

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра вагонов

О. В. ХОЛОДИЛОВ

ДЕФЕКТОСКОПИЯ  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности «Подвижной состав железнодорожного транспорта»*

Гомель 2020

УДК 629.4:620.179.1(075.8)  
ББК 39.22  
Х73

**Р е ц е н з е н т ы :** заведующий кафедрой теоретической механики и механики материалов д-р физ.-мат. наук, профессор *Ю. В. Василевич* (БНТУ); заведующий кафедрой физических методов контроля канд. техн. наук, доцент *С. С. Сергеев* (Белорусско-Российский университет)

**Холодилов, О. В.**

**Х73** Дефектоскопия подвижного состава железнодорожного транспорта : учеб. пособие / О. В. Холодилов ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 326 с.  
ISBN 978-985-554-928-5

Изложены физические основы методов неразрушающего контроля и оценки технического состояния деталей подвижного состава, применяемых на железнодорожном транспорте.

Предназначено для студентов вузов железнодорожного транспорта специальности 1-37 02 02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта» всех форм обучения, изучающих дисциплины «Основы дефектоскопии», «Методы и средства неразрушающего контроля» и «Технология производства и ремонта вагонов», для аспирантов и магистрантов соответствующих специальностей, а также для обучения и повышения квалификации инженерно-технических работников и дефектоскопистов.

**УДК 629.4:620.179.1(075.8)**  
**ББК 39.22**

**ISBN 978-985-554-928-5**

© Холодилов О. В., 2020  
© Оформление. БелГУТ, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>Принятые сокращения</b> .....	6
<b>Введение</b> .....	7
<b>1 Технический контроль. Общие положения</b> .....	9
1.1 Содержание понятий «неразрушающий контроль», «техническая диагностика», «дефектоскопический контроль» .....	9
1.2 Классификация видов технического контроля .....	12
<b>2 Общие вопросы разработки и применения методов и средств НК</b> .....	15
2.1 Классификация видов и методов НК .....	15
2.2 Дефектоскопия деталей ПС .....	19
2.2.1 Общие представления о дефектах. Классификация дефектов .....	19
2.2.2 Дефекты металлов .....	22
<b>3 Система НК подвижного состава</b> .....	40
3.1 Содержание системы НК .....	40
3.2 Эффективность систем НК .....	42
<b>4 Визуальный и измерительный контроль</b> .....	44
4.1 Физические основы ВИК .....	44
4.2 Особенности ВИК при проведении некоторых видов НК .....	46
<b>5 Акустический вид НК</b> .....	54
5.1 Методы акустического контроля и их классификация .....	54
5.2 Физические основы методов акустического контроля .....	58
5.2.1 Основные понятия акустики .....	58
5.2.2 Основные акустические величины .....	58
5.2.3 Волновое уравнение .....	62
5.2.4 Типы акустических волн .....	64
5.2.5 Акустические свойства сред .....	65
5.3 Возбуждение и регистрация УЗ-колебаний .....	71
5.3.1 Пьезоэффект и свойства пьезоматериалов .....	71
5.3.2 Отражение и преломление акустических волн на границе двух сред ..	73
5.3.3 Преобразователи для акустического контроля .....	77
5.3.4 Пьезопреобразователь в виде фазированной решетки .....	80
5.3.5 Бесконтактные способы излучения и приема акустических волн .....	82
5.3.6 Акустическое поле преобразователя .....	85
5.3.7 Методы УЗ-контроля .....	90
<b>6 Магнитный вид неразрушающего контроля</b> .....	130
6.1 Общие представления о магнетизме .....	130
6.2 Характеристики магнитного поля .....	133
6.3 Намагничивание и магнитные свойства ферромагнетиков .....	137
6.4 Связь магнитных и физико-механических свойств ферромагнетиков .....	145
6.5 Физические основы магнитной дефектоскопии .....	146
6.6 Классификация методов магнитного НК .....	150
6.7 Способы магнитного контроля .....	151

6.8	Виды (способы) и схемы намагничивания ОК.....	153
6.9	Виды намагничивающих токов .....	158
6.10	Размагничивание ОК .....	160
6.11	Методы и средства магнитного контроля.....	162
6.11.1	Магнитопорошковый метод НК .....	162
6.11.2	Феррозондовый метод НК .....	181
6.11.3	Магнитографический метод НК.....	191
<b>7</b>	<b>Вихрековый вид неразрушающего контроля.....</b>	<b>195</b>
7.1	Физические основы вихрекового НК .....	195
7.2	Классификация вихрековых преобразователей.....	199
7.3	Сигналы ВТП, годографы и способы ВТК .....	210
7.4	Представление информации при ВТК .....	212
7.5	Средства ВТК.....	213
7.6	Области применения ВТК.....	218
<b>8</b>	<b>Неразрушающий контроль проникающими веществами .....</b>	<b>220</b>
8.1	Капиллярные методы контроля .....	220
8.1.1	Геометрические характеристики поверхностных дефектов .....	221
8.1.2	Последовательность операций при капиллярном контроле .....	223
8.1.3	Физические явления, лежащие в основе капиллярного контроля .....	224
8.1.4	Классификация методов капиллярного контроля.....	242
8.1.5	Материалы, используемые при капиллярном контроле.....	243
8.1.6	Чувствительность капиллярного контроля.....	245
8.1.7	Технология капиллярного контроля .....	246
8.1.8	Условные обозначения обнаруженных дефектов. Запись технологии кон- троля при оформлении результатов .....	249
8.1.9	Технические средства, используемые при капиллярном контроле .....	250
8.1.10	Объекты контроля и области применения капиллярных методов контроля....	252
8.2	Методы и средства течеиспания.....	253
8.2.1	Причины нарушения герметичности .....	257
8.2.2	Классификация методов испытания на герметичность .....	257
8.2.3	Общая характеристика технологического процесса испытаний на герме- тичность .....	262
<b>9</b>	<b>Тепловой вид НК .....</b>	<b>269</b>
9.1	Физические основы теплового НК .....	269
9.2	Классификация и модели тепловой дефектоскопии .....	270
9.3	Оптическая пирометрия. Основы теории теплового излучения .....	276
9.3.1	Радиационный теплообмен .....	276
9.3.2	Излучение абсолютно черного тела .....	277
9.3.3	Излучение реальных тел.....	277
9.4	Физические основы измерения температуры.....	279
9.5	Источники тепловой стимуляции объектов ТК .....	281
9.6	Средства контроля температуры .....	286
<b>10</b>	<b>Радиационный вид НК .....</b>	<b>289</b>
10.1	Общие сведения.....	289
10.2	Физические основы радиационного НК .....	291
10.2.1	Механизмы возникновения рентгеновского и $\gamma$ -излучений .....	291
10.2.2	Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом .....	295

10.3 Радиграфия .....	296
10.3.1 Основы радиографического метода.....	296
10.3.2 Методика и техника радиографического контроля .....	297
10.4 Радиометрия .....	309
10.4.1 Основы радиометрического метода контроля .....	309
10.4.2 Классификация методов .....	311
10.4.3 Выбор источника излучения и область применения .....	313
10.4.4 Расшифровка дефектов .....	314
10.5 Радиоскопия .....	315
10.5.1 Основы радиоскопического метода контроля.....	315
10.5.2 Технология радиоскопического контроля .....	318
10.5.3 Область применения радиоскопических систем .....	319
<b>Заключение</b> .....	<b>321</b>
<b>Список использованной и рекомендуемой литературы</b> .....	<b>322</b>

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

---

НК – неразрушающий контроль;  
ОК – объект контроля;  
ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;  
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка;  
ПК – персональный компьютер;  
НТД – нормативно-техническая документация;  
МПК – магнитопорошковый контроль;  
МДК – магнитодинамический контроль;  
ВИК – визуальный и измерительный контроль;  
ФЗК – феррозондовый контроль;  
ВТК – вихретоковый контроль;  
ВТП – вихретоковый преобразователь;  
УЗ – ультразвук, ультразвуковой;  
УЗК – ультразвуковой контроль;  
ОНК – оптический неразрушающий контроль;  
ТНК – тепловой неразрушающий контроль;  
ЭМАП – электромагнитно-акустический преобразователь;  
ПС – подвижной состав;  
ВС – волновое сопротивление;  
ФАР – фазированная антенная решетка;  
ПФР – преобразователь на фазированной решетке;  
ПАЭ – преобразователь акустической эмиссии;  
ФЗП – феррозондовый преобразователь;  
ЭМП – электромагнитное поле;  
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;  
РЭОП – радиационный электронно-оптический преобразователь;  
ПАВ – поверхностно-активные вещества;  
ТФХ – теплофизические характеристики;  
ИС – интегральные(ая) схемы(а);  
ПС – подвижной состав;  
ТУ – технические условия;  
МДС – магнитодвижущая сила;  
ЭДС – электродвижущая сила;  
МТМ – магнитотвердые материалы;  
МММ – магнитомягкие материалы;  
КМС – концентрат магнитной суспензии.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Научно-технический прогресс обуславливает повышение требований к качеству и надежности промышленной продукции различных отраслей народного хозяйства. Необходимые качество и надежность объектов могут быть обеспечены при условии применения эффективных систем контроля качества в цикле «изготовление – эксплуатация – ремонт». Контроль качества объектов (материалов, заготовок, полуфабрикатов и изделий) должен осуществляться методами, после применения которых объекты могут быть использованы по прямому назначению, т. е. методами неразрушающего контроля (НК).

Методы НК, основанные на воздействии проникающих веществ и физических полей на объект или на регистрации полей, создаваемых самим объектом контроля, образуют класс физических методов НК. На практике физические методы НК используют:

- для обнаружения несплошностей материала (дефектоскопия);
- исследования структуры материала (структуроскопия);
- измерения размеров объектов, как правило, толщины стенок и покрытий, в том числе и при одностороннем доступе к ним (толщинометрия);
- изучения внутреннего строения объектов (интроскопия от лат. *intro* – внутри, греч. *skopeo* – видение, т. е. внутривидение).

Физические методы НК настолько широко применяют в различных отраслях промышленности, что на практике и в литературе для краткости используют термин «неразрушающий контроль».

Зарождение НК обычно относят ко времени открытия в ноябре 1895 г. немецким профессором Вильгельмом Рентгеном лучей, названных его именем, с помощью которых оказалось возможным обнаружить неметаллический предмет в закрытой деревянной коробке и неоднородность внутренней структуры металла.

Неразрушающий контроль рассматривается как резерв повышения и гарантия качества выпускаемой продукции. НК – завершающая операция в технологических процессах. Этим объясняются значительные объемы НК при производстве и ремонте продукции.

Например, в развитых капиталистических странах затраты на НК составляют в среднем 1–3 % от стоимости выпускаемой продукции. При производстве ответственных сварных конструкций (суда, высотные здания, энергетическое оборудование) стоимость операций НК достигает 20–25 %

от общей стоимости сооружений, а его трудоемкость сопоставима с трудоемкостью сварки. Указанные затраты быстро окупаются, т. к. благодаря НК на всех этапах изготовления (ремонта) и приемки радикально повышаются качество и эксплуатационная надежность продукции.

Неразрушающий контроль при диагностике объектов обеспечивает безопасность и возможность эксплуатации объектов по их фактическому состоянию, а не по расчетному ресурсу. Так, диагностика рельсов в пути на отечественных железных дорогах средствами ультразвуковой и магнитной дефектоскопии позволяет продлить срок эксплуатации рельсов в 1,5–2 раза по сравнению с расчетным.

Сейчас контролем рельсов в Республике Беларусь занято около 700 работников разной квалификации. В эксплуатации находится  $\approx 500$  дефектоскопов различного типа и три вагона-дефектоскопа. Ежегодно контролируется более 0,5 млн км пути, 150 тыс. сварных стыков, изымается от 10 до 15 тыс. дефектных рельсов, в том числе от 2 до 4 тыс. острodefектных. В результате этого предотвращается свыше шести тысяч потенциально возможных изломов ответственных объектов пути.

