. Нарушение герметизации элементов 2. Обрыв шунтирующих сопротивлений 3. Неправильная комплектация элементов
Конденсаторы	Пробой секций элементов
Линейные ВЧ заградители	Перегревы контактных соединений
КРУ, КРУН, токопроводы	Перегревы контактных соединений выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, кабелей, токоведущих шин и т.п.
Кабельное хозяйство электростанций	Перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей
Воздушные линии электропередач	Перегревы контактных соединений проводов

## 9.10. НАГРЕВ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНТРОЛЬ ИХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА.

При протекании тока нагреваются токоведущие части и их контактные соединения. Количество тепла, выделяющегося в контактном соединении пропорционально  $I^2 R_k$ , где  $R_k$  – **переходное сопротивление контакта**.

Контакты бывают **подвижными** и **неподвижными**. Подвижные в свою очередь могут быть **скользящими** (*система возбуждения генераторов, электрифицированный транспорт*) и **размыкающимися** (*коммутационные аппараты*); неподвижные – **разборными** (*болтовые соединения*) и **неразборными** (*соединение пайкой, сваркой*).

Контактное сопротивление обычно имеет большую величину, чем сопротивление металла или сплава, из которого оно состоит (за исключением сварных соединений). Это объясняется тем, что даже при плотном прилегании отшлифованных контактирующих поверхностей, площадь их соприкосновения значительно меньше геометрических размеров контактов, так как на поверхности всегда остаются микронеровности. Кроме того, на поверхности металла обычно имеется тонкий слой из адсорбированных газов, оксидов, сульфидов, хлоридов, жиров и др.

Величина  $R_k$  зависит от силы нажатия контактов, материала, обработки контактных поверхностей и выражается следующей формулой

$$R_k = \varepsilon / F^n ,$$

где  $F$  – сжимающая сила;  $n$  – показатель, зависящий от типа контакта;  $\varepsilon$  – коэффициент, характеризующий материал и способ обработки контактной поверхности.

При возрастании температуры контактное сопротивление может быть найдено по выражению

$$R_k = R_{k1} \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1) \right),$$

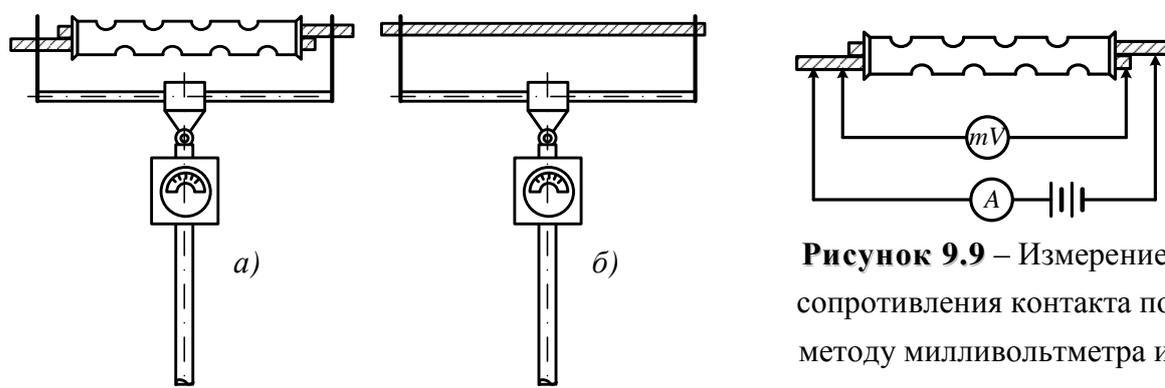
где  $\vartheta_1$  – начальная температура контакта;  $R_{k1}$  – переходное сопротивление контакта при  $\vartheta_1$ ;  $\vartheta_2$  – температура, для которой определяется сопротивление контакта;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала контакта.

Длительные температуры нагрева контактных соединений при длительном протекании номинального тока не должны превышать значений, указанных в ГОСТ (от 75°C до 120°C в зависимости от материала и типа контактного соединения). Увеличение температуры контактов усиливает процесс окисления контактных поверхностей. С увеличением слоя оксида контактное сопротивление увеличивается, что приводит к еще большему нагреву.

Измерение температуры нагрева контактных соединений производится переносным электротермометром, представляющим собой неравновесный мост, в одно из плеч которого включен медный термометр сопротивления. Питание моста производится от батарейки. Термосопротивление с помощью изолирующей штанги прижимается к контакту и через 20–30 сек показания считываются со шкалы прибора, включенного в диагональ моста.

Систематический контроль нагрева контактов производится с помощью термопленок, термосвечей и термоуказателей (см. выше).

Температура контактов не всегда указывает на его действительную дефектность, т.к. металл обладает значительной теплоемкостью и теплопроводностью. Более точная оценка состояния контактов производится по **величине падения напряжения** на контактном соединении, или путем измерения **переходного сопротивления** при помощи милливольтметра и амперметра (или микроамперметра). В **первом случае** измерения производятся при рабочем напряжении с помощью милливольтметра, укрепленного на изолирующей штанге. Затем результаты измерения сравнивают с падением напряжения на участке шины без контактного соединения при неизменной величине тока нагрузки (рис. 9.8).



**Рисунок 9.8** – Измерение падения напряжения на контакте (а) и на участке провода (б)

**Рисунок 9.9** – Измерение сопротивления контакта по методу милливольтметра и амперметра

Во **втором случае** на отключенном и заземленном участке цепи приборы подключаются по следующей схеме (рис. 9.9). Питание производится от источника постоянного тока. Переходное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_k = \Delta U_k / I,$$

где  $\Delta U_k$  – падение напряжения на контакте.

Дефектность контактного зажима устанавливается на основании следующего соотношения

$$\Delta U_k / \Delta U_{\Pi} = R_k / R_{\Pi} = K_{\text{деф}},$$

где  $\Delta U_{\text{п}}$  и  $R_{\text{п}}$  – падение напряжения и сопротивление участка целого провода.

Если  $K_{\text{деф}} \geq 2$  – контактный зажим считается дефектным и его нужно заменить.

Для **выключателей и разъединителей** во время ремонта измеряют сопротивление контактной системы постоянному току. При этом измеряется сопротивление всей токоведущей цепи каждой фазы. Распространенным методом таких измерений является **метод амперметра-вольтметра** (или микроомметра). Также для измерения контактных сопротивлений широко используются **контактомеры**. Прибор измеряет падение напряжения на контакте, но отградуирован в микроомах, благодаря тому, что ток 1 А поддерживается при измерениях постоянным. Наиболее точные результаты дают измерения **двойным мостом**.

