



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

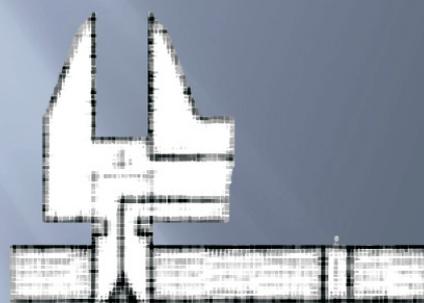
SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

Электронный учебно-методический комплекс

Методы неразрушающего контроля

Учебная программа дисциплины

- **Учебное пособие**
Методические указания по лабораторным работам
Методические указания по самостоятельной работе
Банк тестовых заданий в системе UniTest



Красноярск
ИПК СФУ
2009

УДК 669.017(075)
ББК 34.2я73
М54

Авторы:
**Н. И. Кашубский, А. А. Сельский,
А. Ю. Смолин, А. А. Кузнецов, В. И. Афанасов**

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Методы неразрушающего контроля» подготовлен в рамках реализации Программы развития федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) на 2007–2010 гг.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;
Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

М54 Методы неразрушающего контроля. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Н. В. Кашубский, А. А. Сельский, А. Ю. Смолин и др. – Электрон. дан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – (Методы неразрушающего контроля : УМКД № 1588–2008 / рук. творч. коллектива А. Ю. Смолин). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 50 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD* ; операционная система *Microsoft Windows XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1701-0 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1765-2 (учебного пособия)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320902520 (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Методы неразрушающего контроля», включающего учебную программу дисциплины, методические указания по лабораторным работам, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Методы неразрушающего контроля. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Методы неразрушающего контроля. Презентационные материалы».

Рассмотрены виды дефектов твердых материалов, дана характеристика визуального и измерительного контроля, а также неразрушающих физических методов контроля. Представлены краткие сведения о системах аттестации в области неразрушающего контроля.

Предназначено для студентов направления подготовки магистров 190100.68 «Наземные транспортно-технологические комплексы» укрупненной группы 190000 «Транспортная техника и технологии».

© Сибирский федеральный университет, 2009

Рекомендовано к изданию Инновационно-методическим управлением СФУ

Редактор Л. Г. Семухина

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения Информационно-телекоммуникационного комплекса СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 30.11.2009

Объем 3 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПОНЯТИЯ О ДЕФЕКТАХ И ДЕФЕКТНОЙ ПРОДУКЦИИ	8
2. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ	11
2.1. Законы и элементы оптики.....	11
2.2. Источники оптического излучения. Световые приборы.....	15
2.3. Характеристика размеров изделий и средств их контроля.....	19
2.4. Взаимосвязь систем ВИК с другими системами неразрушающего контроля. Требования к проведению ВИК.....	29
3. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	33
3.1. Физические основы взаимодействия излучения и вещества.....	33
3.2. Методы оптического контроля	38
4. КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ ..	44
4.1. Методы контроля проникающими веществами	44
4.2. Физические явления, лежащие в основе капиллярного контроля.....	47
5. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ	53
6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ	62
7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	66
8. РАДИОВОЛНОВЫЙ КОНТРОЛЬ	69
9. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ	71
10. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	76
10.1. Теоретические основы метода	76
10.2. Методы акустического контроля.....	79
11. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ	94
12. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АТТЕСТАЦИИ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	97
12.1. Аттестация персонала	97
12.2. Аттестация лабораторий.....	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	107



ВВЕДЕНИЕ

Все виды технического контроля опасных производственных объектов разделяются на 3 группы: разрушающий контроль, повреждающий контроль и неразрушающий контроль.

Разрушающий контроль – это совокупность таких видов контроля, которые требуют отбора проб или вырезки образцов непосредственно из материала объекта, при этом объект остается неработоспособным до восстановления мест отбора проб (образцов). К разрушающим видам контроля относятся:

- лабораторный химический анализ материала объекта (требует на сверловки определенного объема стружки);
- металлография (исследование структуры металла объекта; требует вырезки шлифов);
- лабораторные механические испытания материала объекта на растяжение, сжатие, изгиб, ударную вязкость (требует вырезки специальных образцов – темплетов).

Повреждающий контроль – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом объект сохраняет работоспособность, но в местах контроля остаются не препятствующие эксплуатации неустраняемые следы. К повреждающим видам контроля, в частности, относятся:

- измерение твердости (твердометрия) вдавливанием специальных инденторов (баббитовые шарики, алмазные наконечники; на поверхности объекта остается вмятина);
- стилоскопирование (оценка марки стали по составу оптического спектра вольтовой дуги, создаваемой между электродом специального прибора – стилоскопа и поверхностью объекта, на которой остается прижег).

Неразрушающий контроль (НК) – это совокупность таких видов контроля, которые производятся непосредственно на объекте, при этом исправный объект сохраняет работоспособность без какого-либо повреждения материала.

Различают понятия «неразрушающий контроль» и «неразрушающий физический контроль».

Неразрушающий физический контроль – это совокупность таких видов неразрушающего контроля, которые требуют применения специальных веществ, сложных приборов и достаточно наукоемких технологий. Из всех видов неразрушающего контроля, используемых на опасных производственных объектах, лишь один не относится к категории физических – это визуальный и измерительный контроль (ВИК). Таким образом, сочетание этих понятий можно выразить формулой:

Неразрушающий контроль = Неразрушающий физический контроль + ВИК.

По степени проникновения в материал все виды неразрушающего физического контроля условно подразделяют на две категории: поверхностные и объемные.

Поверхностные виды (методы) неразрушающего контроля – это такие, которые позволяют обнаруживать только дефекты, имеющие выход на доступную для контроля поверхность материала объекта.

Объемные виды (методы) неразрушающего контроля – это такие, которые дают возможность обнаруживать преимущественно внутренние дефекты материала, а поверхностные дефекты выявляются, только если они достаточно крупные.

В России классификация неразрушающих физических видов (методов) контроля приведена в стандарте ГОСТ 18353-79 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» [1]. Этот стандарт предусматривает 9 видов контроля (табл. 1).

Таблица 1

Классификация видов неразрушающего физического контроля материалов

Вид контроля	Категория вида контроля	Требования к материалу объекта
Оптический*	Для оптически прозрачных материалов – объемный, для непрозрачных – поверхностный	Любой твердый или жидкий
Проникающими веществами	Поверхностный	Любой твердый
Магнитный	Поверхностный**	Ферромагнитные металлы
Электромагнитный	Поверхностный**	Любые металлы
Электрический	Поверхностный**	—«—
Радиоволновый	Объемный	Любые неметаллы
Радиационный	Объемный	Любой твердый
Акустический	Объемный	Любой твердый или жидкий
Тепловой	Объемный	—«—

* Оптический вид контроля частично входит в состав ВИК, когда речь идет о применении специальных увеличительных средств.

** Эти методы позволяют обнаруживать не только поверхностные, но и подповерхностные дефекты, залегающие на малой глубине (до 2 мм).

Каждый вид контроля объединяет в себе один или несколько методов, основанных на данном физическом принципе.

В настоящем пособии рассмотрены все перечисленные в таблице виды неразрушающего контроля и составляющие их методы, показаны средства неразрушающего контроля, представлены методики и технологии контроля некоторых конкретных объектов.

На [рис. 1](#) приведена логическая цепь полного технического диагностирования объекта, из которой видно, что неразрушающий контроль (кроме толщинометрии) является завершающей фазой процесса.

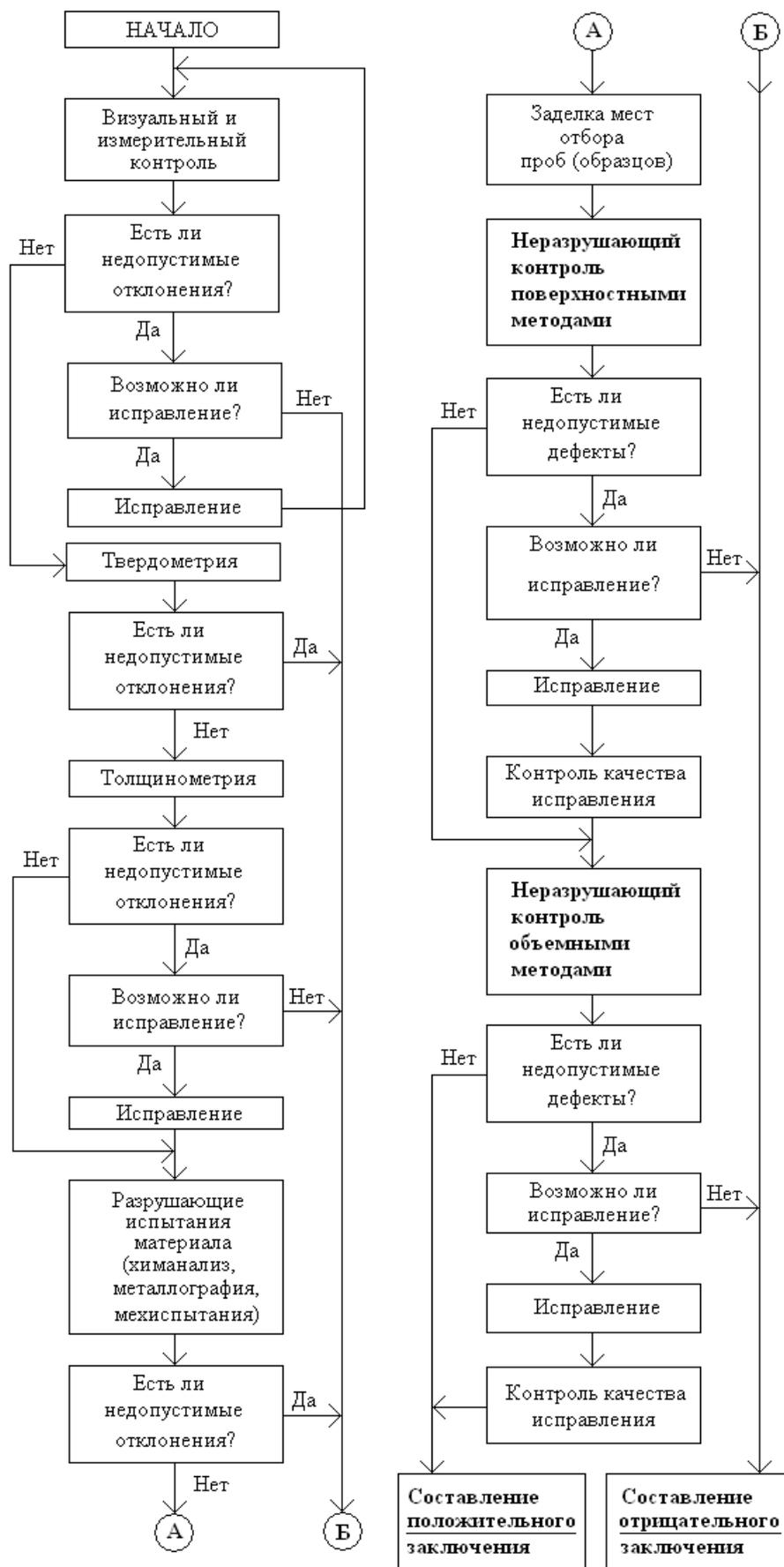


Рис. 1. Логическая цепь технического диагностирования объекта

В первую очередь всегда производится ВИК. Это обуславливается тем, что при наличии очевидных неустранимых недопустимых повреждений объекта прочие более трудоемкие и дорогостоящие процедуры не имеют смысла.

Далее логично провести измерение твердости материала объекта по системе равномерно распределенных точек портативными ультразвуковыми или динамическими твердомерами. Такие современные твердомеры, как приборы серий «ТЭМП», «УЗИТ», «ТДМ» и др., выполнены в «карманном» исполнении с автономным маловольтажным электропитанием, не оставляют следов на объекте, но, тем не менее, это не дает права всецело отнести твердомерию к неразрушающему контролю, так как на вооружении еще остаются и «повреждающие» приборы (например, «ПОЛЬДИ»). Твердость обычно измеряется в системе единиц Бринелля или Роквелла. Если она выходит за нормативно допустимые пределы, то материал объекта, как правило, признается непригодным и дальнейший контроль нелогичен.

Одновременно с твердометрией обычно измеряют толщину стенок объекта в тех же точках портативными ультразвуковыми толщиномерами. Если толщина на обширных площадях вышла за допустимые пределы по утонению, то измеряемый элемент объекта признается требующим замены и дальнейший его контроль также не имеет смысла.

В том случае, если по результатам всех предыдущих процедур объект не бракуется, в ряде случаев назначают исследования его материала разрушающими методами (химический анализ, металлография, механические испытания). Если программой диагностирования это предусмотрено и результаты испытаний разрушающими методами положительны, то последующему неразрушающему контролю должны быть обязательно подвержены не только нормативно регламентированные зоны и элементы, но и восстановленные места отбора проб (образцов). Поэтому неразрушающий физический контроль всегда проводят в последнюю очередь.

В процедуру неразрушающего контроля, как правило, включены как минимум 2 метода: один поверхностный и один объемный. Поверхностные методы более просты в исполнении, поэтому их используют прежде объемных, а объемные проводят при отсутствии показаний на недопустимые дефекты по результатам поверхностных.

Только в случае отсутствия противопоказаний по результатам всех процедур диагностирования составляется положительное заключение, содержащее в себе отдельные заключения по каждому виду (методу) контроля.

Процедуры контроля на опасных производственных объектах могут выполнять специалисты, обученные и аттестованные в соответствии с требованиями «Правил аттестации персонала в области неразрушающего контроля» ПБ 03-440-02 [2], причем выдавать заключения могут лица с квалификацией не ниже II уровня по данному методу для данного вида объектов. Лаборатории, выполняющие диагностирование, должны быть аттестованы в соответствии с требованиями «Правил аттестации лабораторий неразрушающего контроля» ПБ 03-372-00 [3] и аккредитованы согласно требованиям СДА-01 [4] и СДА-15 [5].

1. ПОНЯТИЯ О ДЕФЕКТАХ И ДЕФЕКТНОЙ ПРОДУКЦИИ

Основным способом получения сплавов является смешивание различных металлов в определенных пропорциях, расплавление и отливка их в специальные формы.

Применение литья в металлические формы, по выплавляемым моделям, центробежным методом, в оболочковые формы позволяет получать отливки различной конфигурации, требующие незначительной механической и термической обработки для превращения их в готовые изделия.

Для изготовления деталей в большинстве случаев используют различные методы обработки металлов давлением: прокатку, ковку, штамповку, прессование, волочение. В дальнейшем полученные полуфабрикаты подвергают механической, термической, химико-термической, электрохимической и другим видам обработки.

В результате фазовых превращений при нагреве и охлаждении металла, а также вследствие пластической деформации происходит формирование микро- и макроструктуры металла.

Структура любого металла не является идеально сплошной. По современной теории пластичности, металлы и сплавы представляют собой физико-химическую систему, состоящую из кристаллов основного металла, внутри и по границам которых распределены примеси и легирующие элементы, а также различные пороки, различающиеся размерами, формой и расположением в металле. Например, в тонкой структуре можно наблюдать дислокации и вакансии (искажения и несовершенства кристаллической решетки металла); в микроструктуре – микротрещины и микропоры; в макроструктуре – трещины, раковины, расслоения, рыхлости и т.д.

Наиболее опасными являются микротрещины и макроскопические нарушения сплошности или однородности металла.

Чтобы правильно оценить степень влияния несплошности на работоспособность изделия, необходимо учесть характер нагружения детали (статическое, динамическое, знакопеременное), характер перегрузок, уровень действующих напряжений, рабочую среду и температуру, чувствительность материала к концентрациям напряжений, размер и местоположение несплошностей и др. Полученные данные используют при разработке нормативной документации на изготовление изделия, обеспечивающей определенные его параметры и показатели качества.

В нормативной документации должны быть четко указаны предельные отклонения параметров детали от номинальных значений, при которых изделие будет выполнять свои функции без снижения надежности.

Отклонение считается допустимым, если действительное численное значение параметра изделия не выходит за пределы, установленные нормативной документацией. Выход действительного значения параметра за установленные пределы означает, что рассматриваемая продукция имеет дефект.

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. Дефектами могут быть не только недопустимые нарушения сплошности металла, но и выход размера детали за пределы допуска, несоответствие степени шероховатости поверхности изделия техническим условиям, наличие царапин и сколов на защитном покрытии, высокое содержание вредных примесей в металле и т.д.

Дефекты, обнаруживаемые при контроле изделий, подразделяют на явные и скрытые, а также на исправимые и неисправимые. Дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно, называют *исправимым*. Дефект, устранение которого связано с большими трудовыми и материальными затратами, называют *неисправимым*. Исправимость и неисправимость дефекта определяют применительно к рассматриваемым конкретным условиям производства и ремонта с учетом затрат и технических факторов.

Примеры исправимых дефектов: выход действительного размера диаметра вала за наибольший предельный размер; повреждение защитного покрытия; шероховатость поверхности ниже класса, предусмотренного техническими условиями; локальные непровары др.

Примеры неисправимых дефектов: выход действительного размера диаметра вала за наименьший предельный размер; несоответствие химического состава металла заданному; горячие и холодные трещины, пережог, расслоения, рванины и др.

Изделие, имеющее хоть один дефект, относится к некондиционной продукции и не может быть использовано по назначению.

Все встречающиеся отклонения параметров изделия от установленных нормативной документацией в зависимости от их влияния на эффективность и безопасность использования продукции делят на критические, значительные и малозначительные.

Критическими называют отклонения, при наличии которых нельзя использовать продукцию по назначению, так как она не отвечает требованиям безопасности.

Значительными считают отклонения, которые влияют на использование продукции по назначению и на ее долговечность, но не являются критическими.

Малозначительные – отклонения, которые существенно не влияют на использование продукции.

Критические и значительные отклонения считаются дефектами, поэтому для их выявления контроль должен быть сплошным и в отдельных случаях – неоднократным. Малозначительные отклонения не считаются дефектами, но для некоторых видов продукции совокупности отклонений, каждое из которых является малозначительным, могут быть эквивалентны значительному или критическому отклонению и должны быть отнесены к соответствующей категории.

По происхождению дефекты изделий подразделяют на конструктивные, производственно-технологические и эксплуатационные. *Конструктивные* возникают из-за ошибок конструктора; *производственно-технологические* – при получении чугуна и стали, при литье, прокатке, пайке, сварке, клепке, механической и термической обработке и т.д.; *эксплуатационные* – в результате работы (усталость металла, коррозия, износ, неправильное техническое обслуживание и эксплуатация).

Виды наиболее характерных дефектов твердых материалов показаны в [табл. 2](#).

Таблица 2

Виды дефектов в материалах и сварных швах

Вид дефекта	Эскиз сечения материала	Причина возникновения
Трещина		Превышение допустимых механических или термических напряжений
Усадочная раковина в отливке		Нарушение термических режимов литья
Шлаковые включения в сварных швах		Неверный выбор марки электрода
Непровар сварного шва		Превышение скорости сварки, слабый сварочный ток или неверная разделка кромок под сварку
Дефекты формы сварных швов		Нарушение технологии сварки
Газовые поры в сварных швах		Сварка непрокаленными электродами
Подрез сварного шва		Смещение или наклон электрода при сварке
Расслоение в прокате		Раскатка усадочной раковины в заготовке-отливке
Закат в прокате («ласточкин хвост» [*])		Раскатка грубой наружной неровности в заготовке-отливке
Заков в поковке («ковочный крест»)		Смятие усадочной раковины в заготовке-отливке при ее проковке

^{*} Такое название в обиходе дефект получил из-за трехмерной формы, похожей на раздвоенный хвост ласточки в полете.

Более полный перечень дефектов в материалах и сварных швах представляется в соответствующей нормативной документации.

2. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

На опасных производственных объектах визуальный и измерительный контроль регламентируется руководящим документом РД 03-606-03 [6]. Этот вид контроля отличается от других видов неразрушающего контроля границами спектральной области электромагнитного излучения, используемого для получения информации об объекте контроля. Видимое излучение, т.е. свет, – это излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение. **Визуальный контроль** – это единственный вид неразрушающего контроля, который может быть выполнен без какого-либо оборудования с использованием простейших измерительных средств.

В то же время визуальный контроль является таким же современным видом контроля, как радиационный и ультразвуковой.

2.1. Законы и элементы оптики

Основой визуального контроля являются законы оптики.

1. Закон прямолинейного распространения света. В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Это вытекает из того, что непрозрачные предметы при освещении их источниками света дают тени с резко очерченными границами. Закон прямолинейного распространения света является приближенным, так как при прохождении света через очень малые отверстия наблюдаются отклонения от прямолинейности. Чем меньше отверстие, тем больше отклонение.

2. Закон независимости световых лучей. Независимость световых лучей заключается в том, что они при пересечении не возмущают друг друга, так как пересечение лучей не мешает каждому из них распространяться независимо друг от друга. Следует заметить, что независимость сохраняется в том случае, когда интенсивность света сравнительно невелика. При интенсивностях света, полученных лазером, независимость не наблюдается.

3. Закон отражения. При прохождении света через границу двух прозрачных веществ падающий луч разделяется на два: отраженный и преломленный. Направления этих лучей определяются законами отражения и преломления ([рис. 2](#)).

Закон отражения гласит, что отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения. Угол падения равен углу отражения.

4. Закон преломления. Согласно данному закону, преломленный луч лежит в одной плоскости с нормалью, восстановленной в точке падения. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных веществ.

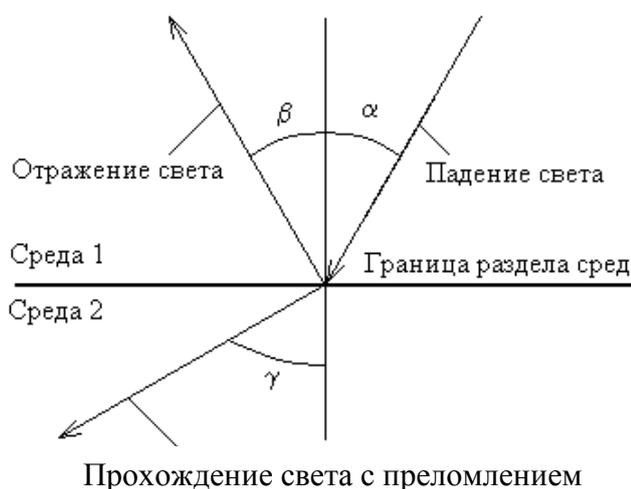


Рис. 2. Законы отражения и преломления света

Оба эти закона выражаются формулой

$$\frac{\sin \alpha}{C_1} = \frac{\sin \beta}{C_1} = \frac{\sin \gamma}{C_2}, \quad (1)$$

где C_1, C_2 – скорости света, соответственно, в первой и второй средах.

Поскольку у первых двух частей равенства (1) знаменатели одинаковы (падающий и отраженный свет распространяется в одной и той же среде), то одинаковы и числители, значит, углы падения α и отражения β равны.

Из равенства первой и третьей частей следует

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{C_1 (\text{const})}{C_2 (\text{const})} = \text{const}. \quad (2)$$

Законы отражения и преломления света были выведены в XVII в. голландским физиком Виллебрордом Снеллем.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно, а в неоднородной среде световые лучи искривляются и тогда свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время, т.е. оптическая длина которого минимальна, – это принцип Ферма, лежащий в основе законов отражения и преломления.

Какова же природа света?

В конце XVII в. почти одновременно возникло несколько теорий.

Ньютон предложил теорию истечения, согласно которой свет представляет собой поток световых частиц (корпускул), летящих от светящегося тела по прямолинейным траекториям. Теория получила название **корпускулярной**.

Гюйгенс выдвинул **волновую теорию**, в которой свет рассматривался как упругая волна, распространяющаяся в мировом эфире.

Обе теории по-разному объясняют зависимость между абсолютным показателем преломления и скоростью света в веществе. Ньютон считал, что преломление света вызвано действием на световые корпускулы на границе

двух сред сил, изменяющих нормальную составляющую скорости корпускул. Волновая же теория приводит к обратному соотношению.

Около 100 лет главенствовала корпускулярная теория. Но в начале XIX в. Френель на основе волновой теории объяснил многие оптические явления. В результате волновая теория получила всеобщее признание, а корпускулярная была забыта.

В 1851 г. Фуко измерил скорость света в воде и еще раз доказал экспериментально справедливость волновой теории. Первоначально считалось, что свет представляет собой поперечную волну, распространяющуюся в упругой среде, называемой мировым эфиром.

В 1864 г. Максвелл создал **электромагнитную теорию света**, согласно которой свет – это электромагнитная волна с длиной от 0,4 до 0,75 мкм.

В конце XIX в. и в начале XX в. ряд новых опытных фактов заставил вернуться к представлению об особых световых частицах – фотонах. Было установлено, что свет имеет двойственную природу, сочетая в себе как волновые свойства, так и свойства, присущие световым частицам.

В одних явлениях, таких как интерференция, дифракция, поляризация, свет ведет себя как волна, а в других, например, как фотоэффект, – как поток световых частиц – фотонов (корпускул).

Двойственная корпускулярно-волновая природа присуща не только свету, но и электромагнитным волнам, и мельчайшим частицам – электронам, протонам, нейтронам и т.д.

Электромагнитная волна несет с собой энергию. В белом свете глазом воспринимается весь интервал электромагнитных волн. Действие света на глаз (т.е. световые ощущения) в сильной степени зависит от длины волны. Чувствительность среднего нормального глаза к излучению разной длины волны дается так называемой кривой видности. Человеческий глаз наиболее чувствителен к излучению с длиной волны 0,555 мкм. Функция видности для этой длины волны принята равной 1. При том же потоке энергии оцениваемая зрительно интенсивность света для других длин волн оказывается меньше.

Для характеристики интенсивности света с учетом его способности вызывать зрительное ощущение введена величина, называемая световым потоком. Световой поток – это поток лучистой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению. Единица измерения – *люмен* (лм):

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot \text{рад},$$

где «кд» – кандела (единица силы излучения света, от англ. candle – свеча); «рад» – радианы (единица измерения угла расхождения светового потока).

Опытным путем установлено, что 1 лм, образованному излучением с длиной волны 0,555 мкм, соответствует поток энергии в 0,0016 Вт:

$$A = 0,0016 \text{ Вт/лм},$$

где A – механический эквивалент света.

Степень освещенности некоторой поверхности падающим на нее световым потоком характеризуется величиной, называемой освещенностью. Единица освещенности – люкс (лк):

$$1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}.$$

То есть 1 лк – это световой поток в 1 лм, равномерно распределенный по поверхности в 1 м. Освещенность рабочего места при визуальном контроле – важная величина, она должна быть не менее 500 лк. Рабочую поверхность на стационарном рабочем месте целесообразно покрывать светлым пластиком, при этом наиболее благоприятным является полуотраженное освещение. При выборе освещенности на рабочем месте учитывают: наименьший размер дефекта, который требуется обнаружить, и контраст дефекта на поверхности объекта контроля. Расстояние наилучшего зрения от нормального невооруженного глаза до объекта контроля считается 250 мм.

Основными элементами физической оптики являются поляризация света, интерференция, дифракция и яркость.

Поляризация света – упорядочение и ориентация векторов напряженности электрического и магнитного полей световой волны в плоскости, перпендикулярной световому пучку.

Интерференция – сложение в пространстве двух или нескольких волн с одинаковыми периодами. Интерференция объясняется волновой природой света и используется для точного измерения длин и углов, для контроля качества обработанных поверхностей.

Дифракция – совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция света объясняется волновой природой света и приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

Яркость – это отношение силы света к площади элемента. Размерность и единица яркости – кандела на квадратный метр (кд/м^2), которая равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м при силе света 1 кд.

Приборы, применяемые для сравнения источников света или световых потоков, называют фотометрами. Фотометры делят на визуальные и объективные.

Визуальные фотометры основаны на способности глаза хорошо устанавливать равенство яркостей двух соприкасающихся поверхностей. Объективные методы фотометрии делятся на фотографические и электрические.

Объективные фотометры позволяют измерять интенсивность излучения за пределами видимой части спектра.

Для определения интенсивности ультрафиолетового излучения применяются фотопластинки и фотоэлементы, а для определения интенсивности инфракрасного излучения – болометры и термостолбики.

Основным оптическим инструментом является глаз. Оптическая система глаза состоит из роговицы, жидкости передней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Сила, или рефракция, глаза зависит от величины ра-

диусов кривизны преломляющих поверхностей, расстояний между ними, показателя преломления роговицы, хрусталика, водянистой влаги и стекловидного тела. Все эти величины для разных глаз имеют разные значения. Нормальная зрительная работоспособность глаза зависит от состояния светочувствительного и двигательного аппарата.

Зрительное утомление может наступить при расстройстве функций одного или обоих аппаратов. Утомление двигательного аппарата глаза может быть следствием необходимости часто переводить взгляд с одного предмета на другие, неодинаково удаленные, а также следить за движущимися объектами. При неудовлетворительном распределении яркости в освещенном пространстве и шуме в помещении возникает явление дискомфорта – ощущение неудобства или напряженности. Так, при яркости больше $1\ 500\ \text{кд/м}^2$ зрачок глаза максимально сужен и глаз быстро утомляется. При пониженном освещении зрачок расширяется и наступает быстрое утомление за счет изменения световой чувствительности зрительного анализатора. Эта способность называется адаптацией.

Адаптация бывает световая и темновая. Способность глаза отдельно воспринимать близко расположенные друг к другу точки, линии или другие фигуры называется разрешающей. Способность глаза замечать мелкие предметы и различать их форму называется остротой зрения. Способность глаза приспособляться к четкому видению различно удаленных объектов называется аккомодацией.

2.2. Источники оптического излучения. Световые приборы

Источником оптического излучения называют устройство, предназначенное для превращения какого-либо вида энергии в оптическое излучение.