К примеру, в России контролем рельсов занято около 14 тыс. специалистов. Ежегодно проверяется более 4,5 млн км рельсов и 2,5 млн сварных стыков в них. В среднем путь по всей длине рельса контролируют 2 раза в месяц, а на грузонапряженных участках – через каждые 3–10 дней. По результатам НК ежегодно снимают более 100 тыс. рельсов с дефектами, предотвращая этим возможные их изломы под поездами.



# 1 ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

---

## 1.1 Содержание понятий «неразрушающий контроль», «техническая диагностика», «дефектоскопический контроль»

**В** технической литературе и среди специалистов наблюдаются разночтения в толковании терминов «неразрушающий контроль» «техническая диагностика», «дефектоскопический контроль» или «дефектоскопия».

Одни считают техническую диагностику одним из направлений неразрушающего контроля (в связи с тем, что диагностирование, как правило, проводят без нарушения пригодности проверяемого объекта к применению), другие, наоборот, неразрушающий контроль, либо дефектоскопию относят к разновидностям технической диагностики.

Термин «техническое диагностирование» нередко считают синонимом термина «неразрушающий контроль», что не соответствует действительности, т. к. *неразрушающий контроль* – существенно более широкое понятие, чем *техническая диагностика* и *дефектоскопия*.

Проведем анализ содержания понятий «неразрушающий контроль», «техническая диагностика», а также «технический контроль», «дефектоскопический контроль» и уточним их взаимоотношение.

В ГОСТ 16504–81 [1] приведены следующие определения терминов.

*Технический контроль* – это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

*Неразрушающий контроль* – это контроль объекта, при котором не нарушается его пригодность к применению.

Согласно ГОСТ 20911–89 [2] *техническая диагностика* – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов, а *техническое диагностирование* – это определение технического состояния объекта.

Видно, что указанные виды контроля имеют одну общую цель – определение технического состояния проверяемых объектов. Эта же цель стоит и перед *дефектоскопией*.

*Техническая диагностика* (от греч. *diagnostics* – способный распознавать) – это самостоятельный вид НК, предназначенный для определения технического состояния, исправности, работоспособности и функционирования технических систем (механических, электрических, гидравлических, пневматических и др.) различных объектов: механизмов, машин, оборудо-

вания или их составных частей и т. п. при их изготовлении, испытаниях, техническом обслуживании в процессе эксплуатации и при ремонте.

Теоретическим фундаментом технической диагностики является *теория распознавания образов*. Диагностирование выполняется на основе статистических решений в условиях ограниченной информации. В процессе технического диагностирования состояние технических систем описывают рядом параметров. Их анализируют, как правило, с использованием моделей отказов и оценивают статистическими методами распознавания образов с использованием различных математических методов.

*Дефектоскопическим контролем* или *дефектоскопией* называют одно из направлений НК, при котором осуществляется контроль качества материала деталей и узлов (как отдельных, так и в составе механических систем) и покрытий, а также контроль положения скрытых элементов механизмов, агрегатов, конструкций. Дефектоскопию следует относить к материалу заготовок, полуфабрикатов, деталей и узлов, в том числе находящихся в составе механических систем (агрегатов, конструкций, механизмов, машин, оборудования и т. д.).

*Дефектоскопический контроль* имеет специфические отличия от технической диагностики. Он имеет другое назначение, при его проведении применяются другие алгоритмы поиска дефектов, иной порядок выбора методов и средств контроля и т. д. Теория распознавания образов находит ограниченное применение при этом контроле. Статистические решения используются, как правило, не для поиска и обнаружения дефектов, а для обработки результатов контроля за какой-либо период времени.

*Дефектоскопический контроль* выполняют с использованием взаимодействия физических полей (акустических, магнитных, радиационных и др.) или веществ – жидкостей или газов с проверяемыми объектами. При этом, как уже отмечалось, контролю могут подвергать как отдельные детали, так и находящиеся в составе механических систем. Под механической системой мы понимаем совокупность взаимосвязанных деталей и узлов, образующих отдельные конструкции, агрегаты, устройства, или изделие в целом.

Техническая диагностика и дефектоскопический контроль имеют следующие общие черты:

- их целью является определение технического состояния проверяемого объекта;
- контроль выполняется без нарушения пригодности проверяемого объекта к применению.

Однако *техническая диагностика* и *дефектоскопический контроль* являются разными самостоятельными направлениями НК. Они имеют разное назначение, предназначены для контроля разнородных объектов, позволяют обнаруживать неодинаковые дефекты (отказы) и т. д.

Основные отличия технической диагностики и дефектоскопического контроля приведены в таблице 1.1. На рисунке 1.1 показана классификация технического, разрушающего и неразрушающего контроля.

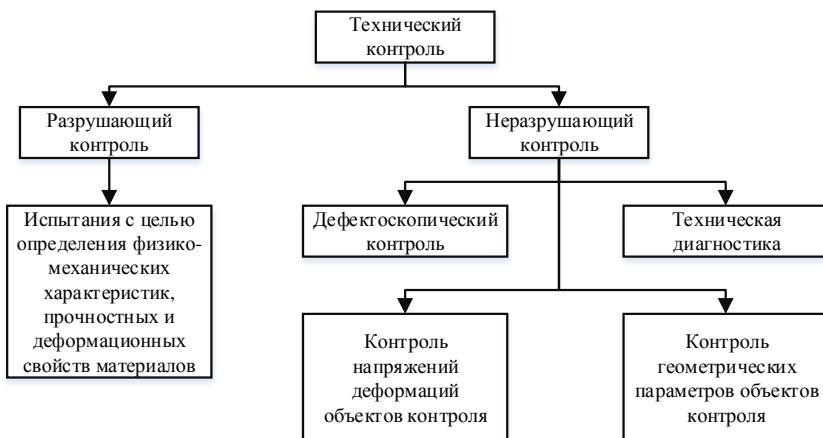


Рисунок 1.1 – Классификация технического, разрушающего и неразрушающего контроля

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика технической диагностики и дефектоскопического контроля

Характеристика контроля	Техническая диагностика	Дефектоскопический контроль
1 Объекты контроля (ОК)	Технические системы: электрические; гидравлические; пневматические; механические и др.	Материал деталей и узлов
2 Назначение контроля	Оценка состояния, исправности, работоспособности и функционирования систем	Оценка сплошности материала и положения скрытых элементов конструкций
3 Характер регистрируемых параметров	Выходные параметры ОК при функциональном или тестовом диагностировании	Результаты взаимодействия физических полей (радиационного, магнитного, электромагнитного, акустического, теплового, электростатического или радиоволнового) либо вещества – жидкости или газа с материалом ОК
4 Обнаруживаемые дефекты (отказы)	Изменение параметров, характеризующих состояние ОК: частота вращения, сила и напряжение электрического тока, мощность, вибрации, расход жидкости или газа, рабочая температура, давление и т. д.	Трещины, коррозионные поражения, волосовины, расслоения и другие дефекты, а также нарушения положения скрытых элементов конструкций ОК
5 Применение измерительных и неизмерительных средств контроля	В основном применяются измерительные средства контроля	Применяются измерительные и индикаторные средства контроля

Окончание таблицы 1.1

Характеристика контроля	Техническая диагностика	Дефектоскопический контроль
6 Область применения методов математической статистики	Оценка параметров диагностирования в процессе поиска отказов; обработка результатов контроля с целью оценки его эффективности и принятия мер по обеспечению бездефектности продукции	Для обработки результатов контроля за какой-либо период с целью оценки его эффективности и принятия мер по обеспечению бездефектности продукции
7 Основные этапы разработки процесса контроля и оценки контролепригодности ОК	Выбор параметров контроля. Разработка алгоритмов контроля. Выбор количества и мест расположения контрольных точек на ОК. Разработка методики контроля. Оценка контролепригодности ОК	Определение типа отыскиваемых дефектов в материале ОК. Оценка контролепригодности ОК. Выбор средства контроля. Разработка методики контроля
8 Критерии контролепригодности ОК	Конструктивное исполнение ОК. Согласованность устройств сопряжения ОК и средств диагностики. Количество, расположение и доступность устройств сопряжения. Трудоемкость соединения и разъединения устройств сопряжения	Вид материала ОК. Вид и толщин защитного покрытия ОК. Шероховатость поверхности ОК. Форма ОК в зоне контроля. Доступность зоны контроля, взаимное расположение конструктивных элементов ОК
9 Принятые (применяемые) показатели контролепригодности ОК	Средняя оперативная трудоемкость диагностирования. Стоимость и продолжительность контроля. Коэффициенты безразборного диагностирования, полноты проверки исправности (работоспособности, функционирования), глубины поиска дефекта. Время подготовки ОК к диагностированию.	Нет

## 1.2 Классификация видов технического контроля

Сущность *технического контроля* состоит в проверке соответствия продукции или процессов, от которых зависит качество продукции, установленным техническим требованиям.

Объектом технического контроля могут быть процессы разработки продукции и соответствующая техническая документация, технологические процессы изготовления, применения, транспортировки, хранения, технологического обслуживания и ремонта продукции и собственно продукция.

Задачи контроля, играющего важнейшую роль в управлении качеством на производстве, заключаются, в основном, в оценке качества и установлении соответствия качества заданным требованиям.

Технический контроль осуществляют на стадиях проектирования (*контроль проектирования*), производства (*производственный контроль*) и эксплуатации (*эксплуатационный контроль*) продукции.

Эксплуатационный контроль – это неотъемлемая составная часть технического диагностирования объектов.

Для технического контроля и диагностики важным свойством продукции является *контролепригодность*. Оно определяет возможность, удобство и надежность технического контроля и диагностирования продукции в процессе изготовления, испытания, технического обслуживания и эксплуатации [3].

В процессе производства (создания) продукции выполняют несколько видов контроля:

- *входной* (контроль продукции, предназначенной для использования при изготовлении/ремонте другой продукции или для эксплуатации). Основные положения входного контроля установлены в ГОСТ 24297–87 [4];
- *пооперационный* (контроль продукции или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции);
- *приемочный* (контроль продукции, по результатам которого принимают решение о ее пригодности к поставкам потребителю и использованию).

В эксплуатационном контроле различают *входной, профилактический* (необязательный) и *текущий* виды контроля. Контролю подвергают или все единицы (элементы) продукции (*сплошной контроль*), или некоторую часть (*выборочный контроль*). При выборочном контроле решение о соответствии (несоответствии) всей продукции установленным техническим требованиям принимают по результатам контроля выборки из исследуемой партии продукции [5, 6].

Контроль проводят по запланированному графику (*плановый контроль*) или в случайные моменты, выбираемые службами контроля (*летучий контроль*). Эффективность летучего контроля обуславливается его внезапностью для разработчиков и изготовителей продукции. Летучий контроль, как правило, проводят непосредственно на месте изготовления, ремонта, хранения продукции.

В ряде случаев с целью проверки эффективности ранее выполненного контроля осуществляют вторичный, *инспекционный* контроль продукции специально уполномоченными исполнителями. Инспекционный контроль, как правило, летучий и выборочный.

Сущность любого технического контроля сводится к осуществлению двух основных этапов:

- 1) получение информации о фактическом состоянии объекта контроля, о признаках и показателях его свойств (*первичная информация*);

2) сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями, т. е. обнаружение соответствия или несоответствия фактических данных требуемым. Информацию расхождения фактических и требуемых данных называют *вторичной*. На основе вторичной информации вырабатывают соответствующее управляющее воздействие на объект, подвергающийся контролю. Технический контроль, вторичную информацию которого используют также для оценки стабильности и регулирования технологического процесса изготовления или эксплуатации продукции, относят к *активному* контролю.