*Контактное соединение в какой-то мере является ослабленным местом в электрической цепи. Поэтому необходимо выявлять и устранять при ремонте излишние контакты, по возможности заменять разъемные соединения паяными, литыми и сварными контактами.*

При ремонте разъемных зажимов придерживаются следующих правил:

– контактные поверхности очищают от загрязнений и оксидов и покрывают смазкой;

– применяют болты, гайки и др. крепежные изделия, покрытые кадмием или цинком;

– затяжку болтовых соединений производят ключом с регулируемым крутящим моментом. Минимальный и максимальный крутящие моменты для резьбовых крепежных соединений разного класса и диаметра указываются в ГОСТах. Контактное давление должно обеспечивать наиболее низкое контактное сопротивление, не вызывая при этом текучести материала шин и крепежных изделий. Для алюминиевых шин контактное давление должно быть не менее  $1500 \text{ Н/см}^2$ , для медных – не менее  $1000 \text{ Н/см}^2$ ;

– непосредственное соединение проводников допускают только в случае выполнения их из одинаковых или однородных материалов, а также при покрытии контактных поверхностей кадмием, оловом или цинкооловянистым сплавом;

– при контактных соединениях меди с алюминием, образующих в присутствии влаги электролитическую пару, во избежание коррозии применяют медно-алюминиевые переходные детали (*например, к алюминиевой шине приваривают медный наконечник или холодной сваркой армируют ее медными накладками*);

– после ремонта или ревизии контактного зажима измеряют его переходное сопротивление.

На станциях подстанция и ВЛ на каждое контактное соединение и аппаратный зажим ведется специальная документация, в которой отмечаются результаты и даты измерения переходных сопротивлений, осмотров, ревизий и устранения дефектности.

Для снижения нагрева контактных соединений коммутационных аппаратов применяют их посеребрение.

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Практический раздел**

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ  
ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

**Темы практических занятий**

**Минск 2016 г.**

## ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

### *Тематика практических занятий по разделу контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования*

1. Изучение устройства и принципа действия ультразвуковых приборов неразрушающего контроля.
2. Определение твердости металла переносным твердомером.
3. Ультразвуковой контроль толщины изделий.
4. Ультразвуковой контроль сварных соединений.
5. Обнаружение дефектов магнитопорошковым методом контроля.
6. Обнаружение дефектов вихретоковым методом контроля.
7. Обнаружение поверхностных дефектов капиллярным методом контроля.
8. Магнитная структуроскопия.

При выполнении практических заданий студенты могут пользоваться методическими материалами из разработанного автором практикума: Герасимова А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС: лабораторный практикум/ А.Г.Герасимова.– Минск: Выш. шк., 2013.– 170с.

### *Тематика практических занятий по методам диагностики и контроля электротехнического оборудования*

1. Неразрушающие методы контроля изоляции. Контроль изоляции по сопротивлению, токам утечки и по тангенсу угла диэлектрических потерь.
2. Контроль изоляции по емкостным характеристикам. Приборы ПКВ.
3. Исследование характеристик трансформаторного масла. Контроль изоляции по характеристикам трансформаторного масла.
4. Частичные разряды в изоляции и диагностика изоляции по характеристикам частичных разрядов.
5. Методы хроматографического анализа газов и других продуктов распада. Хроматографы и хроматография.
6. Контроль и испытания внешней изоляции РУ и ВЛ.
7. Контроль и испытания силовых кабелей.

При выполнении практических заданий студенты могут пользоваться пособиями, разработанным на кафедре «Электрические станции» БНТУ:

- 1) Степанчук К.Ф. Контроль и диагностика изоляции машин и аппаратов. Мн.: БГПА, 1995 г.
- 2) Техника высоких напряжений: лабораторные работы (практикум) /

В.А. Булат [и др]; под общ. ред. К.Ф. Степанчука. – Минск: БНТУ, 2006. – 82 с.

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Раздел контроля знаний**

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ  
ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

**Вопросы к зачету, контрольные тесты**

**Минск 2016 г.**

## ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ, КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

### Вопросы по разделу контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования.

1. Условия работы конструкционных материалов теплоэнергетического оборудования под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.
2. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам теплоэнергетического оборудования.
3. Основные служебные свойства металла теплоэнергетического оборудования.
4. Виды и методы контроля металлоконструкций теплоэнергетического оборудования.
5. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
6. Акустические методы НК, область применения и классификация.
7. Основные параметры УЗК.
8. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
9. Классификация ПЭП.
10. Эхо-метод ультразвукового контроля.
11. Технология проведения УЗК.
12. Область применения УЗК.
13. Классификация магнитных методов контроля.
14. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
15. Магнитографический метод контроля сварных швов.
16. Метод магнитной памяти металлов.
17. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
18. Физические явления капиллярного контроля.
19. Технология проведения капиллярного контроля.
20. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
21. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
22. Классификация вихретоковых преобразователей.
23. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
24. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
25. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
26. Классификация средств НК.
27. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
28. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
29. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
30. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.

31. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
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 химического и марочного состава сталей без разрушения деталей.
37. Вибродиагностические системы.
38. Термографический контроль.
39. Оптические системы.

### **Вопросы по разделу контроль и диагностика электроэнергетического оборудования.**

1. Виды дефектов в электрической изоляции, причины и динамика их развития.
2. Виды и методы контроля изоляции. Неразрушающие и разрушающие испытания.
3. Стратегии, объем и периодичность неразрушающего контроля электрической изоляции.
4. Общая схема замещения изоляции.
5. Измерение сопротивления изоляции и критерии состояния по сопротивлению и токам абсорбции.
6. Контроль изоляции по диэлектрическим потерям.
7. Емкостные методы оценки увлажнения изоляции.
8. Причины возникновения частичных разрядов в изоляции и их параметры.
9. Причины и источники появления газов в трансформаторном масле.
10. Газовыделение при термическом разложении изоляции и разложении под воздействием частичных разрядов.
11. Критерии, нормы и периодичность диагностики методами ХАГ
12. Влияние температуры на свойства изоляции и составных частей электрооборудования.
13. Предельные температуры и превышения температур.
14. Тепловое старение изоляции.
15. Перегрузки оборудования по условиям нагрева. Перегрузки оборудования по критерию износа изоляции.
16. Способы и методы измерения рабочих температур и их превышений в элементах электрооборудования в эксплуатации.
17. Инфракрасная термодиагностика электрооборудования.
18. Нагрев контактных соединений и контроль их температурного режима.