По физической природе различают два вида оптических излучений: тепловое и люминесценцию.

Тепловым называют оптическое излучение, возникающее при нагревании тел. Тепловыми излучателями являются все источники, свечение которых обусловлено нагреванием, например электрические лампы накаливания.

Люминесценцией называют спонтанное излучение, избыточное над тепловым излучением, если его длительность значительно превышает период колебаний электромагнитной волны соответствующего излучения. При люминесценции возможно более эффективное преобразование подводимой энергии в оптическое излучение, чем при тепловом возбуждении, так как люминесценция в принципе не требует нагрева тел.

В источниках света используются следующие виды люминесценции: *электролюминесценция* (оптическое излучение атомов, ионов, молекул, жидких и твердых тел под действием ударов электронов (ионов), движущихся со скоростями, достаточными для возбуждения); *фотолюминесценция* (оптиче-

ское излучение, возникающее в результате поглощения телами оптического излучения).

Электрический режим характеризуется мощностью лампы, рабочим напряжением на лампе, напряжением питания, током и родом тока.

К основным геометрическим параметрам ламп относятся: габаритные и присоединительные размеры, высота светового центра, размеры излучающего тела.

Конструктивными параметрами являются: форма колбы, ее оптические свойства (прозрачность, матовость, зеркализированность и т.д.); расположение тела накала, конструкция ножки или ввода, тип цоколя, формы и размеры разрядной колбы и др.

При оценке эффективности лампы наиболее важны: энергетический коэффициент полезного действия (КПД) в заданной области спектра; эффективный КПД лампы для соответствующего приемника излучения, эффективная отдача лампы.

Основными показателями долговечности являются полный и полезный срок службы.

Под полным сроком службы понимают продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента полной утраты или работоспособности. Например, в лампах накаливания – из-за перегорания нити, в газоразрядных лампах – из-за потери способности зажигаться и т.д.

Полезным сроком службы называют продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента ухода за установленные пределы одного из параметров, определяющих целесообразность использования ламп одного типа, например, из-за снижения потока или яркости для облучательных и осветительных ламп либо невозможности эксплуатации специальных газоразрядных ламп высокой яркости в светооптических приборах из-за нестабильности положения дуги и т.п.

Важным показателем надежности является также вероятность безотказной работы ламп в течение заданного времени, которая часто регламентируется минимальной продолжительностью горения.

Большинство современных источников света относятся к категории электрических. По принципу действия их можно разделить на две большие группы, которые вместе вырабатывают 98-99 % всего светового потока. Это лампы накаливания и газоразрядные лампы.

Главным недостатком осветительных **ламп накаливания** являются низкая световая отдача, составляющая 10–20 лм/Вт при сроке службы 1 000 ч.

Газоразрядной называют лампу, в которой оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в газах, парах или их смесях. У современных осветителей газоразрядных ламп световая отдача в 5–20 раз превышает световую отдачу ламп накаливания, а срок службы составляет 10 000–20 000 ч.

Наиболее массовыми из газоразрядных ламп являются люминесцентные, представляющие собой разрядные источники света низкого давления, в

которых ультрафиолетовое излучение ртутного разряда преобразуется люминофором в более длинноволновое излучение.

Светоизлучающие диоды – микроминиатюрные полупроводниковые источники света, в которых излучение возникает на полупроводниковом переходе в результате рекомбинации электронов и «дырок». Используются полупроводниковые материалы высокой чистоты.

Светоизлучающие диоды работают от источника постоянного напряжения 1–3 В при токах от 10 до 100 мА. Сила света порядка 0,01–0,02 кд.

Мощность инфракрасного излучения составляет 5–7 мВт по 100 мА.

Лазеры представляют собой генераторы оптического излучения, обладающие совершенно уникальными свойствами: высокой когерентностью в пространстве и времени (когерентные волны – это волны одной частоты, колебания в которых отличаются постоянной разностью фаз); исключительно узкой направленностью (расходимости до 0,04); огромной концентрацией мощности (до 10 Вт/см в непрерывном режиме и до 10 Вт/см в импульсе); способностью фокусироваться в исключительно малые порядки.

Принцип действия лазеров основан на использовании процесса вынужденного испускания фотона возбужденным атомом или молекулой под воздействием излучения, имеющего ту же частоту.

Лазерное вещество может быть газообразным, жидким и твердым. Соответственно, различают газовые, жидкостные, твердотельные и полупроводниковые лазеры.

Световые приборы – это устройства, содержащие источник света и светотехническую аппаратуру. Световые приборы предназначены для освещения или световой сигнализации.

Светотехническая аппаратура осветительных приборов (осветительная арматура) перераспределяет свет источника света в пространстве или преобразует его свойства (изменяет спектральный состав излучения или поляризует его). Световые приборы по основной светотехнической функции разделены на приборы для освещения (это осветительные приборы) и приборы для световой сигнализации (это светосигнальные приборы).

Световые приборы могут совмещать эти функции. По характеру светораспределения все световые приборы подразделяются на светильники, проекторы и прожекторы. По условиям эксплуатации делятся на световые приборы для помещения, открытых пространств и экстремальных сред.

Светильник – это световой прибор, перераспределяющий свет лампы или ламп; предназначен для освещения относительно близко расположенных объектов или для сигнализации на небольших расстояниях.

Светильники общего назначения предназначены для общего освещения помещения и открытого пространства, светильники местного освещения – для освещения рабочих поверхностей.

Светильники комбинированного освещения создают поочередно или одновременно как общее, так и местное освещение.

Световые приборы могут быть стационарными, т.е. закрепленными на месте установки, и нестационарными, т.е. могут быть перемещены в другое

место. Переносный световой прибор имеет индивидуальный источник питания или отключается при перемещении.

Прожектор – световой прибор, перераспределяющий свет лампы внутри малых телесных углов и обеспечивающий концентрацию светового потока.

Проектор – световой прибор, перераспределяющий свет лампы с концентрацией светового потока на поверхности малого размера или в малом объеме.

Электрическая безопасность световых приборов определяется классом защиты от поражения электрическим током, степенью защиты от соприкосновения с токоведущими частями, напряжением, сопротивлением, электрической прочностью изоляции.

Существует пять классов защиты световых приборов от поражения электрическим током.

Безопасным считается напряжение до 110 В постоянного тока. Под малым напряжением понимают номинальное напряжение светового прибора, не превышающее 42 В между проводниками и землей при напряжении холостого хода до 50 В.

Электрическая прочность изоляции определяется значениями испытательного напряжения частотой 50 Гц, которое должно выдерживаться без пробоя токоведущих частей.

В зависимости от области применения взрывозащищенные световые приборы условно делят на две группы:

I группа – рудничные взрывозащищенные световые приборы для подземных выработок шахт и рудников, опасных по газу и пыли;

II группа – взрывозащищенные световые приборы для внутренней и наружной установки на предприятиях химической, нефтяной, газовой и других отраслей промышленности, где возможно образование взрывоопасных смесей.

Пожарная безопасность светового прибора означает практическую невозможность загорания как самого прибора, так и окружающей его среды. Это обеспечивается конструкцией светового прибора, выбором комплектующих элементов и материалов с температурными характеристиками, соответствующими тепловому режиму работы светового прибора. При этом характеристикой пожаробезопасности является соответствие температуры на основных элементах светового прибора допустимым значениям как в рабочем, так и в аварийном режиме работы.

Защита от пыли, воды и агрессивных сред обеспечивается выбором соответствующих конструкционных и светотехнических материалов, а также степенью герметизации внутреннего объема прибора или его отдельных полостей.

Оптические системы, применяемые при ВИК, будут описаны далее в разделе «Оптический контроль». Здесь же рассмотрим вопросы измерительного контроля.

2.3. Характеристика размеров изделий и средств их контроля

При изготовлении любого изделия пользуются чертежом, на котором обозначены все линейные и угловые размеры этого изделия.

Линейный размер – это числовое значение линейной величины (диаметра, длины) в выбранных единицах измерения. Линейные размеры делятся на номинальные, действительные и предельные.

Номинальный размер – это размер, полученный конструктором при проектировании в результате расчетов (на прочность, жесткость, износостойкость) или с учетом различных конструктивных, технологических и эксплуатационных соображений. Номинальные размеры могут быть как целыми, так и дробными числами. Но на чертеже в качестве номинального линейного размера указывается расчетный размер, округленный до ближайшего значения из установленного ряда нормальных линейных размеров.

Изготовить деталь с абсолютно точным размером нельзя, так как неизбежны погрешности. Причин возникновения погрешностей много: неточность оборудования, приспособлений и режущих инструментов, степень их изношенности; неоднородность заготовок для деталей по размерам, формам, механическим свойствам; неточность установки и закрепления заготовок в приспособлениях; влияние температуры на обрабатываемые детали и отдельные части оборудования; упругие деформации обрабатываемых деталей, инструментов, отдельных частей оборудования, приспособлений; вибрации фундамента, на котором установлено оборудование, и т.д.

Все возникающие погрешности при изготовлении деталей можно разделить на 4 вида: погрешности размеров, формы поверхности, расположение поверхностей и погрешности качества поверхности. Рассмотрим вопросы, связанные с погрешностями размеров.

Размер, полученный в результате обработки детали, будет отличаться от номинального; это будет *действительный размер*, т.е. размер, установленный измерением с допустимой погрешностью.

Чтобы действительный размер обеспечивал функциональную готовность детали, устанавливаются два *предельных размера* – наибольший и наименьший. Это предельно допустимые размеры, между которыми должны находиться или которым может быть равен действительный размер годной детали. На чертеже в дополнение к номинальному размеру проставляют его *предельные отклонения*: верхнее и нижнее.

Верхнее отклонение – это алгебраическая разность между наибольшим предельным размером и номинальным.

Нижнее отклонение – это алгебраическая разность между наименьшим предельным размером и номинальным.

Разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами или алгебраическая разность между верхним и нижним отклонениями харак-

теризует точность, с которой должен быть выполнен размер при изготовлении детали, и называется *допуском*.

Допуск в отличие от отклонений знака не имеет. Чем больше допуск, тем ниже требования к точности обработки детали. И наоборот, уменьшение допуска означает большую точность, требуемую при изготовлении детали, а следовательно, ее удорожание.

Поле допуска отличается от допуска тем, что оно определяет не только величину, но и его положение относительно номинального размера.

Действительный размер, т.е. размер, установленный измерением, будет годным, если он окажется не больше наибольшего предельного размера и не меньше наименьшего предельного размера.

Чтобы определить, какой размер получился после обработки детали и соответствует ли он требованиям чертежа, необходимо измерить эту деталь.

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Средство измерений – это техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимается неизменным в пределах установленной погрешности в течение известного интервала времени.

По метрологическому назначению средства измерений подразделяются:

- на рабочие средства измерений физических величин (они являются самыми многочисленными);
- метрологические средства измерений, предназначенные для обеспечения единства измерений в стране.

Единство измерений – это состояние измерений, при котором результаты измерений выражены в узаконенных единицах и погрешности известны с заданной вероятностью.

Средства измерений классифицируют:

- 1) по конструктивному исполнению – на меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, измерительные комплексы;
- 2) по уровню автоматизации – на неавтоматические, автоматизированные и автоматические;
- 3) по уровню стандартизации – на стандартизованные и нестандартизуемые;
- 4) по отношению к измеряемой физической величине – на основные и вспомогательные.

Рассмотрим подробно первую из этих классификаций.

Меры – это средства измерения, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах измерения и известны с необходимой точностью.

Единицами измерения являются: для измерения линейных размеров – метр (м), миллиметр (мм), микрометр (мкм); для измерения угловых размеров – градус (°), угловая минута (′), угловая секунда (″).

Мера может быть однозначной, т.е. воспроизводящей физическую величину одного размера (например, плоскопараллельная мера длина – 10 мм) и многозначной, т.е. воспроизводящей физическую величину разных размеров (например, образцовая линейка, угловой лимб).

Измерительные приборы – средства измерения, предназначенные для получения значений измеряемой величины в установленном диапазоне.

Измерительные приборы, как правило, содержат устройство для преобразования измеряемой величины в сигнал измерительной информации и его индикации в форме, доступной для восприятия. Устройство для индикации имеет шкалу со стрелкой, диаграмму с пером или цифроуказатель, с помощью которого можно отсчитывать или регистрировать значения физической величины. При сопряжении прибора с мини-ЭВМ отсчет можно производить с дисплея. По степени индикации измеряемой величины измерительные приборы делят на показывающие и регистрирующие; по действию – на интегрирующие, суммирующие, приборы прямого действия и приборы сравнения.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, преобразователей и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин, расположенных в одном месте.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерения одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту.

Измерительный комплекс – совокупность функционально объединенных средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения конкретной измерительной задачи.

Конструкция большинства средств измерений состоит из последовательно расположенных деталей и устройств, каждое из которых при измерении выполняет определенную задачу.

Рассмотрим кратко эти детали и устройства.

Основание измерительного средства – это конструктивный элемент, на котором смонтированы все остальные элементы данного средства измерений, например: штанга штангенциркуля, скоба микрометра, корпус индикатора часового типа.

Чувствительный элемент – это часть средства измерений, которая осуществляет его соприкосновение с объектом измерения и воспринимает величину этого объекта, например: измерительные губки штангенциркуля, измерительный наконечник индикатора.

Размерный элемент – это одна из деталей средства измерений, обладающая собственным точным, обычно многозначным размером, с величиной которого в процессе измерения непосредственно сопоставляется воспринятая

средством измерений величина объекта измерения. Например, штанга со шкалой штангенциркуля, с ней сравнивают размер детали, воспринятый губками.

Преобразовательный элемент – это внутренний механизм или элемент средства измерений, который преобразует (видоизменяет) малые перемещения, воспринятые от объекта измерения воспринимающим элементом, в большие перемещения на отсчетном устройстве так, что исполнитель может непосредственно наблюдать их и производить отсчет. Например, зубчатая передача в индикаторе часового типа преобразует малые перемещения измерительного наконечника в большие перемещения стрелки, легко наблюдаемые по шкале.

Отсчетное устройство создает возможность отсчитывать показания средства измерений; в большинстве случаев это шкала и указатель, которым служит отдельный штрих или группа штрихов, или стрелка. В последнее время получили распространения средства измерений с цифровыми отсчетными устройствами. Например, нониус штангенциркуля, круговая шкала индикатора и стрелка индикатора часового типа, табло микрометра с цифровой индикацией.

В зависимости от назначения и принципа действия конкретного средства измерений в его конструкции используются те или иные комплексы этих устройств и элементов, составляющих структуру данного средства измерений.

Шкала средства измерений – это ряд отметок (штрихов или точек) и проставленных около них чисел, положение и значение которых соответствуют ряду последовательных размеров.

Цена деления шкалы – это разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Иначе говоря, величина перемещения чувствительного элемента средства измерений, вызывающая перемещение указателя отсчетного устройства на одно деление шкалы.

Отсчет – это число, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерений.

Показание средства измерений – это значение измеряемой величины, определенное по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. Показание всегда равно произведению числа отсчитанных делений шкалы на цену деления данной шкалы.

Дискретность отсчета при цифровой индикации – это наименьшая разность показаний младшего разряда цифровой индикации данного средства измерений.

Диапазон показаний – это область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Диапазон измерений – это область значений измеряемой величины, для которой нормированы погрешности данного средства измерений.

Пределы измерений – это наибольшее и наименьшее значение диапазона измерений.

Измерительные усилия – это сила, с которой чувствительный элемент воздействует на поверхность объекта измерения.

Длина (интервал) деления шкалы – это расстояние между серединами двух соседних отметок шкалы.

Различают несколько **видов измерений**.

Прямое измерение – это измерение, при котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по результату измерения, например, измерение глубины линейкой глубиномера штангенциркуля ШЦ-1.

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины определяют пересчетом результатов прямых измерений величин, связанных с искомой величиной известной зависимостью.

Например, требуется измерить расстояние L между центрами двух отверстий с помощью штангенциркуля (рис. 3).

Прямым измерением с помощью циркуля это сделать практически невозможно, следовательно, воспользуемся косвенным измерением. Сначала выполним прямые измерения величин d_1 , d_2 , L_{\max} губками для внутренних измерений, а затем рассчитаем искомую величину по формуле

$$L = L_{\max} - 0,5(d_1 + d_2) . \quad (3)$$

Контактное измерение – это измерение, при котором воспринимающее устройство средства измерений имеет механический контакт с поверхностью объекта, например, измерение с помощью штангенциркуля, микрометра, индикатора и т.д.

Бесконтактное измерение – это измерение, при котором воспринимающее устройство средства измерений не имеет механического контакта с поверхностью измеряемого объекта, например, измерение элементов резьбы с помощью микрометрического микроскопа.

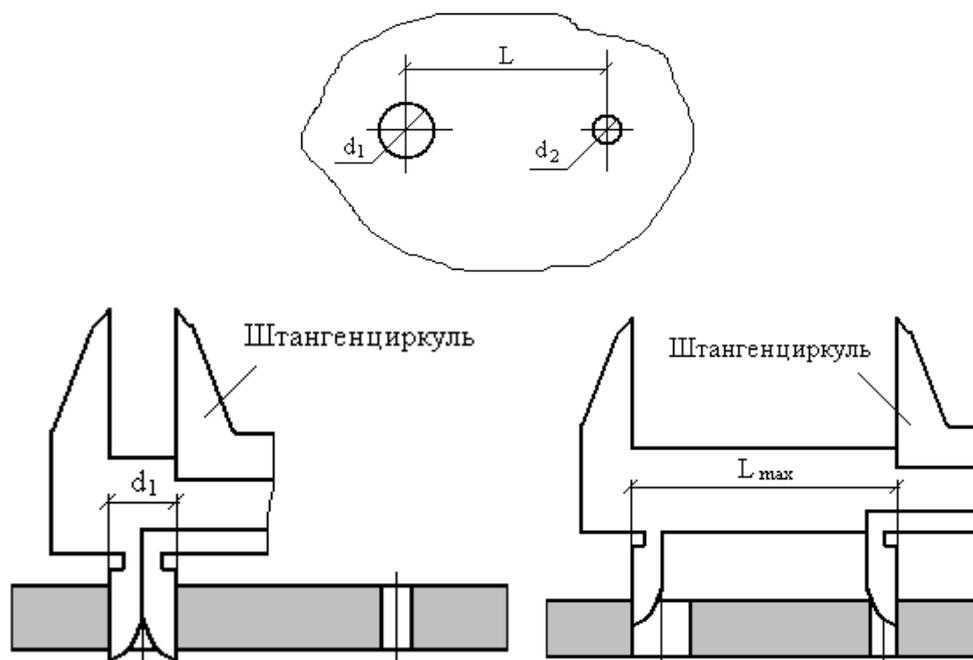


Рис. 3. Косвенное измерение штангенциркулем дистанции между центрами отверстий

Методами измерений принято называть совокупность приемов и принципов использования средств измерений. Наиболее распространены следующие методы:

1. *Метод непосредственной оценки.* При этом методе величину измеряемого объекта определяют непосредственно по размерному устройству, имеющемуся в конструкции применяемого средства измерений. Например, при измерении диаметра вала с помощью штангенциркуля величина диаметра, воспринятая губками, непосредственно сопоставляется со шкалой штанги, обладающей точным размером и включенной в конструкцию штангенциркуля.

2. *Метод сравнения с мерой.* Это метод, при котором величина измеряемого объекта сопоставляется с величиной, воспроизводимой мерой или величиной образцовой детали, которые не входят в конструкцию применяемого средства измерений. Например, измерение диаметра вала (30 мм) с помощью индикатора цифрового типа методом сравнения с концевой мерой длиной 30 мм на стойке со столиком. В этом случае величина диаметра вала сопоставляется с помощью индикатора с величиной концевой меры длины, которая не входит в конструкцию индикатора.

При выполнении измерения неизбежно возникают **погрешности** различной величины.

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения L_u от действительного значения измеряемой величины L_g , определяемое по формуле

$$\Delta = L_u - L_g . \quad (4)$$

Погрешности делят на группы:

– систематические (постоянно или закономерно изменяющиеся при повторных измерениях одной и той же величины);

– случайные (изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины).

На суммарную погрешность измерения наиболее существенно влияют следующие составляющие:

1) инструментальная погрешность;

2) погрешность, вносимая в процесс мерами или образцами;

3) погрешность, возникающая от измерительного усилия при контактном измерении;

4) погрешности, возникающие из-за термического расширения или сжатия объекта контроля или средства измерений при отклонениях температуры в процессе измерения;

5) субъективные погрешности, связанные с человеком, выполняющим процесс измерения.

От правильности выполнения измерения значительно зависит качество продукции, поэтому рассмотрим подробнее составляющие погрешности измерения.

Инструментальная погрешность – это разность между показанием средства измерений и действительным размером измеряемого объекта. Так

как эта погрешность вносит самый большой вклад в погрешность измерения, за всеми средствами измерений проводится контроль как после их изготовления или ремонта, так и во время их эксплуатации. Такой контроль принято называть поверкой средств измерений. При проведении поверки определяют работоспособность поверяемого средства и его инструментальную погрешность, выясняя, находится ли она в пределах нормы, установленной для данного средства измерений.

Выполняют поверку специальные органы метрологической службы – измерительные лаборатории и их поверочные пункты.

Если в результате поверки данное средство измерений годное, то составляется официальный документ о положительных результатах поверки (аттестат) и (или) проводится его клеймение; если же средство измерений не годное, то оно изымается из применения. Свидетельство годного средства измерений хранится до даты следующей поверки. Если срок прошел и очередную поверку не произвели, то при контроле метрологическим органом данное средство измерений объявляется незаконным, а его аттестат недействительным.

Погрешности мер или образцов, используемых при установке средства измерений на размер со своими знаками, входят в погрешность каждого измерения. Чем выше точность изготовления объекта измерения, т.е. чем меньше допуск, тем опаснее отклонение меры, используемой при установке средств измерения.

Погрешность, появляющаяся от измерительного усилия при контактом измерении, зависит от деформаций, возникающих на поверхности объекта измерения. Чем больше деформации, тем больше погрешности измерения.

Погрешность, возникающая из-за термического расширения (сжатия) объекта измерения и средства измерений зависит от температуры помещения, где производятся измерения. Нормальной считается температура +20 °С. Отклонения от нормальной температуры приводят к тепловому расширению или сжатию измеряемой детали и средства измерений, а следовательно, к увеличению погрешности измерения.

Субъективные погрешности, связанные с человеком, выполняющим измерения, можно разделить на 3 группы:

– ошибки при действиях: неточное совмещение шкалы с измеряемым размером; ошибки подбора концевых мер длины (КМД) в блок, ошибки установки на нуль, ошибки при закреплении средства измерений в установленном положении; при контакте чувствительного элемента средства измерений с поверхностью объекта (возможно завышение или занижение измерительного усилия);

– ошибки при наблюдении: ошибки отсчета при оценке точности совпадения стрелки или штриха нониуса с делением шкалы и его знаком;

– профессиональные субъективные погрешности – это ошибки исполнителя, вызванные его недостаточной квалификацией.

Меры длины – это средства измерений, имеющие постоянную длину, выполненную с высокой точностью. Меры длины являются исходными раз-

мерами для сравнения с ними размеров деталей машины. Благодаря высокой точности всех мер, они обеспечивают единство всех измерений линейных размеров. По конструкции меры длины делят на штриховые и концевые.

Штриховые меры длины – это многозначные меры, на которые нанесены шкалы с высокой точностью интервалов.

Концевые меры длины – это однозначные меры, размер которых образован противоположными измерительными поверхностями. Наиболее распространенные – это плоскопараллельные концевые меры длины.

Особенность КМД заключается в том, что их измерительные поверхности имеют высокую плоскостность, параллельны между собой и обладают малой шероховатостью. Эти свойства обеспечивают одинаковое для данной меры расстояние между измерительными поверхностями в любом месте; КМД выпускаются размерами от 0,1 до 100 мм цельными, а свыше 100 мм – с двумя отверстиями для соединения стяжками.

Материалом для изготовления КМД служат хромистые закаленные стали и твердый сплав ВК6М. Основными параметрами КМД являются: длина концевой меры (номинальная и действительная); плоскопараллельность измерительных поверхностей; суммарная погрешность формы и расположения измерительных поверхностей; точность концевой меры (точность длины и отклонение от плоскопараллельности измерительных поверхностей, которая определяется разностью между наибольшим и наименьшим расстоянием между измерительными поверхностями).

Существуют два метода нормирования точности КМД: метод классов точности и метод разрядов.

Класс точности меры показывает, какое отклонение имеет действительный размер данной меры от ее номинального размера. Классы точности концевых мер – это ряды допусков на изготовление их действительных размеров в зависимости от величины их номинального размера. Кроме того, класс точности указывает на допускаемое отклонение от плоскопараллельности мер.

Таких классов пять: 00, 0, 1, 2, 3. Класс точности присваивается каждой мере при контроле годности ее изготовления на производстве и при проверке ее состояния в процессе эксплуатации. Кроме этих пяти классов применяют еще 4-й и 5-й, которые присваиваются значительно изношенным концевым мерам.

Разряд точности концевых мер длины показывает, с какой погрешностью измерения производится аттестация действительного размера длины концевой меры. Установлено пять разрядов точности: 1, 2, 3, 4, 5.

Притираемость измерительных поверхностей – это способность измерительных поверхностей сцепляться друг с другом при смещении в плотно прижатом состоянии, что позволяет собирать блоки КМД из отдельных мер; суммарный размер такого блока равен сумме размеров мер, вошедших в него.

Концевые меры длины изготавливают различных номинальных размеров со следующими градациями.

Градация – это разность двух последующих размеров в миллиметрах в группе из нескольких КМД, расположенных в порядке возрастания их номинального размера.

Штангенинструменты – это средства измерений линейных размеров, основными частями которых являются штанга со шкалой и нониус, т.е. вспомогательная шкала для уточнения отсчета показаний. К ним относятся штангенциркули, штангенглубиномеры, штангенрейсмасы. *Штангенциркули* предназначены для измерения наружных и внутренних размеров; *штангенглубиномеры* – для измерения выступов, глубин отверстий и пазов; *штангенрейсмасы* – для измерения высот и разметочных работ.

Микрометрические инструменты – средства измерений линейных размеров, основанные на использовании винтовой пары, называемой микропарой. Микропара служит размерным и преобразовательным устройством в микрометрических инструментах.

К инструментам данной группы относят: микрометры с ценой деления 0,01 мм, рычажные микрометры, настольные микрометры, глубиномеры микрометрические и нутромеры микрометрические.

Микрометрические глубиномеры применяются для измерения глубины выемок и высоты уступов в деталях машин.

Микрометрические нутромеры измеряют размеры отверстий, ширину пазов и другие внутренние линейные размеры и отклонения формы деталей машин.

К **рычажно-зубчатым инструментам** относят головки измерительные, скобы с отсчетным устройством, глубиномеры, нутромеры, толщиномеры, стенкомеры.

Индикаторные нутромеры с ценой деления 0,01 мм применяют для измерения внутренних размеров 6–100 мм.

Толщиномеры настольные (ТС) имеют цену деления 0,01 мм и пределы измерения 0–10 мм; *толщиномеры ручные* (ТР) имеют цену деления 0,1 мм и пределы измерения 0–50 мм.

Стенкомеры имеют цену деления 0,01 мм (модели С-2 и С-10А) и 0,1 мм (модели С-10Б, С-50, СМТ-90).

Бесшкальные измерительные инструменты предназначены для контроля размеров, формы и взаимного расположения частей изделия. К бесшкальным измерительным инструментам относятся калибры, шаблоны, щупы.

Калибр – это бесшкальный измерительный инструмент для определения годности размеров элементов деталей машин. В зависимости от формы контролируемой поверхности калибры делят: на гладкие – для контроля деталей гладких цилиндрических соединений; резьбовые – для контроля деталей резьбовых соединений; шлицевые – для контроля шлицевых соединений; конусные гладкие – для контроля конусных гладких соединений и специальные – для контроля деталей нестандартных соединений и отдельных деталей специальной формы.

Предельными гладкими калибрами контролируют годность наибольшего и наименьшего предельных размеров элемента детали. Такие калибры

делят на проходной (ПР) и непроходной (НЕ). Калибры для контроля отверстий называют пробками. Проходным калибром (пробкой ПР) контролируют в отверстии годность наименьшего предельного размера. Этот размер годен, если пробка ПР проходит сквозь отверстие.

Непроходным калибром (пробкой НЕ) контролируют в отверстии годность наибольшего предельного размера. Этот размер годен, если пробка НЕ не проходит в отверстие. Если пробка ПР прошла, а пробка НЕ не вошла в отверстие, то принято считать, что действительный размер отверстия находится в пределах поля допуска ТД и это отверстие годно.

Калибры для контроля валов называют *скобами*.

Проходным калибром-скобой ПР контролируют годность наибольшего предельного размера вала. Этот размер годен, если скоба прошла через него. Непроходным калибром-скобой НЕ контролируют годность наименьшего предельного размера вала. Этот размер годен, если скоба НЕ не прошла через него. Если скоба ПР прошла, а скоба НЕ не прошла через вал, то принято считать, что действительный размер вала находится в пределах поля допуска и этот вал годен.

При контроле калибрами не определяют числовые значения контролируемых размеров, а только устанавливают годность или негодность элемента детали. Когда требуется определить числовую величину действительного размера забракованной детали, то ее измеряют универсальными средствами измерения. Это необходимо, чтобы найти причину брака, а также решить, можно ли исправить забракованную деталь.

Калибры-пробки измеряют рычажными микрометрами, рычажными скобами, рычажно-зубчатыми головками ИГ, микрокаторами, а также с помощью оптиметров или длиномеров. Калибры-скобы измеряют на горизонтальных оптиметрах или горизонтальных длиномерах.