Технический контроль, после которого продукция может быть использована по прямому назначению (в отличие от *разрушающего*), называют *неразрушающим*. Один и тот же метод контроля в зависимости от назначения продукции может быть отнесен как к разрушающему, так и к неразрушающему. Например, метод определения твердости путем вдавливания шарика при контроле твердости металлического зеркала – разрушающий, а при контроле литой станины – неразрушающий, ибо станина с образовавшейся лункой может быть использована по назначению.

Неразрушающие методы позволяют вести *сплошной* контроль. Важность перехода от *выборочного* контроля к *сплошному* возрастает с увеличением сложности контролируемого оборудования. Это можно пояснить таким примером. Основную часть парового котла современной электростанции составляет трубная система, включающая сотни тысяч отдельных труб и сварных соединений. Если при выборочном контроле вероятность пропуска дефектного элемента будет составлять 0,01 % (весьма высокая степень надежности), то по законам статистики из  $10^5$  элементов 10 разрушится во время работы. Отсюда следует, что введение сплошного НК трубной системы котла является необходимым условием его успешной эксплуатации.

**Из всех известных методов контроля качества наибольшими функциональными возможностями обладают физические методы НК.**

### **Контрольные вопросы**

- 1 Дайте определение понятий технический контроль, неразрушающий контроль.
- 2 Дайте определение понятий техническая диагностика, дефектоскопический контроль.
- 3 Назовите общие черты и основные отличия технической диагностики и дефектоскопического контроля.
- 4 Приведите классификацию (схему) технического контроля.
- 5 Дайте классификацию видов технического контроля.

## 2 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ НК

---

### 2.1 Классификация видов и методов НК

**Н**ормативная классификация видов и методов неразрушающего контроля содержится в ГОСТ 18353–79 [7] и ГОСТ Р 56542–2019 [8]. В основу классификации видов и методов НК положены процессы взаимодействия физического поля или вещества с объектом контроля. С точки зрения явлений, на которых они основаны, выделяют девять видов НК: акустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический.

**Методы НК каждого вида классифицируют** по следующим признакам:

а) характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;

б) первичным информативным параметрам;

в) способам получения первичной информации.

В наименовании метода должны присутствовать классификационные признаки, свойственные данному методу НК.

*Характер взаимодействия поля или вещества с объектом*

Под характером взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающим веществом.

Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определенные изменения поля или состояние вещества. Например, наличие несплошности вызывает изменение прошедшего через нее излучения или проникновение в нее пробного вещества. В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком. Например, электродвижущая сила, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термоэлектрический эффект).

*Первичный информативный параметр*

Под первичным информативным параметром подразумевается одна из основных характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемая после взаимодействия этого поля или вещества с контролируемым объектом.

### Способ получения первичной информации

Под первичной информацией подразумевается совокупность характеристик физического поля или проникающего вещества, регистрируемая после взаимодействия этого поля или вещества с контролируемым объектом. Измерение и регистрацию какого-либо информационного параметра осуществляют с использованием конкретного типа датчика или вещества.

Классификация методов НК дана в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация видов и методов НК

Вид НК	Признаки контроля		
	Характер взаимодействия физических полей или проникающих веществ с ОК	Первичный информативный параметр	Способ получения первичной информации
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы. Намагниченности. Остаточной индукции Магнитной проницаемости. Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый. Индукционный. Феррозондовый. Эффект Холла. Магнитографический Пондеромоторный. Магниторезистивный
Оптический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индукцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический Спектральный	Интерференционный. Голографический. Рефрактометрический. Визуально-оптический
Вихре-токовый	Прошедшего поля Отраженного поля	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический
Радиационный	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Активационного анализа Характеристического излучения Автоэмиссионный	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтилляционный. Ионизационный. Вторичных электронов. Радиографический. Радиоскопический
Радиоволновой	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Резонансный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный). Болометрический. Термисторный. Интерференционный. Голографический. Жидких кристаллов. Термобумаг. Термолюминофоров. Фотуправляемых полупроводниковых пластин. Калориметрический



Окончание таблицы 2.1

Вид НК	Признаки контроля		
	Характер взаимодействия физических полей или проникающих веществ с ОК	Первичный информативный параметр	Способ получения первичной информации
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электродинамический Электроемкостный	Электростатический порошковый. Электропараметрический. Электронскровой. Экзоэлектронной эмиссии. Шумовой Контактной разности потенциалов
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический. Жидких кристаллов. Термокрасок. Термобумаг. Термолюминофоров. Термозависимых параметров Оптический интерференционный. Калориметрический
Акустический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Резонансный Импедансный Собственных колебаний Акустико-эмиссионный Вибродиагностический Шумодиагностический	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический. Электроманитно-акустический Микрофонный Порошковый
Проникающими веществами	Молекулярный Капиллярный Молекулярный Течеисследования	Жидкостный Газовый	Яркостный (ахроматический). Цветной (хроматический). Люминесцентный. Люминесцентно-цветной. Фильтрующихся частиц. Масс-спектрометрический. Пузырьковый. Манометрический. Галогенный. Радиоактивный. Катарометрический. Высокочастотного разряда. Химический. Остаточных деформаций. Акустический

**Магнитный неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом.

Как правило, его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов. Свойства, которые требуется контролировать (химической со-

став, структура, наличие несплошностей и др.), обычно связаны с параметрами процесса намагничивания и петлёй гистерезиса.

**Электрический неразрушающий контроль.** Вид НК, основанный на анализе параметров электрического поля или электрического тока, взаимодействующих с контролируемым объектом или возникающими в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия.

**Вихретоковый неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

Его применяют только для контроля объектов из электропроводящих материалов. Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят от его размеров, электрических и магнитных свойств материала, от наличия в материале нарушений сплошности, взаимного расположения преобразователя и ОК, т. е. от многих параметров.

**Радиоволновой неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

Обычно применяют волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона длиной 1–100 мм и контролируют изделия из материалов, где радиоволны затухают слабо: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты.

**Тепловой неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на анализе параметров тепловых полей контролируемых объектов, вызванных дефектами.

Он применим к объектам из любых материалов. Измеряемым информационным параметром служит температура или тепловой поток.

**Оптический неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на регистрации параметров оптического излучения после взаимодействия с контролируемым объектом или собственного оптического излучения исследуемого объекта.

Оптические методы имеют очень широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта. Самым простым методом является органолептический визуальный контроль, с помощью которого находят видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т. д.

**Радиационный неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом.

*В наименовании видов контроля слово «радиационный» может быть заменено словом, обозначающим конкретный метод ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т. д.).*

**Акустический неразрушающий контроль** – вид НК, основанный на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте.

*При использовании возбуждаемых упругих волн ультразвукового диапазона частот (>20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический».*

Параметры упругих волн тесно связаны с такими свойствами материалов, как упругость, плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др.

**Контроль проникающими веществами** – вид НК, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта.

*При визуальном осмотре поверхностных дефектов термин «проникающими веществами» может быть изменён на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов – на «течеискание».*

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении в полость дефекта индикаторной жидкости, хорошо смачивающей материал объекта. Их применяют для обнаружения слабо видимых невооружённым глазом поверхностных дефектов. Методы течеискания используют для выявления только сквозных дефектов.

В процессе развития техники бездефектность материала всегда была важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты.

Однако цель неразрушающего контроля не сводится только к обнаружению дефектов. Сфера его применения гораздо шире, неразрушающие испытания используют для контроля свойств и оценки надёжности материала изделия, они служат инструментом для улучшения методов конструирования и технологических процессов. С их помощью можно определить, где и каким образом возникают дефекты, чтобы затем устранить причину их возникновения.

В практике НК деталей и узлов ПС наибольшее распространение получили следующие методы контроля: визуальный и измерительный контроль (ВИК), магнитопорошковый (МПК), феррозондовый (ФЗК), вихретоковый (ВТК), ультразвуковые эхо- и зеркально-теневой (УЗК), акустической эмиссии (АЭ), виброакустический, тепловой (ТНК), рентгенографический.

## **2.2 Дефектоскопия деталей ПС**

### **2.2.1 Общие представления о дефектах. Классификация дефектов**

Под **дефектом** (от лат. *defectus* – недостаток) понимают каждое отдельное несоответствие продукции установленным в НТД требованиям [9; 10].

Можно выделить четыре типа дефектов:

1) дефекты, связанные с отклонением геометрических размеров от номинальных значений;

2) дефекты, обусловленные нарушением сплошности (или образованием несплошностей и структурной неоднородности): раковины, трещины, расслоения и т. п.;

3) дефекты, связанные с отклонением физико-механических параметров (магнитная проницаемость, коэрцитивная сила, диэлектрическая проницаемость, плотность, химический состав, твёрдость, предел прочности и др.) от номинальных значений;

4) изменение параметров состояния (развитие трещин, изменение напряженно-деформированного состояния, увеличение зазора и т. д.).

Для рационального выбора вида контроля качества продукции важную роль играет классификация дефектов, которую производят по различным признакам.

1 *По степени влияния на работоспособность изделия* (независимо от типа):

а) *критические*, когда при наличии дефекта использовать продукцию по назначению невозможно или недопустимо (небезопасно);

б) *значительные*, оказывающие существенное влияние на использование продукции и на её долговечность;

в) *малозначительные*, практически не влияющие на использование продукции по назначению и на её долговечность.

Вид дефекта, в отличие от типа, характеризует степень его влияния на эффективность и безопасность использования продукции с учётом её назначения, т. е. потенциальную опасность рассматриваемого дефекта.

Очевидно, что дефект одного и того же типа, и размера может принадлежать к дефектам различного вида в зависимости от условий и режимов эксплуатации продукции, т. е. в зависимости от её назначения. Например, пора диаметром 2 мм в стыковом сварном соединении толщиной 20 мм в сосуде для хранения воды относится к *малозначительному* дефекту, а в таком же соединении в пролётном строении моста – к *критическому*.

Необходимо заметить, что во многих отраслях промышленности ограничиваются разделением дефектов по потенциальной опасности на два вида: *допустимые* и *недопустимые*, относя к последним критические, а иногда и значительные дефекты.

Совокупность дефектов, каждый из которых при отдельном его рассмотрении является *малозначительным*, может быть эквивалентна *значительному* или даже *критическому* (недопустимому) дефекту и должна относиться к соответствующему виду дефектов.

Изделие признается годным, если оно удовлетворяет требованиям нормативной документации.

2 *По использованию методики, методов и средств контроля*:

а) *явные*, для выявления которых в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, предусмотрены соответствующие ме-

тодики, методы и средства и правила (если даже невозможно их визуальное обнаружение);

б) *скрытые*, выявление которых не предусмотрено нормативной документацией (отсутствуют рекомендации по их обнаружению, включая и визуальный осмотр). Такие дефекты, как правило, выявляются в процессе эксплуатации изделия или при дополнительных проверках.

3 По природе возникновения (технологическим признакам): трещины, поры, включения, непровары и т. д.

4 В зависимости от этапа возникновения:

а) *конструктивные*, вызванные несовершенством конструкторской документации;

б) *производственно-технологические*, связанные с отклонениями в технологическом процессе;

в) *эксплуатационные*, появившиеся в процессе эксплуатации изделия;

г) *аварийные*.

5 По геометрическим признакам и массовости дефекты различают на виды: внутренние, наружные, сквозные, компактные, протяженные, плоские, объемные, мелкие, средние, крупные, единичные, групповые и распространенные.

Выявленный дефект может быть *устранимым*, если удаление (исправление) его возможно и экономически целесообразно, в противном случае – *неустранимым*.