*Контрольные тесты по разделу контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования*

**ТЕСТ № 1**

<p><b>1. При велосиметрическом методе УЗК основным признаком дефекта служит:</b></p> <p>а) изменение амплитуды УЗ; б) увеличение скорости УЗК; в) уменьшение скорости УЗК; г) образование акустической тени.</p>	<p><b>2. При капиллярном методе контроля в качестве пенетранта выбирают жидкости:</b></p> <p>а) с большим поверхностным натяжением; б) с относительно низким поверхностным натяжением; в) поверхностное натяжение не имеет значения.</p>
<p><b>3. Магнитные методы контроля можно применять для обнаружения:</b></p> <p>а) для обнаружения подповерхностных дефектов; б) сквозных дефектов; в) глубинных дефектов; г) коррозионных повреждений</p>	<p><b>4. В качестве источника электромагнитного поля при вихретоковом контроле применяется:</b></p> <p>а) излучатель; б) пьезопреобразователь; в) индуктивная катушка; г) пьезоэлектрическая пластина.</p>
<p><b>5. Дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их, называется:</b></p> <p>а) проявителем; б) пенетрантом; в) индикатором; г) очистителем.</p>	<p><b>6. Как называется процедура устранения вибрации:</b></p> <p>а) центровка; б) развертка; в) балансировка; г) калибровка.</p>
<p><b>7. Основой для выбора конструкционных материалов являются:</b></p> <p>а) физические свойства; б) химические свойства; в) механические свойства; г) технологические свойства.</p>	<p><b>8. Какие из методов НК требуют обязательного двухстороннего доступа к ОК:</b></p> <p>а) вихретоковый; б) ультразвуковой; в) магнитографический г) радиационный</p>
<p><b>9. Какие методы можно использовать для обнаружения поверхностных дефектов в медном сплаве:</b></p> <p>а) магнитопорошковый; б) ультразвуковой; в) капиллярный; г) вихретоковый.</p>	<p><b>10. Ультразвуковые волны имеют частоту:</b></p> <p>а) до 20 Гц; б) от 20 до <math>2 \cdot 10^4</math> Гц; в) от <math>2 \cdot 10^4</math> до <math>2 \cdot 10^9</math> Гц; г) более <math>2 \cdot 10^9</math> Гц.</p>

ТЕСТ № 2

<p><b>1. Источник ультразвуковых колебаний обычно используется в преобразователях действует по:</b></p> <p>а) магнитострикционному принципу;          б) пьезоэлектрическому принципу;          в) электродинамическому принципу;          г) ни один из вышеперечисленных.</p>	<p><b>2. Прибор НК, предназначенный для определения концентрации напряжений, называется:</b></p> <p>а) дефектоскоп;          б) структуроскоп;          в) стилоскоп;          г) толщиномер.</p>
<p><b>3. Основной недостаток вихретокового метода НК:</b></p> <p>а) сложность подготовки поверхности к контролю;          б) мертвая зона;          в) невозможность обнаруживать дефекты на глубине;          г) малая чувствительность</p>	<p><b>4. Способность материала сопротивляться коррозии при высоких температурах называется:</b></p> <p>а) жаропрочность;          б) окалинстойкость;          в) длительная прочность;          г) жаростойкость.</p>
<p><b>5. Активной частью гамма-дефектоскопа является:</b></p> <p>а) рентгеновская трубка;          б) электромагнит;          в) ампула с радионуклидом.</p>	<p><b>6. Какие из перечисленных металлов относятся к ферромагнитным:</b></p> <p>а) хром;          б) железо;          в) никель;          г) алюминий.</p>
<p><b>7. Какой метод УЗК наиболее подходит для контроля крупнозернистого материала:</b></p> <p>а) отражения;          б) прохождения;          в) импедансный;          г) вынужденных колебаний.</p>	<p><b>8. Какие материалы можно контролировать вихретоковым методом:</b></p> <p>а) стали;          б) цветные сплавы;          в) пластмассы;          г) бетон.</p>
<p><b>9. Как на рентгеновской пленке будет выглядеть дефект в виде поры:</b></p> <p>а) светлым пятном на темном фоне;          б) темным пятном на светлом фоне;          в) не виден вообще;</p>	<p><b>10. Благодаря какому физическому явлению возможен контакт между дефектом и дефектоскопическим материалом при капиллярном контроле:</b></p> <p>а) капиллярности;          б) смачивания;          в) магнитной проницаемости.</p>

ТЕСТ № 3

<p><b>1. Магнитная индукция, выраженная через длину проводника и силу тока равна:</b></p> <p>а) <math>B = IL/F</math>;          б) <math>B = F/(IL)</math>;          в) <math>B = I/LF</math>.</p>	<p><b>2. К пассивным методам УЗК относятся:</b></p> <p>а) шумодиагностика;          б) метод акустической эмиссии;          в) свободных колебаний;          г) отражения.</p>
<p><b>3. Расстояние, преодолеваемое упругой волной за время, равное одному периоду колебаний называется:</b></p> <p>а) частота;          б) длина волны;          в) скорость звука;          г) длительность импульса.</p>	<p><b>4. Неоднородность химического состава в различных зонах детали называется:</b></p> <p>а) раковина;          б) питтинг;          в) ликвация;          г) мартенсит.</p>
<p><b>5. Какие из перечисленных методов контроля относятся к бесконтактным:</b></p> <p>а) магнитопорошковый;          б) ультразвуковой;          в) вихретоковый;          г) радиационный.</p>	<p><b>6. Стилоскопирование позволяет определить:</b></p> <p>а) механические свойства;          б) структуру;          в) марочный состав стали;          г) химический состав стали.</p>
<p><b>7. Как на рентгеновской пленке будет выглядеть дефект в виде несплошности сварного шва:</b></p> <p>а) светлым пятном на темном фоне;          б) темным пятном на светлом фоне;          в) не виден вообще;</p>	<p><b>8. Какой проявитель для капиллярного метода контроля будет наиболее эффективен:</b></p> <p>а) крупнопористый;          б) мелкопористый;          в) мелкодисперсный;          г) крупнодисперсный.</p>
<p><b>9. Какой из видов коррозии можно определить методом шумодиагностики:</b></p> <p>а) язвенную;          б) стояночную;          в) межкристаллитную;          г) подшламовую.</p>	<p><b>10. Какие дефекты можно определить с использованием ДАО-технологии:</b></p> <p>а) подповерхностные дефекты;          б) глубинные дефекты;          в) поверхностные дефекты;          г) структурные несовершенства.</p>