Радиусный шаблон – это инструмент для контроля профильных радиусов кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей изделий.

Резьбовой шаблон – инструмент для определения шага и угла профиля резьбы изделий.

Для контроля конструктивных элементов формы и размеров кромок, зазоров соединений, собранных под сварку, а также размеров сварных швов применяют специальные шаблоны, имеющие вырезы под определенный шов, размер которого указан на шаблоне; а также универсальные шаблоны сварщика (УШС-3); кроме того, используют предельные шаблоны с наибольшими (проходными) и наименьшими (непроходными) контрольными вырезами.

Для контроля зазоров между плоскостями применяются *щупы* – калибры, имеющие вид мерной пластины определенной толщины от 0,22 до 1 мм. Щупы длиной 100 мм поставляются наборами; длиной 200 мм – отдельными пластинами.

Средства измерения и контроля углов. Исходную точность выполнения изделия обеспечивают угловые меры. Это меры, воспроизводящие единицу измерения угла в градусах.

Промышленность выпускает наборы угловых мер в виде *угловых плиток* с градацией 2"; 1'; 1 и 15°. Набор состоит из угловых плиток с номинальными углами до 90°. Точность углов угловых плиток отвечает одному из четырех классов точности – 00; 0; 1; 2. Например, допуск углов угловой меры 1-го класса точности равен +10'.

Угловые плитки изготавливают в виде пластин с узкими измерительными поверхностями, обработанными доводкой и образующие острый угол или угол со срезанной вершиной, или стороны четырехугольника.

Угловые плитки снабжены монтажными отверстиями для собирания в блоки с помощью струбцин.

Кроме угловых плиток применяют правильные шестигранные меры и многогранные меры с углами более 90°.

Для измерения отклонений от перпендикулярности, т.е. от угла, 90 широко применяются угольники.

Угольники – это жесткое бесшкальное средство для контроля годности прямого угла, имеющее как наружный, так и внутренний рабочие углы. Угольниками пользуются для измерения отклонений от перпендикулярности поверхностей деталей в линейных единицах измерения, используя оценку «на просвет» и по щупам.

Для измерения углов в условных единицах применяют *угломеры с нониусом* – универсальный и транспортирный.

Для измерения небольших отклонений от горизонтального или вертикального расположения поверхностей служат *уровни*: брусковые, рамные и электронные.

2.4. Взаимосвязь систем ВИК с другими системами неразрушающего контроля. Требования к проведению ВИК

В соответствии со справочником [26, т. 1] ВИК в определенной степени взаимосвязан с другими видами неразрушающего контроля. Почти все системы НК обладают рядом общих характеристик:

- объекты, подлежащие контролю различными методами, дефекты в них и причины их возникновения часто являются одними и теми же;
- информационные модели дефектов во многих методах НК анализируются и интерпретируются визуально.

Зрение человека является основой неразрушающего контроля, для ряда методов НК оговариваются критерии видимости дефектов. В связи с этим почти любой метод НК может считаться визуальным на стадиях выявления и интерпретации. В частности, критерии видимости дефектов оговариваются для магнитопорошкового, капиллярного методов и некоторых методов те-чеискания.

Выявление и распознавание дефектов происходит, как правило, в условиях различных мешающих факторов. Уровни освещенности индикаций, размеры частиц дефектоскопических материалов, углы зрения, чувствительность к свету, относящиеся к зрению дефектоскописта, контролируются для

обеспечения надежности и точности методов НК. Кроме того, практически во всех автоматизированных системах НК используются оптические элементы, которые тесно связаны со свойствами органа зрения человека. Поэтому обучение операторов-дефектоскопистов заканчивается только тогда, когда надежность проводимого ими контроля становится достаточно высокой и устойчивой.

При **ультразвуковом контроле** работа дефектоскописта связана со зрительно-напряженными функциями в связи с восприятием визуальной информации и взаимодействием с органами управления ультразвуковым прибором, пьезоэлектрическими преобразователями, электронно-лучевыми трубками либо электролюминесцентными, жидкокристаллическими экранами, а также бумажными носителями. Существует ряд противопоказаний для оператора, которые приведены в справочнике [26, т. 1].

Требуется определенная освещенность рабочего места в пределах от 300 до 700 лк, скачки яркости при смене полей зрения должны быть минимальными, т.е. интенсивность освещения объектов контрольных поверхностей, где находятся рукописи и документы, не должна превышать яркости экрана прибора. Рабочие места оператора следует располагать так, чтобы в поле его зрения не попадали окна или осветительные приборы; они не должны находиться и непосредственно за спиной оператора. Необходимо исключить отражения на экране от различных источников дневного и искусственного света, все блестящие детали, попадающие в поле зрения, должны быть заменены на матовые, соотношение яркости экрана и непосредственного ближайшего окружения не должно превышать 3:1. Также к ускорению развития зрительного утомления, изменению цветоощущения, повышению расхода энергии могут привести резкие запахи, высокая температура воздуха, шум и другие внешние воздействия.

При проведении **капиллярного контроля** визуальные способы используются:

- для сравнения чувствительности целевых наборов дефектоскопических материалов (индикаторных пенетрантов, очистителей, гасителей, проявителей);
- обнаружения дефектов (индикаторных следов);
- проверки чистоты дефектоскопических материалов.

Геометрические и оптические данные индикаторных рисунков указывают на наличие дефектов, их местоположение, форму и протяженность на поверхности объекта контроля, а также коррелируют с некоторыми характеристиками дефектов: яркость индикаторного следа – с глубиной дефекта; непрерывная линейная форма индикаторного следа свидетельствует о наличии трещины, а случайные небольшие пятна – о наличии пор.

Для выявления индикаторных рисунков визуальным способом применяется комбинированное (т.е. общее и местное) освещение. Комбинированную освещенность обработанной проявителем контролируемой поверхности выбирают в пределах 750–4 000 лк. Для люминесцентных методов она долж-

на составлять 500–3 000 лк при использовании ламп накаливания; ультрафиолетовая облученность при этом должна составлять 500–3 000 мкВт/см².

В ряде случаев для обнаружения следа дефекта и расшифровки результатов контроля используют различные средства осмотра (лупы, биноклярные стереоскопические микроскопы, зеркала и т.п.). При проведении капиллярного контроля часто используют различные средства и методы оптического неразрушающего контроля, например лазер с бегущим пучком или фотодетектор, который преобразует импульсы света в электрические сигналы с применением специальных методов распознавания образов.

При **магнитопорошковом контроле** чувствительность метода зависит от способа и условий регистрации индикаторного рисунка выявляемых дефектов. Нормативными документами устанавливаются минимальные уровни освещенности (облученности) контролируемых поверхностей объектов. Так, при использовании магнитных порошков естественной окраски, а также цветных магнитных порошков устанавливается значение минимальной освещенности в 1 000 лк, а при использовании люминесцентных магнитных порошков – минимальный уровень облученности ультрафиолетовым излучением, соответственно, 2 000 и 1000 мкВт/см², при минимально допустимой освещенности поверхности 20 лк. При этом дефектоскописты должны знать признаки индикаторных рисунков реальных дефектов и уметь распознавать ложные индикации.

Как при капиллярном, так и при магнитопорошковом контроле для иллюстрации результатов с целью дальнейшего помещения изображений в итоговые документы в настоящее время рекомендуется иметь в аксессуаре дефектоскописта такие средства ВИК, как металлическая миллиметровая линейка (или рулетка) и цифровая фотокамера с достаточно высоким уровнем разрешения при обеспечении нижней границы фокусного расстояния не более 500 мм.

Вот поэтому, несмотря на то, что «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля» [2] и «Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля» [3] не требуют обязательной параллельной аттестации в области ВИК специалистов иных методов НК, дефектоскописты и их работодатели, как правило, в практике стараются получить и засвидетельствовать квалификацию по ВИК в дополнение к прочим методам.

Требования к специалистам, осуществляющим ВИК. Специалисты, осуществляющие визуальный и измерительный контроль, должны быть аттестованы в соответствии с Правилами [2]. Они не должны иметь медицинских противопоказаний по состоянию здоровья.

Теоретическая и практическая подготовка специалистов и контролеров может производиться на специальных курсах при учебно-аттестационных центрах, в учебных комбинатах или по месту работы в соответствии с программой.

Минимальный стаж работы по ВИК при аттестации на I уровень квалификации должен быть не менее 3 мес.; при этом для лиц со средним, сред-

ним специальным и средним техническим образованием – обучение полное; аттестация на II уровень возможна после 6 мес. работы для специалистов I уровня.

Для лиц с высшим образованием аттестация на II уровень возможна при минимальном стаже работы 9 мес. с прохождением курсов повышения квалификации.

Требования к проведению ВИК. Стационарные участки контроля необходимо размещать в наиболее освещенных местах, оборудованных искусственным освещением. Освещенность должна быть достаточной для выявления дефектов, но не менее 500 лк. Участки должны быть оборудованы рабочими столами, стендами, рольгангами и другими средствами, обеспечивающими удобства выполнения работ.

Окраска поверхностей стен, потолков, рабочих столов и стендов должна быть выполнена в светлых тонах (белый, голубой, желтый, светло-зеленый, светло-серый), чтобы увеличить контрастность контролируемых поверхностей, повысить контрастную чувствительность глаза, снизить общее утомление специалиста, выполняющего контроль.

При монтаже, строительстве, ремонте, реконструкции, а также в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений ВИК выполняется на месте производства работ. При этом должно быть обеспечено удобство подхода специалистов, выполняющих контроль, к месту проведения контрольных работ, созданы условия для их безопасного производства.

Подготовка к контролю осуществляется подразделениями организации, выполняющей работы по ВИК, а в процессе эксплуатации технических устройств и сооружений – службами организации, которой принадлежит контролируемый объект. Подготовка проводится в соответствии с требованиями РД 03-606-03 [6].

3. ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Если оператор-диагност осматривает объект без каких-либо специальных увеличительных средств, то это – визуальный осмотр, который, как указывалось выше, согласно ГОСТ 18353 не относится к категории физических видов неразрушающего контроля. Но как только оператор взял в руки хотя бы простую увеличительную лупу, это уже **оптический вид неразрушающего физического контроля**.

3.1. Физические основы взаимодействия излучения и вещества

Теоретические основы оптического контроля изложены в справочнике [26, т. 1]. В соответствии с указанным источником метод основан на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК).

Оптическим излучением или *светом* называется электромагнитное излучение с длиной волны 10^{-3} – 10^3 мкм, в котором выделяются ультрафиолетовая (УФ), видимая и инфракрасная (ИК) области спектра с длинами волн, соответственно, 10^{-3} –0,38; 0,38–0,78 и 0,78– 10^3 мкм. В данном методе в основном используется видимая часть и в некоторой степени УФ-части спектра.

Возникновение ОИ связано с движением электрически заряженных частиц (электроны, атомы, ионы, молекулы). Дискретные или индуцированные переходы носителей зарядов с более высоких на более низкие уровни энергии сопровождаются испусканием световых квантов (фотонов) с энергией равной разности энергий этих уровней. Энергия фотона

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж с; ν – частота излучения, Гц.

Скорость распространения ОИ в реальных средах определяется по формуле

$$V = c_0 / n = \lambda_0 \nu / n \lambda \nu, \quad (5)$$

где n – показатель преломления среды, $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ (ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость среды); λ_0 – длина волны света в вакууме; λ – длина волны света в среде.

Информационными параметрами ОИ являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности. Для получения обратной информации используются изменения этих параметров в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеивания, дисперсии света, а также изменения характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люми-

несценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений. Спектральные и интегральные фотометрические характеристики зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны.

Основными дефектами, обнаруживаемыми данным методом, являются нарушения сплошности, расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменения структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д. Внутренние дефекты могут выявляться только в прозрачных материалах в оптической области спектра.

Эффективность применения метода зависит от правильности выбора геометрических, спектральных, светотехнических, временных характеристик и условий освещения и наблюдения ОК. Для большей эффективности следует обеспечить максимальный контраст дефекта подбором углов освещения и наблюдения спектра и интенсивности источника (непрерывного или стробоскопического), а также состояния поляризации и степени когерентности света. Также учитываются различия оптических свойств дефекта и окружающей его области фона. Контраст определяется по формуле:

$$K = (L_o - L_\phi) / (L_o + L_\phi), \quad (6)$$

где L_o , L_ϕ – соответственно, яркости объекта и фона.

Физические основы взаимодействия излучения и вещества могут быть описаны единым параметром – **комплексным показателем преломления N (КПП)**, зависящим от частоты, температуры, напряжений и других факторов:

$$N = n - i k, \quad (7)$$

где n – определяет скорость света в среде; k – затухание ОИ, главный показатель поглощения.

Для немагнитных веществ (магнитная проницаемость $\mu = 1$)

$$n = \sqrt{\varepsilon}, \quad (8)$$

где ε – диэлектрическая постоянная.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями:

$$n^2(1 - k^2) = \varepsilon \text{ и } n^2k = 2\pi\sigma/\omega, \quad (9)$$

где σ – удельная проводимость; ω – круговая частота излучения.

По взаимодействию с ОИ вещества можно разделить:

– на однородные, отражение света (ОС) которых сводится к свойствам гладкой поверхности;

– однородные, для описания ОС которых используется модель плоского слоя (или системы слоев);

– вещества с шероховатой границей раздела сред в приповерхностной области;

– неоднородные вещества с объемной системой неоднородностей, описываемые моделью типа совокупности рассеивающих слоев.

По численным значениям КПП можно выделить:

– сильнопоглощающие вещества с $k > 10$ (металлы и т.п.) и высокой отражательной способностью, оптические свойства которых определяются характеристикой поверхности;

– слабопоглощающие вещества с $k \leq 0,01$ (вода, газы, некоторые стекла т.п.) и низкой отражательной способностью, определяемой практически полностью величиной n ;

– вещества с $0,01 \leq k \leq 0,1$ (полупроводники), отражательная и излучатель способности которых существенно зависят от толщины слоя материала;– вещества с $0,1 \leq k \leq 10$ (тонкослойные покрытия и т.п.), отражательная способность которых зависит и от толщины слоя, и от значения k .

Спектральные характеристики оптических свойств определяются совокупностью значений КПП для различных частот излучения. Как правило, спектр КПП находят экспериментально.

Взаимосвязь основных оптических констант вещества – показателя преломления и показателя поглощения – определяется интегральным уравнением Крамерса – Кронинга, позволяющим вычислить одну из констант на фиксированной частоте по известным для всего спектра значениям другой.

По спектральным свойствам материалы обычно разделяют на металлы, полупроводники и диэлектрики. *Металлы* характеризуются высокой отражательной способностью, особенно в ИК-области спектра, наличием точки температурной инверсии, увеличением излучательной способности в УФ-диапазоне. Их оптические свойства определяются в основном проводимостью.

Для *полупроводников* характерно наличие поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, а также сильная зависимость оптических свойств от температуры.

У *диэлектриков* отмечается наличие зон прозрачности в широком диапазоне спектра с резкой границей поглощения.

Оптические свойства многокомпонентных рассеивающих сред (лаки, краски, окислы металлов и пр.) описывают с помощью различных моделей теории светорассеивающих (мутных) сред, например с помощью двухпоточкового приближения. Оптические свойства веществ в монолите и в дисперсной среде могут резко различаться, например, металлы хорошо отражают свет в монолитном состоянии, но в состоянии мелкодисперсной фазы обладают низкой отражательной способностью и используются в качестве поглощающих покрытий (платиновая чернь и т.д.). Диэлектрики в дисперсной фазе хорошо отражают свет в спектральных областях, соответствующих полосам поглощения монолитного материала.

Важнейшая особенность ОС газов – селективность поглощения излучения. Форма и положение линий испускания (поглощения) газов сильно зависят от их концентрации и температуры.

При взаимодействии ОИ с веществом наблюдается поглощение, рассеяние, отражение и преломление ОИ.

Отражением света (ОС) называется эффект возвращения световой волны при ее падении на границу раздела двух сред обратно в первую среду.

Различают зеркальное, диффузное и смешанное ОС. *Зеркальное* ОС имеет место, если неровности поверхности малы по сравнению с длиной волны света. При этом свет отражается по законам геометрической оптики, т.е. угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения света.

Диффузное ОС сопровождается равномерным распределением отраженного света в пределах полусферы. Оно характерно для поверхности с неровностями порядка длины волны света, расположенными хаотично.

Смешанное ОС наблюдается при отражении от поверхностей с неровностями, большими длины волны света. Для него характерно преимущественное отражение в направлении зеркального ОС в сочетании с менее интенсивной диффузионной компонентой. Регулярные неоднородности поверхности приводят к появлению пространственного распределения отраженного света, характерного для явления дифракции.

ОС обычно носит селективный характер, что и определяет цветность различных тел.

Поглощение света (ПС) – уменьшение энергии световой волны в веществе вследствие преобразования ее во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения (люминесценция), имеющего иной спектральный состав и иные направления распространения.

Для твердых веществ характерно *собственное поглощение*, обусловленное взаимодействием света с кристаллической решеткой, и *характеристическое* (селективное) *поглощение*, возникающее вследствие колебаний и вращений молекул и приводящее к появлению полос резонансного поглощения.

Газы обладают в основном избирательным поглощением.

Ослабление монохроматического света в гомогенной изотропной среде за счет поглощения описывается законом Бугера:

$$F_{\alpha\lambda} = F_{0\lambda} \alpha_{\lambda} = F_{0\lambda} \exp(-\alpha_{\lambda} X), \quad (10)$$

где $F_{\alpha\lambda}$ – поток, поглощенный средой; $F_{0\lambda}$ – падающий поток; α_{λ} – спектральный показатель поглощения среды, мм^{-1} ,

$$\alpha_{\lambda} = 4\pi k/\lambda \quad (11)$$

(k – главный показатель поглощения среды; λ – длина волны света); X – длина пути света в среде.

Ослабление полихроматического излучения определяют интегрированием соответствующих потоков по длинам волн.

Рассеяние света (РС) – преобразование света веществом, сопровождающееся изменением направления его распространения, поляризации и (в общем случае) частоты.

РС обусловлено его дифракцией на оптических неоднородностях среды, зависит от их размеров, концентрации и комплексного показателя преломления.

Существует большое число разновидностей эффекта РС. Рассеяние Рэ-лея происходит без изменения частоты света, наблюдается при прохождении света через скопление частиц с размерами, меньшими длины его волны.

Рассеяние света может происходить на электронах среды (явление Комптона), молекулах вещества (комбинационное рассеяние), на флуктуациях плотности среды (рассеяние Мандельштама – Бриллюэна). Рассеяние Тиндаля характерно для мутных сред с размерами частиц порядка долей длины волны света, а рассеяние Ми – для сред с частицами, размеры которых составляют несколько длин волн света.

В мощном лазерном излучении наблюдаются нелинейные эффекты – вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) и др. Для каждого вида рассеяния характерна своя индикатриса рассеяния. Например, при рассеянии Рэ-лея, Тиндаля индикатриса имеет симметричный характер, а при рассеянии Ми – резко выраженную асимметрию. Для слабомутных сред (вода, чистый воздух, стекло) присуще малоугловое рассеяние, т.е. яркость пучка в направлении падающего на среду света значительно больше его яркости в иных направлениях.

Для сильно рассеивающихся сред (молочное стекло и т.п.) характерно изотропное рассеяние.

Преломление света. При падении пучка лучей света на границу раздела однородных гладких прозрачных сред часть его отражается под углом α_1 , равным углу падения, другая же часть проходит во вторую среду под углом α_2 , определяемым законом преломления:

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_{21}. \quad (12)$$

Константа n_{21} есть относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой и обуславливается отношением скоростей света в этих средах. Абсолютный показатель преломления n_a есть отношение скорости света в вакууме к его скорости в среде. Очевидно, что

$$n_{21} = n_{2a} / n_{1a}, \quad (13)$$

Чаще всего в технике определяют показатель преломления среды к воздуху:

$$n_a = n_{a, \text{возд}} \cdot n_{21}. \quad (14)$$

При нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре

$$n_{a, \text{возд}} = 1,00027. \quad (15)$$

При условиях измерений, отличных от нормальных, вводят поправку для реальных значений температуры, давления и влажности воздуха.

Показатель преломления определяется природой вещества и зависит от внешних условий, особенно от температуры и длины волны света. Принято указывать индексами значения температуры и длины волны света, при которых измерен показатель преломления.

Различают изотропные и анизотропные материалы. У *изотропных материалов* (стекла, жидкости, газы) показатель преломления не зависит от направления света при измерениях. *Анизотропные материалы* (кристаллы и др.) характеризуются двойным лучепреломлением, т.е. расщеплением луча на два, распространяющихся с разными скоростями. Скорость одного из них («необыкновенного») зависит от направления. Анизотропия наблюдается и у изотропных в обычных условиях веществ при сжатии и других воздействиях.

Преломление и отражение света от сильнопоглощающих сред (полупроводники, металлы) описываются теми же соотношениями, что и для прозрачных, но с введением комплексного показателя преломления:

$$\bar{n} = n - ik . \quad (16)$$

Показатель преломления зависит от плотности вещества. Функция показателя преломления $\bar{n}(d)$ обычно прямо пропорциональна плотности:

$$\bar{n}(d) = rd , \quad (17)$$

где r – постоянная, характерная для конкретного вещества, называется *удельной рефракцией*; d – плотность.

Дисперсия – это зависимость показателя преломления от длины волны света. Обычно при увеличении частоты показатель преломления возрастает (нормальная дисперсия), однако в окрестности полос поглощения среды наблюдается аномальная дисперсия. Дисперсию оценивают разностью показателей преломления каких-либо длин волн ($n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$).

В области сильных световых полей показатель преломления среды может зависеть от мощности пучков света (нелинейно-оптические эффекты).

3.2. Методы оптического контроля

Оптический вид контроля регламентируется стандартом ГОСТ 23479-79 «Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования» [7]. Этот стандарт классифицирует чувствительность оптического контроля по двум основным параметрам: кратность увеличения оптических средств и освещенность контролируемой поверхности. На опасных производственных объектах применяется кратность увеличения оптических средств не ниже 4 и освещенность контролируемой поверхности не менее 500 лк.

Оптический вид контроля включает в себя 3 метода:

1. Наружный метод.

2. Перископический метод.

3. Эндоскопический метод.

Наружный метод позволяет обследовать только легко доступные наружные поверхности объекта и широкие полости, в которые оператор может проникнуть с простыми средствами оптического контроля (оптической системой). Используя его, нельзя осматривать внутренние поверхности узких, тем более изогнутых полостей.

Оптическая система – это совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и т.п.), предназначенная для определенного формирования пучков световых лучей.

К простым оптическим системам относятся зеркала, линзы, очки, лупы. Более сложные системы наружного оптического контроля – телескопы и микроскопы.

Одним из наиболее простых способов наружного оптического контроля труднодоступных поверхностей или поверхностей, наклоненных менее 30° к зрительной оси глаза, является их осмотр с помощью зеркал. Применяют плоские зеркала и сферические.

Плоским зеркалом называют оптическую деталь с плоской отражающей поверхностью, предназначенную для изменения направления оси оптической системы. Комбинация из таких зеркал может обеспечить поворот изображения. Отражательная способность зеркала достигает 95 %.

Сферическим зеркалом называют оптическую деталь, сферическая поверхность которой является отражательной.

Линза – оптическая деталь, ограниченная преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью вращения. По оптическим свойствам линзы делят на две основные группы:

1) положительные, т.е. собирающие;

2) отрицательные, т.е. рассеивающие.

Линзы отличаются одна от другой расстоянием центров образующих их сферических поверхностей, радиусами и показателями преломления вещества, из которого они сделаны. Величина оптической силы линзы определяется фокусным расстоянием, которое зависит от кривизны преломляющих поверхностей, показателя преломления и толщины линзы. Например, двояковыпуклая линза с большой кривизной поверхностей имеет меньшее фокусное расстояние и большую оптическую силу, так как оптическая сила линзы обратно пропорциональна ее заднему фокусному расстоянию.

За единицу измерения оптической силы линзы принимают оптическую силу такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м; такая единица называется диоптрией. В промышленности диоптрия обозначается «дптр».

Например, у положительных линз с фокусным расстоянием +0,4 м оптическая сила составляет 2,5 дптр. У отрицательных линз с фокусным расстоянием –0,4 м оптическая сила –2,5 дптр, а для –4,0 м она равна –0,25 дптр.

Линзы – это средства коррекции зрения. Их можно разделить на две группы:

1) одноэлементные (очковые и контактные линзы, однолинзовые лупы, диафрагмы различных видов);

2) многоэлементные (многолинзовые лупы, телескопические и проекционные системы).

Луна – это оптическая система, состоящая из одной или нескольких линз, которая предназначена для наблюдения предметов, расположенных на ограниченном расстоянии.

Промышленность выпускает лупы общего назначения различных типов и конструкций: складные, карманные, измерительные, часовые, лупы с ручкой и др. Увеличение стандартных луп от $2,5\times$ до $25\times$. Измерительные лупы выпускаются с увеличением $10\times$.

При контроле поверхностей больших размеров сначала следует использовать лупу с небольшим увеличением, выявляя подозрительные места, а затем исследовать их лупой с большим увеличением, поскольку она имеет меньшее линейное поле зрения. Лупу нужно держать так, чтобы ее плоскость была параллельна поверхности контролируемого объекта и как можно ближе к глазу, так как при этом глаз воспринимает наибольшее количество отраженного от поверхности изделия света.

При оптическом контроле далеко расположенных поверхностей широко используются *телескопические системы*, которые преобразуют параллельный пучок излучения, поступающий в их входной зрачок, в параллельный, более узкий пучок излучения, выходящий через выходной зрачок системы. Фокусы таких систем находятся в бесконечности, а оптическая сила равна нулю. Такие системы называются афокальными.

Сложная телескопическая система, кроме двух составляющих основных оптических частей – положительных объектива и окуляра (труба Кеплера) и положительного объектива и отрицательного окуляра (труба Галилея), может иметь другие оптические детали, например, защитные стекла, сетки, призмы, светофильтры и т.п. Конструктивно эти детали могут быть отнесены как к объективной, так и к окулярной части.

Микроскопы предназначены для наблюдения близко расположенных предметов. Рабочие микроскопы, используемые в цехах, имеют увеличение порядка $40\times$, поле зрения около 5 мм. Их применяют при контроле поверхностей с гальваническими покрытиями, окрашенных и полированных поверхностей.

Микроскопы измерительные используются в машиностроении для точных измерений линейных размеров контролируемого объекта. Точность измерения линейных размеров составляет от 0,01 до 0,001 мм; угловых – от $10'$ до $1''$; предел измерения линейных размеров – 50–200 мм.

Микроскопы металлографические используются для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов. Работают в отраженном свете. Увеличения от $100\times$ до $1\ 350\times$, при фотографировании от $45\times$ до $2\ 000\times$.

Перископический метод позволяет обследовать узкие длинные прямолинейные полости.

Перископы – это смотровые приборы, построенные на базе световодной трубы и линзовой оптики с механическим устройством (рис. 4).

Этим методом, к примеру, в энергетике контролируют поверхность осевых каналов роторов паровых турбин. Длина световодной трубы может достигать 6 м.

Эндоскопический метод позволяет обследовать узкие длинные искривленные полости.

Эндоскопы – это смотровые приборы, первоначально построенные на базе волоконной и линзовой оптики с механическим устройством, но в настоящее время благодаря интенсивному развитию видеоэлектроники они создаются на основе микровидеокамер, портативных компьютеров, а передающим изображением средством является обычный электрический кабель, длина которого может достигать 40 м. При этом ориентация принимающего изображение элемента относительно оси конца световода (кабеля) дистанционно управляется в оптоволоконных эндоскопах с помощью тросика Боудена (подобно ручному тормозу велосипеда), а в современных приборах – стрелками на клавиатуре компьютера (рис. 5).