В НК дефекты классифицируются по типам  $k$  ( $k = 1, k_0$ ) и видам  $f$  ( $f = 1, f_0$ ) [11]. Типы дефектов обусловлены технологическими причинами, связанными с производством, ремонтом и эксплуатацией ОК. Вид дефекта является характеристикой, обуславливающей степень потенциальной опасности дефекта и проявляются в возможности возникновения из-за дефекта чрезвычайной ситуации в эксплуатации (аварии, крушения и т. д.). Степень опасности дефекта характеризуется вероятностью  $P^*(A)$  возникновения аварийной ситуации как случайного события  $A$  из-за дефекта (если он единственный в ОК). Если обозначить потенциальную опасность конкретного дефекта через  $P^*(A)$ , то

$$P^*(A) = P^*(A_T)r_k/r_T, \quad (2.1)$$

где  $P^*(A_T)$  – потенциальная опасность трещины;  $r_k$  и  $r_T$  – коэффициенты опасности дефекта конкретного типа и трещины соответственно,  $P^*(A_T) = 0,9999$ . Ориентировочные значения  $r_k$  и  $r_T$  приведены в работе [11].

Особую группу составляют дефекты (их называют *дефектоскопическими*), связанные с реализацией различных методов. Они определяются по косвенным признакам (измеряемым или неизмеряемым характеристикам), позволяющим с определённой достоверностью оценивать образ дефектов (плоские, округлые и т. д.). Измеряемую характеристику дефекта, по кото-

рой судят об отсутствии или возможном обнаружении дефекта, называют *главной измеряемой характеристикой*, а ее значение для данного дефекта – *характеристическим размером*. При контроле каждый дефект выступает как несплошность с конкретным характеристическим размером  $S$ .

Степень «засоренности» объекта дефектами характеризуют дефектностью ОК и описывают совокупностью вероятностей  $f_y(m)$  числа  $m$  дефектов разных типов  $k$  и/или вида  $i$ , где  $y = k, i, (ki)$ ;  $m = 0, m_{y0}$  (рисунок 2.1).

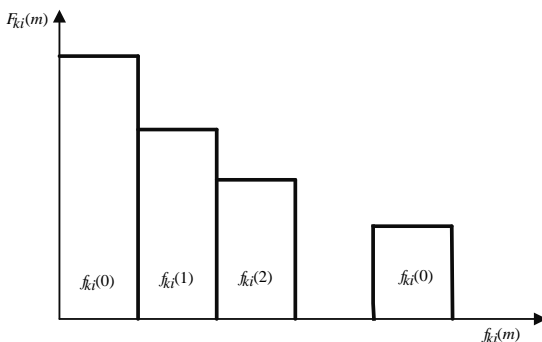


Рисунок 2.1 – Вероятность возникновения дефектов в объектах контроля

Причем

$$\sum_1^{m_{y0}} f_y(m) = 1. \quad (2.2)$$

Вероятность наличия в ОК хотя бы одного дефекта определяется суммой  $\sum_1^{m_0} f_{ki}(m)$ ,  $F_k(0)$  – вероятность того, что в объекте контроля дефектов нет, а вероятность возникновения дефекта соответствует  $f_{ki}(0)$ .

В технике бездефектность материалов и изделий является важнейшим фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в получаемых изделиях могут существовать дефекты.

### 2.2.2 Дефекты металлов

Основными конструкционными материалами являются металлы.

В процессе изготовления металлические изделия проходят сложный технологический цикл. Он включает следующие основные операции: плавка, литье, обработка давлением, термическая обработка, механическая обработка, соединение с другими деталями. Отдельные операции могут выпадать из этой цепочки или повторяться несколько раз. В процессе технологических операций металл (его структура, свойства) изделий изменяется. Для выясне-

ния характера этих изменений необходимо иметь хотя бы общие представления о металловедении.

Готовые изделия хранятся и эксплуатируются, при этом их параметры также могут претерпевать изменения.

Чистые металлы в технике используют довольно редко. Как правило, применяют сплавы металлов, такие как сталь, чугун, титан и пр. В наиболее простом случае это бинарные сплавы, т. е. сплавы двух компонентов.

Согласно существующей классификации можно выделить две группы (два вида) дефектов металлов: производственно-технологические, эксплуатационные.

### **Производственно-технологические дефекты**

#### *Литейные дефекты*

Литье – это технологический процесс изготовления заготовок и изделий путем заполнения жидким металлом изложницы или формы с последующим затвердеванием металла.

Изложница – форма простых геометрических очертаний (обычно с малой конусностью) заполняемая расплавленным металлом для получения слитка. Отлитый в изложницу металл (слиток) является заготовкой для дальнейшей обработки давлением.

Литевая форма – устройство для получения изделий различной конфигурации из металлов и других материалов под действием давления, создаваемого на литевых машинах.

Литейная форма имеет конфигурацию, приблизительно или даже точно (точное литье) повторяющую конфигурацию изделия. В ней получают заготовки, называемые отливками. Для получения пустотелых отливок в форму вставляют стержни, воспроизводящие конфигурацию внутренних полостей. Изложницы и формы делают разъемными для удобства извлечения слитка или отливки. Их снабжают литниковой системой, через которую заливают расплавленный металл, обеспечивают возможность выхода образующихся газов.

При рассмотрении дефектов литья к слитку и отливке подходят по-разному. Слиток подлежит дальнейшей обработке давлением, а отливка является почти готовым изделием. Такие дефекты отливки, как наросты, вмятины, корка, окалина, поверхностные включения, несоответствие размеров и конфигурации чертежу (вызывается сдвигом частей литейной формы, сдвигом стержней в форме, неполным заполнением формы металлом), коробление (изгиб под влиянием внутренних напряжений), обнаруживают при визуальном осмотре и обмерах. Для слитка все названные выше дефекты несут незначительные, т. к. поверхность слитка обычно механически обрабатывают, а точная форма слитка не имеет значения для дальнейшей обработки его давлением.

В зависимости от степени пораженности дефектами все отливки подразделяют на четыре группы:

1) годные, полностью отвечающие всем установленным требованиям технической документации и стандартов;

2) условно годные, имеющие небольшие отклонения от установленных требований (малозначительные дефекты), не оказывающие существенного влияния на эксплуатационные показатели отливки или изделия в целом; отливки допускаются к дальнейшей обработке и используются по своему назначению после тщательной оценки дефектов;

3) исправимый брак – отливки, имеющие один или несколько устранимых дефектов, после исправления которых они могут быть допущены к дальнейшей обработке и использованию по назначению;

4) неисправимый или окончательный брак – отливки, имеющие такие дефекты, исправление которых технически невозможно или экономически нецелесообразно, либо качество исправления которых невозможно проконтролировать. Забракованию подлежат отливки, имеющие хотя бы один неустраняемый дефект.

Устранимость или неустраняемость дефекта определяют применительно к конкретным условиям производства и ремонта.

Согласно ГОСТ 19200–80 [12] дефекты отливок из чугуна и стали подразделяют на пять основных групп. Необходимо отметить, что принятая терминология широко используется также для отливок из сплавов на основе алюминия, магния, титана и других и поэтому может рассматриваться как универсальная.

1 *Несоответствие по геометрии*. Первая группа дефектов отливок из стали и чугуна, включает в себя четырнадцать видов: недолив, незалив, неслитина, обжим, подутость, перекося, стержневой перекося, разностенность, стержневой залив, коробление, вылом, зарез, прорыв металла, уход металла.

2 *Дефекты поверхности*: пригар, спай, ужимина, нарост, залив, засор, плена, просечка, окисление, поверхностное повреждение, складочность, грубая поверхность, газовая шероховатость.

3 Вторая группа дефектов отливок из стали и чугуна, включает в себя тринадцать видов. Большинство этих дефектов возникает вследствие сложных физико-химических процессов, проходящих на границе раздела металл – форма.

4 *Несплошности в теле отливки*: горячая трещина, холодная трещина, усадочная раковина, газовая раковина, ситовидная раковина, песчаная раковина, шлаковая раковина, усадочная пористость, газовая пористость, графитовая пористость, рыхлота, залитый шлак, непровар жеребека, вскип, утяжина.

Эта группа внутренних дефектов различного вида и происхождения наиболее многочисленна и наиболее опасна из-за последствий, возникающих при эксплуатации отливок.



5 *Включения*: металлическое включение, неметаллическое включение, королек. В эту группу входят дефекты в виде инородных металлических или неметаллических частиц, попавших в металл механическим путем.

6 *Несоответствие по структуре*: отбел, половинчатость, ликвация, флокены. Дефекты этой группы специфичны для отливок с тонкими стенками и массивными узлами.

### **Дефекты прокатанного и кованого металла**

Обработку давлением металлов осуществляют прокаткой (обжатием между вращающимися валками), свободной ковкой (ударным воздействием), прессованием (неударным воздействием), штамповкой (ковкой или прессованием в форму-штамп), высадкой (продавливанием сквозь отверстие), волочением (протаскиванием металла через отверстие-оправку для получения прутка, проволоки) и др.

Прокатку слитка производят, как правило, в два этапа: сначала получают заготовку квадратного (*блумс*) или прямоугольного (*сляб*) сечения, а потом из этой заготовки прокатывают листы, трубы, рельсы и другие профили.

Прогрессивной технологией является прокатка заготовки непосредственно из застывающего металла (непрерывная разливка). Обработка давлением позволяет получить металл требуемой формы, уплотняет его, измельчает структуру, улучшает механические свойства.

В процессе обработки давлением металл слитка испытывает сильные деформации, в нем возникают большие внутренние напряжения как сжимающие, так и растягивающие. Первые могут вызвать заваривание некоторых дефектов слитка, а вторые – привести к появлению разрывов в металле, тем более вероятных, если металл слитка в этом месте был ослаблен собственными дефектами. Дефекты продукции после обработки давлением подразделяют на две группы: связанные с дефектами слитка и вызываемые самой обработкой [13].

При контроле продуктов прокатки и волочения необходимо обеспечить высокую производительность, в этом случае применяют вихретоковый, магнитный (феррозондовый) и УЗ виды НК.

### **Дефекты, возникающие при различных видах обработки деталей**

**Термическая обработка** заключается в нагреве и последующем охлаждении металлов и сплавов по определенному закону и направлена на изменение их свойств в результате изменения внутренней структуры.

Целью термической обработки является также снятие внутренних напряжений, повышение прочности, пластичности и вязкости металла.

Основными видами термической обработки стали, чугуна и цветных сплавов являются *отжиг*, *нормализация*, *отпуск* и *закалка*.

Отжиг – это первичная операция термической обработки, при которой стали нагревают до определенных температур, выдерживают при этих температурах и затем медленно охлаждают вместе с печью.

Цель и назначение отжига так же разнообразны, как и выполнение. Отжиг применяют для снятия внутренних напряжений, повышения механических свойств металла, улучшения обрабатываемости режущим инструментом, снижения твердости и для подготовки структуры к дальнейшей термической обработке.

**Нормализация.** Термическую операцию, при которой сталь нагревают до температуры 30–50 °С выше верхних критических точек  $A_{с3}$  и  $A_{ст}$ , выдерживают при этой температуре и затем охлаждают на спокойном воздухе, называют нормализацией.

Нормализацией устраняют внутренние напряжения и наклеп, повышают механические свойства и готовят структуру стали для окончательной термической обработки.

В процессе отжига и нормализации могут возникнуть следующие дефекты: *окисление, обезуглероживание, перегрев и пережог металла.*

При нагреве в пламенных печах поверхность стальных деталей взаимодействует с печными газами. В результате металл окисляется и на деталях образуется окалина – химическое соединение металла с кислородом. С повышением температуры и увеличением времени выдержки окисление резко возрастает. Образование окалины не только вызывает угар (потерю) металла на окалину, но и повреждает поверхность деталей. Поверхность стали под окалиной получается разъеденной и неровной, что затрудняет обработку металла режущим инструментом. Окалину с поверхности деталей удаляют травлением в растворе серной кислоты в воде, очисткой в дробеструйных установках или галтовкой в барабанах.