ТЕСТ № 4

<p><b>1. Параметр НК характеризующий минимальные размеры выявляемых дефектов называется:</b></p> <p>а) разрешающая способность;          б) чувствительность;          в) мертвая зона;          г) коэффициент усиления.</p>	<p><b>2. Какие виды контроля можно осуществлять с помощью метода вихревых токов:</b></p> <p>а) выявление и оценка глубинных дефектов          б) определение толщины покрытий;          в) измерение диаметра трубы;          г) обнаружение поверхностных дефектов.</p>
<p><b>3. Скорость распространения упругих волн в однородном слое:</b></p> <p>а) пропорциональна <math>\lambda f</math>;          б) пропорциональна частоте <math>f</math>;          в) не зависит от частоты;          г) пропорциональна <math>1/f</math>.</p>	<p><b>4. Усталостные трещины в металлах возникают:</b></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><b>5. Магнитографический метод основан на:</b></p> <p>а) на использовании капиллярных свойств жидкости;          б) на регистрации магнитных полей рассеяния;          в) на регистрации изменении электромагнитного поля токов Фуко;          г) на определении магнитных свойств объектов.</p>	<p><b>6. Для дефектоскопии ОК большой толщины при радиационном методе НК в качестве источников излучения используются:</b></p> <p>а) гамма-дефектоскоп;          б) линейный ускоритель;          в) рентгеновский аппарат</p>
<p><b>7. Парковый ресурс турбин определяется ресурсом:</b></p> <p>а) рабочих лопаток;          б) роторов высокого давления;          в) роторов низкого давления;          г) направляющего аппарата.</p>	<p><b>8. Какие дефектоскопические материалы могут использоваться при магнитопорошковом методе контроля:</b></p> <p>а) порошок <math>Fe_2O_3</math>;          б) порошок алюминия;          в) порошок никеля;          г) порошок чугуна.</p>
<p><b>9. Какой из методов НК является самым дешевым и наглядным:</b></p> <p>а) ультразвуковой;          б) магнитопорошковый;          в) вихретоковый;          г) проникающими веществами</p>	<p><b>10. Для повышения жаростойкости стали легируют:</b></p> <p>а) молибденом;          б) титаном;          в) алюминием;          г) вольфрамом.</p>

ТЕСТ № 5

<p><b>1. Изменение, какого параметра при вихретоковом контроле сигнализирует о наличии дефекта в ОК:</b></p> <p>а) напряжение на катушках ВТП;          б) магнитная индукция;          в) время;          г) электрическое сопротивление</p>	<p><b>2. Индикаторный рисунок при магнитопорошковым методе проявляется:</b></p> <p>а) через 5-60 мин;          б) незамедлительно;          в) 2-5 мин;          г) 5-6 часов.</p>
<p><b>3. Как называется прибор для определения ударной вязкости:</b></p> <p>а) маятниковый копер          б) вискозиметр;          в) твердомер;          г) разрывная машина.</p>	<p><b>4. Жидкость, с каким углом смачивания будет наиболее эффективна в качестве пенетранта:</b></p> <p>а) <math>0^\circ &lt; \theta &lt; 90^\circ</math>;          б) <math>90^\circ &lt; \theta &lt; 180^\circ</math>;          в) <math>0^\circ &lt; \theta &lt; 45^\circ</math>;          г) <math>180^\circ &lt; \theta &lt; 360^\circ</math>.</p>
<p><b>5. Какие параметры влияют на скорость проведения капиллярного контроля:</b></p> <p>а) тип материала;          б) температура окружающей среды;          в) температура пенетранта;          г) все перечисленные.</p>	<p><b>6. Какой из перечисленных ниже методов УЗК наиболее подходит для измерения толщины детали:</b></p> <p>а) прохождения;          б) свободных колебаний;          в) отражения;          г) акустической эмиссии.</p>
<p><b>7. Основным критерием конструкционной прочности металлов являются:</b></p> <p>а) жаростойкость;          б) допустимое напряжение;          в) временное сопротивление;          г) долговечность.</p>	<p><b>8. Можно ли с помощью радиографического метода контроля оценить глубину нахождения дефекта:</b></p> <p>а) можно;          б) нельзя;          в) можно, если увеличить время просвечивания ОК.</p>
<p><b>9. Удаление из сталей кислорода в процессе изготовления:</b></p> <p>а) дегазация;          б) раскисление;          в) цементация;          г) рекристаллизация.</p>	<p><b>10. Какой вид установки вибродатчиков используется при контроле в стендовых системах:</b></p> <p>а) на магнит;          б) на клей;          в) ручным щупом;          г) на шпильку.</p>

ТЕСТ № 6

<p><b>1. Основной недостаток УЗК:</b></p> <p>а) малая чувствительность;          б) необходимость двухстороннего доступа к ОК;          в) ограниченная толщина контролируемых деталей;          г) наличие мертвой зоны.</p>	<p><b>2. При радиометрическом методе контроля способом детектирования дефектоскопической информации является:</b></p> <p>а) телескопическое изображение на экране;          б) регистрация электрических сигналов;          в) фиксация изображения на пленке или бумаге;</p>
<p><b>3. Какой из методов капиллярного контроля обладает наибольшей чувствительностью к дефектам:</b></p> <p>а) ахроматический;          б) цветной;          в) фильтрующихся суспензий;          г) люминесцентный.</p>	<p><b>4. Взаимодействие вихретокового преобразователя и объекта контроля происходит:</b></p> <p>а) на значительном расстоянии;          б) при прямом контакте;          в) на небольших расстояниях;          г) через слой контактной смазки</p>
<p><b>5. Какой из перечисленных методов УЗК подходит для контроля дефектов соединения слоистых изделий типа металл-неметалл;</b></p> <p>а) импедансный;          б) эхо-метод;          в) метод свободных колебаний;          г) реверберационный.</p>	<p><b>6. Операция, в результате которой пьезоэлектрические материалы приобретают пьезоэлектрические свойства:</b></p> <p>а) поляризация;          б) термообработка;          в) электризация;          г) тренировка.</p>
<p><b>7. При магнитном контроле используются в основном поля:</b></p> <p>а) 200...1000 мТл;          б) 1000...2000 мТл;          в) 1...20 Тл;          г) <math>1 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3}</math> Тл.</p>	<p><b>8. Каким типом ПЭП при УЗК оценивают состояние сварных швов:</b></p> <p>а) прямым;          б) наклонным;          в) горизонтальным;          г) вертикальным</p>
<p><b>9. При радиоскопическом методе контроля детектирование дефектоскопической информации осуществляется:</b></p> <p>а) на экране;          б) на пленке;          в) в виде импульсов;          г) появлением многократных эхо-сигналов</p>	<p><b>10. Какие методы НК можно использовать для обнаружения поверхностных дефектов осевого канала ротора паровой турбины:</b></p> <p>а) капиллярный;          б) вихретоковый;          в) ДАО-технология;          г) ультразвуковой.</p>