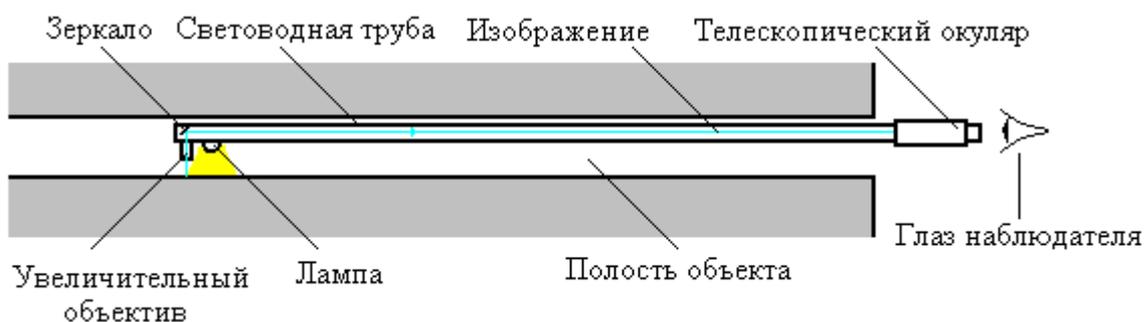


Рис. 4. Перископический метод оптического контроля прямолинейной полости

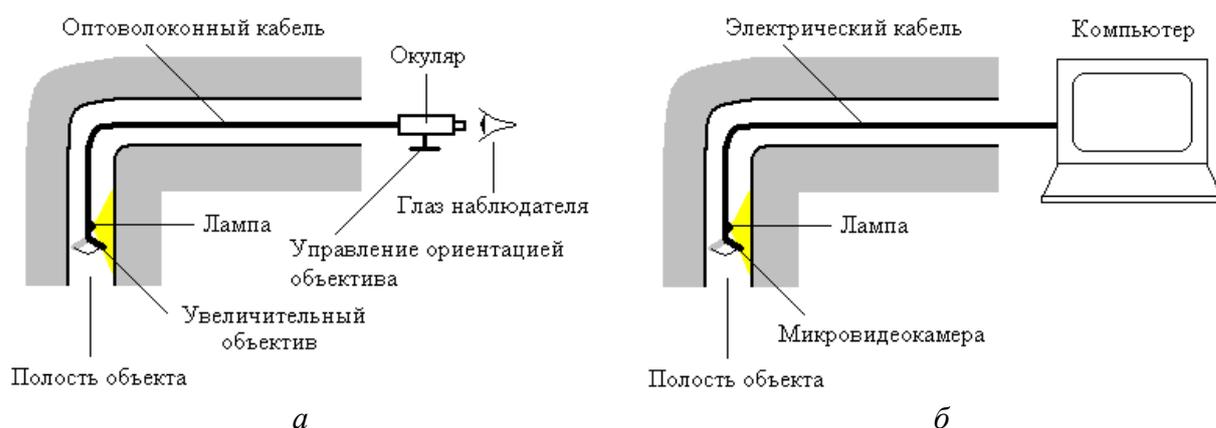


Рис. 5. Эндоскопический метод оптического контроля искривленной полости: а – с помощью оптоволоконного эндоскопа; б – с помощью компьютерного эндоскопа

Эндоскопы применяются:

– в машиностроительных цехах для контроля цилиндрических отверстий, пересекающихся отверстий, внутренней резьбы и на других недоступных участках;

– в авиационно-космической промышленности для визуального контроля узлов двигателей, систем питания горючим, воздухом, систем управления и торможения;

– в автомобильной промышленности для контроля отливок и головок, недоступных мест масляных систем, механических и электрических конструкций, при диагностировании двигателей и т.п.;

– на электростанциях и атомных объектах для контроля лопаток турбин, генераторов, двигателей, насосов, при визуальном контроле бойлерных труб на точечную коррозию и другие дефекты, при контроле внутренних поверхностей атомных реакторов без разборки;

– в химической и нефтехимической промышленности при визуальном контроле испарительных конструкций, ректификационных блоков, камер химических реакций, цилиндров, барабанов и других типов оборудования.

В случаях, когда вредное излучение, температура или химическая среда представляет опасность для контроля или когда конфигурация объекта контроля не дает возможности его контролировать непосредственно, применяют агрегатные комплексы дистанционного оптического контроля, в состав которых входят телевизионная установка, световой прибор и системы позиционирования и транспортировки.

Другие оптические и оптико-механические приборы. Эти приборы имеют оптические и механические элементы и применяются для измерения линейных размеров. Они бывают контактные и бесконтактные, проекционные, интерференционные, лазерные или основанные на других физических принципах.

Наибольшее распространение из них получили оптиметры, длиномеры и интерферометры.

Оптиметры – это оптико-механические приборы для измерения линейных размеров методом сравнения с мерой, основанные на использовании оптико-механического рычага. Основные типы оптиметров – вертикальный и горизонтальный. Оптиметры применяют для измерения линейных размеров и отклонений формы особо точных деталей машин и измерительных инструментов, а также для поверки концевых мер длины 3, 4 и 5-го классов точности.

Длиномеры – это оптические измерительные приборы, имеющие размерный элемент – пиноль со шкалой высокой точности, с которой сопоставляется искомый размер объекта контроля. Благодаря этому контактные измерения линейных размеров можно производить как методом сравнения с мерой, так и методом непосредственной оценки. Отсчетные устройства современных длиномеров изготавливают на базе дифракционной решетки, что позволяет отсчитывать результат с дискретностью 0,2 мкм (у оптиметра 1 мкм). Кроме того, современные длиномеры электрифицированы и оснащены микроЭВМ, что дает возможность автоматизировать процесс измерения и обработку его результатов.

Интерферометры – это оптические измерительные приборы, использующие интерференцию. При интерференции видимого света возникает картина интерференций, т.е. ряд спектральных полос, характерных для видимого света, симметрично расположенных относительно черной полосы в середине ряда. Эта полоса служит своеобразным визиром прибора. При изменении размера объекта контроля воспринимающий элемент прибора вызывает в преобразующем устройстве прибора соответственное смещение картины интерференции на фоне непосредственной шкалы. По этой шкале отсчитываются показания интерферометра. Наиболее целесообразно использовать интерферометры для контроля и поверки концевых мер длины 1, 2, 3-го классов точности, а также для контроля и поверки проволочек, используемых при измерении среднего диаметра резьбы.

Лазерный интерферометр с микропроцессором – это интерферометр с оптическим квантовым генератором – лазером. Лазер удобен тем, что создает узконаправленный когерентный пучок света большой мощности. По сравнению с контактным интерферометром лазерный имеет большую чувствительность.

Лазерные интерферометры в основном предназначены для измерения линейных или угловых перемещений, происходящих в агрегатах машин и в устройствах, от которых требуется точность движений в процессе работы.

4. КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Этот вид контроля в целом основан на способности тех или иных веществ проникать в слабораскрытые наружные и сквозные дефекты в твердых стенках контролируемых объектов.

4.1. Методы контроля проникающими веществами

При контроле проникающими веществами используют газоаналитический, газогидравлический, вакуумно-жидкостный и капиллярный методы (табл. 3). Первые три метода объединены понятием «течеискание».

Таблица 3

Методы контроля проникающими веществами

Метод	Контролируемые объекты	Выявляемые дефекты
Газоаналитический	Сосуды, баллоны, аммиачные трубопроводы	Только сквозные
Газогидравлический	Баллоны, дюкеры	
Вакуумно-жидкостный	Днища и стенки резервуаров	
Капиллярный	Любые твердые	Наружные сквозные и несквозные

Газоаналитический метод состоит в следующем (рис. 6). Герметически закрытый объект наполняют химически активным газом (аммиак) под давлением. В качестве индикатора используют отрезок лакмусовой бумаги или специальный портативный прибор – газоанализатор. Лакмусом либо датчиком газоанализатора медленно сканируют всю наружную поверхность объекта. В зоне, где имеется сквозной дефект, образуется утечка аммиака, в результате в этом месте лакмус темнеет, а газоанализатор дает соответствующие показания.

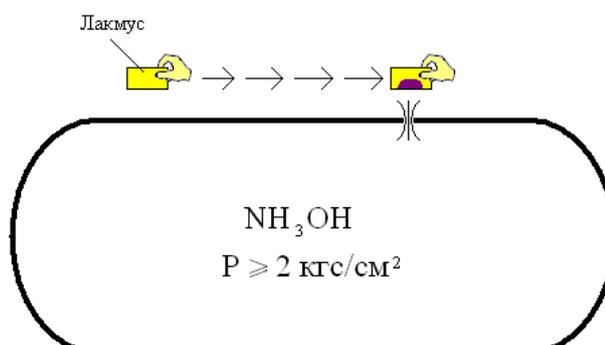


Рис. 6. Поиск сквозных дефектов в стенке баллона газоаналитическим методом

Метод связан с использованием ядовитого газа, поэтому необходимо применение специальных защитных средств: оператор должен выполнять контроль в противогазе и резиновых перчатках. Лакмусовый способ более дешев, так как не требует специальной аппаратуры, но при обнаружении дефектов он связан с расходом индикаторной бумаги.

Газогидравлический метод в обиходе иногда называют «пузырьковым» (рис. 7). Герметически закрытый объект наполняют воздухом под давлением и погружают в прозрачную жидкость (дюкеры – подводные переходы различных трубопроводов через водоемы – заведомо погружены в нее). В точке, где имеется сквозной дефект, образуется утечка воздуха в жидкость, в результате в этом месте в жидкости возникает цепочка восходящих пузырьков. В быту этот метод хорошо знаком велосипедистам – именно так они обнаруживают мелкие проколы в камерах колес.

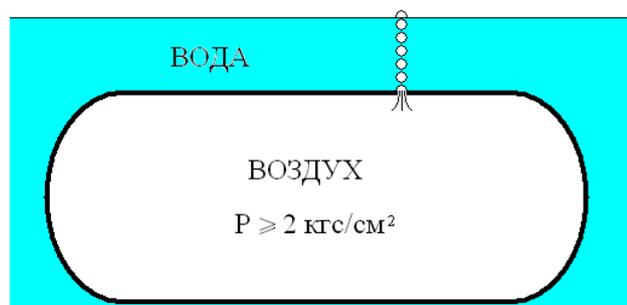


Рис. 7. Поиск сквозных дефектов в стенке баллона газогидравлическим методом

Вакуумно-жидкостный метод (рис. 8) широко применяется при контроле герметичности днищ и стенок резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Средствами контроля являются электрический вакуумный насос, вакуумный манометр и вакуум-камера, представляющая собой лист толстого оргстекла со штуцером, обнесенный по контуру толстой полосой пористой резины. Насос, манометр и камера соединены между собой резиновыми шлангами. В качестве индикаторного средства используется жидкое мыло или обыкновенный косметический шампунь. Контролируемый участок объекта обильно покрывают слоем мыла, накрывают вакуум-камерой и откачивают из-под нее воздух. Степень вакуума должна быть не менее $-0,75 \text{ кгс/см}^2$. Если под камерой имеется сквозной дефект, то под действием внешнего атмосферного давления наружный воздух устремляется сквозь него в полость камеры, и над дефектом возникает вспенивание мыльного слоя, которое оператор хорошо видит сквозь прозрачную крышку камеры.

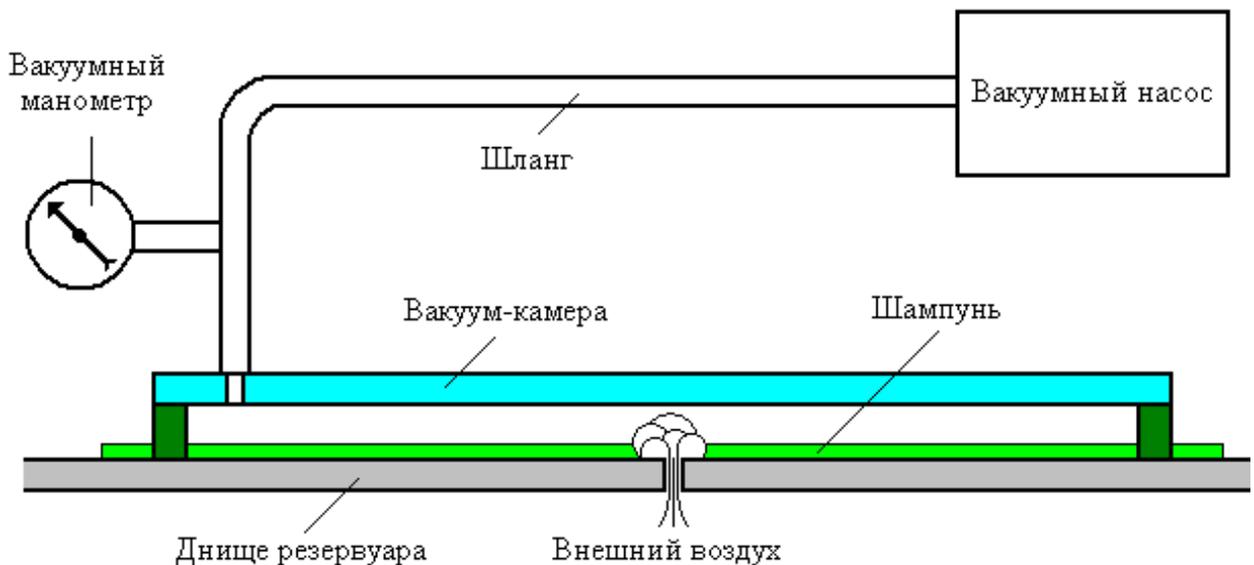


Рис. 8. Поиск сквозных дефектов
в днище резервуара вакуумно-жидкостным методом

Капиллярный метод представляет собой многооперационный процесс. Теоретические основы капиллярного контроля изложены в справочнике [26, т. 1].

Типовой перечень операций включает в себя подготовку изделия к контролю, нанесение индикаторной жидкости, удаление ее излишков и проявление индикаторных следов дефектов (рис. 9).

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.

Эффективность каждой операции зависит от нескольких физических явлений, определяемых физико-химическими свойствами контактирующих сред и материала объекта. Однако сложность выбора свойств дефектоскопических материалов состоит в том, что в разных операциях одна и та же жидкость должна иметь даже противоположные свойства. Так, при заполнении трещины индикаторная жидкость должна обладать хорошей проникающей способностью, чтобы как можно лучше заполнить полость дефекта. Но парадокс состоит в том, что такую жидкость затем трудно извлечь из трещины при проявлении. В результате пенетрант останется в трещине и не образует следа на поверхности, т.е. трещина таким пенетрантом не будет обнаружена.

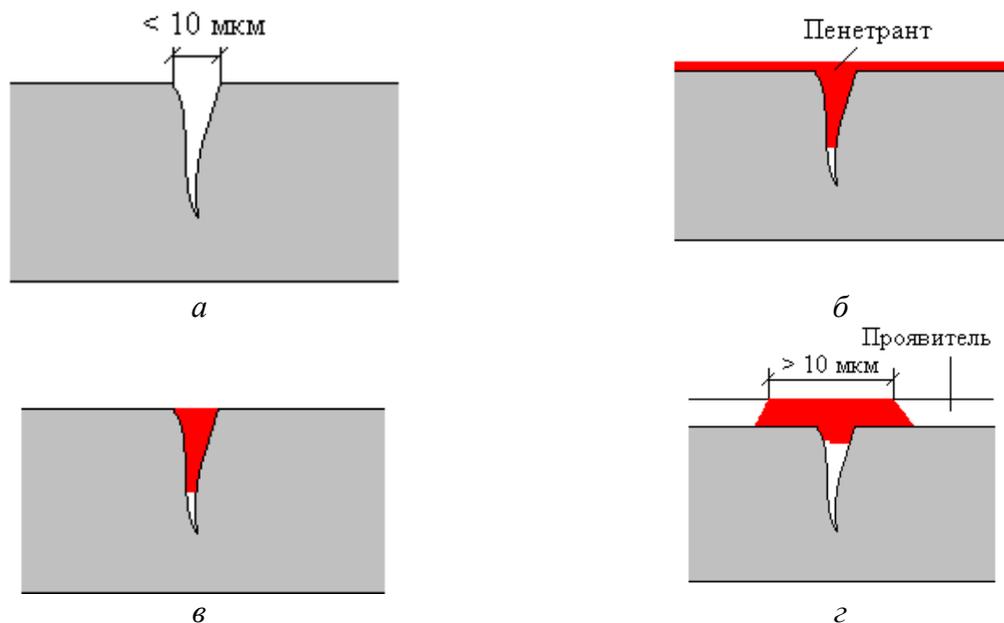


Рис. 9. Поиск поверхностных дефектов в металле капиллярным (цветным) методом

Кроме того, следует сразу обратить внимание на то, что кроме взаимодействия жидких дефектоскопических материалов с твердыми поверхностями нельзя не принимать во внимание взаимодействие жидкостей между собой, а также с газами. Явления растворения, адсорбции, эмульгирования, диффузии серьезно влияют на конечный результат контроля, прежде всего на его чувствительность.

При комбинированных способах контроля, включающих в себя капиллярный метод, картину осложняют физические поля (акустическое, магнитное, электромагнитное) и те явления, которые возникают при их взаимодействии с жидкими и твердыми дефектоскопическими материалами.

4.2. Физические явления, лежащие в основе капиллярного контроля

Знание физических явлений, лежащих в основе операций капиллярного контроля, позволяет принимать меры для повышения чувствительности и надежности контроля и исключать факторы, снижающие чувствительность и приводящие к неадекватным результатам.

Смачивание и поверхностное натяжение. Смачивание детали дефектоскопическими материалами – главное условие капиллярного контроля. Смачивание определяется взаимным притяжением молекул жидкости и твердого тела.

Как известно, на границе двух сред (например, жидкость – воздух) силы взаимного притяжения между молекулами жидкости и воздуха отличаются от сил притяжения между молекулами внутри жидкости и внутри воздуха. Контактующие среды вблизи поверхности обладают некоторым из-

бытком потенциальной энергии по сравнению с молекулами, находящимися внутри отдельно взятого вещества. Этот избыток называется *свободной энергией поверхности*. Свободная энергия молекул на поверхности больше, чем у молекул внутри вещества. В связи с этим молекулы стремятся уйти внутрь вещества, и в результате среда вынуждена приобретать форму с минимальной наружной поверхностью. Так, жидкость в невесомости под влиянием этого явления имеет форму шара. Поскольку поверхности стремятся сократиться, возникает сила поверхностного натяжения.

Величину поверхностного натяжения определяют работой, измеряемой в джоулях на квадратный метр ($\text{Дж}/\text{м}^2$), необходимой для образования единицы площади поверхности раздела двух находящихся в равновесии фаз.

Если на границе раздела сред выделить произвольную площадку, то натяжение рассматривают как результат действия распределенной силы, приложенной к периметру этой площадки. Направление сил – по касательной к границе раздела и перпендикулярно периметру. Силу, отнесенную к единице длины периметра, называют *силой поверхностного натяжения*, измеряют в ньютонах на метр ($\text{Н}/\text{м}$) и обозначают σ .

Два равноправных определения поверхностного натяжения соответствуют двум применяемым для его измерения единицам: $\text{Дж}/\text{м}^2$ и $\text{Н}/\text{м}$. С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается. Величины поверхностного натяжения для наиболее распространенных дефектоскопических материалов при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении даны в [табл. 4](#).

Таблица 4

Значения поверхностного натяжения дефектоскопических материалов

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

Как видно из таблицы, в капиллярной дефектоскопии используются жидкости с относительно низким поверхностным натяжением, об одной из причин этого говорилось в начале раздела.

Для иллюстрации природы явления смачивания рассмотрим каплю жидкости, лежащую на поверхности твердого тела ([рис. 10](#)).

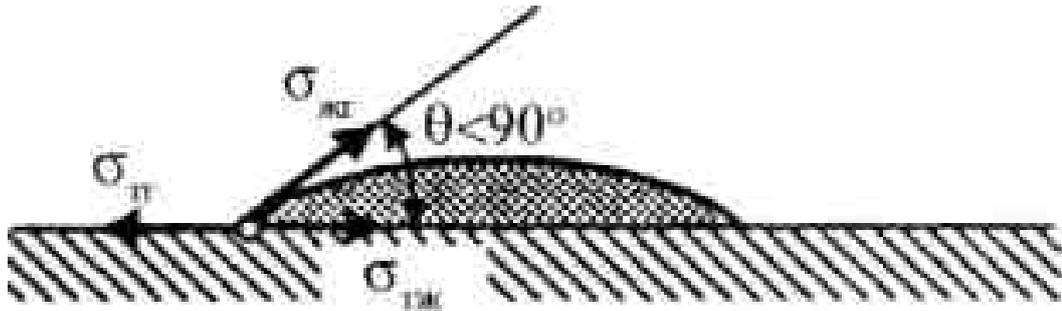


Рис. 10. Смачивание ($\theta < 90^\circ$) поверхности твердого тела жидкостью:

$\sigma_{т.ж}$ – поверхностное натяжение на границе «твердое тело – жидкость»; $\sigma_{т.г}$ – поверхностное натяжение на границе «твердое тело – газ»; $\sigma_{ж.г}$ – поверхностное натяжение на границе «жидкость – газ»; θ – краевой угол смачивания (измеряется со стороны границы раздела «жидкость – твердое тело»)

Здесь

$$\cos \theta = (\sigma_{т.г} - \sigma_{т.ж}) / \sigma_{ж.г} . \quad (18)$$

Силой тяжести пренебрегаем, так как капля мала. На единицу длины периметра, где соприкасаются твердое тело, жидкость и газ, действуют три силы поверхностного натяжения, направленные по касательным к соответствующим границам раздела: «твердое тело – газ» $\sigma_{т.г}$, «твердое тело – жидкость» $\sigma_{т.ж}$, «жидкость – газ» $\sigma_{ж.г}$. Как правило, во всех справочниках для $\sigma_{ж.г}$ принято обозначение σ .

Когда капля находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю:

$$\begin{aligned} \sigma \cos q + \sigma_{т.ж} - \sigma_{т.г} &= 0, \\ \cos q &= (\sigma_{т.г} - \sigma_{т.ж}) / \sigma. \end{aligned} \quad (19)$$

Угол θ называют *краевым углом смачивания*. Он измеряется со стороны жидкости. Если $\sigma_{т.г} > \sigma_{т.ж}$, то он острый. Из рисунка видно, что при этом жидкость смачивает твердое тело. Чем меньше θ , тем сильнее смачивание. Предельный случай ($\theta = 0$) будет соответствовать полному смачиванию, т.е. растеканию жидкости по поверхности твердого тела до толщины молекулярного слоя. Если $\sigma_{т.г} < \sigma_{т.ж}$, то $\theta > 90^\circ$ – тупой и $\cos \theta$ отрицателен. Это означает, что жидкость не смачивает твердое тело. Формальным пределом смачивания и несмачивания взят угол $\theta = 90^\circ$ (смачивание $0 < \theta < 90^\circ$ и несмачивание $90^\circ < \theta < 180^\circ$). При этом в первом случае жидкость будет подниматься в капилляре, а во втором – опускаться ниже уровня в сосуде ([рис. 11](#)).

Поверхностное натяжение характеризует свойство самой жидкости, а $\sigma \cos \theta$ – смачиваемость этой жидкостью поверхности данного твердого тела. Составляющую силы поверхностного натяжения $\sigma \cos \theta$, «размазывающую» каплю по поверхности, иногда называют силой смачивания. Для большинства хорошо смачивающих веществ $\cos \theta$ близок к единице, например, для границы стекла с водой он равен 0,685, с керосином – 0,90, с этиловым спиртом – 0,955.

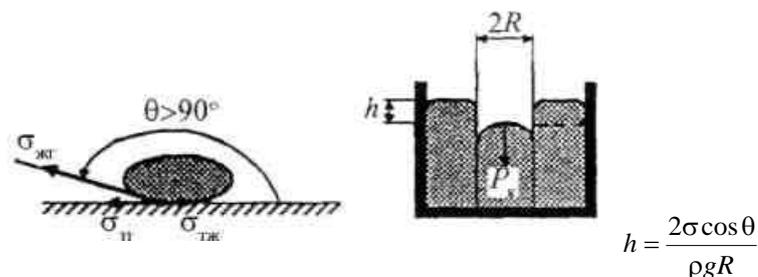


Рис. 11. Случай несмачивания ($\theta > 90^\circ$) твердой поверхности жидкостью

Сильное влияние на смачивание оказывает состояние поверхности ее (микрорельеф и чистота). Например, слой масла на поверхности стали или стекла резко ухудшает ее смачиваемость водой, $\sigma \cos \theta$ становится отрицательным. Поэтому важна роль очистки поверхности от жиров, масел и других загрязнений детали перед капиллярным контролем.

Адгезия и когезия. Физическая сущность смачивания особенно хорошо объясняется через понятия адгезии и когезии.

Понятие *когезии* определяется взаимодействием внутри жидкости или твердого тела и характеризуется *работой когезии* A_k , т.е. работой, необходимой для разрыва столбика жидкости или твердого тела с поперечным сечением единичной площади.

Адгезия характеризуется явлениями, связанными с взаимодействием приведенных в соприкосновение различных тел, и определяется *работой адгезии* A_a , т.е. той работой, которая затрачивается при разрыве единицы площади межфазного поверхностного слоя.

Очевидно, что работа когезии A_k равна удвоенному поверхностному натяжению σ , поскольку при разрыве столбика жидкости (или твердого тела) единичной поверхности образуются две новые поверхности. Так, например, при разрыве столбика жидкости работа когезии равна $A_k = 2\sigma$.

Работа адгезии A_a сопровождается образованием двух единичных поверхностей и ликвидацией межфазной поверхности. Чем больше адгезия, тем лучше происходит смачивание.

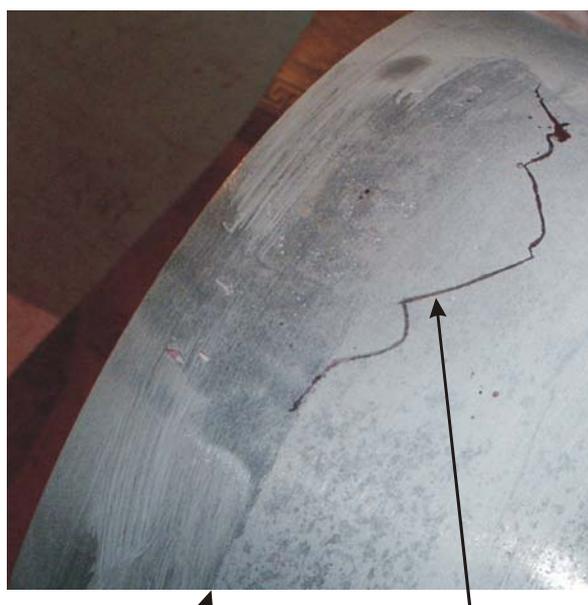
Капиллярный метод подразделяется на две разновидности: цветной и люминесцентный. Основным индикаторным средством здесь служит специальная жидкость с высокой проникающей способностью – пенетрант (от греч. «пенетро» – проникаю). При *цветном* способе используется пенетрант яркого цвета, а для *люминесцентного* применяется жидкость, имеющая свойство сиять в ультрафиолетовом облучении.

Для поиска неразличимых глазом узких (раскрытием менее 10 мкм) трещин контролируемый участок объекта зачищают от покрытий, очищают от загрязнений, обезжиривают специальным растворителем (см. рис. 9, а) и обильно покрывают слоем пенетранта (рис. 9, б). После некоторой выдержки (5–7 мин, для пропитки пенетрантом возможных дефектов) излишки пенетранта тщательно удаляют неворсистой хлопчатобумажной ветошью (рис. 9, в) и при цветном способе покрывают участок другой специальной жидкостью – белым проявителем, представляющим собой взвесь мела или гашеной извести в летучем жидком носителе. По мере высыхания проявитель превращается

в белую высокопористую корку, и оставшийся в полости дефекта пенетрант за счет капиллярного эффекта начинает подниматься в проявитель и вследствие хаотичности пор расходиться над дефектом по ширине. В результате красный след на белом фоне над дефектом становится достаточно широким, чтобы быть различимым человеческим глазом (рис. 9, з).

При люминесцентном способе после удаления излишков пенетранта участок освещают специальным ультрафиолетовым фонарем, сохранившийся в полостях дефектов пенетрант начинает светиться, показывая оператору эти дефекты.

Пример выявления капиллярным (цветным) методом трещины в гребном вале теплохода показан на рис. 12.



Граница зоны
напрессовки полумуфты

Индикаторный след
трещины

Рис. 12. Пример выявления капиллярным методом трещины в гребном вале теплохода

Капиллярный метод также может быть использован в целях течеискания. Для этого одну поверхность стенки объекта покрывают проявителем, а другую (противоположную) – пенетрантом. Если в данной зоне имеется сквозной дефект (течь), пенетрант через некоторое время проникнет сквозь него в проявитель и вызовет на противоположной поверхности различимый след.

Основываясь на этом, в 2004 г. студентом М.Н. Лычковским и доцентом А.А. Сельским (Красноярский государственный технический университет) было предложено существенно упростить процедуру диагностирования нижних уторных швов нефтепродуктовых резервуаров на предмет течей и переложить ее на плечи владельца резервуара [8, 9]. Для этого следует покрыть уторный шов снаружи равномерным слоем мелового раствора и периодически осматривать побеленный шов на предмет сырых пятен в известковом слое, при необходимости восстанавливая побелку. Здесь пенетрантом выступает сама хранимая жидкость. Это хотя формально и относится к сфере неразрушающего контроля методом проникающих веществ, однако не требу-

ет ни высокой квалификации в области диагностики, ни затрат на привлечение специалистов, ни расходов на средства контроля и в то же время позволяет владельцу своевременно обнаружить нарушение герметичности шва и принять меры по ее устранению.

В России капиллярный метод регламентирован стандартом ГОСТ 18442-80 «Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. Общие требования» [10]. Этот стандарт устанавливает 5 классов чувствительности, характеристики которых приведены в [табл. 5](#).

Таблица 5

Классификация чувствительности капиллярного контроля

Класс чувствительности	Требования к подготовке поверхности		Раскрытие выявляемых дефектов, мкм
	Шероховатость, не грубее	Освещенность, лк, не менее	
I	$Rz\ 2,5$	2 000	Менее 1
II	$Rz\ 20$		От 1 и более
III	$Rz\ 40$	1 500	От 10 и более
IV	$Rz\ 80$	500	От 100 и более
Технологический	Не обработанная		Не нормируется

Выбор набора реактивов для проведения капиллярного контроля в реальных условиях осуществляется на основании заранее определенной шероховатости поверхности контроля.

5. МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Теоретические основы магнитного контроля изложены в справочнике [26, т. 1].

Магнитные свойства присущи всем без исключения окружающим телам. Магнетизм так же универсален, как земное притяжение и электричество. Однако не у всех тел это свойство проявляется в одинаковой степени. У подавляющего большинства тел магнитные свойства очень слабы.

Можно указать два наиболее ярких проявления магнетизма. Во-первых, это так называемые постоянные магниты, обычно изготовленные из железа или его сплавов и соединений, а также из некоторых других химических элементов – никеля, кобальта и редкоземельных элементов (лантаноидов), например гадолиния. Во-вторых, проявление аналогичной силы можно увидеть, если взамен упомянутых постоянных магнитов взять проводники (или катушки из них – соленоиды), по которым протекает постоянный электрический ток.

Рассмотрим два постоянных магнита из одинаковых массивных железных стержней (рис. 13).