При окислении стали происходит также *обезуглероживание*, т. е. выгорание углерода с поверхности деталей, что приводит к резкому снижению прочностных свойств стали. Кроме того, обезуглероживание поверхности может вызвать образование закалочных трещин и коробление (поводку детали).

При нагреве стали выше определенных температур и длительных выдержках в ней происходит быстрый рост зерен, ведущий к возникновению крупнокристаллической структуры. Это явление называют *перегревом*. Перегрев ведет к понижению пластических свойств стали. В перегретой стали при закалке образуются трещины. Перегрев металла может быть исправлен последующей термической обработкой – отжигом или нормализацией.

*Пережог* получается в результате длительного пребывания металла в печи при высокой температуре, близкой к температуре плавления. Физическая сущность пережога состоит в том, что кислород из окружающей атмосферы при высокой температуре проникает в глубь нагреваемого металла и окисляет границы зерен. В результате окисления границ зерен механическая связь между зернами ослабевает, металл теряет пластичность и становится хрупким. Пережог является неисправимым браком.

Закалкой стали называют такую операцию термической обработки, при которой стальные детали нагревают до температуры, несколько выше критической, выдерживают при этой температуре и затем быстро охлаждаются в воде или масле.

Основное назначение закалки – получение стали с высокими твердостью, прочностью, износостойкостью и другими свойствами. Качество закалки зависит от температуры и скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения.

В процессе нагрева под закалку и при закалке могут появляться следующие дефекты: трещины, деформация и коробление, обезуглероживание, мягкие пятна и низкая твердость.

*Закалочные трещины* – разрывы металла, возникающие при охлаждении деталей преимущественно сложной формы в процессе закалки из-за высоких внутренних напряжений. Они могут появиться и после закалки на деталях, длительное время не подвергавшихся отпуску, уменьшающему внутренние напряжения. Закалочные трещины – это неисправимый брак.

Трещины возникают при неправильном нагреве (перегреве) и большой скорости охлаждения в деталях, конструкция которых имеет резкие переходы поверхностей, грубые риски, оставшиеся после механической обработки, острые углы, тонкие стенки и т. д.

Высокие и неравномерные внутренние напряжения при недостаточной жесткости детали вызывают ее коробление. Если же детали имеют ослабленные сечения, то могут возникнуть и трещины. Наиболее вероятные места зарождения закалочных трещин – места с резким изменением сечения, острые углы и подрезы.

Закалочные трещины, обычно расположенные в углах деталей или инструмента, имеют дугообразный или извилистый вид.

Однако трещины при закалке нередко могут появляться и на деталях простой формы. В этом случае причиной образования трещин могут быть такие дефекты материала как волосовины, шлаковые включения, флокены, ковочные трещины, или несоблюдение режимов термической обработки деталей.

Отличительным признаком закалочных трещин является неопределенность их направления и извилистая форма. Закалочные трещины встречаются группами, но большей частью число их на детали невелико.

*Деформация и коробление* деталей происходят в результате неравномерных структурных и связанных с ними объемных превращений, обуславливающих возникновение внутренних напряжений в металле при нагреве и охлаждении.

При закалке стали коробление деталей может происходить и без значительных объемных изменений в результате неравномерного нагрева и охлаждения. Если, например, деталь небольшого сечения и большой длины нагревать только с одной стороны, то она изгибается. При этом нагреваемая

сторона детали удлиняется и становится выпуклой, а ее противоположная сторона – вогнутой. Нагревать и охлаждать детали при закалке следует равномерно.

*Мягкие пятна* – это участки на поверхности детали или инструмента с пониженной твердостью. Такие дефекты образуются при закалке в процессе охлаждения в закалочной среде, когда на поверхности детали имелась окалина, следы загрязнений и участки с обезуглероженной поверхностью, а также в случае недостаточно быстрого движения детали в закалочной среде и образования на поверхности детали паровой рубашки.

*Низкая твердость* чаще всего наблюдается при закалке инструмента. Причинами низкой твердости являются недостаточно быстрое охлаждение в закалочной среде, низкая температура закалки, а также недостаточная выдержка при нагреве под закалку. Для исправления этого дефекта деталь следует подвергнуть высокому отпуску и снова закалить.

Перегрев деталей под закалку увеличивает зернистость металла и, следовательно, ухудшает его механические свойства. Металл приобретает повышенную хрупкость. Для повторной закалки деталей их следует подвергнуть отжигу для измельчения зерна.

Недогрев получается в том случае, если температура закалки была ниже критической точки  $A_{c3}$  (для доэвтектоидных сталей) и  $A_{c1}$  (заэвтектоидных сталей). Недогрев исправляют отжигом, после которого деталь снова закаливают.

Отпуском называют такую операцию термической обработки, при которой закаленную сталь нагревают до температуры ниже критической точки  $A_c$ , после чего ее охлаждают.

В любой закаленной на мартенсит стали появляются не только высокая твердость и прочность, но и большие внутренние напряжения. Поэтому закаленная сталь очень хрупка и легко разрушается от ударных и изгибающих нагрузок. Для снятия внутренних напряжений и повышения вязкости закаленную сталь подвергают отпуску.

Специфическими видами термообработки являются поверхностная и химико-термическая обработка.

Термическую обработку, при которой изменяется не только структура, но и химический состав поверхностных слоев металла, называют *химико-термической обработкой*.

Сущность химико-термической обработки стали состоит в искусственном изменении химического состава ее поверхностных слоев. Цель такой обработки – получение высокой поверхностной твердости и износостойкости стальных деталей. Химический состав поверхностных слоев стали изменяется благодаря проникновению в них различных элементов. Изменение химического состава вызывает изменение структуры и свойств поверхностного слоя.

Характерной причиной дефектов при термообработке является несоблюдение режимов нагрева и охлаждения, в результате чего структура и свойства сплава не соответствуют заданным.

Наиболее опасными дефектами термообработки являются трещины. Они возникают в результате резкого нагрева или охлаждения (микро- и макро-трещины), насыщения поверхностного слоя водородом (водородные трещины).

### Механическая обработка

Большинство деталей машин изготавливается путем обработки резанием. Заготовками таких деталей служат прокат, отливки, поковки, штамповки.

Процесс обработки деталей резанием основан на образовании новых поверхностей путем деформирования и последующего отделения поверхностных слоев материала с образованием стружки. Та часть металла, которая снимается при обработке, называется *припуском*<sup>1)</sup>.

После снятия припуска на металлорежущих станках обрабатываемая деталь приобретает форму и размеры, соответствующие рабочему чертежу детали. Для уменьшения трудоемкости и себестоимости изготовления детали, а также ради экономии металла, размер припуска должен быть минимальным, но в то же время достаточным для получения хорошего качества детали и с необходимой шероховатостью поверхности.

В современном машиностроении имеется тенденция снижать объем обработки металлов резанием за счет повышения точности исходных заготовок.

Основные методы обработки металлов резанием.

В зависимости от характера выполняемых работ и вида режущего инструмента различают следующие методы обработки металлов резанием: *точение, фрезерование, сверление, зенкерование, долбление, протягивание, развертывание* и др. (рисунок 2.2).

*Точение* – операция обработки тел вращения, винтовых и спиральных поверхностей резанием при помощи резцов на станках токарной группы. При точении заготовке сообщается вращательное движение (главное движение), а режущему инструменту (резцу) – медленное поступательное

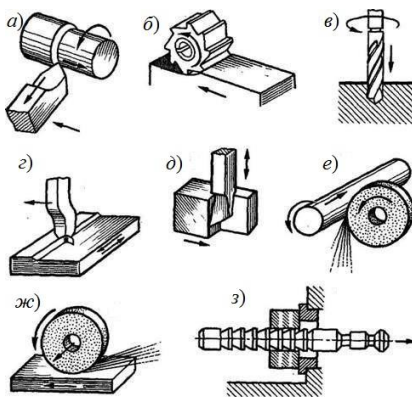


Рисунок 2.2 – Виды механической обработки металлов

<sup>1)</sup> *Припуск* – избыточный (сверх чертежного размера) слой заготовки, оставляемый для снятия режущим инструментом при операциях обработки резанием.

перемещение в продольном или поперечном направлении (движение подачи) (рисунок 2.2, а).

*Фрезерование* – высокопроизводительный и распространенный процесс обработки материалов резанием, выполняемое на фрезерных станках. Главное (вращательное) движение получает фреза, а движение подачи в продольном направлении – заготовка (рисунок 2.2, б).

*Сверление* – операция обработки материала резанием для получения отверстия. Режущим инструментом служит сверло, совершающее вращательное движение (главное движение) резания и осевое перемещение подачи. Сверление производится на сверлильных станках (рисунок 2.2, в).

*Строгание* – способ обработки резанием плоскостей или линейчатых поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает изогнутый строгальный резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) – заготовка. Стругание производится на строгательных станках (рисунок 2.2, г).

*Долбление* – способ обработки резцом плоскостей или фасонных поверхностей. Главное движение (прямолинейное возвратно-поступательное) совершает резец, а движение подачи (прямолинейное, перпендикулярное главному движению, прерывистое) – заготовка. Долбление производят на долбежных станках (рисунок 2.2, д).

*Шлифование* – процесс чистовой и отделочной обработки деталей машин и инструментов посредством снятия с их поверхности тонкого слоя металла шлифовальными кругами, на поверхности которого расположены абразивные зерна (рисунок 2.2, е, ж).

Главное движение вращательное, которое осуществляется шлифовальным кругом. При круглом шлифовании вращается одновременно и заготовка. При плоском шлифовании продольная подача осуществляется обычно заготовкой, а поперечная подача – шлифовальным кругом или заготовкой.

*Протягивание* – процесс, производительность при котором в несколько раз больше, чем при строгании и даже фрезеровании. Главное движение прямолинейное, режущее – вращательное (рисунок 2.2, з).

Дефекты, возникающие при механической обработке:

- микротрещины при обработке резанием;
- прижоги и мелкие трещины при шлифовке;
- трещины при правке, рихтовке, монтаже и т. д.

Дефекты типа несплошностей в процессе механической обработки возникают редко. Например, при обработке резанием металла, в котором имеются большие поверхностные напряжения, могут возникнуть трещины. При шлифовании возможен резкий нагрев поверхностного слоя металла, что может привести к появлению сетки мелких трещин и прижогов – локальных перезакаленных участков.

При правке, рихтовке, монтаже оборудования также могут появляться рихтовочные и монтажные трещины, ориентированные в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений.

### Дефекты соединения деталей

Соединения деталей бывают подвижные и неподвижные (мы рассматриваем только некоторые типы последних). Неподвижные соединения делят на разъемные (разборные) и неразъемные. Способы получения неразъемных соединений: сварка, пайка, клейка, клепка.

Практически все разъемные соединения основаны на использовании сил трения (резьбовые соединения и прессы посадки). В газо- и гидротight конструкциях к соединениям предъявляют требования герметичности. В этих случаях в дополнение или вместо традиционных методов контроля соединения проверяют методами течеискания.

Большую группу технологических дефектов составляют дефекты сварки, которые имеют различные механизмы возникновения в различных зонах по отношению к центру сварного шва. Схема зон сварного соединения (качественная) приведена на рисунке 2.3, а схема изменения температуры в зоне термического влияния, позволяющая анализировать фазовые и структурные изменения, происходящие в этих зонах, – на рисунке 2.4.