ТЕСТ № 7

<p><b>1. Какой из методов НК не требует обязательной подготовки поверхности контроля:</b></p> <p>а) магнитопорошковый;          б) магнитографический;          в) ультразвуковой;          г) капиллярный.</p>	<p><b>2. Какой из методов радиационного контроля обладает наибольшей достоверностью:</b></p> <p>а) радиографический;          б) радиометрический;          в) радиоскопический</p>
<p><b>3. Какие материалы можно контролировать вихретоковым методом:</b></p> <p>а) полупроводники;          б) электропроводящие;          в) ферромагнитные;          г) все вышеперечисленные.</p>	<p><b>4. Какие материалы используются для изготовления лопаток паровых турбин ЧНД:</b></p> <p>а) Вст4кп5;          б) ВТ22;          в) 20Х13;          г) 10Х18Н12Т.</p>
<p><b>5. Значения относительной магнитной проницаемости у ферромагнитных материалов:</b></p> <p>а) <math>\mu_r &gt; 1</math>;          б) <math>\mu_r &lt; 1</math>;          в) <math>\mu_r \gg 1</math>.</p>	<p><b>6. С помощью какого метода можно определить марочный состав стали:</b></p> <p>а) стилоскопирования;          б) структурного анализа;          в) магнитографического;          г) радиографического</p>
<p><b>7. Длина волны <math>L</math>, выраженная через скорость <math>c</math> и частоту <math>f</math> равна:</b></p> <p>а) <math>L = c/f</math>;          б) <math>L = cf</math>;          в) <math>L = 1/cf</math>;          г) <math>L = c + f</math>.</p>	<p><b>8. Ультразвуковой прибор, предназначенный для определения механических свойств материалов, называется:</b></p> <p>а) дефектоскоп;          б) структуроскоп;          в) пирометр;          г) толщиномер.</p>
<p><b>9. Преобразователь для определения частоты оборотов, применяемый при вибродиагностике называется:</b></p> <p>а) акселерометр;          б) таходатчик;          в) проксиметр;          г) веломер.</p>	<p><b>10. Сплав меди с цинком называется:</b></p> <p>а) бронза;          б) латунь;          в) магнетит;          г) силумин.</p>

ТЕСТ № 8

<p><b>1. Способность одного и того же химического элемента при различной температуре иметь различную кристаллическую структуру называется:</b></p> <p>а) анизотропия;          б) полиморфизм;          в) аллотропия;          г) политропия.</p>	<p><b>2. Магнитографический метод наиболее часто применяют для:</b></p> <p>а) определения механических свойств объектов;          б) измерения толщины детали;          в) контроля сплошности сварных швов.</p>
<p><b>3. Дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их, называется:</b></p> <p>а) проявителем;          б) пенетрантом;          в) индикатором;          г) очистителем.</p>	<p><b>4. Стали, легированные большим количеством легирующих элементов с повышенным содержанием углерода относятся к:</b></p> <p>а) перлитному классу;          б) мартенситному классу;          в) аустенитному классу;          г) ферритному классу.</p>
<p><b>5. Для дефектоскопии ОК большой толщины при радиационном методе НК в качестве источников излучения используются:</b></p> <p>а) гамма-дефектоскоп;          б) линейный ускоритель;          в) рентгеновский аппарат</p>	<p><b>6. Для контроля внутренней поверхности труб используются вихретоковым преобразователи:</b></p> <p>а) накладные;          б) проходные;          в) раздельно-совмещенные;          г) наклонные.</p>
<p><b>7. При контроле велосимметрическим методом УЗК основным признаком дефекта служит:</b></p> <p>а) изменение амплитуды;          б) изменение частотного спектра сигнала;          в) уменьшение скорости волны;          г) появление многократных эхо-сигналов</p>	<p><b>8. Процесс выставления характеристик прибора по стандартному образцу называется:</b></p> <p>а) сканирование узла;          б) развертка;          в) проверка чувствительности;          г) калибровка.</p>
<p><b>9. Основной недостаток вихретокового метода НК:</b></p> <p>а) сложность подготовки поверхности к контролю;          б) мертвая зона;          в) невозможность обнаруживать дефекты на глубине;          г) малая чувствительность</p>	<p><b>10. Как называется процедура устранения вибрации:</b></p> <p>а) центровка;          б) развертка;          в) балансировка;          г) калибровка.</p>

ТЕСТ № 9

<p><b>1. Сжатие и расширение материала под влиянием переменного электрического поля называется:</b></p> <p>а) пьезоэлектрический эффект;          б) рефракция;          в) магнитоскрипция;          г) магнитная индукция.</p>	<p><b>2. Изображение эхо-сигналов на экране УЗК-дефектоскопа называется:</b></p> <p>а) развертка;          б) стробирование;          в) калибровка;          г) центровка</p>
<p><b>3. Какие дефекты относятся к дефектам эксплуатации:</b></p> <p>а) усадочные раковины;          б) трещины ползучести;          в) закаты;          г) неметаллические включения.</p>	<p><b>4. От каких характеристик ОК зависят результаты радиационного контроля:</b></p> <p>а) химического состава;          б) толщины;          в) плотности;          г) прочности</p>
<p><b>5. Напряженность магнитного поля, которую необходимо наложить на предмет для полного его размагничивания называется:</b></p> <p>а) остаточная магнитная индукция;          б) гистерезис;          в) коэрцитивная сила;          г) индукция.</p>	<p><b>6. Сплав меди с алюминием называется:</b></p> <p>а) бронза;          б) латунь;          в) магнетит;          г) силумин.</p>
<p><b>7. Какой материал наиболее предпочтителен для изготовления трубок поверхностей нагрева регенеративных подогревателей низкого давления:</b></p> <p>а) 12ХМ;          б) 16ГНМА;          в) ЛО-62-1;          г) СЧ15-32.</p>	<p><b>8. В каких случаях при магнитном контроле деталь контролируют способом приложенного поля:</b></p> <p>а) для выявления поверхностных дефектов;          б) для выявления подповерхностных дефектов;          в) деталь имеет сложную форму;          г) при небольшой мощности дефектоскопа.</p>
<p><b>9. Эхо-импульсный метод УЗК основан на:</b></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><b>10. Датчик применяемый для определения виброскорости называется:</b></p> <p>а) акселерометр;          б) таходатчик;          в) проксиметр;          г) велометр.</p>