Будем считать, что заштрихованный конец стержня имеет знак «+» и обозначен буквой N («северный полюс», по аналогии с магнитным полем Земли), а незаштрихованный конец – знак «-» и обозначен буквой S («южный полюс»). Стержни, изображенные на рис. 13, направлены друг к другу одинаковыми знаками и буквами (+, N). Чтобы сблизить стержни, необходимо приложить усилия. На рис. 14, где стержни обращены друг к другу разными знаками и буквами (+, N и -, S), усилия направлены на то, чтобы не дать стержням соприкоснуться.

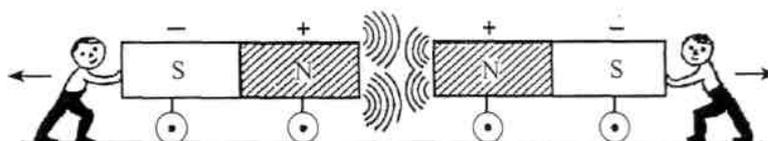


Рис. 13. Усилия при попытке сблизить одноименные концы постоянного магнита

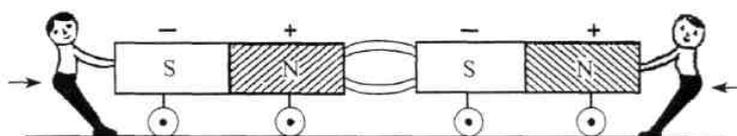


Рис. 14. Усилия при попытке удержать от смыкания постоянные магниты, направленные друг к другу разноименными концами

Достаточно ослабить усилие, как в первом случае магнитные стержни разъедутся, а во втором – плотно соединятся.

Существует еще один наглядный способ обнаружения магнитного действия постоянных магнитов. Если около магнита поместить металлическую деталь, которая до приближения к магниту не проявляла никаких магнитных дей-

ствий, то вблизи постоянного магнита эта деталь сама станет магнитом. На стороне детали, обращенной к магниту, возникнет состояние, при котором она всегда будет притягиваться к магниту, подобно разноименным концам магнитных стержней (рис. 15).

Этот эффект можно использовать для обнаружения в пространстве, окружающем магнит, его магнитного действия (рис. 16). Проявление таких магнитных действий стержневым постоянным магнитом, полученное с помощью магнитных порошков, показано на рис. 16, а. Частицы порошка, имея несколько удлиненную форму, выстраиваются вдоль линий, которые выходят из одного конца магнита и входят в другой. Их принято называть линиями индукции или магнитными силовыми линиями, поскольку именно вдоль них направлены силы, ориентирующие частицы магнитного порошка вокруг магнита (рис. 16, б стрелки).

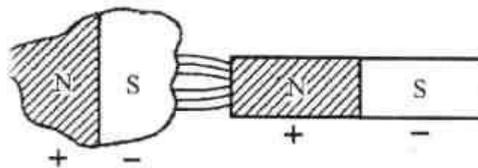


Рис. 15. Магнитоиндукционный эффект

Напомним, что концы магнитов называют полюсами. Если вблизи магнита нет других магнитов, каких-либо больших железных предметов или залежей магнитной руды, то подвешенный магнит всегда ориентируется почти точно вдоль географического меридиана с юга на север.

Магнитному виду контроля подвергаются только ферромагнитные материалы. Этот вид контроля составляют следующие методы:

- 1) индукционный,
- 2) магнитоферрозондовый,
- 3) магнитографический,
- 4) магнитопорошковый,
- 5) метод эффекта Холла,
- 6) метод магнитной памяти металла.

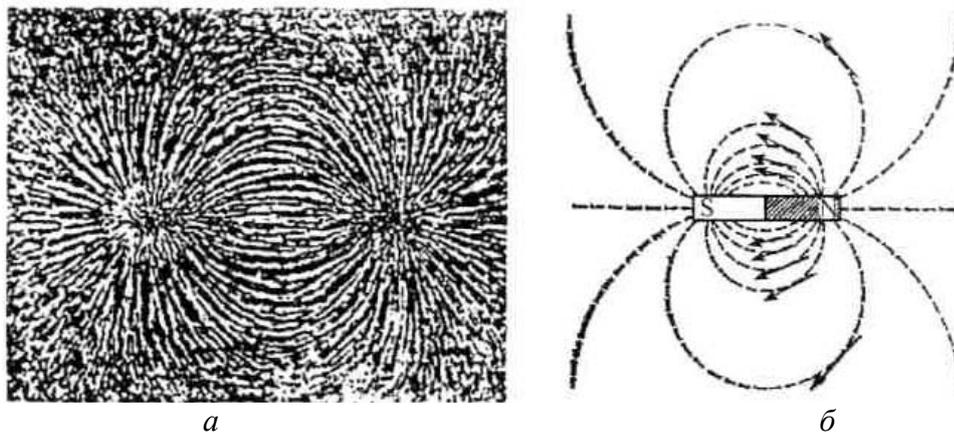


Рис. 16. Картина линий индукции стержневого магнита, полученная с помощью магнитных порошков (а), и векторный характер магнитного поля (б)

Индукционный метод основан на явлении самоиндукции. Если электрическую катушку, замкнутую на гальванометр или милливольтметр, быстро пронести над металлом, в котором имеется наружный дефект, то над дефектом возникает неоднородность электромагнитного поля в катушке, которая образует слабую электродвижущую силу (ЭДС) в ней. Эта ЭДС, индуцируемая прибором, и является признаком дефекта. Этот метод использовался на железной дороге при строительстве первых вагонов-дефектоскопов. В настоящее время метод практически не применяется, так как обладает слабой чувствительностью, напрямую зависящей от скорости сканирования.

Методы 1 и 6 – пассивные, а методы 2–5 – активные, т.е. требуют предварительного намагничивания объекта, при котором над дефектом образуется собственное магнитное поле – поле рассеяния (рис. 17). Поле рассеяния образуется за счет того, что в таких условиях дефект сам по себе превращается в небольшой магнит с полюсами на краях, между которыми возникает пучок магнитных силовых линий, частично выступающий над поверхностью объекта. Эти методы различаются между собой по способу выявления полей рассеяния над дефектами (табл. 6).

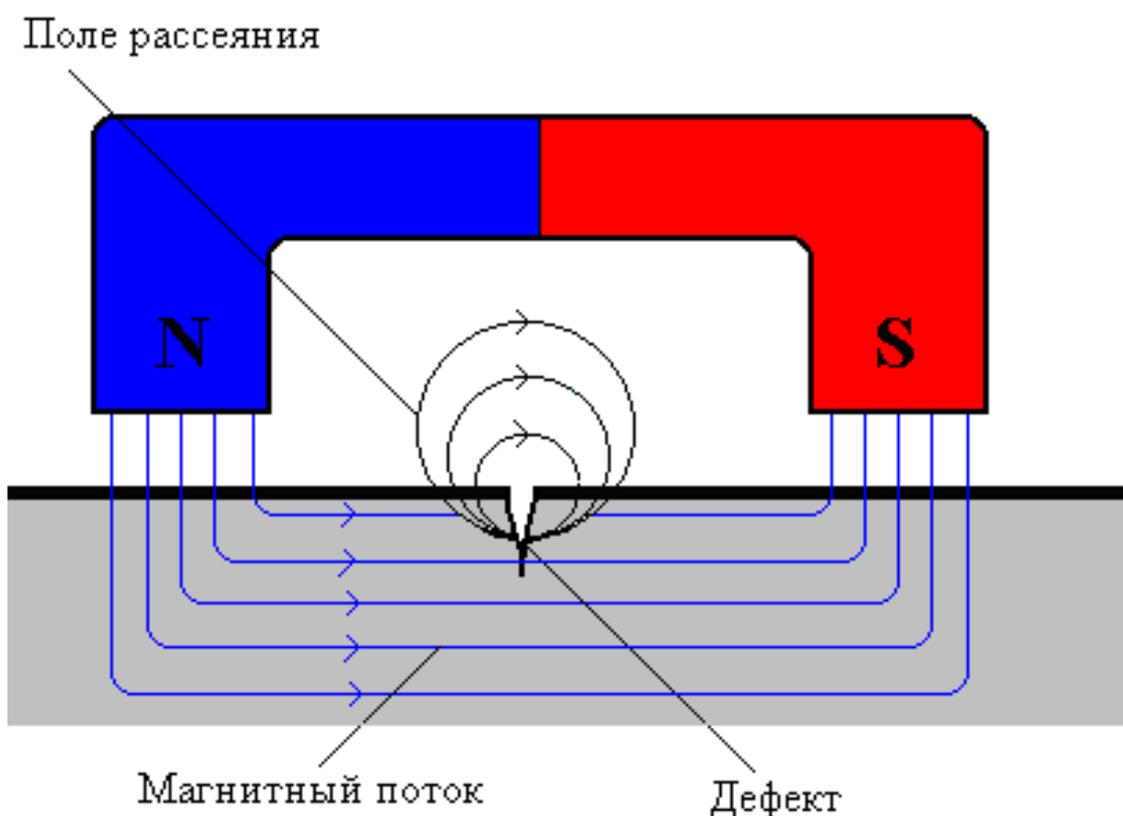


Рис. 17. Поле рассеяния над дефектом

Магнитоферрозондовый метод широко применяется на железной дороге для контроля рельсовых звеньев.

Магнитографический метод используется при контроле сварных соединений, но редко, так как требуется весьма сложная аппаратура и обязательное предварительное размагничивание объекта вместе с пленкой.

Активные методы магнитного контроля

Метод	Краткое описание	Эскиз
Магнитоферрозондовый	Поле рассеяния над дефектом возбуждает ЭДС в датчике – катушке, замкнутой на индикатор	
Магнитографический	Поле рассеяния над дефектом оставляет на магнитной ленте магнитное пятно, которое далее визуализируется в специальном видеомагнитофоне	
Магнитопорошковый	При поливе поверхности магнитопорошковой суспензией поле рассеяния над дефектом стягивает на себя частицы черного магнитного порошка	
Метод эффекта Холла	Поле рассеяния над дефектом вызывает отклонение траектории электрического тока в пластине Холла	См. рис. 18 и рис. 19

Наиболее популярен **магнитопорошковый метод**, при котором слабо-раскрытые дефекты визуализируются за счет того, что на них образуются валки черного магнитного порошка, которые в несколько раз шире дефекта и потому различимы глазом. В России магнитопорошковый метод регламентирован стандартом ГОСТ 21105-87 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод» [11]. Этот стандарт классифицирует чувствительность магнитопорошкового метода по трем уровням, возможности и требования которых приведены в [табл. 7](#).

Таблица 7

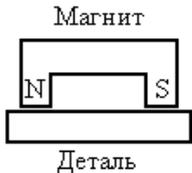
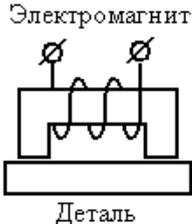
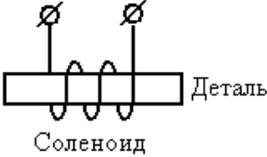
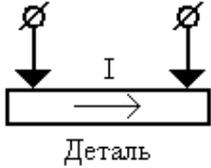
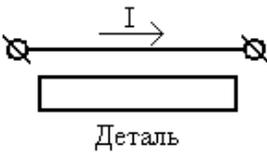
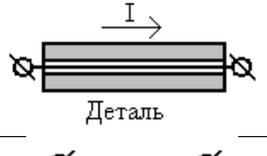
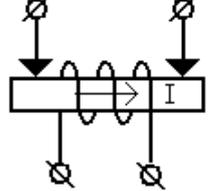
Классификация чувствительности магнитопорошкового контроля

Уровень чувствительности	Требования к подготовке поверхности		Раскрытие выявляемых дефектов, мкм
	Шероховатость, не грубее	Освещенность, лк, не менее	
А	Rz 2,5	1000	От 2,5 и более
Б	Rz 40	750	От 10 и более
В	Не обработанная	500	От 25 и более

Существует несколько видов и способов намагничивания деталей и объектов (табл. 8). Эти виды и способы выбирают в зависимости от формы и размеров контролируемой детали (объекта), типа намагничивающего устройства и предполагаемой преимущественной ориентации ожидаемых дефектов (лучше всего выявляются дефекты, ориентированные перпендикулярно магнитному потоку).

Таблица 8

Виды и способы намагничивания

Вид намагничивания	Способ	Схема	Преимущественная ориентация выявляемых дефектов
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	 <p>Магнит N S Деталь</p>	Поперечные
	Электромагнитом	 <p>Электромагнит Деталь</p>	
	Соленоидом	 <p>Деталь Соленоид</p>	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	 <p>Деталь</p>	Продольные
	Пропусканием тока по проводу рядом с деталью	 <p>Деталь</p>	Вдоль провода
	Пропусканием тока по проводу в полости детали	 <p>Деталь</p>	Продольные
Комбинированное (пример)	Пропусканием тока по детали и соленоидом	 <p>Деталь</p>	Любые

Объект поливают магнитопорошковой суспензией (взвесь вороненой пыли Fe_2O_3 в летучем жидком носителе) в процессе намагничивания (способ приложенного поля, СПП) или после него (способ остаточной намагниченности, СОН). СОН применяют только на магнитомягких сталях, таких как инструментальные и подшипниковые, которые долго сохраняют поверхностную намагниченность; в большинстве же случаев используют СПП.

На ферромагнитных материалах магнитопорошковый метод предпочтителен по сравнению с капиллярным, так как более оперативен и прост в применении.

Метод эффекта Холла (рис. 18) нашел применение для контроля стальных канатов. Датчик Холла (пластина Холла, рис. 18, а) представляет собой прямоугольную пластину из полупроводникового материала (например, арсенида галлия).

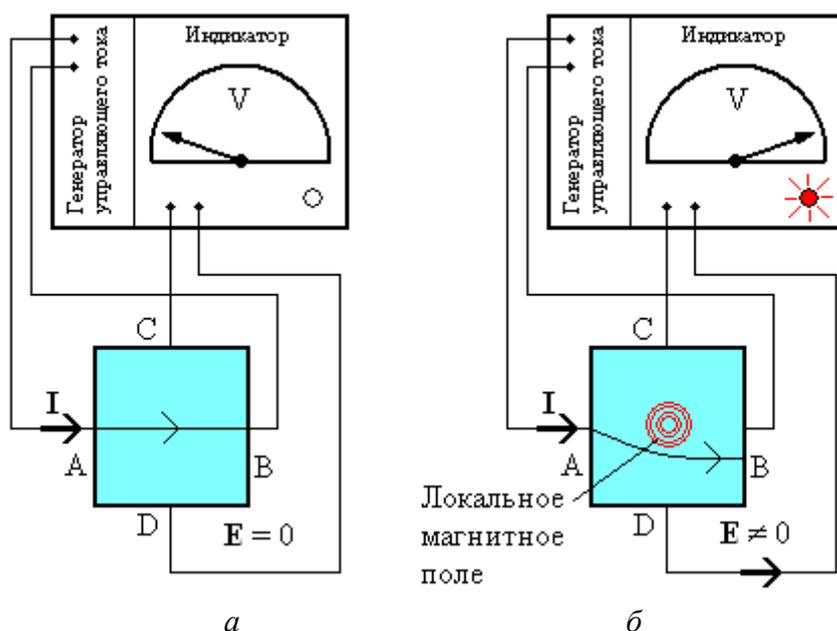


Рис. 18. Принцип действия пластины Холла:
 а – магнитное воздействие отсутствует;
 б – влияние локального магнитного поля

В направлении $A-B$ течет постоянный ток I (управляющий ток). Эффект Холла состоит в том, что при попадании в пластину локального магнитного поля в ней происходит искривление пути носителей электрических зарядов (т.е. траектории управляющего тока), что вызывает образование разности потенциалов между гранями C и D , т.е. возникновение электродвижущей силы E в цепи индикатора (рис. 18, б). Исполнительный орган (магнитная головка) средства контроля объектов методом Холла обобщенно представляет собой конструкцию, схематически показанную на рис. 19. Объект перемещается относительно такой головки, и в случае попадания под нее дефекта на выводах пластины Холла возникает импульс ЭДС, регистрируемый прибором. На фотографиях (рис. 20) показаны внешний вид прибора «ИНТРОС МДК-21», построенного на эффекте Холла, и примеры его применения на канатах.

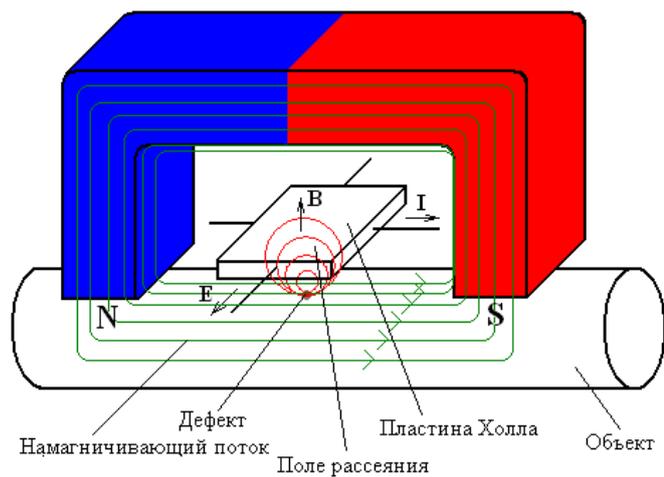


Рис. 19. Схематическое представление конструкции магнитной головки прибора для контроля изделий методом Холла

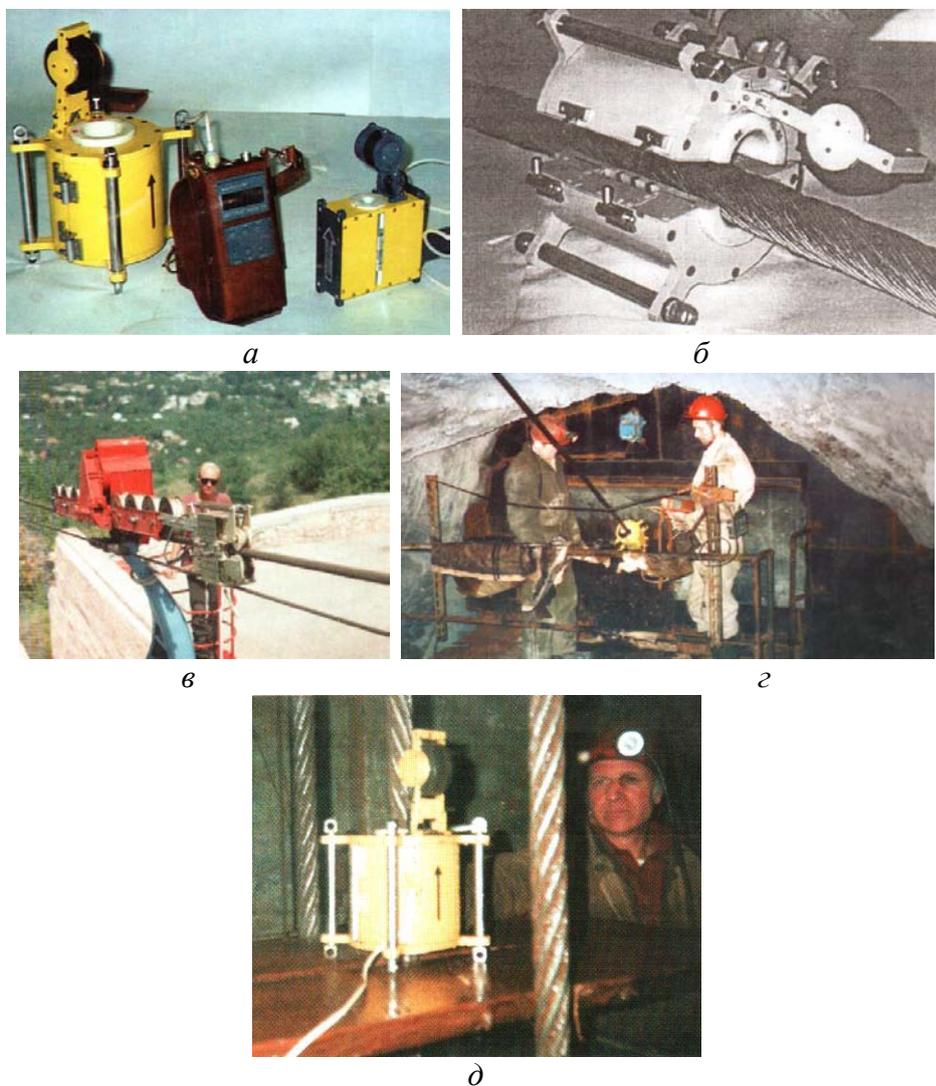


Рис. 20. Примеры контроля качества канатов: *а* – прибор «ИНТРОС МДК-21» в комплекте; *б* – установка головки МГ-64 на канат; *в* – контроль канатной дороги; *г* – контроль каната в угольной шахте; *д* – контроль каната в шахте пассажирского лифта

Метод магнитной памяти металла (МПМ) основан на измерении и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния металла, отражающих их структурную и технологическую наследственность.

Установлено, что в зонах стального объекта, когда-либо (даже лишь однократно) претерпевавших повышенные механические напряжения (далее – зоны концентрации напряжений, ЗКН), напряженность поля остаточной намагниченности металла H_p меняет свой знак (инверсия: плюс на минус или наоборот) либо обращается в нуль. При контроле методом МПМ вполне достаточно использовать естественную намагниченность, сформировавшуюся в процессе изготовления изделия в магнитном поле Земли, а для элементов механического оборудования постоянная намагниченность обусловлена еще и регулярным влиянием полей электрических установок, входящих в конструкцию объекта (например, электроприводы различных механизмов). Для оборудования, находящегося в эксплуатации, магнитная память проявляется в необратимом изменении намагниченности металла в направлении действия максимальных напряжений от рабочих нагрузок, т.е. степень опасности участка отображается не собственно значением напряженности поля H_p , а крутизной ее перепада в ЗКН (рис. 21).

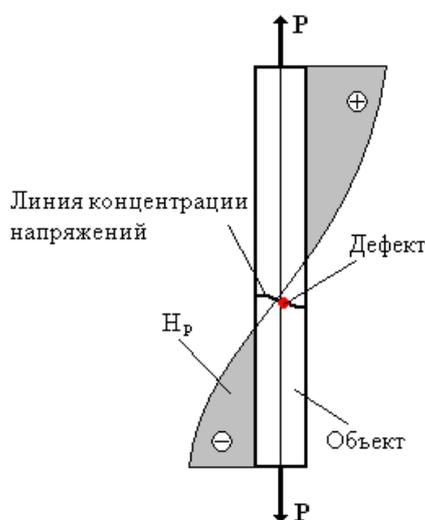


Рис. 21. Инверсия знака при остаточной напряженности магнитного поля H_p в зоне, претерпевшей концентрацию механических напряжений

Этот метод регламентируется стандартом ГОСТ Р 52005-2003 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования» [12] и находит применение, например, на объектах котлонадзора [13]. В настоящее время ведутся успешные разработки по его применению и на стальных канатах, так как он имеет ряд преимуществ перед методом эффекта Холла (портативность средств контроля и надежность выявления опасных

участков). На [рис. 22](#) приведены фотографии средств контроля методом МПМ и пример его проведения.

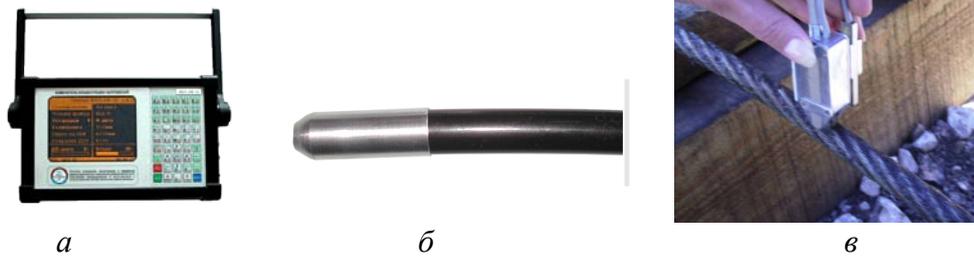


Рис. 22. Метод магнитной памяти металла: *а* – внешний вид прибора ИКН-4М-16; *б* – исполнительный элемент датчика; *в* – контроль каната методом МПМ

Точность и достоверность метода определяется технологической последовательностью проведения контроля.

6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ

Вихревые токи возникают в электропроводящих изделиях, находящихся под воздействием переменного магнитного поля [26, т. 1]. Впервые вихревые токи были обнаружены французским ученым Д.Ф. Араго (1786–1853) в 1824 г. в медном диске, расположенном на оси под вращающейся магнитной стрелкой. За счет вихревых токов диск приходил во вращение. Это явление, названное явлением Араго, было объяснено несколько лет спустя М. Фараде-ем с позиций открытого им закона *электромагнитной индукции*: вращаемое магнитное поле наводит в медном диске токи (вихревые), которые взаимодействуют с магнитной стрелкой. Вихревые токи были подробно исследованы французским физиком Ж.Б. Фуко (1819–1868) и названы его именем (токи Фуко). Он открыл явление нагревания вихревыми токами металлических тел, вращаемых в магнитном поле.

Вихревые токи возникают в проводящих телах как вследствие изменения магнитного потока во времени, так и в результате относительного перемещения проводящего тела и магнитного потока.

Вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящих изделиях, формируя вихреобразные контуры, сцепляющиеся с индуктирующим их магнитным потоком.

Согласно закону Ленца, переменное магнитное поле вихревых токов стремится противодействовать изменениям магнитного потока, индуктирующего вихревые токи, вследствие чего они оказывают размагничивающее действие на источник переменного магнитного потока, в том числе и на возбуждающую катушку вихретокового преобразователя (ВТП), вносимая индуктивность которой уменьшает собственную индуктивность возбуждающей катушки ВТП.

Вихревые токи вызывают соответствующие выделения тепла (Джоулева), которые называют потерями энергии на вихревые токи. В вихретоковом контроле эти потери определяют вносимое активное сопротивление ВТП, которое может быть одним из информативных параметров ВТП при контроле промышленных изделий.

Для уменьшения потерь энергии от вихревых токов в магнитопроводах электрических машин и трансформаторов их выполняют из тонких изолированных листов электротехнической стали (толщиной 0,35 мм), для увеличения удельного электрического сопротивления которой добавляют к железу 2–4 % кремния.

Вихревые токи вызывают неравномерное распределение напряженности магнитного поля в проводящем изделии, в котором они возникают. Это объясняется тем, что в центральной части сечения этого изделия магнитодвижущая сила вихревых токов, направленная навстречу основному магнитному потоку, является наибольшей, так как эта часть сечения охватывается наибольшим количеством контуров вихревых токов. Такое вытеснение маг-

нитного потока из середины сечения изделия к его поверхности будет тем больше, чем выше угловая частота переменного тока возбуждающей катушки ВТП и чем больше магнитная проницаемость μ_a материала объекта контроля (ОК). При высоких частотах магнитный поток проходит лишь в тонком поверхностном слое контролируемого изделия (рис. 23, где $x^2 = \omega\sigma\mu_a R_{\text{ОК}}^2$, $R_{\text{ОК}}$ – радиус ОК).

По своему характеру явление вытеснения магнитного потока аналогично поверхностному эффекту вытеснения тока, и его иногда называют магнитным поверхностным эффектом. Явление магнитного поверхностного эффекта находит широкое применение в индукционном нагреве для плавки и поверхностной закалки металлов.

Общая характеристика вихретокового контроля. Как отмечалось выше, вихретоковый контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля внешнего источника (обмотка возбуждения ВТП) электромагнитным полем вихревых токов, возбуждаемых в ОК переменным магнитным полем ВТП.

Распределение плотности вихревых токов в электропроводящем объекте контроля определяется источником электромагнитного поля, геометрическими и электромагнитными параметрами ОК, а также взаимным расположением ВТП и ОК. Возбуждающая катушка ВТП может располагаться вблизи ОК (рис. 24, а – накладной ВТП), а также проходить внутри трубчатого ОК или облетать его (рис. 24, б, в – проходные ВТП).

Форма кривых распределения вихревых токов повторяет форму витков обмотки возбуждения ВТП с учетом формы ОК (рис. 25, токи μ_a). В результате действия вихревых токов в ОК изменяется результирующее магнитное поле.

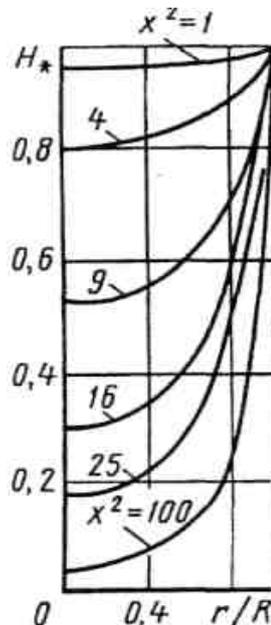


Рис. 23. Распределение модулей относительной напряженности магнитного поля в цилиндре

Из графика распределения плотности вихревых токов в ОК видно, что максимального значения она достигает под витками возбуждающей обмотки

ВТП. Под центром возбуждающей обмотки ВТП вихревые токи отсутствуют, и, следовательно, обнаружить дефект в этом месте ОК не представляется возможным.

Взаимодействие возбуждающей обмотки ВТП с объектом контроля можно представить схемой воздушного трансформатора, параметры цепи вторичной обмотки $Z_{вт}$ которого определяются эквивалентным контуром вихревых токов в ОК (рис. 26, а).

Как известно, воздушный трансформатор можно представить схемой замещения (рис. 26, б), на которой $R_{вн}$ – вносимое в катушку активное сопротивление, обусловленное потерями энергии в результате нагрева ОК вихревыми токами; $L_{вн}$ – вносимая индуктивность, обусловленная изменением потокосцепления индуктивной катушки (обмотки возбуждения ВТП) за счет действия вихревых токов. Поскольку потокосцепление ψ из-за действия вихревых токов изменяется, индуктивность катушки при наличии вблизи нее электропроводящего ОК также изменится. Параметры $R_{вн}$ и $L_{вн}$ зависят от плотности и распределения вихревых токов в ОК.