В процессе сварки жидкий металл нагревается до высоких температур ( $T \approx 1100 \dots 1523 \text{ }^\circ\text{C}$ ), которые обуславливают его интенсивное взаимодействие с присутствующими в зоне сварки шлаками и активными газами ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), что может способствовать ухудшению свойств металла шва и появлению в нем дефектов в виде пор и свищей.

В околошовной зоне металл, расположенный на границе шва, нагревается до температуры плавления: ширина зоны сплавления 1 (см. рисунок 2.3) обычно  $\leq 1$  мм. Зона сплавления часто является слабым местом всего сварного соединения, т. к. в ней возможны хрупкие разрушения, разрушения при циклических нагрузках, ножевая коррозия и др.

На участке 2 перегрева до ( $1100\text{--}1573 \text{ }^\circ\text{C}$ ) наблюдается быстрый рост зерен, вызывающий понижение пластичности и особенно ударной вязкости.

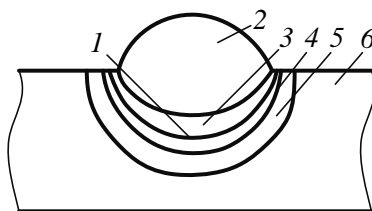


Рисунок 2.3 – Схема зон сварного соединения:

- 1 – граница раздела между швом и основным металлом, 2 – смешанная зона расплавления основного и присадочного металлов; 3 – зона полного расплавления основного металла; 4 – зона частичного расплавления основного металла;
- 5 – зона термического влияния;
- 6 – основной металл, не подверженный термическому влиянию

Свойства участка 3 (перекристаллизация), нагретого до температур 900–1100 °С, такие же, как и основного металла.

Участок 4 (неполной перекристаллизации) 500–900 °С и состоит из зерен основного металла, пришедших и не прошедших перекристаллизацию.

На участке 5 (рекристаллизация) происходит перекристаллизация его зерен, ранее деформированных в холодном состоянии, снижаются прочностные свойства. У дисперсионно-твердеющих сплавов увеличивается прочность, и снижается пластичность.

Структура участка 6 (старение), нагреваемого до температуры 500 °С, практически не изменяется, но в низколегированных сталях при повышенных содержаниях кислорода и азота при температурах 200–373 °С может снижаться ударная вязкость.

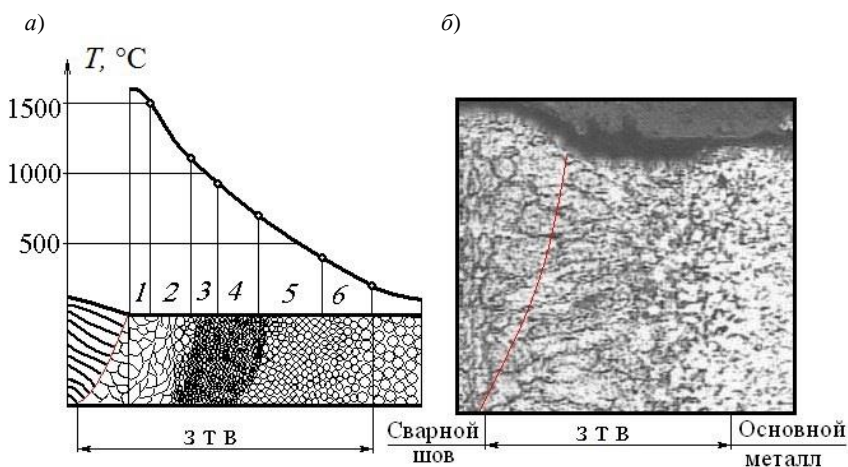


Рисунок 2.4 – Схема изменения температуры (а) в зоне термического влияния (ЗТВ) на различных участках и фотография микрошлифа сварного соединения (б):

- 1 – участок сплавления; 2 – перегрева; 3 – перекристаллизации;  
4 – неполной перекристаллизации; 5 – рекристаллизация; 6 – участок старения

Анализ количественного соотношения частоты появления дефектов различного вида в производственных сварных конструкциях, по данным, опубликованным в мировой печати, свидетельствует, что больше половины дефектов сварки приходится на холодные трещины.

В целом же наиболее опасными дефектами являются трещины и трещиноподобные дефекты, непровары.



В соответствии с ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012 [14] дефекты сварки плавлением можно классифицировать на шесть групп<sup>1)</sup>:

*Группа I Трещины*

Трещины (100; e)  
Микротрещина (1001)  
Продольная трещина (101; Ea)  
Поперечная трещина (102; Eb)  
Радиальные трещины (103; E)  
Трещина в кратере (104; Ec)  
Раздельные трещины (105; E)  
Разветвленные трещины (106; U)

*Группа II Поры*

Газовая полость (200; a)  
Газовая пора (2011; Aa)  
Равномерно распределенная пористость (2012; aa)  
Скопление пор (2013)  
Цепочка пор (2014)  
Продолговатая газовая полость (2015; Ab)  
Свищ (2016; Ab)  
Поверхностная пора (2017)  
Усадочная раковина (202; R)  
Кратер (2024; K)

*Группа III Твердые включения*

Твердое включение (300)  
Шлаковое включение (301; Va)  
Флюсовое включение (302; C)  
Оксидное включение (303; J)  
Металлическое включение (304; H)

*Группа IV Несплавление и непровары*

Несплавление (401)  
Непровар и полный непровар (402; D)

*Группа V Нарушение формы шва*

Нарушение формы (500)

Подрез непрерывный протяженный (5011; F)  
Подрез перемежающийся локальный (5012; P)  
Усадочная канавка (5013)  
Превышение выпуклости стыкового шва (502)  
Превышение выпуклости углового шва (503)  
Превышение проплава (504)  
Местное превышение проплава (5041)  
Неправильный профиль сварного шва (505)  
Наплыв (506)  
Линейное смещение (507)  
Угловое смещение (508)  
Натек (509)  
Прожег (510)  
Неполное заполнение разделки кромок (511)  
Чрезмерная асимметрия сварного шва (512)  
Неравномерная ширина шва (513)  
Неровная поверхность шва (514)  
Вогнутость корня шва (515)  
Пористость в корне сварного шва (516)  
Возобновление шва (517)

*Группа VI Прочие дефекты*  
Следы случайной дуги (601)  
Брызги металла (602)  
Вольфрамовые брызги (6021)  
Поверхностные задиры (603)  
Утонение металла шва (606)

---

<sup>1)</sup> Приведены название каждого дефекта и его трехзначное цифровое обозначение (или четырехзначное обозначение разновидности), а также буквенное обозначение согласно Классификации дефектов Международного института сварки (МИС).

## **Основные термины и определения, используемые при контроле сварных соединений**

*Горячие трещины* – хрупкое межкристаллитное разрушение металла шва, возникающее в твердо-жидком состоянии при завершении кристаллизации шва под действием сварочных напряжений.

*Дефект* – несоответствие сварного шва или сварного соединения требованиям нормативной документации.

*Допустимый дефект* – дефект, присутствие которого не ухудшает механических и эксплуатационных свойств сварного шва и разрешено нормативно-технической документацией.

*Зона термического влияния* – участок, нагретый при сварке до температуры 1350–2000 К, в котором произошли структурные и механические изменения основного металла.

*Контроль качества* – процесс проверки соответствия показателей качества сварных соединений и изделий требованиям нормативных документов.

*Кратер* – усадочная раковина в конце валика сварного шва.

*Недопустимый дефект* – дефект, наличие которого категорически запрещено нормативно-технической документацией.

*Оксидные включения* – соединения кислорода с химическими элементами, например,  $\text{SiO}_2\text{--MnO--FeO}$ ;  $\text{SiO}_2\text{--MnO--Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2\text{--FeO--Al}_2\text{O}_3$ .

*Остаточная деформация* – деформация, возникающая в сварном изделии к моменту его полного охлаждения.

*Погонная энергия* – показатель сварочного процесса, представляющий собой отношение эффективной мощности источника теплоты к скорости сварки.

*Режим сварки* – совокупность характеристик сварочного процесса, которые должны выполняться для получения сварного соединения.

*Свариваемость* – технологическое свойство металлов или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения, отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним.

*Сварка плавлением* – процесс сварки, при котором металл в зоне соединения находится в жидком состоянии при нагреве выше температуры плавления.

*Сварное соединение* – совокупность трех участков: сварного шва, зоны сплавления и зоны термического влияния.

*Сварной шов* – участок сварного соединения, в пределах которого металл был расплавлен, а затем закристаллизовался.

*Сварочная ванна* – объем металла, находящегося в расплавленном состоянии при сварке.

*Сварочные деформации* – деформации, возникающие в сварной конструкции вследствие нагрева и охлаждения металла при сварке.

*Твердое включение* – частица твердого инородного вещества в металле сварного шва. Такие включения могут быть шлаковыми, флюсовыми, оксидными и металлическими.

*Термический цикл* – характер изменения температуры во времени в данной точке сварного соединения.

*Трещины основного металла* – трещины при производстве металлопродукта, раскрывшиеся под действием термического цикла сварки.

*Флюс* – вещество, вводимое в зону сварки для создания защиты дуги и сварочной ванны от воздуха, а также для металлургических процессов во время сварки.

*Холодные трещины* – трещины, образующиеся в сварных соединениях преимущественно после охлаждения; возникают под действием сварочных напряжений.

*Шлак* – стекловидный расплав на поверхности шва после затвердевания различных окислов, образующихся в результате металлургических процессов во время сварки.

*Эвтектика* – механическая смесь кристаллов компонентов, образующаяся при затвердевании металла сварочной ванны и имеющая наиболее низкую температуру плавления по сравнению с металлом шва.

### **Эксплуатационные дефекты**

Эксплуатационные дефекты возникают в результате длительной эксплуатации вагонов, их сборочных единиц и деталей, а также неправильного технического обслуживания.

Разрушение объектов при эксплуатации может произойти под действием чрезмерных внешних нагрузок. Нагрузка может быть *кратковременной* (в том числе ударной), *длительной* и *многократно прилагаемой*.

Длительная статическая нагрузка может привести к разрушению объекта даже в тех случаях, когда такая же кратковременная нагрузка для него не опасна. Под действием длительной нагрузки происходит медленная деформация объекта, постепенно ослабляющая его прочность. Это явление называют *ползучестью*. Оно особенно часто проявляется при эксплуатации объектов из пластмасс, композитов, но существует также и для металлических деталей, особенно при повышенной температуре.

Допустимые многократно прилагаемые (циклические) нагрузки значительно меньше допустимых статических.

Разрушение под действием внешних нагрузок (особенно циклических) начинается в местах, где расположены концентраторы напряжений. Ими являются элементы конструкции (утонение, надпил, отверстие), а также дефекты типа несплошностей. Чем резче профиль утонения (например, меньше радиус отверстия), тем больше концентрация напряжений вблизи них. По этой причине дефекты плоскостного характера типа *неслитин, закатов* и особенно *трещин* гораздо опаснее округлых дефектов типа *раковин* и *шлаковых включений*.

Для предотвращения катастрофического разрушения ответственные объекты периодически подвергают контролю, проводят плановые ремонты. Обычно в процессе эксплуатации применяют визуальный осмотр, контроль капиллярными, магнитными и вихретоковыми методами для выявления поверхностных дефектов.

Внутренние трещины любого происхождения обнаруживают при УЗ-контроле (обычно эхо-метод). Утонения труб, сосудов под действием коррозии (в том числе локальной) определяют с помощью УЗ-толщиномеров.

*Трещины-надрывы* в поверхностном слое металла образуются в результате высоких одноразово приложенных напряжений (растяжение, изгиб, кручение), когда нагрузка превышает прочность детали, например, при нарушении технологии правки детали, демонтаже или монтаже детали с хрупким поверхностным слоем или при перегрузке детали в эксплуатации (работа в нерасчетном режиме).