ТЕСТ № 10

<p><b>1. Для выявления, каких дефектов предназначен метод акустической эмиссии:</b></p> <p>а) типа нарушений сплошности;          б) поверхностных трещин;          в) горизонтальных;          г) концентрации напряжений.</p>	<p><b>2. Расчет конструкции на прочность проводят по:</b></p> <p>а) допустимым напряжениям;          б) пределу текучести;          в) относительному удлинению;          г) ударной вязкости.</p>
<p><b>3. Какие факторы влияют на чувствительность магнитопорошкового контроля:</b></p> <p>а) скорость намагничивания;          б) время намагничивания;          в) форма детали;          г) угол намагничивания.</p>	<p><b>4. Какой из методов магнитного контроля позволяет контролировать структуру металла:</b></p> <p>а) феррозондовый;          б) магнитографический;          в) магнитопорошковый;          г) магнитной памяти.</p>
<p><b>5. Рабочая температура углеродистых качественных сталей:</b></p> <p>а) до 300°C;          б) до 600°C;          в) до 450°C;          г) до 150°C.</p>	<p><b>6. Основным параметром, характеризующим наличие дефекта при радиационном методе контроля является:</b></p> <p>а) напряжение;          б) интенсивность излучения;          в) ЭДС;          г) активность источника ионизирующего излучения.</p>
<p><b>7. Активной частью гамма-дефектоскопа является:</b></p> <p>а) рентгеновская трубка;          б) электромагнит;          в) ампула с радионуклидом;          г) линейный ускоритель</p>	<p><b>8. Прибор НК, используемый для обнаружения несплошностей материала называется:</b></p> <p>а) толщиномер;          б) структуроскоп;          в) трещиномер;          г) дефектоскоп.</p>
<p><b>9. Какой тип ПЭП наиболее подходит для выявления вертикальных дефектов:</b></p> <p>а) раздельно-совмещенный;          б) наклонный;          в) прямого действия;          г) вертикальный.</p>	<p><b>10. Значения относительной магнитной восприимчивости у ферромагнитных материалов:</b></p> <p>а) <math>\mu_r &gt; 1</math>;          б) <math>\mu_r &lt; 1</math>;          в) <math>\mu_r \gg 1</math>.</p>

**Электронный учебно-методический комплекс**

**Вспомогательный раздел**

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ  
ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

**УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА**

**Минск 2016 г.**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по  
новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ»

Кафедра «Метрология и энергетика»

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора института

\_\_\_\_\_ И.А.Тавгень

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

**УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**  
**«Методы диагностики и контроля**  
**энергооборудования »**

специальности переподготовки

1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования  
организаций»

в соответствии с типовым учебным планом переподготовки, утвержденным  
22.04.2014 г. пер. № 25-13/580

г. Минск, 2015

Разработчики программы:

А.Г. Герасимова, доцент кафедры «Тепловые электрические станции», кандидат технических наук, доцент;

Е.Г.Пономаренко, заместитель декана энергетического факультета, доцент кафедры «Электрические станции», кандидат технических наук, доцент

Рекомендована к утверждению:

Кафедрой «Метрология и энергетика»

протокол заседания от «    » октября 2015г.г. № 1

Советом Института повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ

протокол заседания от « \_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г. № \_\_\_\_\_

## I. ВВЕДЕНИЕ

*Цель* курса – получить теоретические знания о методах контроля и диагностики теплотехнического и электротехнического оборудования.

*Задачами* курса «Методы диагностики и контроля энергооборудования являются: освоение теоретических знаний и получение практических навыков в области контроля и диагностики электротехнического и теплотехнического оборудования;

В результате изучения курса слушатели должны *знать*:

- методы контроля и технической диагностики энергооборудования;
- физическую сущность современных методов неразрушающего контроля и диагностики теплотехнического оборудования ТЭС;
- физическую сущность современных методов неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования;

Слушатели курсов должны усвоить *умения*:

- работы с нормативно-технической документацией (СТБ ЕН, ТКП, ГОСТ, ИСО-9000, 9001) охватывающий вопросы контроля и диагностики теплотехнического и электротехнического оборудования;
- производить выбор метода и средства контроля для решения конкретных задач диагностики электротехнического и теплотехнического оборудования;
- использовать полученную информацию для предотвращения аварийных ситуаций при эксплуатации энергооборудования.

Обучаемые должны приобрести *навыки*:

- работы с приборами и средствами неразрушающего контроля и диагностики энергетического оборудования.

Учебная программа дисциплины рассчитана на 52 учебных часа. Распределение аудиторных занятий по видам: лекции – 18 часов; практических занятий – 8 часов.

## II. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ

Диагностика – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

### **Тема 1. Введение**

Предмет и задачи курса. Краткий анализ технического состояния энергетического оборудования Республики Беларусь. Пути повышения надежности и долговечность работы энергетического оборудования. Закон РБ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов». Основные положения. Требования промышленной безопасности. Основные нормативные документы в области контроля и технической диагностики энергетического оборудования.

### **Тема 2. Контроль и диагностика технического состояния тепломеханического оборудования. Основные положения**

Основные термины и определения. Понятие контроля, технической диагностики, диагностирования и освидетельствования оборудования.

Виды контроля. Разрушающий и неразрушающий, выборочный и сплошной контроль. Понятие первичного (входного), периодического и внепланового контроля.

Виды дефектов металла и причины их образования. Влияние дефектов на эксплуатационные характеристики оборудования.

Условия работы конструкционных материалов теплоэнергетического оборудования под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам теплоэнергетического оборудования.

Основные служебные свойства металла теплоэнергетического оборудования.