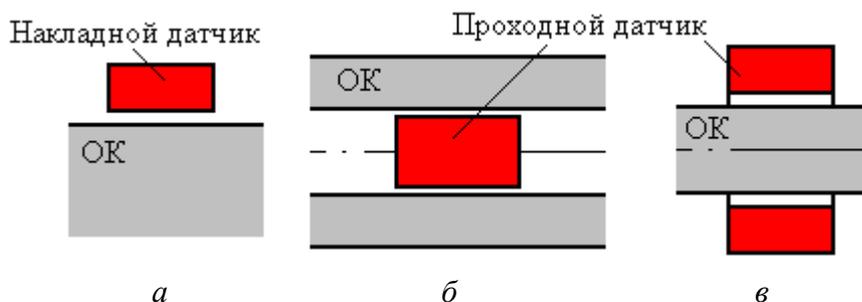


Рис. 24. Накладной (а) и проходные (б, в) ВТП

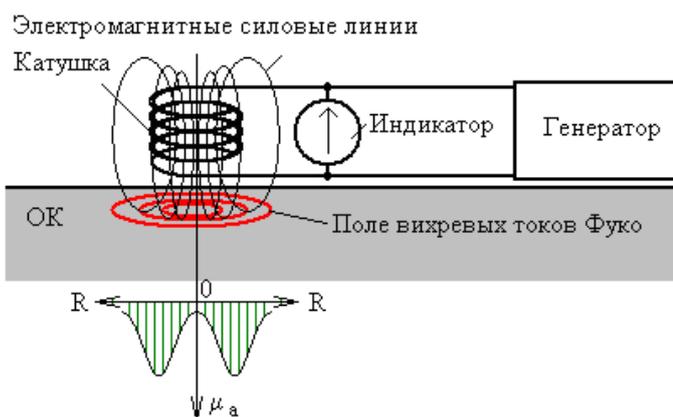


Рис. 25. Схема принципа действия прибора с накладным ВТП

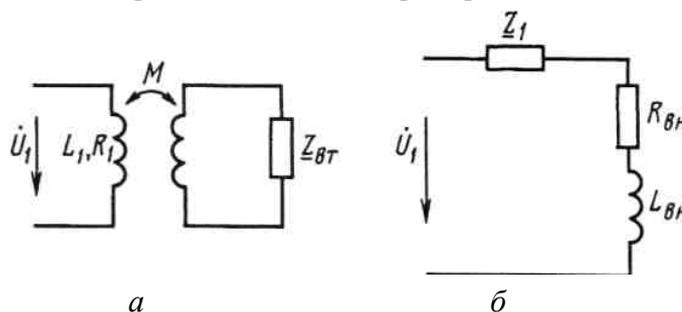


Рис. 26. Воздушный трансформатор (а) и его схема замещения (б)

Электромагнитный вид контроля содержит только два метода: вихретоковую дефектоскопию и вихретоковую толщинометрию. Оба эти метода в отличие от магнитных могут применяться на любых твердых металлах.

С помощью **вихретоковой дефектоскопии** можно выявлять наружные и подповерхностные (не глубже 2 мм) дефекты раскрытием от 1 мкм и более. Создаваемое катушкой поле вихревых токов Фуко однородно, если под катушкой нет дефектов. Это поле ответно возбуждает в катушке вторичную электродвижущую силу, в определенной степени изменяющую амплитуду тока. При калибровке прибора на бездефектном образце итоговый уровень амплитуды принимают за базовый, балансируя индикатор в нулевое значение.

Если далее при контроле объекта в процессе сканирования катушкой его поверхности под датчиком оказывается дефект, то он искажает поле вихревых токов, изменяя степень его влияния на амплитуду тока в катушке. Это вызывает разбаланс индикатора, что и служит признаком дефекта.

Катушка накладного датчика обычно намотана на ферритовый стержень. Если выпуск рабочего конца этого стержня подогнать под профиль контролируемой поверхности, то этим методом очень удобно контролировать галтельные переходы в точеных изделиях, резьбовые канавки и т.п. При контроле треугольной резьбы с целью выявления канавочных трещин этот метод не имеет себе равных по достоверности и надежности. В этом методе используется портативная аппаратура: размер современных вихретоковых индикаторов трещин сравним с шариковыми авторучками.

Вихретоковый метод дефектоскопии широко применяется в металлургии для контроля тонкостенных труб, прутков малого диаметра и проволоки.

Вихретоковая толщинометрия используется для измерения толщины металлизации на неметаллических материалах (например, заготовки для печатных плат в радиоэлектронике) или наоборот – толщины защитных неметаллических покрытий на металле (например, электроизоляция). Понижение толщины исследуемого покрытия вызывает уплотнение поля вихревых токов под датчиком и усиление его влияния на амплитуду тока в катушке. Поскольку существует корреляция между толщиной покрытия и плотностью создаваемого поля токов Фуко, это и дает возможность численной оценки толщины покрытия этим методом, но в пределах не более 2 мм.

7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Электрический контроль включает в себя три метода: электропотенциальный, электроискровой и электроемкостный.

Электропотенциальный метод предназначен для измерения глубины наружных трещин в металле, выявленных ранее иными методами. Он основан на измерении электрического сопротивления R (микроомы) локального исследуемого участка электропроводящего объекта и сравнении результата с сопротивлением аналогичного эталонного (заведомо бездефектного) элемента такой же длины. Однако в таких условиях речь идет об измерении очень малых значений сопротивления, поэтому используется ток высокой частоты, характеризующийся активным проявлением так называемого скин-эффекта, а в качестве измеряющего устройства применяется измеритель очень малых значений электросопротивления – микроомметр, включенный по схеме моста Уинстона.

Скин-эффект (от англ. skin – шкура) состоит в том, что электрическое поле тока высокой частоты (ВЧ) охватывает не всю высоту сечения проводника, а лишь сегментообразную приповерхностную зону между электродами ([рис. 27](#)).

При этом максимальная глубина проникновения тока в материал δ , м, зависит от частоты тока:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_a}}, \quad (20)$$

где ω – круговая частота тока, с^{-1} ; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м ; $\sigma = 1/\rho$ – удельная электрическая проводимость материала, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; f – линейная частота тока, Гц.

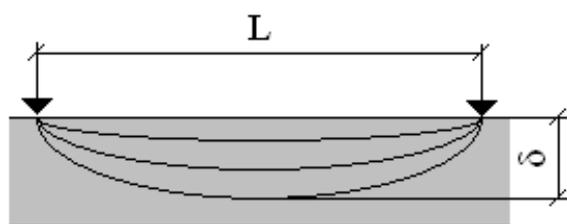


Рис. 27. К пояснению понятия «скин-эффект»

Принцип действия электропотенциального метода измерения глубины трещины показан на [рис. 28](#).

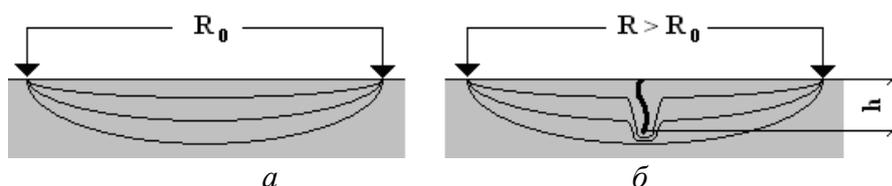


Рис. 28. Принцип действия электропотенциального метода измерения глубины трещины

Как видно из рисунка, при неизменной дистанции L между электродами (обеспечивается конструкцией датчика) электросопротивление R_0 бездефектного участка (вариант a) меньше сопротивления R участка с трещиной (вариант b), так как во втором случае основная часть тока, идущего вблизи поверхности, вынуждена обтекать трещину. Установлено, что существует достаточно выраженная пропорция между глубиной трещины h и разностью этих сопротивлений, что и позволяет применять этот метод. На этом принципе, например, построен трещиномер ИГТ-10.

Электроискровой и электроемкостный методы широко используются в машиностроении, судостроении, авиационной и космической промышленности и предназначены для измерения толщины изолирующих покрытий проводников в электрических системах. Кроме того, электроискровой метод позволяет обнаруживать места сквозного пробоя изоляции. При этом основным элементом аппаратуры является измеритель очень больших значений электросопротивления – мегаомметр, один полюс которого подключается к исследуемому проводнику, а второй – к электроду, которым сканируют поверхность изоляции. В местах, где ее толщина уменьшается, наблюдается пропорциональное этому понижению сопротивления, а там, где есть сквозной пробой, возникает вольтова дуга (искра), поскольку прибор использует ток большой силы. В этом случае показания прибора пульсируют (рис. 29).

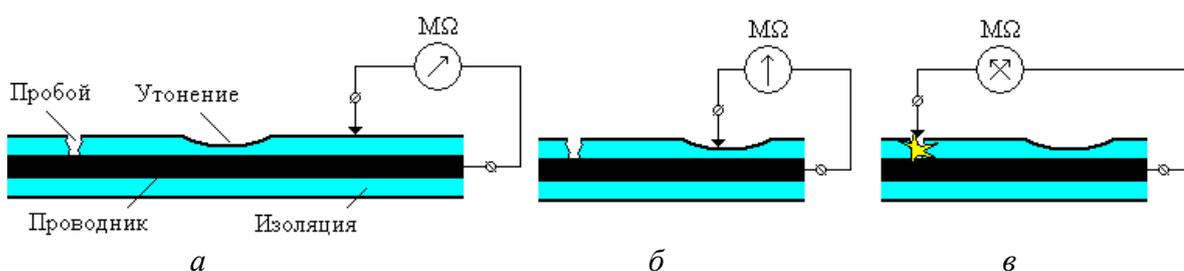


Рис. 29. Реакция электроискрового прибора на состояние изоляции:
 a – на бездефектном участке; b – в зоне утонения изоляции; $в$ – на пробое

При электроемкостном методе основным элементом аппаратуры является измеритель емкости – микрофарадометр, один полюс которого подключается к исследуемому проводнику, а второй – к специальной металлической пластине, которой сканируют поверхность изоляции (рис. 30).

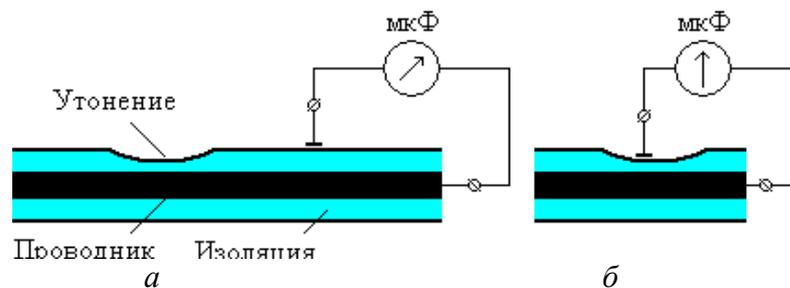


Рис. 30. Реакция электроемкостного прибора на состояние изоляции: *а* – на бездефектном участке; *б* – в зоне утонения изоляции

Проводник и пластина, разделенные изоляцией, в совокупности создают конденсатор большой емкости. В местах, где есть уменьшение толщины изоляции, наблюдается пропорциональное этому понижению емкости.

8. РАДИОВОЛНОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Радиоволновый контроль применяется главным образом в строительстве для поиска и исследования металлических включений в неметаллических материалах (например, арматура в железобетоне или трассировка скрытой электропроводки в стене здания, если ее схема утеряна). Этот вид контроля может быть реализован двумя методами: сквозным (радиотеневым) и радиолокационным.

Радиоволновый контроль основан на том, что все металлы являются препятствием для радиоволн, отражая либо поглощая их (поглощение радиоволн происходит путем их преобразования в электрический ток в металле, если этот металл надежно заземлен).

Сквозной (радиотеневой) метод относится к классу методов прохождения. Он состоит в том, что сквозь исследуемый объект пропускают поток радиоволн (рис. 31, а). Если на пути потока в объекте имеется металлическое включение, оно оттеняет часть волнового потока и амплитуда A сигнала на приеме падает относительно значения A_0 , полученного на свободном участке, что и является признаком присутствия металлического включения (рис. 31, б).

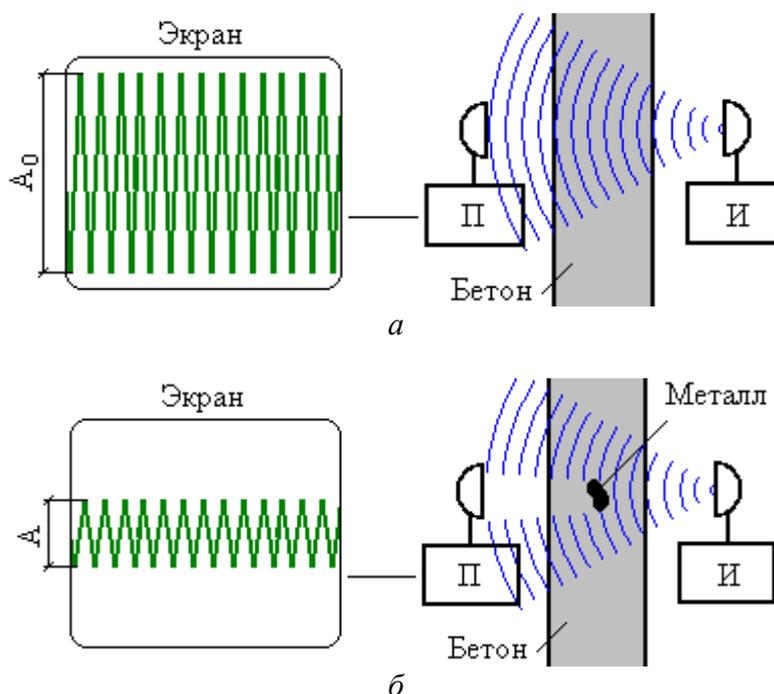


Рис. 31. Принцип сквозного радиоволнового метода:
а – на участке объекта без металлических включений;
б – на участке с металлическим включением

Среди достоинств сквозного метода можно отметить следующие:

- может быть реализован в непрерывном режиме излучения радиоволн, что существенно упрощает радиоаппаратуру;
- не критичен к заземлению исследуемых металлических включений.

Недостатки сквозного метода:

- требует двустороннего доступа к объекту с максимально соосным расположением антенн излучателя и приемника;
- не дает возможности определять глубину залегания металлических включений.

Радиолокационный метод относится к классу методов отражения. Он состоит в том, что в исследуемый объект запускают импульсы радиоволн (рис. 32). Если на пути потока в объекте имеется незаземленное металлическое включение, оно отражает часть волнового потока, и совмещенная по излучению и приему антенна прибора принимает радиоэхо от металлического включения.

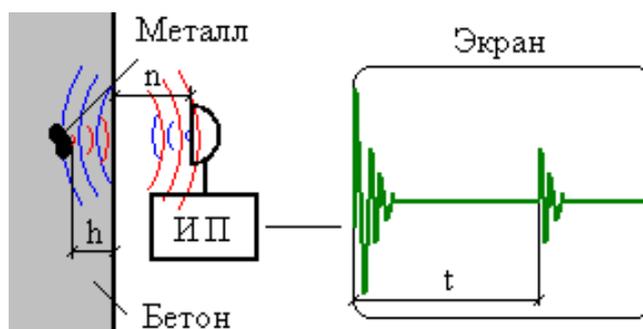


Рис. 32. Принцип радиолокационного метода

Достоинства радиолокационного метода:

- не требует двустороннего доступа к объекту;
- позволяет автоматически определять глубину залегания металлических включений:

$$h = 0,5C \cdot t - n, \quad (21)$$

где C – скорость распространения радиоволн (скорость света); t – время между посылкой импульса и приемом его отражения (измеряется в наносекундах); n – фиксированная величина зазора между поверхностью объекта и антенной.

Недостатком радиолокационного метода является то, что заземленные металлические включения дают слабое отражение радиоволн.

9. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Все методы радиационного контроля основаны на пропускании ионизирующего излучения через твердый материал объекта и поэтому относятся только к классу методов прохождения. Радиационные методы чаще всего применяют при контроле качества сварных соединений. В эту группу методов входят рентгенографический, гаммаграфический и рентгеноскопический.

Схема **рентгенографического метода** показана на [рис. 33](#). Источником излучения является специальный генерирующий аппарат, располагаемый по одну сторону от объекта, а на другой стороне крепится рентгеновская пленка, упакованная в гибкую светонепроницаемую кассету. Аппарат управляется дистанционно (ДУ) с помощью реле времени, которым задается время просвечивания (экспозиции). Требования к методу изложены в ГОСТ 7512-82 «Контроль неразрушающий. Радиографический метод» [14].

Гаммаграфический метод ([рис. 34](#)) отличается от рентгенографического тем, что здесь применяются негенерирующие (т.е. непрерывно самоизлучающие) мощные естественные источники гамма-излучения – элементы из радиоактивных металлов (уран, стронций, иридий, кобальт), помещенные в специальные переносные свинцовые колбы с дистанционно управляемым затвором.

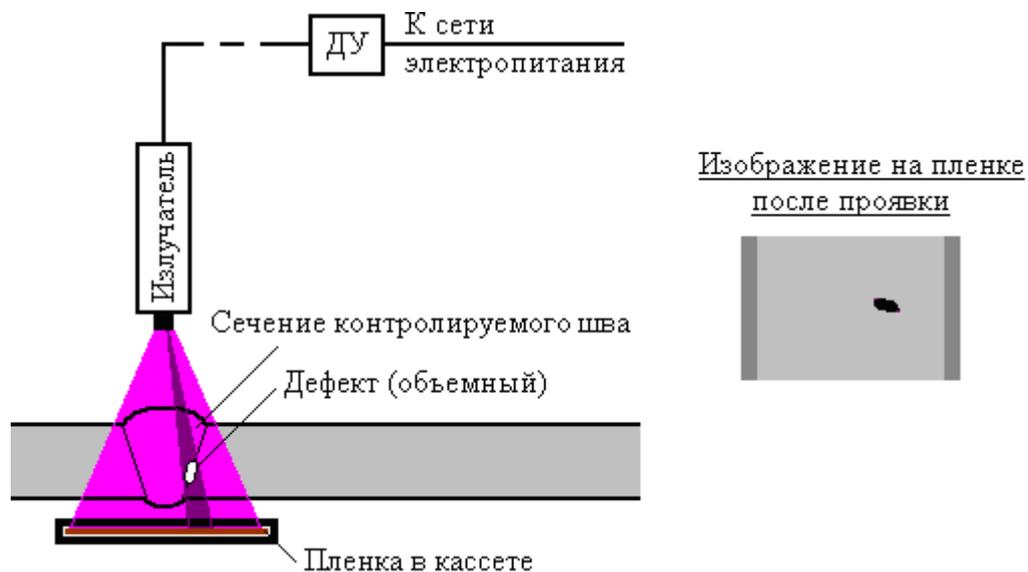


Рис. 33. Схема рентгенографического метода

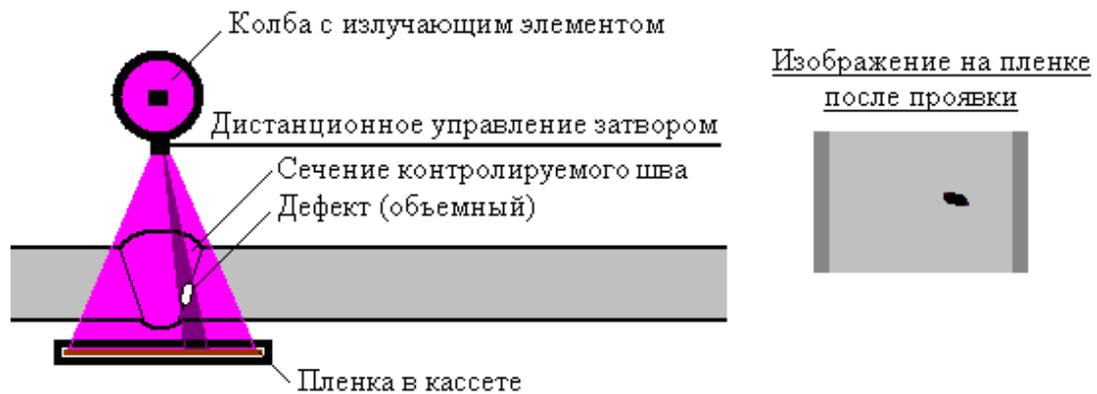


Рис. 34. Схема гаммаграфического метода

Этот метод характеризуется большей мощностью излучения, чем рентгенографический, и поэтому позволяет осуществлять контроль более толстых стальных объектов – до 40 мм (рентгенографический – до 25 мм). Он не требует электропитания, но лаборатории, применяющие его, должны быть обязательно обеспечены специальным хранилищем для источников излучения и специальным автомобилем для их перевозки.

В отличие от рентгенографического и гаммаграфического **рентгеноскопический метод** (рис. 35) – стационарный, так как в этом случае мощный рентгеновский аппарат, преобразователь изображения и контролируемый объект должны быть помещены в специальной камере (бункере). Толстые стены камеры выполнены из бетона со свинцовым наполнителем (дробь), помещение снабжено датчиками присутствия, а входная дверь – датчиком закрытия: система не будет работать, если дверь камеры открыта или в камере находятся люди. Из трех рассматриваемых здесь методов рентгеноскопический – самый мощный, он позволяет просвечивать стальные изделия толщиной до 80 мм. Получаемое изображение преобразуется в телевизионное и по кабелю передается на монитор, расположенный в удаленном от рентген-камеры помещении оператора.

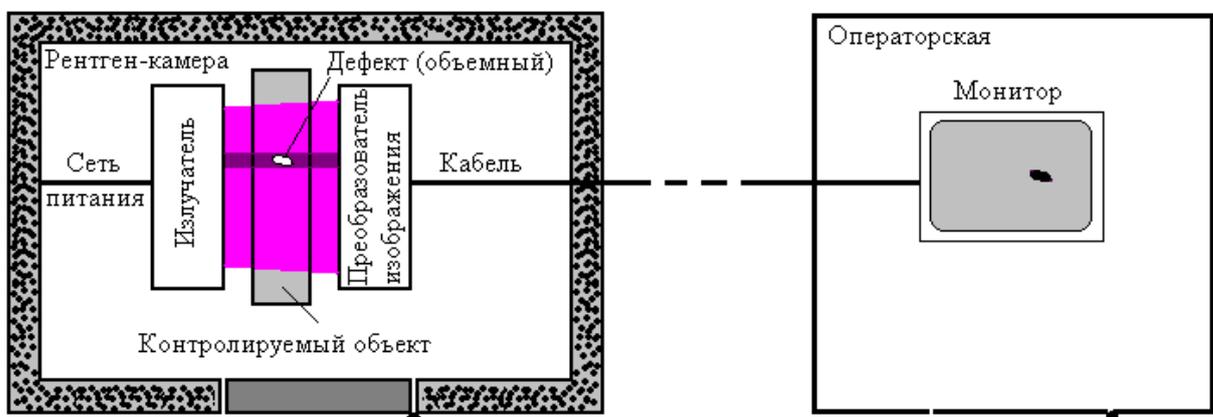


Рис. 35. Схема рентгеноскопического метода

Все радиационные методы связаны с высокой опасностью. Поэтому специальными нормативными документами [15, 16, 17, 18] предусмотрены следующие особые меры безопасности при их осуществлении:

1. При проведении рентгенографического и гаммаграфического контроля в зоне работ не должно быть посторонних лиц. Эта зона ограничивается радиусом 25 м от места съемки для рентгенографического и 50 м для гаммаграфического метода. При этом источник излучения следует ориентировать в таком направлении, в котором наименее вероятно присутствие людей.

2. Участок проведения рентгенографического и гаммаграфического контроля должен быть обнесен съемным ограждением. В перекрытых проходах и проездах должен быть вывешен знак радиационной опасности (рис. 36).

3. Оператор должен быть одет:

при проведении рентгенографического контроля – в белый халат или комбинезон и в белый головной убор;

при проведении гаммаграфического контроля – также и в специальный защитный фартук со свинцовым наполнителем.

4. При проведении контроля любыми радиационными методами оператор должен иметь при себе счетчик Гейгера для контроля окружающего радиационного фона, а также индивидуальный нагрудный радиационный дозиметр для фиксирования накопленной дозы облучения. В процессе экспозиции оператор должен следить за окружающим фоном и в случае превышения допустимого уровня удалиться от источника на безопасное расстояние. Лица, у которых индивидуальным дозиметром зафиксировано превышение допустимой дозы облучения, отстраняются от участия в проведении радиационного контроля на срок, устанавливаемый органами Роспотребнадзора.

5. На наружной стороне дверей помещений для хранения источников излучения, дверей рентген-камер для рентгеноскопического контроля и на бортах спецавтомобилей для перевозки средств гаммаграфического контроля должен быть нанесен знак радиационной опасности. На двери рентген-камеры рекомендуется смонтировать подсветку знака с загоранием синхронно с включением аппарата. Спецавтомобиль должен быть также снабжен желтым проблесковым маячком и специальным поддоном в днище салона для доставки неисправных источников к месту их захоронения (заклинивание открытого затвора источника гамма-излучения является радиационной аварией, и такой источник ремонту не подлежит).

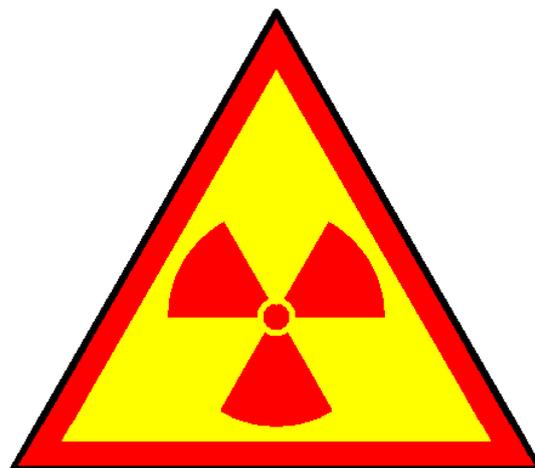


Рис. 36. Знак радиационной опасности

6. Все лаборатории, осуществляющие радиационный контроль, должны иметь соответствующую лицензию и санитарно-гигиенический паспорт (заключение), выдаваемые органами Роспотребнадзора. Отдельными паспортами должны быть обеспечены рентген-камеры и спецавтомобили.

Достоинства радиационных методов – наглядность результатов контроля и возможность выявления мелких округлых дефектов (пор), которые ультразвуковой дефектоскопией определяется ненадежно.

Кроме высокой опасности, радиационные методы обладают следующими недостатками:

1. Аппаратура не склонна к портативности (вес наиболее легких аппаратов серии «АРИНА» и «МИРА» в полном комплекте достигает 20 кг).

2. Аппараты для рентгеновского контроля характеризуются большим расходом электроэнергии; рентгенографический и гаммаграфический методы – расходом пленки и средств ее химической обработки.

3. Невозможно обнаружить наиболее опасные плоскостные дефекты, так как они практически не влияют на торможение лучистой энергии: совокупная плотность остается одинаковой в области дефекта и вне ее (рис. 37).

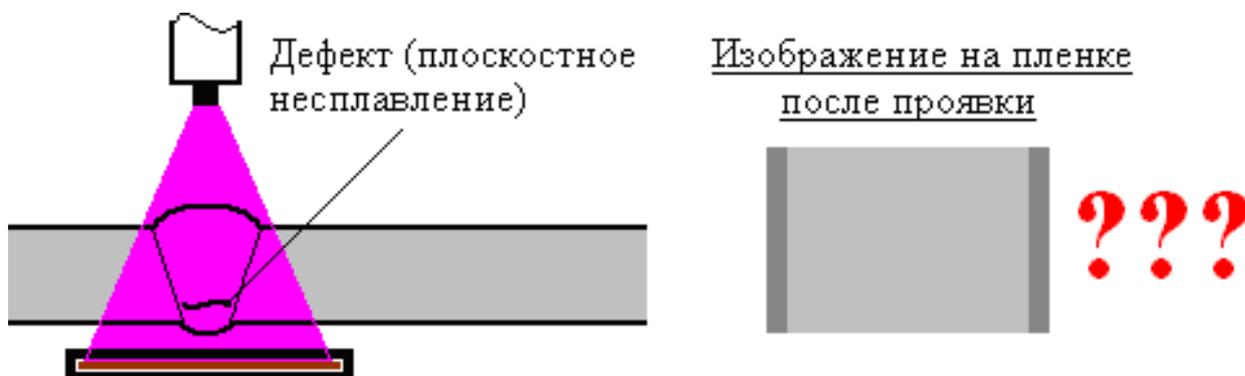


Рис. 37. Пропуск радиационным методом существующего дефекта

В конце 1990-х гг. по результатам обширных международных исследований было установлено, что достоверность радиационного контроля металла в среднем составляет лишь 19 %. В связи с этим интерес к радиационным методам в настоящее время постепенно снижается: большинство лабораторий предпочитает применять ультразвуковой контроль, втрое более достоверный и полностью безопасный.

10. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Колебание – это движение точки относительно некоторого ее среднего положения, обладающее повторяемостью, например колебание маятника.

В акустике обычно рассматривают колебания точки среды относительно положения, в котором точка находилась в покое.

Волны – колебательные движения, распространяющиеся в пространстве: колебания одной точки передаются соседней и т.д. В большинстве видов неразрушающего контроля (радиационном, оптическом, тепловом, радиоволновом) используются электромагнитные колебания и волны. В отличие от них в акустических видах используются *упругие механические колебания и волны в твердой среде*.