*Трещины усталости (усталостные трещины)* являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами в деталях подвижного состава и одними из самых опасных. Основная причина появления усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений. Усталостные трещины возникают в местах концентрации напряжений: по галтелям, в местах с резкими переходами сечений и наличием подрезов, у основания резьбы и зубьев шестерен, в углах шпоночных канавок, у отверстий для смазки или в местах других конструктивных или технологических концентраторов напряжений. Усталостные трещины появляются также в местах дефектов металлургического и технологического происхождения или следов грубой механической обработки поверхности (глубоких рисок, следов резца и т. п.).

Усталостные трещины, как правило, развиваются в поперечном или в наклонном направлении. Усталостные трещины различают по внешнему виду. Чаще всего они бывают двух типов:

- поперечные или кольцевые трещины, развивающиеся на цилиндрических деталях по окружности в сечении, перпендикулярном к оси детали;
- трещины, расположенные под углом к оси детали.

В зоне усталостного разрушения отсутствуют какие-либо признаки пластической деформации даже у самых пластичных материалов. Ширина раскрытия усталостной трещины у выхода ее на поверхность в начальной стадии разрушения не превышает нескольких микрометров.

*Трещины контактной усталости* – особый вид разрушения, представляющий собой контактные усталостные выкрашивания. Поверхностные контактные разрушения – *фреттинг-коррозия* или контактная усталость являются не полными разрушениями деталей, а сочетаниями многочисленных, часто очень мелких сколов.

*Контактное усталостное выкрашивание (питтинг)* с последующим развитием усталостного разрушения по сечению деталей наблюдается в таких деталях, как подшипники качения и скольжения, на зубьях шестерен, замковых соединениях и пр.

*Трещины термической усталости.* Разрушение деталей после многократного воздействия периодически изменяющегося во времени уровня термических напряжений представляет собой явление термической усталости. Для разрушения при термической усталости характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и относительно быстрой их релаксацией. Характерными для термоусталости являются трещины с широкими полостями и тупыми окончаниями – трещины «разгара».

Стенки большинства трещин интенсивно окислены. Трещины термоусталости могут иметь местные уширения, когда они пересекают границы зерен, неблагоприятно ориентированные для развития по ним трещин.

*Трещины химической усталости (коррозионно-усталостные).* Разрушение материала в результате действия повторно приложенных нагрузок и коррозионной среды называют коррозионно-усталостным разрушением. Коррозионно-усталостные трещины – это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений.

*Кавитационное растрескивание.* Кавитация означает образование полости на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков. Лопающиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью. Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся стенка граничит с жидкостью (например, в циклически нагружаемых подшипниках скольжения).

*Водородное охрупчивание (разрушение под влиянием водорода).* Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины. Источниками поступления водорода могут явиться термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварка), диссоциация газов, коррозия, гальванические процессы и т. п.

*Трещины ползучести.* Разрушение деталей после пластического течения их материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называется разрушением от ползучести. Для ползучести является характерным множественное трещинообразование. Большое влияние на характер разрушения оказывает размер зерен и их разновидность. Для материала с разнородным зерном характерно межзеренное разрушение в области малых зерен и внутриверенное – по более крупным.

*Растрескивание под действием термических напряжений.* Разрушение под действием термических напряжений происходит только в следствие

теплового градиента, без приложения внешней механической нагрузки. Причиной возникновения трещин при этом является образование локальных полей напряжений.

*Коррозионное растрескивание* – особенно опасный вид коррозионного разрушения, происходящего при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений (внешних или внутренних) и коррозионной среды. При этом наблюдается хрупкое разрушение, направленное перпендикулярно действию растягивающих напряжений.

Атмосферная коррозия металлов может быть поверхностной, а может распространяться в глубь металла. Очень опасна коррозия, поражающая преимущественно границы зерен – *межкристаллитная коррозия*. При эксплуатации также возможна поверхностная или более глубокая (в том числе межкристаллитная коррозия) под действием агрессивных сред: жидкостей, газов.

Коррозионные повреждения (очаговые, межкристаллитные и др.) встречаются на разных деталях. Степень коррозионного повреждения зависит от наличия агрессивных сред, качества защитных покрытий, неблагоприятного сочетания материалов деталей в узле и др. В эксплуатации коррозией часто поражены закрытые, внутренние полости, труднодоступные для осмотра.

Процесс развития коррозионного разрушения состоит из трех стадий:

- 1) медленное развитие трещин, когда процесс в основном определяется коррозионным фактором,
- 2) скачкообразное, относительно быстрое развитие трещин при увеличивающемся влиянии механического фактора;
- 3) лавинообразное разрушение (долом). Особенностью трещин при коррозионном растрескивании является их сильная разветвленность.

Специфическим видом разрушения является коррозия под напряжением: агрессивное действие среды усиливается внутренними напряжениями в металле изделия.

*Стресс-коррозия (коррозионное растрескивание под напряжением)*: процесс образования и развития поверхностных трещин на изолированной, катодно-защищенной поверхности газопроводов в результате длительного воздействия на металл труб механических напряжений и специфических коррозионных сред.

При транспортировке, монтаже, хранении изделие может получить *механические повреждения*: забоины, вмятины, надиры, риски, местный наклеп. Их причины могут быть разнообразными.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Назовите виды НК.
- 2 Перечислите признаки, по которым классифицируют виды НК.
- 3 Охарактеризуйте магнитный вид НК.

- 4 Охарактеризуйте электрический вид НК.
- 5 Охарактеризуйте тепловой вид НК.
- 6 Охарактеризуйте вихретоковый вид НК.
- 7 Охарактеризуйте радиоволновой вид НК.
- 8 Охарактеризуйте акустический вид НК.
- 9 Охарактеризуйте оптический вид НК.
- 10 Охарактеризуйте радиационный вид НК.
- 11 Охарактеризуйте вид НК проникающими веществами.
- 12 Дайте определение дефекта и назовите основные типы дефектов.
- 13 Дайте классификацию дефектов по степени их влияния на работоспособность изделия.
- 14 Дайте классификацию дефектов по использованию методики, методов и средств контроля.
- 15 Дайте классификацию дефектов, по геометрическим признакам и массовости.
- 16 Назовите группы дефектов и перечислите виды дефектов, входящие в эти группы.
- 17 Назовите основные группы дефектов отливок из чугуна и стали.
- 18 Назовите дефекты, возникающие при обработке металла давлением.
- 19 Перечислите основные виды термической обработки.
- 20 Перечислите дефекты, возникающие при термической обработке.
- 21 Перечислите и охарактеризуйте основные методы обработки металлов резанием.
- 22 Перечислите виды соединения деталей.
- 23 Изобразите строение сварного соединения и назовите его основные дефекты.

## 3 СИСТЕМА НК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

---

### 3.1 Содержание системы НК

**Н**а железнодорожном транспорте сложилась система НК, объединяющая технологии и средства дефектоскопии и диагностики объектов путевого хозяйства, подвижного состава, тягового подвижного состава и сооружений железнодорожной инфраструктуры (рисунок 3.1), позволяющая осуществлять оценку стабильности и управления технологическими процессами изготовления, ремонта, эксплуатации и контроля технических объектов по результатам НК [15].

Как бы ни был совершен тот или иной метод какого-либо вида НК, он не может полностью решить задачу обнаружения дефектов в ОК. Поэтому при контроле ответственных деталей подвижного состава с целью большей полноты и глубины контроля применяют несколько методов (вариантов методов), используемых по определенной программе для оценки состояния ОК [16]. Например, оси вагонов или локомотивов контролируют магнитными (магнитопорошковыми) и акустическими методами (зеркально-теневой и эхо-метод).

Любой метод НК подразумевает выявление определённого вида дефектов. При контроле дефект может быть выявлен или пропущен [1]. Выявление дефекта рассматривается как случайное событие, вероятность наступления которого обозначим через  $P(B_k)$ .

Для систем НК введём понятие вероятность выявления  $P(B_{ki}/M_t)$  дефектов вида  $k_i$  при варианте  $t$  метода  $M$ . Эта вероятность зависит от характеристического размера ( $XP$ ) дефекта  $D_s$ , минимальное значение которого определяет предельную чувствительность варианта  $t$  метода  $M$ .

$P(B_{ki}/M_t)$  также зависит от надежности дефектоскопической аппаратуры (определяется вероятностью  $P_d(t_p)$  сохранения аппаратурой заданных основных параметров в течение планируемого времени выполнения контроля), надёжностью оператора (в течение времени выполнения контроля описывается вероятностью  $P_{оп}(t_p)$  точного, безошибочного и своевременно выполнения оператором порученных ему функций в условиях окружающей среды, воспроизводимой с вероятностью  $P_{сп}(t_p)$ ).

Оценка надежности метода (варианта метода) НК рассматривается как надежность комплекса «дефектоскоп – оператор – среда» и описывается вероятностью  $P_{д-оп}(t_p)$ . Надежность оператора определяется уровнем подготовки, опытом практической работы, зрительными способностями, напряженностью работы и условиями контроля.





Рисунок 3.1 – Система НК объектов (инфраструктуры) железнодорожного транспорта

Вероятность обнаружения дефекта  $D_s$  комплексом «дефектоскоп – оператор», использующим вариант  $M_t$ ,

$$P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/M_t) = P(B_{ki}/M_t)P_{\text{д-оп}}(t_p). \quad (3.1)$$

Вероятность того, что дефект  $D_{ki}$  не будет выявлен ни одним из  $t_0$  вариантов, т. е. системой  $C_j$ , может быть рассчитана как

$$P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/C_j) = \sum P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/M_t), \quad (3.2)$$

а вероятность выявления –

$$P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/C_j) = \prod_{t=1}^{t_0} [1 - P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/M_t)]. \quad (3.3)$$

Очевидно, что вероятность обнаружения дефекта системой НК растет с увеличением числа вариантов метода.

### 3.2 Эффективность систем НК

Основной целью НК следует считать выявление дефектов, устранение которых приводит к повышению эксплуатационной надежности объектов контроля.

Эффективность систем НК определяется интегральным критерием эффективности  $Q_j$ , отражающим соотношение технической эффективности  $G_j$  системы  $C_j$  и суммарных затрат  $\mathcal{E}_{\Sigma j}$ , за счет которых достигается техническая эффективность [11]:

$$Q_j = (G_j / \mathcal{E}_j), \quad (3.4)$$

В качестве меры технической эффективности  $G_j$  системы  $C_j$  может служить приращение  $\Delta H_j$  надежности объектов, связанное с устранением дефектов, выявленных системой,

$$G_j = \Delta H_j = H_j - H_0, \quad (3.5)$$

где  $H_j$  – вероятность невозникновения в объекте аварийной ситуации (надежность объекта) после устранения в нем дефектов, выявленных системой  $C_j$ ,  $H_0$  – надежность того же объекта до контроля, определяемая вероятностью безотказной работы объекта.

Если в объекте имеется  $(k_i)_0$  дефектов различного типа и вида  $D_{ki}$ , где  $[k_i = 1, (k_i)_0]$ , каждому из которых соответствуют свое распределение вероятностей  $f_{ki}(m)$  и своя потенциальная опасность  $P(A_{ki})$ , то вероятность безотказной работы

$$H_0 = \prod_{ki=1}^{(ki)_0} \sum_{m=0}^{m_{ki0}} \left\{ [1 - P(A_{ki})]^m f_{ki}(m) \right\}. \quad (3.6)$$

Для расчета величины  $H_j$  в выражение (3.3) вводят множитель  $[1 - P_{\text{д-оп}}(B_{ki}/M_t)]$ , определяющий вероятность пропуска дефекта  $D_{ki}$  с потенциальной опасностью  $P(A_{ki})$  при контроле системой  $C_j$ .