### **Тема 3. Разрушающие методы контроля**

*Механические испытания.* Статические и динамические методы испытаний механических свойств. Статические кратковременные испытания на растяжение-сжатие, твердость, изгиб и кручение. Динамические испытания с определением ударной вязкости и ее составляющих – удельной работы зарождения и развития трещины. Испытания переменной нагрузкой с определением предела выносливости материала. Испытания на термическую усталость, ползучесть и длительную прочность. Испытания на вязкость разрушения.

*Металлографические методы испытаний.* Макроскопический анализ. Способы макроанализа. Технология проведения макроанализа. 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 4. Неразрушающий контроль технического состояния теплоэнергетического оборудования. Общие положения**

Общая характеристика неразрушающего контроля и диагностики. Стандартизация неразрушающего контроля и диагностики. Перечень основных отечественных стандартов в области неразрушающего контроля и диагностики. Автоматизация неразрушающего контроля и диагностики теплоэнергетического оборудования. Экспертные системы. Эффективность применения методов и средств неразрушающего контроля и диагностики.

Методы неразрушающего контроля, применяемые для диагностики металлоконструкций теплоэнергетического оборудования (визуально-измерительный, акустический, вихретоковый, магнитный, проникающими веществами, радиационный, тепловой, методы диагностики акустической эмиссии и др.). Общие теоретические сведения о методах неразрушающего контроля, технологии проведения контроля металлоконструкций теплоэнергетического оборудования

#### **Тема 5. Методы неразрушающего контроля, применяемые при диагностике металлоконструкций теплоэнергетического оборудования**

*Акустические методы контроля.* Типы акустических волн, особенности их распространения; акустические свойства сред. Отражение и преломление акустических волн. Классификация методов акустического контроля. Методы отражения, прохождения, комбинированные, свободных и вынужденных колебаний, импедансные. Основные характеристики методов и области их применения. Акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля, физические основы и регистрируемые параметры. Пьезоэлектрические преобразователи. Типы пьезоматериалов и их основные технические характеристики. Структурная схема эхо-импульсного ультразвукового дефектоскопа. Чувствительность акустического контроля, максимальная и минимальная глубина прозвучивания, разрешающая способность.

*Методы акустико-эмиссионной диагностики.* Акустико-эмиссионные методы контроля, назначение и решаемые задачи. Параметры акустической эмиссии, основные диагностические признаки. Анализ акустических сигналов при АЭ контроле. Методы определения координат источников АЭ. Критерии оценки технического состояния объектов по параметрам АЭ. Диагностика утечки газов и жидкостей из резервуаров. Приборы и информативные параметры АЭ течеискания. Акустико-эмиссионный контроль процессов термообработки. Акустико-эмиссионный контроль процессов сварки. Прогнозирование и оценка ресурса с использованием АЭ-информации.

*Вихретоковые методы контроля.* Физические основы вихретоковых методов контроля. Классификация вихретоковых методов контроля (амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый, спектральный и др). Разновидности пре-

образователей. Применение вихретоковых методов контроля при диагностике энергетического оборудования ТЭС.

**Капиллярные методы контроля (контроль проникающими веществами)** 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.

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. Импульсный магнитный метод и средства его реализации. Применение импульсного магнитного метода. Магнитная толщинометрия.

**Радиационные методы контроля.** Природа и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. 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.

**Методы течеискания.** Понятие герметичности. Основные виды нарушения герметичности. Физические основы методов течеискания. Регистрация проникающих через течи жидких и газообразных пробных веществ. Определение суммарной герметичности и локализация течей. Основные методы течеискания: манометрический, масс-спектрометрический, галогенный, пузырьковый, химический, гидростатический, люминесцентный, акустико-эмиссионный. Чувствительность методов и область применения.

## **Тема 6. Системы диагностического мониторинга и непрерывного контроля**

Системы диагностического мониторинга состояния теплотехнического оборудования (термографический контроль, вибродиагностика, телекоммуникации). Системы непрерывного контроля состояния теплотехнического оборудования.

Обработка результатов диагностики энергооборудования. Порядок проведения диагностирования для определения остаточного ресурса энергооборудования. Системы мониторинга состояния энергооборудования.

## **Тема 7. Задачи и методы профилактического контроля и диагностики изоляции электрического оборудования**

Основные задачи контроля изоляции в условиях эксплуатации. Виды дефектов в электрической изоляции, причины и динамика их развития. Виды и методы контроля изоляции. Неразрушающие и разрушающие испытания. Стратегии, объем и периодичность неразрушающего контроля электрической изоляции. Методы комплексного автоматизированного контроля. Разрушающие испытания и экономическое обоснование испытаний. Вопросы техники безопасности при проведении испытаний и профилактических мероприятий.

## **Тема 8. Физические основы и методы неразрушающих испытаний изоляции**

Контроль изоляции по электрическим характеристикам. Общая схема замещения изоляции. Измерение сопротивления изоляции и критерии состояния по сопротивлению и токам абсорбции. Контроль изоляции по диэлектрическим потерям. Измерительные мосты и методы их применения в лабораторных и эксплуатационных условиях. Емкостные методы оценки увлажнения изоляции. Приборы контроля влажности и методы их применения.

## **Тема 9 Выявление и измерение частичных разрядов в изоляции**

Причины возникновения частичных разрядов в изоляции и их параметры. Частичные разряды при переменном, постоянном и импульсном напряжениях. Схемы и приборы для регистрации частичных разрядов. Трудности при регистрации частичных разрядов в условиях эксплуатации. Использование индикаторов частичных разрядов и дефектоскопов. Акустические и оптические методы регистрации частичных разрядов.

## **Тема 10. Контроль изоляции трансформаторов и других маслонеполненных аппаратов путем анализа состояния масла и методами хроматографического анализа газов (ХАГ)**

Причины и источники появления газов в трансформаторном масле. Газовыделение при термическом разложении изоляции и разложении под воздействием частичных разрядов. Накопление газа в масле и динамика концентрации примесных газов. Критерии, нормы и периодичность диагностики методами

ХАГ. Идентификация дефекта и обоснование оперативных и профилактических мер. Приборы и техника проведения ХАГ. Градуировка ХАГ и обработка хроматограмм.

### **Тема 11. Нагрев электрооборудования и контроль его температурного режима**

Влияние температуры на свойства изоляции и составных частей электрооборудования. Уравнение теплового баланса и его решение. Предельные температуры и превышения температур. Тепловое старение изоляции. Перегрузки оборудования по условиям нагрева. Перегрузки оборудования по критерию износа изоляции Способы и методы измерения рабочих температур и их превышений в элементах электрооборудования в эксплуатации. Инфракрасная термодиагностика электрооборудования. Нагрев контактных соединений и контроль их температурного режима.