10.1. Теоретические основы метода*

Упругость – свойство точек среды возвращаться к первоначальному состоянию после прекращения воздействия силы. Жидкие, газообразные и твердые среды восстанавливают свой объем после сжатия или разрежения, но под действием сил инерции точки продолжают двигаться после достижения первоначального состояния. В результате сжатие переходит в растяжение, а потом опять в сжатие – возникают упругие колебания. Такой процесс распространяется в пространстве и образует упругую волну (рис. 38, а, б).

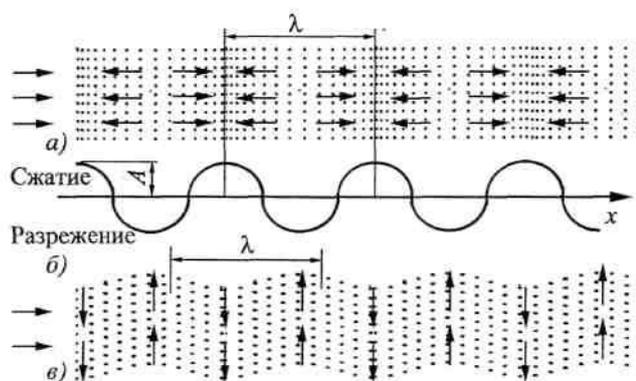


Рис. 38. Продольная (а) и поперечная (в) волны и волновой процесс (б)

Обычно акустические колебания происходят в области, где механическое напряжение пропорционально деформации для твердого тела или давление пропорционально смещению для жидкости, газа. Это область упругого взаимодействия, ей соответствует **линейная акустика**. Однако при больших отклонениях от положения равновесия пропорциональность нарушается. Это область **нелинейной акустики**. Неразрушающему акустическому контролю, как правило, соответствует только область линейной акустики. Некоторые вопросы, связанные с применением нелинейной акустики, рассмотрены в справочнике [26, т. 1].

* Данный параграф написан в соответствии со справочником [26, т. 1].

Колебательный процесс характеризуется двумя основными величинами: частотой и амплитудой колебаний.

Частота – количество колебаний в секунду (с). Ее обозначают буквой f . Одно колебание в секунду – 1 *герц* (Гц). При УЗ-контроле обычно частоту колебаний измеряют в *мегагерцах* (МГц) – миллионах колебаний в секунду или *килогерцах* (кГц) – тысячах герц. В зависимости от частоты f упругие колебания и волны называют по-разному (табл. 9). При высокочастотном акустическом контроле обычно применяют колебания частотой 0,5–10 МГц, а при низкочастотном – частотой 0,015–0,1 МГц.

Длительность одного колебания называют *периодом* T . Его измеряют в секундах или микросекундах (мкс):

$$f = 1/T. \quad (22)$$

Колебания от точки к точке среды передаются с определенной скоростью – *скоростью распространения звука* c . Расстояние, пробегаемое волной за один период колебаний, называют *длиной волны* λ :

$$\lambda = cT = c/f. \quad (23)$$

Таблица 9

Диапазон частот упругих колебаний

Название колебаний и волн	Качественное определение	Диапазон частот, Гц	
		физический	условный
Инфразвук	Ниже границы слухового диапазона человека	<16–25	<20
Звук	Диапазон слуха человека	От 16–25 до $(15–20) \cdot 10^3$	20–20 000
Ультразвук	Выше границы слухового диапазона человека	От $(15–20) \cdot 10^3$ до 10^9	$(20 \cdot 10^3)–10^9$
Гиперзвук	Длина волны меньше длины свободного пробега молекул воздуха	> 10^9	

Скорость продольных звуковых волн во многих металлах приблизительно равна 6 000 м/с = 6 мм/мкс (сталь, алюминий, титан). При частоте 6 МГц длина такой волны составляет около 1 мм. Скорость поперечных волн, как правило, около половины от скорости продольных, следовательно, длина поперечных волн приблизительно вдвое короче. Волны длиной ~ 1 мм (точнее, 0,2–10 мм) обычно употребляются при высокочастотном УЗ-контроле металлов. Небольшая длина волны по сравнению с размером преобразователя позволяет создать направленно распространяющуюся волну, которую рассматривают как пучок лучей.

В акустике часто применяют понятия «*круговая (циклическая, угловая) частота*»

$$\omega = 2\pi f \quad (24)$$

и «*волновое число*»

$$k = \omega / c = 2\pi\lambda. \quad (25)$$

Амплитуда колебаний – это наибольшее отклонение точки от положения равновесия. Кроме того, упругие колебания характеризуют разными иными физическими величинами. Для жидкостей и газов чаще всего используют следующие величины: *смещение* и частиц из положения равновесия, *скорость движения частиц (колебательную скорость)* и *акустическое давление* p .

Для твердых тел обычно используют *вектор смещения* \vec{u} и *тензор акустических напряжений*. В дальнейшем для упрощения формул колебания в твердом теле будем, как правило, характеризовать их акустическим давлением, что не вполне правомерно, но существенно упрощает математический аппарат. Там, где возникает необходимость, учитываются особенности твердого тела.

Будем обозначать амплитудные значения соответствующими большими буквами, а в общем случае – буквой A . В УЗ-дефектоскопии обычно применяют колебания с амплитудой смещения 10^{-11} – 10^{-4} мм. Акустическое напряжение, возникающее при этом в стали на частоте 2 МГц, достигает 10 – 10^8 Па (паскаль).

Энергия акустической (звуковой) волны – это добавочная энергия, обусловленная наличием этой волны. Энергия акустической волны в единице объема среды называется *плотностью звуковой энергии*. Она состоит из кинетической и потенциальной частей. Для плоской бегущей звуковой волны кинетическая и потенциальная части энергии равны и плотность полной энергии, выраженная через амплитуду давления P , определяется по формуле

$$E = P^2 / (\rho c^2), \quad (26)$$

где ρ – плотность среды.

Интенсивность (сила) звука J – средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, за единицу времени. Для периодической звуковой волны усреднение проводится либо за промежуток времени, намного больший по сравнению с периодом, либо за целое число периодов. Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность, выраженная через амплитуды давления P и смещения U , равна

$$J = P^2 / (2\rho c) = 0,5\rho c \omega a^2 U^2. \quad (27)$$

Интенсивность используемых при контроле волн обычно весьма мала: $< 10^{-5}$ Вт/м в месте излучения УЗ. При УЗ-контроле, как правило, регистрируют не интенсивность, а амплитуду волн.

В УЗ-контроле обычно измеряют ослабление амплитуды A' относительно амплитуды возбужденных в ОК колебаний A_0 . Для этого применяют логарифмические единицы сравнения – *децибелы* (дБ). Выражения в децибелах, когда это необходимо подчеркнуть, будем выделять угловыми скобками $\langle \rangle$:

$$\langle A' / A_0 \rangle = 201 g \quad (A' / A_0) = 101 g (J' / J_0). \quad (28)$$

Поскольку $A' < A_0$, децибелы будут отрицательными, однако в УЗ-дефектоскопии знак «-» принято опускать. На [рис. 39](#) приведена номо-

грамма перевода относительных единиц в положительные и отрицательные децибелы.



Рис. 39. Номограмма перевода относительных величин в децибелы.
Попарно используют шкалы I–I', II–II', III–III'

Пример. Как отношение амплитуд $A' / A_0 = 0,045$ выражается в децибелах? Находим деление 0,045 на шкале II'. Против него на шкале II расположено $\langle A' / A_0 \rangle = 26,9$ дБ со знаком «-», но его не указываем.

Если потери невелики, то возбужденный колебательный процесс продолжается очень долго. При отсутствии потерь возникают *непрерывные гармонические* колебания, т.е. изменяющиеся по синусоидальному закону. В УЗ-контроле обычно колебания возбуждают и тут же (через несколько микросекунд) стараются погасить. В результате наблюдается кратковременный волновой процесс – *импульс*.

Одним из параметров колебаний и волн является их *фаза*. Она характеризует состояние колебательного процесса в определенный момент времени. Если колебания непрерывные, то фаза колебаний и само колебание повторяется через каждый период. Для импульсов строгая повторяемость параметров колебаний через период отсутствует. Говорят, что две непрерывные гармонические волны находятся в противофазе, если их фазы отличаются на полпериода. Если на какую-либо точку действуют две такие волны с одинаковыми амплитудами, точка не колеблется, а если фазы этих волн совпадают, амплитуда колебаний увеличивается в 2 раза. Явление наложения волн с учетом их фазы называют *интерференцией*.

10.2. Методы акустического контроля

Из всех видов неразрушающего контроля акустический – самый «богатый» по количеству методов. Классификация этих методов приведена в [табл. 10](#), их описание – в [табл. 11](#).

Таблица 10

Методы акустического контроля

Акустические методы контроля																	
Активные										Пассивные							
Ультразвуковые методы бегущих волн						Спектральные				Импедансный	Акустико-эмиссионный	Спектральные					
Основанные на прохождении		Комбинированные		Основанные на отражении		Вынужденных колебаний		Свободных колебаний				Шумо-диагностический	Вибродиагностический				
Теневой амплитудный	Теневой временной	Велосиметрический	Зеркально-теневой	Эхо-теневой	Эхо-сквозной	Эхометод	Эхо-зеркальный метод	Дельта-метод	Дифракционно-временной	Ревверберационный	Толщинометрия	Локальный	Интегральный	Локальный	Интегральный		

Пассивные методы – методы контроля, при которых не требуется внесение в материал энергии данного вида (дефект сам проявляет себя ее излучением).

Активные методы – методы контроля, при которых в материал вносится энергия данного вида и о состоянии материала судят по явлениям, происходящим с этой энергией.

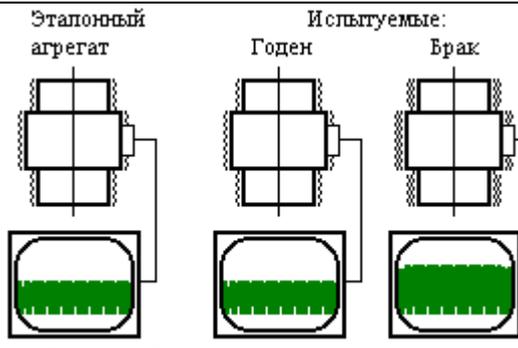
Таблица 11

Краткое описание методов акустического контроля

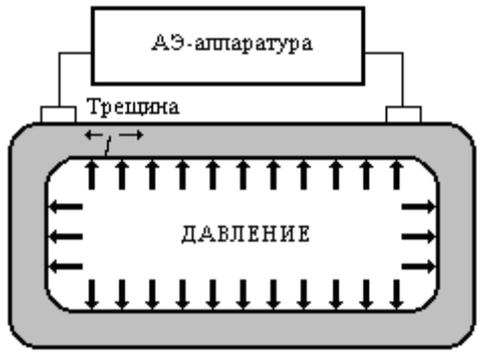
Метод	Схема контроля	Описание
Пассивные методы		
Спектральные методы		
Шумо-диагностический (вариант)		<p>На работающих однотипных агрегатах измеряют амплитудно-частотные характеристики шумов, которые сравнивают с таковыми для эталонного (заведомо бездефектного) агрегата. В случае кардинального отличия от характеристик эталона агрегат выводят из эксплуатации</p>

10. АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

10.2. Методы акустического контроля

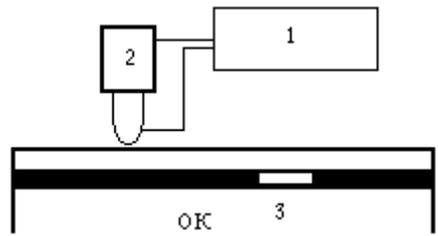
Вибродиагностический		На работающих однотипных агрегатах измеряют характеристики активности вибрации, которые сравнивают с такими для эталонного (заведомо бездефектного) агрегата. В случае кардинального отличия от характеристик эталона агрегат выводят из эксплуатации
	Экран виброанализирующей аппаратуры	

Акустико-эмиссионный

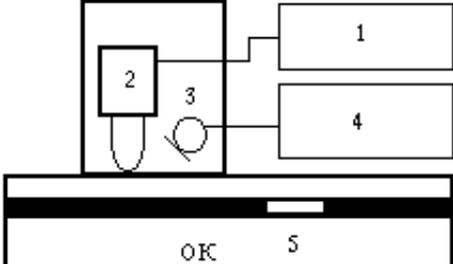
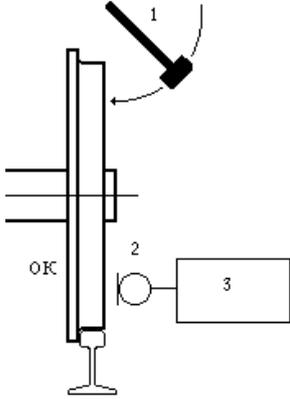
Вариант		Объект контроля подвергают механическому напряжению (например, в сосуде создают внутреннее давление). При этом развивающиеся трещины подрастают скачками. При каждом акте подрастания (скачке) от венца трещины в материал излучается импульс акустической энергии («щелчок», эмиссия). Такие импульсы улавливаются и анализируются специальной аппаратурой
---------	--	---

Активные методы

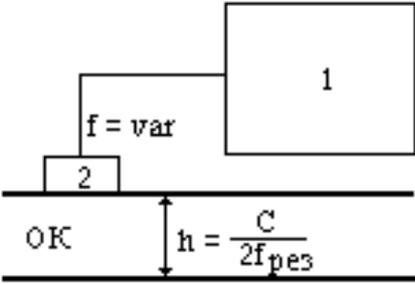
Импедансный метод

Вариант		Прибор 1 возбуждает непрерывные акустические колебания в излучающей пьезопластине, помещенной сверху датчика 2. Принимающая пьезопластина расположена внизу датчика и разделена с излучающей стальным стержнем. Если слоистый ОК качественно склеен, то в контакте наконечника с поверхностью ОК он хорошо демпфирует (затормаживает) приемную пьезопластину, и большая доля звуковой энергии в ней вынуждена переходить в электрическую. Если под датчиком дефект 3 (непроклей), то в этой зоне импеданс ОК (сопротивление колебаниям) меньше, демпфирование слабее и амплитуда электросигнала на приемной пластине ниже
---------	---	---

Спектральные методы свободных колебаний

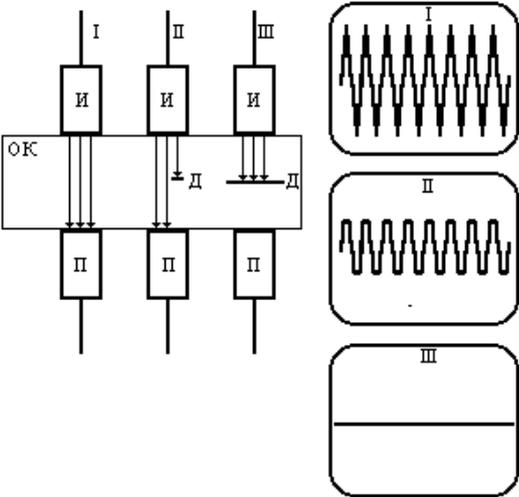
<p>Локальный</p>		<p>Используют для контроля многослойных неметаллических и композитных материалов. Вибратором 2 к точке объекта контроля прилагают колебания, вырабатываемые генератором 1. Ответные колебания принимают микрофоном 3. Индикатор 4 покажет резкое изменение колебаний при расположении вибратора над дефектом 5</p>
<p>Интегральный (вариант)</p>		<p>Объект контроля (например, железнодорожное колесо) подвергают удару специальным молотком 1. Ответный звук принимают микрофоном 2 и при помощи специальной аппаратуры 3 анализируют его частотный спектр. По характеру спектра судят о наличии или отсутствии дефектов в ОК</p>

Спектральные методы вынужденных колебаний

<p>Локальный резонансный (резонансная толщинометрия)</p>		<p>Толщиномер 1 посылает на преобразователь 2 колебания переменной частоты f. Когда частота достигает такого значения, при котором длина волны в ОК $\lambda = C/f = 2h$, объект входит в активный резонанс. Это значение частоты (резонансное) фиксируется, и по нему прибор определяет толщину ОК h (C – скорость звука в ОК)</p>
<p>Интегральный резонансный</p>		<p>Обширный участок поверхности ОК подвергают непрерывным колебаниям при помощи вибраторов 1 и покрывают алюминиевой пудрой 2. В зоне дефекта 3 вследствие резонанса колебания более активны, и поэтому оседание пудры меньше</p>

Ультразвуковые методы бегущих волн

Методы прохождения

<p>Теневой амплитудный</p>		<p>Импульсные или непрерывные ультразвуковые волны пропускают сквозь плоский ОК от излучателя (И) к приемнику (П). Если между И и П дефектов нет, то волны проходят беспрепятственно, и на приеме – сигнал большой амплитуды (вариант I). Малый дефект (Д) оттеняет часть потока, и амплитуда на приеме падает (вариант II). Крупный дефект полностью перекрывает поток, обнуляя сигнал на приеме (вариант III). Глубина залегания и размеры дефекта аппаратурно не оцениваются. Необходим двусторонний доступ к ОК</p>
----------------------------	---	---

Метод	Схема контроля	Описание
Теневой временной		<p>Импульсы ультразвуковых волн пропускают сквозь плоский ОК от излучателя И к приемнику П. Если между И и П есть дефект Д средней величины, он оттеняет часть потока, а отклоняющиеся боковые лучи падают на его край, где претерпевают дифракцию. Попадая в приемник несколько позже прямого потока 1, дифрагированные лучи 2 образуют отдельный слабый сигнал. По разности времени прихода сигналов судят о размерах дефекта. Глубина залегания не определяется. Необходим двусторонний доступ к ОК</p>
Велосиметрический (вариант)		<p>Точечные излучатель и приемник жестко скреплены. Излучатель возбуждает в плоском ОК изгибные волны Лэмба моды a_0. Дистанция между осями И и П приблизительно равна длине волны. Поскольку фазовая скорость волн Лэмба зависит от толщины целого слоя, а дефект делит эту толщину, то в дефектной зоне фазовая скорость понижается и фаза сигнала на приеме сдвигается относительно фазы на излучении. Сдвиг фаз указывает на дефект</p>
<i>Методы отражения</i>		
Эхометод		<p>В совмещенном I или раздельном II режиме работы аппаратуры импульс ультразвуковых волн посылается в ОК. Если на его пути встречается дефект, то импульс частично отражается от него и возвращается в преобразователь, образуя сигнал на приеме (эхосигнал). В раздельном режиме изображение посылаемого (зондирующего) импульса на экране отсутствует</p>

Метод	Схема контроля	Описание
Эхо-зеркальный метод («тандем»)		<p>Предназначен для оценки формы и размеров заведомо выявленного внутреннего дефекта в плоском объекте. В раздельно-совмещенном режиме аппаратуры дефект облучается импульсами ультразвуковых волн. Если эхо в ИП лишь немного превышает эхо в П, и оба сигнала средней амплитуды (вариант I), предполагают круглую форму дефекта. Если сигнал в ИП мощный, а в П отсутствует (вариант II), предполагают плоскую форму и наклонную ориентацию. Если не удается получить эхо обоими преобразователями (вариант III), предполагают горизонтальную плоскую форму. Если эхо в П выше, чем в ИП (вариант IV), то дефект плоский вертикальный. Разводя и сближая ИП и П, по дистанции между ними в позициях пропадаания сигналов можно оценить высоту дефекта</p>
Дельта-метод		<p>Применяется для оценки высоты заведомо выявленных внутренних дефектов. В раздельном режиме работы аппаратуры импульс ультразвуковых волн посылается в ОК так, что облучается верхний край дефекта (позиции I). По дифрагированному эхосигналу определяют глубину залегания верхнего края. Затем, раздвигая И и П, находят позицию облучения нижнего края (II). Разность показаний глубины есть высота дефекта</p>
Дифракционно-временной		<p>Применяется аналогично дельта-методу, но прием дифрагированных сигналов от краев дефекта осуществляется прямым датчиком, установленным над дефектом, в том числе с использованием отражения от противоположной поверхности ОК</p>

Метод	Схема контроля	Описание
Реввербационный		<p>В совмещенном режиме работы аппаратуры импульс ультразвуковых волн посылается в слоистый (клееный) ОК. Если склейка качественная (I), то основная часть импульса уходит через клей, а малая доля отражается обратно. На поверхности ОК часть этой доли идет в ИП, образуя первый пик, а часть вновь углубляется в ОК, и с ней происходит то же самое. Так как основная доля всегда хорошо проходит вглубь ОК, то реверберации в верхнем слое быстро ослабевают и на экране амплитуда пиков убывающая. Дефект (D) типа «непроклей» препятствует уходу сигнала (II), и в этом случае реверберации в первом слое мощные</p>
Толщинометрия		<p>Толщиномер измеряет время t пробега сигнала до противоположной поверхности ОК и обратно и определяет толщину ОК как $h = 0,5C t$, где C – известная скорость звука в данном материале</p>

Комбинированные методы

Эхо-теневой		<p>В раздельно-совмещенном режиме аппаратуры импульсы ультразвуковых волн посылают в ОК. Если на тракте есть дефект, то импульс частично отражается от него в совмещенный преобразователь (ИП) как эхосигнал. Отдельным приемником (П) оценивают падение амплитуды сквозного сигнала, вызванное дефектом. Обладает качествами эхометода + подтверждение дефекта теневым принципом, но требует двустороннего доступа к ОК</p>
-------------	--	--

Метод	Схема контроля	Описание
Зеркально-тепловой		<p>В совмещенном (прямой ИП) или раздельном (наклонные И и П) режиме аппаратуры импульсы ультразвуковых волн посылают в ОК. Если на тракте есть дефект, то он преграждает путь, вызывая падение донного сигнала. По падению донного сигнала судят о наличии и величине дефекта. Необходим односторонний доступ к ОК, при наклонном – выявление дефектов любой формы и ориентации. Не дает глубину залегания дефекта</p>
Эхо-сквозной		<p>Применяется только в металлургической промышленности на выходе линий проката листов. В иммерсионной ванне (контактная жидкость – веретенное масло) лист на вальцах прокатывается между рядами (матрицами) из совмещенных (ИП) и дополнительных приемных (П) преобразователей. При нормальном состоянии листа (вариант I) наблюдается строго упорядоченное расположение эха от границы верхнего слоя жидкости и ОК (1), от границы ОК и нижнего слоя жидкости (2) и сквозного сигнала (3). Варианты II–IV показывают смещение сигналов при попадании в область контроля локальных утонений. Если в области контроля оказывается расслоение или закат (вариант V), то между 1-м и 2-м сигналами появляется мощное эхо от него (4), а сигналы 2 и 3 ослабевают вплоть до обнуления. Ряды ИП и П выстраиваются по всей ширине листа. Метод требует специальной многоканальной аппаратуры и применяется только в автоматическом режиме</p>

Спектральные методы (среди пассивных – шумодиагностический и вибродиагностический; среди активных – методы свободных и вынужденных колебаний) основаны на анализе параметров непрерывных не перемещающихся по объекту колебаний.

Методы бегущих волн основаны на анализе параметров непрерывных (теневой амплитудный) или импульсных (прочие) перемещающихся по объекту колебаний (волн).

Шумодиагностический метод применяется не только на динамически работающих агрегатах, но и в целях течеискания на трубопроводах, сосудах и резервуарах. Течи обнаруживаются по шуму, создаваемому трением истекающей через дефект среды о его края.

Вибродиагностический метод используется как обязательный при диагностике компрессоров газопроводных систем в металлургическом производстве.

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод обеспечивает выявление развивающихся дефектов посредством регистрации и анализа акустических волн, возникающих в процессе пластической деформации и роста трещин в контролируемых объектах. Кроме того, метод АЭ позволяет выявить истечение рабочего тела (жидкости или газа) через сквозные отверстия в контролируемом объекте. Указанные свойства метода АЭ дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на объект.

Характерными особенностями метода АЭ, определяющими его возможности, параметры и области применения, являются следующие:

1. Метод АЭ обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности.

2. В производственных условиях метод АЭ позволяет выявить приращение трещины на десятые доли миллиметра. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по расчетным оценкам составляет порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм, что указывает на весьма высокую чувствительность к растущим дефектам.

3. Свойство интегральности метода АЭ обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких датчиков АЭ, неподвижно установленных на поверхности объекта.

4. Метод АЭ позволяет проводить контроль различных технологических процессов и процессов изменения свойств и состояния материалов.

5. Положение и ориентация дефекта не влияют на его выявляемость.

Метод АЭ может быть использован для контроля объектов при их изготовлении – в процессе приемочных испытаний, при периодических технических освидетельствованиях, в процессе эксплуатации.

Целью АЭ-контроля является обнаружение, определение координат и слежение (мониторинг) за источниками акустической эмиссии, связанными

с несплошностями на поверхности или в объеме стенки сосуда, сварного соединения и изготовленных частей и компонентов. Источники АЭ рекомендуются при наличии технической возможности оценить другими методами неразрушающего контроля. АЭ-метод может быть использован также для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения испытаний и предотвращения разрушения изделия. Регистрация АЭ позволяет определить образование свищей, сквозных трещин, протечек в уплотнениях, заглушках, арматуре и фланцевых соединениях.

АЭ-контроль технического состояния обследуемых объектов проводится только при создании в конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников АЭ. Для этого объект подвергается нагружению силой, давлением, температурным полем и т.д. Выбор вида нагрузки определяется конструкцией объекта и условиями его работы, характером испытаний. На [рис. 40](#) приведены фотографии некоторых современных акустико-эмиссионных систем.

Импедансный метод (от англ. impedance – сопротивление) широко применяется в аэрокосмической промышленности. Только этот метод позволяет достоверно оценить качество спайки сверхлегких сотовых панелей, применяемых в конструкциях элементов крыльев самолетов и корпусов спутников.

Локальный метод свободных колебаний используют в военной промышленности для проверки качества присоединения звукопоглощающих покрытий на корпусах подводных лодок.

Применение *интегрального метода свободных колебаний* пассажиры железнодорожных поездов могут наблюдать во время стоянки на крупных станциях.

Резонансные методы вынужденных колебаний в настоящее время практически не используются, так как задачи дефектоскопии и толщинометрии более точно решают импульсные ультразвуковые методы.

Теневой амплитудный метод – самый первый в истории возникновения ультразвуковой дефектоскопии (был открыт в 1928 г. в России инженером С.Я. Соколовым). Используется только при контроле крупных отливок и поковок. Достоинствами метода являются то, что он может быть реализован в простом непрерывном режиме излучения ультразвука, и то, что волны проходят толщину объекта лишь в одну сторону (это снижает потери их амплитуды от затухания на крупном зерне материала объекта).

Недостатки теневого амплитудного метода:

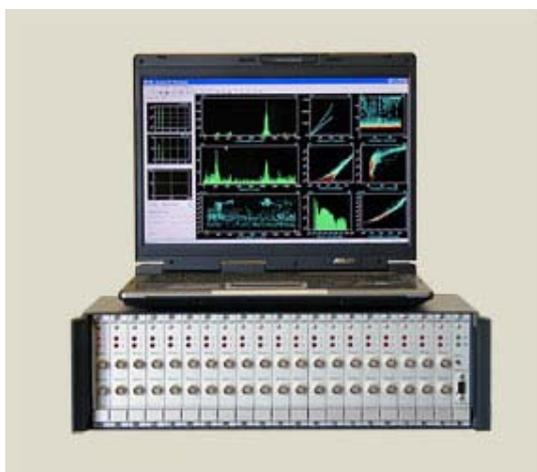
- требует двустороннего доступа к объекту с соосным расположением излучателя и приемника;
- не позволяет определять глубину залегания дефектов.



а



б



в



г



д



е

Рис. 40. Современные акустико-эмиссионные системы: а – «Малахит АС-12А» (Россия); б – «Малахит АС-14А» (Россия); в – «Малахит АС-15А» (Россия); г – «ЭКСИТОН-4080» (Россия); д – «АФ-44» (Молдова); е – «Лель» («А-Line 32D», США)

Теневой временной метод является продуктом совершенствования теневого амплитудного метода с применением импульсного режима. Он позво-

ляет не только выявить внутренний дефект в поковке или отливке, но и оценить его размеры.

Велосиметрический метод (от англ. velocity – скорость и греч. «метрико» – измеряю), кроме показанного варианта, в ином виде применяется для оценки качества (определения марки) бетона. Объект из бетона известной толщины подвергают прозвучиванию по принципу теневого метода, измеряя в нем скорость звука. Для бетона характерна ярко выраженная прямая зависимость скорости звука от его качества (дисперсности). Поэтому метод нашел применение в строительстве [19].

Ни один из других ультразвуковых методов контроля в настоящее время не может сравниться по популярности с *эхометодом*. Информативность, мобильность, безопасность, портативность, экономичность и автономность электропитания, достаточность одностороннего доступа к объекту, а главное – более высокая достоверность контроля – вот те качества, в которых этот метод значительно выигрывает перед рентгеном. Если рентгену в самом мощном (рентгеноскопическом) варианте доступны для контроля стальные объекты не толще 80 мм, то для ультразвукового эхометода этот размер может измеряться метрами. Эхометод позволяет не только выявлять внутренние дефекты, но и оценивать их величину, отличать плоскостные дефекты от объемных, определять глубину залегания.

Единственный показатель, в котором радиационные методы имеют приоритет перед ультразвуковым эхометодом, – иллюстративность результатов контроля. Но и эта проблема в акустике сегодня решается с использованием приборов, изображенных на [рис. 41](#). Например, на [рис. 41, в](#) приведена фотография современного ультразвукового дефектоскопа X-32, построенного на так называемых фазированных акустических решетках (ФАР) и показывающего приблизительные образы выявляемых дефектов. Применение эхометода регламентируется стандартами [20, 21, 22, 23, 24, 25].

В настоящее время трудно найти такую отрасль промышленности, где бы не применялся ультразвуковой эхометод в целях оценки качества сварных соединений, металлических и неметаллических деталей и элементов.