### **ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

9. Изучение устройства и принципа действия ультразвуковых приборов неразрушающего контроля.
10. Определение твердости металла переносным твердомером.
11. Ультразвуковой контроль толщины изделий.
12. Ультразвуковой контроль сварных соединений.
13. Обнаружение дефектов магнитопорошковым методом контроля.
14. Обнаружение дефектов вихретоковым методом контроля.
15. Обнаружение поверхностных дефектов капиллярным методом контроля.
16. Магнитная структуроскопия.
17. Неразрушающие методы контроля изоляции. Контроль изоляции по сопротивлению, токам утечки и по тангенсу угла диэлектрических потерь.
18. Контроль изоляции по емкостным характеристикам. Приборы ПКВ.
19. Исследование характеристик трансформаторного масла. Контроль изоляции по характеристикам трансформаторного масла.
20. Частичные разряды в изоляции и диагностика изоляции по характеристикам частичных разрядов.
21. Методы хроматографического анализа газов и других продуктов распада. Хроматографы и хроматография.
22. Контроль и испытания внешней изоляции РУ и ВЛ.
23. Контроль и испытания силовых кабелей.

**Форма текущей аттестации – зачет.**

### **III. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ (ЗАЧЕТ)**

## **Вопросы по разделу контроль и диагностика теплоэнергетического оборудования.**

40. Условия работы конструкционных материалов теплоэнергетического оборудования под воздействием конструкторско-технологических и эксплуатационных факторов.
41. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам теплоэнергетического оборудования.
42. Основные служебные свойства металла теплоэнергетического оборудования.
43. Виды и методы контроля металлоконструкций теплоэнергетического оборудования.
44. Классификация физических методов неразрушающего контроля.
45. Акустические методы НК, область применения и классификация.
46. Основные параметры УЗК.
47. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), устройство и принцип действия.
48. Классификация ПЭП.
49. Эхо-метод ультразвукового контроля.
50. Технология проведения УЗК.
51. Область применения УЗК.
52. Классификация магнитных методов контроля.
53. Магнитопорошковый метод НК: физическая основа и область применения.
54. Магнитографический метод контроля сварных швов.
55. Метод магнитной памяти металлов.
56. Классификация и назначение капиллярных методов контроля.
57. Физические явления капиллярного контроля.
58. Технология проведения капиллярного контроля.
59. Вихретоковый метод контроля: физическая основа и область применения.
60. Принцип действия вихретокового дефектоскопа.
61. Классификация вихретоковых преобразователей.
62. Радиационные методы контроля: классификация и область применения.
63. Радиационные источники излучения, применяемые при НК.
64. Детекторы, применяемые при радиационном контроле.
65. Классификация средств НК.
66. Контролируемые параметры и дефекты, выявляемые при НК.
67. Чувствительность неразрушающих методов контроля.
68. Испытания на растяжение, образцы, методика проведения. Диаграммы растяжения.
69. Испытания на ударный изгиб, образцы, методика проведения.
70. Испытания на жаропрочность: образцы для контроля, методика проведения, диаграммы.
71. Структурный анализ металлов и сплавов методами РК.
72. Коррозионные испытания.

- 73.Безобразцовые методы контроля микроструктуры.
- 74.Определение марочного состава сталей методом стилоскопирования.

### **Вопросы по разделу контроль и диагностика электроэнергетического оборудования.**

- 19.Виды дефектов в электрической изоляции, причины и динамика их развития.
- 20.Виды и методы контроля изоляции. Неразрушающие и разрушающие испытания.
- 21.Стратегии, объем и периодичность неразрушающего контроля электрической изоляции.
- 22.Общая схема замещения изоляции.
- 23.Измерение сопротивления изоляции и критерии состояния по сопротивлению и токам абсорбции.
- 24.Контроль изоляции по диэлектрическим потерям.
- 25.Емкостные методы оценки увлажнения изоляции.
- 26.Причины возникновения частичных разрядов в изоляции и их параметры.
- 27.Причины и источники появления газов в трансформаторном масле.
- 28.Газовыделение при термическом разложении изоляции и разложении под воздействием частичных разрядов.
- 29.Критерии, нормы и периодичность диагностики методами ХАГ
- 30.Влияние температуры на свойства изоляции и составных частей электрооборудования.
- 31.Предельные температуры и превышения температур.
- 32.Тепловое старение изоляции.
- 33.Перегрузки оборудования по условиям нагрева. Перегрузки оборудования по критерию износа изоляции.
- 34.Способы и методы измерения рабочих температур и их превышений в элементах электрооборудования в эксплуатации.
- 35.Инфракрасная термодиагностика электрооборудования.
- 36.Нагрев контактных соединений и контроль их температурного режима.

## **IV. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

### **Основная литература:**

1. Герасимова А.Г. Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС. – Мн.: Вышэйшая школа, 2011. – 272с.
2. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалев и др.; под общ. ред. В.В.Клюева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656с.
3. Клюев, В.В. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник в 2-х кн. Изд. 2-е / Под ред. В.В. Клюева – М.: Машинострое-

- ние, 1986. Кн1. – 396 с., кн.2 – 326 с.
4. Матюнин, В.М. Металловедение в теплоэнергетике: учебное пособие для вузов / В.М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
  5. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов/ П.А.Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440с.
  6. 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.
  7. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344с.
  8. Герасимова А.Г. Контроль и диагностика теплового оборудования ТЭС:
  9. Степанчук К.Ф. Контроль и диагностика изоляции машин и аппаратов. – Мн.: БГПА, 1995 г.
  10. Техника высоких напряжений / Под ред .профессора Г.С. Кучинского. – С.-Петербург.: Энергоатомиздат, 2003г.
  11. Методические указания и нормы по испытанию высоковольтного оборудования. – Мн.: ГПО «Белэнерго», 2008.

#### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. РД РБ 09100.17-2000. Инструкция по контролю и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов ТЭС.– Минск: БЭРН, 2002.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов: утверждены Министерством по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь 15.11.12. – Минск: Экономэнерго. – 2013. – 224.
3. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением . – Минск: «Диэкос», 2012. – 203с.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды – Минск : Центр охраны труда и промышленной безопасности, 2012. – 127 с.

**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	СТБЕН 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	СТБЕН 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 определения

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 цельнокованых 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