Эхо-зеркальный метод ранее при контроле сварных соединений котлоагрегатов вменялся как обязательный для оценки формы и размеров дефектов, заведомо выявленных эхометодом, но из-за отрицательного влияния габаритов датчиков он мог быть использован только на объектах толщиной более 40 мм. Сейчас такие задачи успешно решаются с помощью *дифракционно-временного* и *дельта-метода*.

Реверберационный метод применяется для проверки качества межметаллической адгезии в биметаллах, например, при диагностике состояния плакирующих наплавов на внутренней поверхности варочных котлов бумагоделательного производства.

Ультразвуковая толщинометрия (импульсным эхометодом) – неотъемлемая процедура при диагностировании сосудов, трубопроводов, резервуаров, а также в судостроительном и судоремонтном производстве. На объектах Ростехнадзора в большинстве случаев удовлетворяет точность измере-

ния $\pm 0,1$ мм, но некоторые современные толщинометры (например, выпускаемые германской фирмой «Крауткремер») позволяют измерять толщины от 1 до 50 мм с точностью $\pm 0,001$ мм (рис. 42).



а



б



в

Рис. 41. Примеры ультразвуковых дефектоскопов: а – цифроаналоговый ультразвуковой дефектоскоп «EPOCH LT»; б – выявление подобным дефектоскопом модели дефекта в стальном образце; в – ФАР-дефектоскоп «X-32»

Эхо-теневой метод применяется как вспомогательный при лабораторном контроле небольших, но ответственных деталей. Для него необходим специальный дефектоскоп с дополнительным приемным каналом.

Зеркально-теневой метод используется как дополнительный (подтверждающий результаты эхометода) при контроле толстых сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов в электроэнергетике.

Эхо-сквозной метод, в частности, реализован российско-германской компанией «Нординкрафт» в виде стационарной установки для контроля листового проката на Череповецком металлургическом комбинате ([рис. 43](#)).



Рис. 42. Измерение толщины стенки трубы ультразвуковым толщиномером



Рис. 43. Установка «Нординкрафт» для автоматического контроля эхо-сквозным методом листового проката на Череповецком металлургическом комбинате

Система автоматического контроля предполагает полное отсутствие оператора контроля на этапе расшифровки данных датчика, что существенно повышает точность и достоверность контроля.

11. ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ

Тепловой вид неразрушающего контроля включает в себя методы инфракрасной дефектоскопии и пирометрии.

Инфракрасная дефектоскопия нашла применение в гражданской промышленности лишь в конце 1970-х гг. Метод основан на том, что в местах дефектов металла подогретого объекта или в зонах утонения стенок трубопровода с подогретой средой тепло передается от внутренней к внешней поверхности стенки несколько в большей степени, чем в окружающих бездефектных зонах. Тепловизор преобразует картину теплового распределения на поверхности объекта в видеоизображение. Чувствительность современных тепловизоров исчисляется десятыми долями градуса.

Внешний вид некоторых тепловидеокамер показан на [рис. 44](#). Все приборы снабжены лазерным указателем рассматриваемой зоны.



Рис. 44. Современные модели тепловизоров: *а* – «SAT S-160»; *б* – «SAT S-280»; *в* – «SAT HY-6800»; *г* – «SAT G-90».

На современном этапе дистанционность инфракрасного метода дефектоскопии характеризуется удовлетворительной достоверностью контроля объекта, нагретого относительно окружающей среды на 50 °С, с расстояния до 50 м. Результаты контроля в режиме реального времени записываются на магнитный или лазерный носитель. Распределение температуры принимаемого теплоизлучения по шкале Цельсия характеризуется тонами и оттенками цветового изображения на тепловидеокадре.

На [рис. 45](#) показан процесс обследования тепловизором агрегата (электродвигателя), а на [рис. 46](#) приведены некоторые примеры термограмм – итоговых документов инфракрасной дефектоскопии объектов. Из последнего примера видно, насколько показательны результаты тепловидеосъемки даже при контрасте температур между объектом и внешней средой лишь в 5 °С. Инфракрасная дефектоскопия все более широко применяется при диагностике котлоагрегатов, паропроводов, теплотрасс, промышленных вытяжных труб, объектов металлургического производства. Достоинствами метода яв-

ляются дистанционность и возможность контроля объекта в процессе его эксплуатации. Недостаток – высокая стоимость аппаратуры.



Рис. 45. Процесс обследования тепловизором работающего агрегата

Пирометрия – дистанционное измерение температуры объекта – применяется в литейном производстве для оценки температуры расплавов и в теплоэнергетике. Выполняется более простыми приборами – пирометрами (рис. 47).

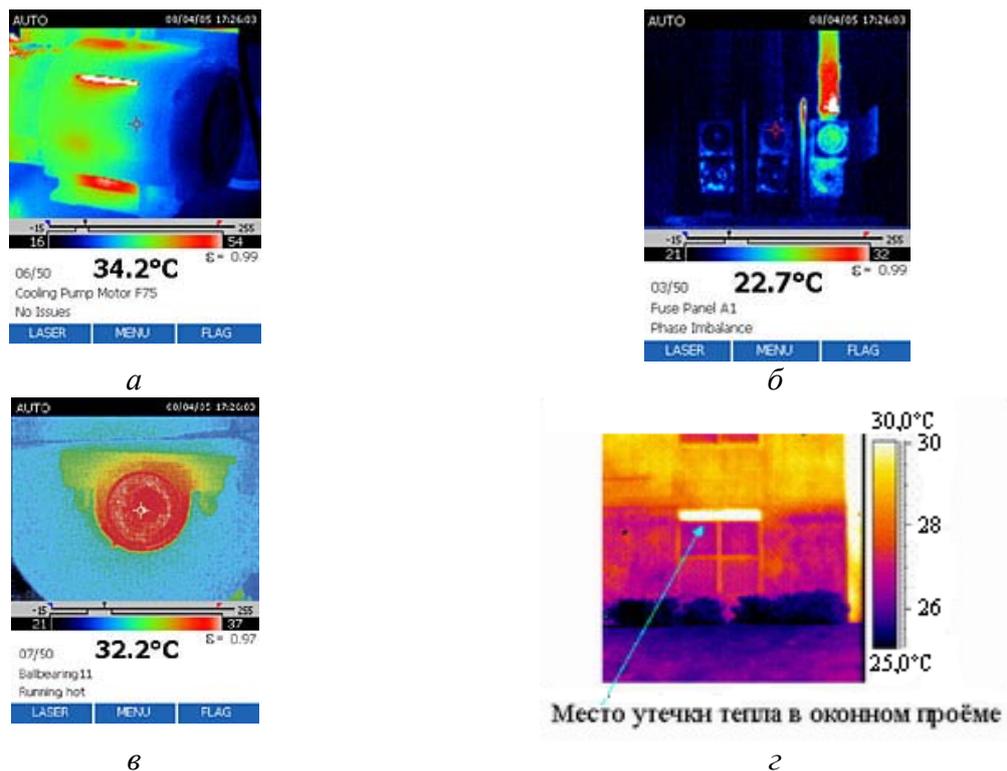


Рис. 46. Примеры термограмм: *а* – перегрев электродвигателя может указывать на заниженные номинальные характеристики, недостаточное охлаждение или проблемы с электропитанием; *б* – разность температур между электроклеммами – на несимметричность нагрузки, наличие гармоник, неисправность компонентов, разъемов или проводов; *в* – высокая температура шарикоподшипников является ранним признаком скорого отказа оборудования; *г* – обнаружено место утечки тепла из жилой квартиры

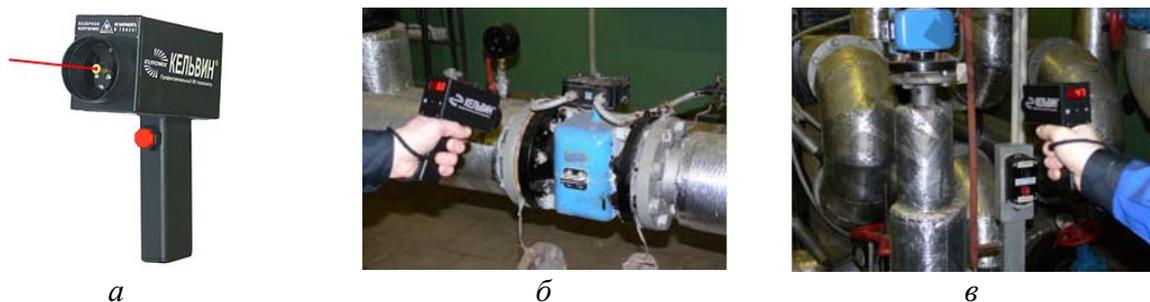


Рис. 47. Пирометр марки «Кельвин»: *а* – внешний вид;
б, в – измерение температуры паропроводов

Преимущества аппаратных средств пирометрии заключаются в выведении оператора из зоны действия повышенной температуры.

12. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АТТЕСТАЦИИ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Система аттестации состоит из аттестации персонала и лаборатории, требования к которым изложены в соответствующей нормативной документации.

12.1. Аттестация персонала

«Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля» ПБ 03-440-02 [2] устанавливают порядок аттестации персонала, выполняющего неразрушающий контроль технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах. Аттестация персонала в области НК проводится в целях подтверждения достаточности теоретической и практической подготовки, опыта, компетентности специалиста, т.е. его профессиональных знаний, навыков, мастерства и предоставления права на выполнение работ по одному или нескольким видам (методам) НК. Специалисты НК в зависимости от их подготовки и производственного опыта аттестуются по трем уровням профессиональной квалификации – I, II, III.

Аттестации подлежит персонал, проводящий контроль объектов с применением следующих видов (методов) НК: ультразвуковой (УК); акустико-эмиссионный (АЭ); радиационный (РК); магнитный (МК); вихретоковый (ВК); проникающими веществами: капиллярный (ПВК), течеискание (ПВТ); визуальный и измерительный (ВИК); вибродиагностический (ВД); электрический (ЭК); тепловой (ТК); оптический (ОК).

Кандидат, претендующий на прохождение аттестации на один из трех уровней квалификации, аттестуется по конкретным методам НК. Областью аттестации каждого кандидата является **сфера его деятельности по контролю конкретных объектов**, а именно:

1. *Объекты котлонадзора:*
 - 1.1. Паровые и водогрейные котлы.
 - 1.2. Электрические котлы.
 - 1.3. Сосуды, работающие под давлением свыше 0,07 МПа.
 - 1.4. Трубопроводы пара и горячей воды с рабочим давлением пара более 0,07 МПа и температурой свыше 115 °С.
 - 1.5. Барокамеры.
2. *Системы газоснабжения (газораспределения):*
 - 2.1. Наружные газопроводы.
 - 2.1.1. Наружные газопроводы стальные.
 - 2.1.2. Наружные газопроводы из полиэтиленовых и композиционных материалов.

- 2.2. Внутренние газопроводы стальные.
- 2.3. Детали и узлы, газовое оборудование.
3. *Подъемные сооружения:*
 - 3.1. Грузоподъемные краны.
 - 3.2. Подъемники (вышки).
 - 3.3. Канатные дороги.
 - 3.4. Фуникулеры.
 - 3.5. Эскалаторы.
 - 3.6. Лифты.
 - 3.7. Краны-трубоукладчики.
 - 3.8. Краны-манипуляторы.
 - 3.9. Платформы подъемные для инвалидов.
 - 3.10. Крановые пути.
4. *Объекты горнорудной промышленности:*
 - 4.1. Здания и сооружения поверхностных комплексов рудников, обогатительных фабрик, фабрик окомкования и аглофабрик.
 - 4.2. Шахтные подъемные машины.
 - 4.3. Горно-транспортное и горно-обогатительное оборудование.
5. *Объекты угольной промышленности:*
 - 5.1. Шахтные подъемные машины.
 - 5.2. Вентиляторы главного проветривания.
 - 5.3. Горно-транспортное и углеобогатительное оборудование.
6. *Оборудование нефтяной и газовой промышленности:*
 - 6.1. Оборудование для бурения скважин.
 - 6.2. Оборудование для эксплуатации скважин.
 - 6.3. Оборудование для освоения и ремонта скважин.
 - 6.4. Оборудование газонефтеперекачивающих станций.
 - 6.5. Газонефтепродуктопроводы.
 - 6.6. Резервуары для нефти и нефтепродуктов.
7. *Оборудование металлургической промышленности:*
 - 7.1. Металлоконструкции технических устройств, зданий и сооружений.
 - 7.2. Газопроводы технологических газов.
 - 7.3. Цапфы чугуновозов, стальковшей, металлоразливочных ковшей.
8. *Оборудование взрывопожароопасных и химически опасных производств:*
 - 8.1. Оборудование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, работающее под давлением до 16 МПа.
 - 8.2. Оборудование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, работающее под давлением свыше 16 МПа.
 - 8.3. Оборудование химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств, работающее под вакуумом.
 - 8.4. Резервуары для хранения взрывопожароопасных и токсичных веществ.
 - 8.5. Изотермические хранилища.
 - 8.6. Криогенное оборудование.
 - 8.7. Оборудование аммиачных холодильных установок.

8.8. Печи, котлы ВОТ, энерготехнологические котлы и котлы-утилизаторы.

8.9. Компрессорное и насосное оборудование.

8.10. Центрифуги, сепараторы.

8.11. Цистерны, контейнеры (бочки), баллоны для взрывопожароопасных и токсичных веществ.

8.12. Технологические трубопроводы, трубопроводы пара и горячей воды.

9. *Объекты железнодорожного транспорта:*

9.1. Транспортные средства (цистерны, контейнеры), тара, упаковка, предназначенные для транспортирования опасных веществ (кроме перевозки сжиженных токсичных газов).

9.2. Подъездные пути необщего пользования.

10. *Объекты хранения и переработки зерна:*

10.1. Воздуходувные машины (турбокомпрессоры воздушные, турбовоздуходувки).

10.2. Вентиляторы (центробежные, радиальные, ВВД).

10.3. Дробилки молотковые, вальцовые станки, энтолейторы.

11. *Здания и сооружения (строительные объекты):*

11.1. Металлические конструкции.

11.2. Бетонные и железобетонные конструкции.

11.3. Каменные и армокаменные конструкции.

12. *Оборудование электроэнергетики.*

Аттестацию проводят Независимые органы по аттестации персонала (НОАП), аккредитованные Ростехнадзором.

Требования к общему образованию специалистов и минимальному производственному опыту приведены в [табл. 12](#), [табл. 13](#), [табл. 14](#).

Таблица 12

Требования к общему образованию специалистов I и II уровней

Уровень квалификации	Требования	
	к общему образованию	к специальной подготовке (с выдачей удостоверения или свидетельства)
I	Среднее	Специализированные курсы по методам НК в объеме не менее 80 ч
	Среднее техническое или не менее трехлетнего курса инженерного вуза или университета	Специализированные курсы или центры повышения квалификации по программам, согласованным с Независимым органом
II	Среднее, высшее	Центры повышения квалификации по программам, согласованным с Независимым органом
	Среднее техническое или высшее по специальности «неразрушающий контроль»	Центры повышения квалификации по программам, согласованным с Независимым органом, или самостоятельная подготовка в процессе работы по НК с разработкой методических документов

Таблица 13

**Требования по минимальному производственному опыту
для допуска к квалификационному экзамену и аттестации на I и II уровни**

Вид (метод) НК	Производственный опыт, месяцы (при 40-часовой рабочей недели)		
	Уровень I	Уровень II	
		для специалиста, имеющего I уровень	для специалиста, не имеющего I уровня
УК	6	12	18
АЭ	6	12	18
РК	6	12	18
МК	3	9	12
ВТ	3	9	12
ПВК	3	6	9
ПВТ	3	9	12
ВИК	3	6	9
ВД	6	12	18
ЭК	3	6	9
ТК	6	12	18

Таблица 14

**Требования по минимальному производственному опыту
для допуска к квалификационному экзамену на III уровень**

Вид допуска	Уровень общего образования	Производственный опыт, месяцы
Кандидат аттестован на II уровень и имеет действующее квалификационное удостоверение	Высшее техническое	24
	Среднее техническое	48
	Высшее техническое	48
Кандидат не аттестован на II уровень	Среднее техническое	72

Требования к квалификации персонала в области неразрушающего контроля:

1. Требования к квалификации специалиста I уровня.

1.1. Специалист I уровня квалификации имеет право проводить НК тем методом, на который он аттестован, в строгом соответствии с методиками, технологическими инструкциями и под наблюдением персонала II или III уровня.

1.2. Специалист I уровня должен знать:

- общие закономерности по физике, электротехнике, электронике, механике, технологии материалов и материаловедению;
- типы дефектов, вероятные зоны и основные причины их образования в конкретных объектах;
- принципы, основные физические процессы, на которых базируется метод контроля, назначение и область его применения;
- принципы устройства и работы, органы управления и порядок настройки аппаратуры;

– правила электробезопасности и пожарной безопасности, правила устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Ростехнадзору объектов, контроль которых он проводит.

1.3. Специалист I уровня должен уметь:

- подготавливать объект к контролю;
- производить настройку и регулировку аппаратуры;
- рационально организовывать свое рабочее место;
- осуществлять контроль, выполнять операции по поиску дефектов;
- регистрировать и классифицировать результаты контроля в соответствии с нормами и критериями, установленными в документах, фиксировать на объекте и в соответствующей документации зоны, в которых предполагается наличие дефекта;
- представлять отчет по результатам контроля;
- выполнять необходимые операции с объектом по завершении контроля.

1.4. Специалист I уровня не производит выбор метода и средств контроля, также оценку результатов контроля.

2. *Требования к квалификации специалиста II уровня.*

2.1. Специалист II уровня квалификации имеет право самостоятельно осуществлять НК и выдавать заключение о качестве проверенных объектов по результатам контроля, вести подготовку и руководство персоналом I и II уровней, разрабатывать письменные инструкции (технологические карты) по НК.

2.2. Специалист II уровня квалификации должен быть компетентным в следующих вопросах:

- оценке качества изделия по результатам НК, классификации и области применения видов (методов) контроля;
- конструктивных особенностях, технологии изготовления, эксплуатации и ремонта объекта контроля, типах дефектов, их классификации, потенциальной опасности и вероятных зонах образования с учетом действующих нагрузок;
- физических принципах, закономерностях метода, определении ограничений применения метода, по которому присваивается квалификация;
- устройстве и функциональных схемах аппаратуры для данного метода контроля, включая правила отбора и проверки качества применяемых расходных материалов;
- основных параметрах метода и аппаратуры, определяющих достоверность результатов контроля, системах расчета параметров контроля, способах измерения и метрологического обеспечения;
- измеряемых характеристиках и признаках выявленных дефектов, методах оценки чувствительности;

- технологии контроля конкретных объектов данным методом (подготовке объекта, выборе основных параметров, настройке аппаратуры, проведении контроля, возможных причинах ложного бракования);
- порядке оформления результатов контроля и хранения документации, основах применения компьютерной обработки;
- документах по НК (стандарты, методики и т.д.);
- других методах НК, правилах выбора и рационального использования;
- порядке организации участков и рабочих мест при контроле конкретных объектов;
- основных неисправностях дефектоскопической аппаратуры и возможных способах их устранения в условиях предприятия, на котором осуществляется контроль;
- рациональной организации рабочего места, правилах электробезопасности и пожарной безопасности, правилах устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Ростехнадзору объектов, контроль которых он проводит.

2.3. Специалист II уровня квалификации должен уметь:

- осуществлять все операции, перечисленные для I уровня;
- выбирать схему контроля для применяемого метода;
- проверять работоспособность аппаратуры и настраивать ее на заданные параметры, осуществлять полный комплекс работ по НК;
- правильно документировать, толковать и оценивать результаты в соответствии с применяемыми стандартами, нормами, руководящими документами. Оформлять результаты контроля с выдачей соответствующего заключения;
- составлять (разрабатывать) технологические инструкции (технологические карты) контроля конкретных объектов с использованием стандартов и действующих нормативно-технических документов;
- проводить экспериментальные работы по определению оптимальных режимов контроля;
- давать заключение по результатам контроля объектов, проконтролированных персоналом I уровня квалификации, с проведением при необходимости инспекционного контроля.

3. Требования к квалификации специалиста III уровня.

3.1. Специалист, аттестованный на III уровень, получает право проведения всех операций по определенному методу НК, производит выбор технологии контроля и аппаратуры.

3.2. Специалист III уровня должен знать:

- принципы, физические основы, техническое обеспечение методов НК;

- конструктивные особенности, технологию изготовления, эксплуатации и ремонта объекта контроля, типы и виды дефектов, вероятные зоны их образования с учетом действующих на объект нагрузок и других факторов;

- принципы построения, функциональные схемы и правила эксплуатации аппаратуры для данного метода контроля, включая правила отбора и проверки качества применяемых расходных дефектоскопических материалов; системы контроля, используемые для проверки объектов (продукции) определенного вида; метрологическое обеспечение данного метода (вида) контроля;

- измеряемые характеристики и идентификационные признаки для разделения дефектов по классам и видам. Знать и иметь опыт применения элементов теории вероятности, математической статистики при обработке результатов контроля;

- технологию контроля различных объектов данным методом; стандарты (коды) и другие действующие нормативные документы и правила по методу (виду) контроля и на аппаратуру для его применения;

- вредные экологические факторы данного метода контроля и способы предотвращения их воздействия на окружающую среду и человека;

- принципы планирования и организации работы лабораторий НК. Современное состояние и перспективы развития данного метода НК;

- рациональную организацию рабочего места, правила электробезопасности и пожарной безопасности, правила устройства и безопасной эксплуатации поднадзорных Ростехнадзору объектов, контроль которых он проводит.

3.3. Специалист III уровня квалификации должен уметь:

- определять конкретные методы, оборудование, технологии и методики, подлежащие использованию для конкретных видов объектов;

- иметь достаточные практические знания о применении материалов, производствах и технологиях для выбора способа и метода контроля и определения критериев приемки;

- выполнять операции контроля, давать оценку и идентифицировать результаты контроля, выдавать заключения о качестве контролируемых объектов;

- на основе анализа отечественных и зарубежных стандартов, руководящих документов, относящихся к практике его работы, разрабатывать методики, технологические инструкции (технологические карты) на проведение контроля в производственных условиях;

- организовывать, проводить и руководить экспериментальными работами по определению оптимальных параметров контроля;

- обеспечивать и контролировать работу специалистов I и II уровней, участвовать в подготовке их к квалификационным экзаменам;

- участвовать в приеме квалификационных экзаменов.

Срок действия аттестации специалистов I и II уровней – 3 года, специалистов III уровня – 5 лет.

12.2. Аттестация лабораторий

«Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля» ПБ 03-372-00 [3] устанавливают основные требования к лабораториям и порядок аттестации лабораторий, выполняющих неразрушающий контроль технических устройств, зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Аттестация лабораторий НК производится в целях установления и подтверждения их компетентности при оценке готовности организаций к выполнению видов деятельности, связанных с применением НК. Правила охватывают деятельность по изготовлению, строительству, монтажу, ремонту, реконструкции, эксплуатации и экспертизе технических устройств, зданий и сооружений с применением тех же методов НК.

Аттестацию лабораторий проводят Независимые органы по аттестации лабораторий НК (НОАЛ НК), аккредитованные Ростехнадзором.

Статус, административная подчиненность и структура лаборатории должны обеспечивать объективность результатов контроля, исключать возможность любого воздействия на сотрудников лаборатории с целью оказать влияние на результаты контроля.

Лаборатория, имеющая статус юридического лица, должна удовлетворять следующим критериям независимости:

- должна быть независима от сторон, заинтересованных в результатах НК;
- не должна участвовать в разработке, изготовлении, строительстве, монтаже, ремонте, реконструкции и эксплуатации или являться покупателем, собственником, потребителем объектов, НК которых осуществляет.

Лаборатория, являющаяся структурным подразделением организации и выполняющая НК для собственных нужд организации, должна удовлетворять следующим критериям независимости:

- в рамках организационной структуры организации должны быть четко разграничены функциональные обязанности по осуществлению НК, а также установлена отчетность лаборатории перед организацией, структурным подразделением которой она является;

- лаборатория не должна заниматься работами, которые могут повлиять на объективность результатов НК.

Лаборатория должна быть оснащена собственными средствами НК, обеспечивающими возможность выполнения работ по НК в рамках ее области аттестации. Для проведения отдельных видов работ допускается использовать дефектоскопическое оборудование, дефектоскопические материалы, принадлежности и приспособления, принадлежащие другим предприятиям, организациям или физическим лицам. Номенклатура средств определяется действующей нормативной и методической документацией по НК, распро-

страняющейся на объекты контроля, виды (методы) НК и виды деятельности, при осуществлении которых проводится НК.

Каждое средство НК, которое имеется в лаборатории, включая и стандартные (контрольные) образцы, должно быть зарегистрировано в лаборатории НК. Сведения о средствах НК должны быть внесены в Паспорт лаборатории и в регистрационный документ (учетный лист, карточка). Сведения о средствах контроля должны включать данные:

- о наименовании, типе средства НК;
- стране, заводе-изготовителе (фирме), заводском и инвентарном номере, годе выпуска;
- дате получения и ввода в эксплуатацию;
- техническом обслуживании, ремонтах;
- данные об аттестации, поверке, калибровке;
- местонахождении Паспорта и (или) руководства по эксплуатации, методических указаний по поверке (если они входят в комплект поставки прибора);
- свидетельствах (протоколах) метрологической поверки (аттестации);
- перечне комплекта поставки прибора, если он не входит в состав других документов.

Все средства НК, относящиеся к средствам измерения (дефектоскопы, преобразователи, стандартные образцы и т.п.), должны быть поверены, калиброваны или аттестованы в установленном порядке. Лаборатория НК должна иметь документированные процедуры технического обслуживания и проверки технического состояния используемых средств НК, а также график поверки.

Лаборатория должна располагать персоналом, аттестованным в установленном порядке, имеющим соответствующую профессиональную подготовку, теоретические знания и практический опыт, необходимые для выполнения работ по НК. В лаборатории должен постоянно вестись учет профессиональной подготовки персонала и его квалификации.

Лаборатория НК должна иметь следующие *документы*:

1. Организационные документы:
 - учредительные документы организации;
 - Положение о лаборатории НК;
 - Паспорт лаборатории НК.
2. Организационно-методические документы:
 - Руководство по качеству;
 - регистрационные документы на средства НК;
 - эксплуатационные документы на средства НК, которые входят в комплект поставки средств (паспорт, руководство по эксплуатации, документы по техническому обслуживанию, ремонту и т.д.);
 - графики поверки и технического обслуживания средств НК;

– свидетельства о метрологической поверке (калибровке, аттестации).

3. Нормативные и методические документы на контроль объектов в соответствии с областью аттестации лаборатории НК:

– нормативные документы, регламентирующие технические требования к объектам контроля и устанавливающие показатели качества этих объектов, а также конкретные виды (методы) контроля этих объектов;

– правила контроля (ПК), основные положения по контролю (ОП) и другие методические документы, в которых определены виды (методы) НК объектов, закрепленных за лабораторией, установлены основные параметры НК, даны схемы и общие требования к проведению НК;

– технологические инструкции, технологические карты, методики или иные документы, регламентирующие порядок проведения (технологию) контроля конкретных объектов.

4. Документация по персоналу лаборатории:

– должностные инструкции;

– материалы по аттестации сотрудников лаборатории (копии удостоверений).

5. Документация по архиву:

– инструкции по порядку ведения архива;

– журнал регистрации архива.

Вся документация, используемая в лаборатории НК, должна проходить своевременную актуализацию.

Лаборатория НК может быть аттестована на срок не более трех лет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М., 1979.
2. ПБ 03-440-02. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля. М., 2002.
3. ПБ 03-372-00. Правила аттестации лабораторий неразрушающего контроля. М., 2000.
4. СДА-01. Сборник документов по аккредитации. Ч. 1 : Общие требования к аккредитации органов оценки соответствия. М., 2008.
5. СДА-15. Сборник документов по аккредитации. Ч. 15 : Требования к испытательным лабораториям. М., 2008.
6. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. М., 2003.
7. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. М., 1979.
8. Сельский, А. А. Способ повышения эффективности контроля герметичности уторных швов нефтепродуктовых резервуаров / А. А. Сельский, М. Н. Лычковский // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11.
9. Лычковский, М. Н. К вопросу о диагностике днищ нефтепродуктовых резервуаров / М. Н. Лычковский, А. А. Сельский // Транспортные системы Сибири / КГТУ. Красноярск, 2004.
10. ГОСТ 18442-80. Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы. Общие требования. М., 1980.
11. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. М., 1987.
12. ГОСТ Р 52005-2003. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования. М., 2003.
13. Дубов, А. А. Диагностика трубопроводов, оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла / А. А. Дубов // Сб. ст. и докл. М. : Энергодиагностика, 1999.
14. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Радиографический метод. М., 1982.
15. СП 2.5.1.799-99. Основные санитарные правила / Минздрав России. М., 2000.
16. СП 2.6.1.758-99. Нормы радиационной безопасности / Минздрав России. М., 2000.
17. СП 2181-80. Санитарные правила при проведении рентгеновской дефектоскопии. М., 1980.

18. СП 2206-80. Инструктивно-методические указания по служебному расследованию и ликвидации радиационных аварий. М., 1980.
19. ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. М., 1987.
20. ГОСТ 20415-82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. М., 1982.
21. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. М., 1986.
22. ГОСТ 24507-80. Контроль неразрушающий. Поковки из черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М., 1980.
23. ГОСТ 22727-88. Контроль неразрушающий. Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля. М., 1988.
24. ГОСТ 12503-75. Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования. М., 1975.
25. ГОСТ 17410-78. Контроль неразрушающий. Трубы металлические бесшовные цилиндрические. Методы ультразвуковой дефектоскопии. М., 1978.
26. Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. 2-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2008.