Тогда выражение (3.3) примет следующий вид:

$$H_0 = \prod_{ki=1}^{(ki)_0} \sum_{m=0}^{m_{ki0}} \left\{ [1 - P(A_{ki})] [1 - P_{\text{д-оп}}(B_{ki} / C_j)]^m f_{ki}(m) \right\}. \quad (3.7)$$

Формулы для расчета величины  $G_j$  приведены в работе [11].

Стоимость системы  $C_j$  приемочного контроля определяется суммарными затратами  $\mathcal{E}_{\Sigma}$  на контроль, в результате которого достигается техническая эффективность  $G_j$ .

Суммарные затраты

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{kj} + \mathcal{E}_{vj} + \mathcal{E}_{пj}, \quad (3.8)$$

где  $\mathcal{E}_{kj}$  – стоимость непосредственного контроля с помощью системы  $C_j$ , включающая в себя зарплату операторов и вспомогательного персонала, отчисления на социальное страхование и охрану труда, расходы на материалы и энергоресурсы, на амортизацию дефектоскопического оборудования;  $\mathcal{E}_{vj}$  – стоимость вспомогательных операций, сопутствующих контролю посредством системы  $C_j$ ;  $\mathcal{E}_{пj}$  – стоимость убытков, связанных с ошибочной браковкой годных объектов (перебраковкой и недобраковкой).

Значение  $\mathcal{E}_{kj} + \mathcal{E}_{vj}$  определяются путем хронометража конкретных технологических процессов контроля деталей. Рекомендации по расчету убытков от перебраковки и недобраковки даны в работе [11]. При разработке системы НК деталей подвижного состава значение  $G_j$  стремятся оставить неизменным, а затраты максимально уменьшать.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что представляет собой система НК на железнодорожном транспорте?
- 2 От чего зависит вероятность выявления дефектов?
- 3 Как определяется вероятность выявления дефектов?
- 4 Чем определяется эффективность систем НК?
- 5 Из чего складываются суммарные затраты на проведение НК?

## 4 ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

---

### 4.1 Физические основы ВИК

**Д**ля оценки технического состояния узлов и деталей подвижного состава, для выявления дефектов в них применяют различные виды контроля, среди которых важное место занимают методы визуального и измерительного контроля (ВИК). Он основан на воздействии электромагнитного излучения, видимого спектра, вызывающего зрительные ощущения оператора при получении информации об объекте контроля.

Несмотря на то что методы ВИК считаются простыми и могут выполняться с использованием простейших измерительных средств, их реализация достаточно сложна, т. к. требует от оператора знания многих аспектов, связанных с поиском дефектов: представление о материалах, их свойствах, причинах образования дефектов, способах их предотвращения и устранения; о взаимосвязях между механическими свойствами, конструктивными параметрами изделий и используемыми физическими явлениями; о механизмах разрушения материалов, о физических основах различных методов и приемов при НК, способах регистрации, хранения и обработки информации по результатам НК, достоинствах и недостатках различных методов НК.

Выявленные при визуальном осмотре видимые дефекты устраняют в соответствии с требованиями нормативных и технологических документов по техническому обслуживанию и ремонту вагонов и локомотивов, их составных частей и деталей. Детали с обнаруженными при осмотре недопустимыми дефектами бракуются и в дальнейшем НК не подлежат.

К достоинствам ВИК относятся простота, доступность, экономичность при обнаружении поверхностных дефектов в деталях ПС. Его применяют на различных стадиях жизненного цикла продукции: при изготовлении, в эксплуатации и при ремонте.

Таким образом, *методы ВИК основаны на использовании оптической области спектра электромагнитного излучения с целью оценки технического состояния объектов контроля.*

Длина волны оптического излучения составляет  $5 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-3}$  м. В состав оптического излучения входят:

– видимое излучение (свет), вызывающее зрительное ощущение (диапазон длин волн  $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-8} \dots 39 \cdot 10^{-8}$  м);

– ИК-излучение, характеризующееся длинами волн в диапазоне от  $54 \cdot 10^{-5}$  до  $76 \cdot 10^{-8}$  м;

– УФ-излучение ( $\lambda = 30 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-9}$  м).

Различают непрерывное оптическое излучение, существующее в любой момент времени, и импульсное оптическое излучение, существующее в интервале времени  $t$ , меньшем времени наблюдения.

Для обеспечения возможности числовой характеристики параметров излучения в оптическом диапазоне вводят систему фотометрических величин.

*Энергетические фотометрические величины*  $X_e$  – величины, определяющие временное, пространственное, спектральное распределение энергии оптического излучения, количественно выражаемые в единицах энергии (мощности) или в производных от них, безотносительно к его действию на заданный селективный приемник.

*Редуцированные фотометрические величины*<sup>1)</sup>  $X_v$  – величины, характеризующие оптическое излучение по его физиологическому воздействию на заданный селективный приемник.

*Фотонные фотометрические величины*  $X_p$  – величины, количественно выражаемые в безразмерных единицах числа фотонов и производных от него.

В Международную систему единиц включены единицы только одного вида редуцированных величин – *световые величины*.

Для обозначения фотометрических величин разных видов установлены подстрочные индексы: обозначения энергетических величин снабжаются индексом  $e$ , световых – индексом  $v$ , фотонных – индексом  $p$ .

Математическое описание единиц энергетических фотометрических, световых величин, светотехнических и оптических характеристик материалов представлено в работах [17–20].

Большинство используемых систем НК для оценки технического состояния деталей ПС обладают некоторыми общими характеристиками:

– контролируемые различными методами детали, дефекты в них и причины их возникновения часто одни и те же, поэтому результаты контроля одним методом могут служить основой для их интерпретации другими методами;

– дефекты, выявляемые различными методами НК, регистрируются и интерпретируются визуально, поэтому практически любой метод НК содержит в себе «визуальную составляющую»;

– использование одних и тех же технических средств при ВИК и других методах НК, уровни освещенности, размеры частиц индикаторов дефектов, углы зрения, чувствительность к свету, мешающие факторы, относящиеся к зрению оператора, обычно регламентируются НТД с целью обеспечения надежности и точности как ВИК, так и других методов НК.

---

<sup>1)</sup> *Редуцированная фотометрическая величина* – фотометрическая величина, образованная по математической модели линейного спектрально-аддитивного для рассматриваемого явления приёмника.

## 4.2 Особенности ВИК при проведении некоторых видов НК

Как мы уже отмечали ранее, практически любой метод НК содержит в себе «визуальную составляющую». Поэтому представляет интерес рассмотрение некоторых специфических особенностей ВИК при их проведении, причем эти особенности имеют место не для одного метода, а для нескольких.

### Ультразвуковой контроль

Ультразвуковой контроль обладает важным достоинством – способностью при одностороннем доступе к детали выявить как дефекты, расположенные на большой глубине, так и дефекты, выходящие на недоступную для контроля поверхность изделия.

При его реализации необходимо учитывать особенности зрительных ощущений, восприятия и взаимодействия оператора-дефектоскописта с органами управления: дефектоскопом, пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), электронно-лучевой трубкой (ЭЛТ), монитором компьютера, бумажным документом (журналы и протоколы контроля).

В связи с необходимостью оператора выполнять зрительно-напряженную работу он обязан один раз в год проходить медицинский осмотр в учреждении здравоохранения с целью определения состояния своего зрения в соответствии с требованиями, изложенными в СТБ ISO 9712-2016 [21]:

1) острота зрения должна позволять читать буквы размера 1 по таблице Егера или шрифт Times Roman № 4,5 или эквивалентный ему шрифт (высотой 1,69 мм)<sup>1)</sup> на расстоянии не менее 30 см одним или двумя глазами с коррективкой или без коррективки;

2) цветовое зрение должно быть достаточным, чтобы оператор мог различить или дифференцировать контраст между цветами или оттенками серого, используемыми в конкретном методе НК.

Поясним некоторые термины, характеризующие функции и параметры зрения оператора при выполнении визуального и измерительного контроля [18].

*Разрешающая способность глаза* (острота зрения)  $\varepsilon$  – минимальный угол между деталями изображения, которые он различает определяет способность глаза различать две точки отдельно друг от друга. Способность глаза различать две точки с минимальным углом между ними в  $1'$  считается нормой (острота зрения такого глаза принимается за 1,0).

---

<sup>1)</sup> Один пункт равен 1/12 высоты шрифта цизеро. Во входящих в Таможенный союз странах СНГ пункт исчисляется по типометрической системе Дидо, в которой 1 пункт равен 0,376 мм.

Разрешающая способность глаза зависит от яркости, контраста, цветности и времени наблюдения ОК. Она максимальна в белом или желто-зеленом свете при яркости 10–100 кд/м<sup>2</sup>, высоком контрасте объекта ( $|k| > 0,5$ ) и времени наблюдения 5–20 с.

Угловая разрешающая способность глаза  $\epsilon$  при расстоянии до объекта  $l = 250$  мм и соблюдении указанных выше условий составляет  $\approx 1'$ , а *линейное разрешение* в плоскости ОК  $e = l \times \alpha = 250 \times 0,0003 = 0,08$  мм, где  $\alpha$  – угловой размер объекта, рад.

Использование увеличивающей оптики (лупа, микроскоп) повышает линейное разрешение  $e$  в число раз, равное увеличению прибора (обычно составляет  $\approx 1 \dots 5$  мкм).

Дифракционный предел линейного разрешения оптического прибора  $l_{\max}$  определяется длиной волны света и составляет для зеленого света  $\approx 0,5$  мкм.

Для определения остроты дальнего зрения (на расстоянии 5–6 м) пользуются таблицами Сивцева – Головина (рисунок 4.1) с буквами (*а*) и кольцами (*б*). В таблицах есть 12 рядов букв и разрезанных колец Ландольта. Цифра слева (*D*) указывает расстояние, с которого человек с нормальным зрением видит данную строку под углом в  $1'$ , цифра справа (*V*) – показатель остроты зрения.

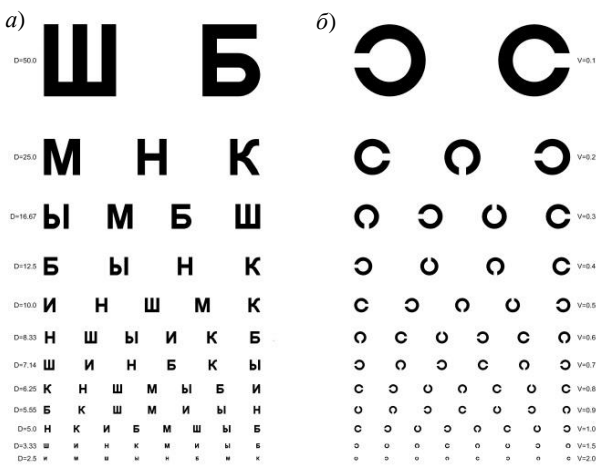


Рисунок 4.1 – Таблицы Сивцева – Головина

Для проверки зрения с близкого расстояния (30–36 см) используют текстовые таблицы (рисунок 4.2, *а*) и таблицы Розенбаума (рисунок 4.2, *б*). При расчете указывают расстояние измерений зрения вблизи, или применяют расчет при помощи единиц системы Егера.

<b>а) № 1 (острота зрения 1,0) шрифт 05</b> <small>Понимание смысла фразы и чтение по переносам, а также умение делать паузы. Читать по слогам, переходя от слогов к словам. Чтение по слогам, переходя от слогов к словам. Чтение по слогам, переходя от слогов к словам. Чтение по слогам, переходя от слогов к словам.</small>	<b>№ 2 (острота зрения 0,9) шрифт 06</b> <small>и переводит слова из начальной, и не разбираю. Это был в своем деле. Больше люблю, что в переводе это другой язык. Это был переводчик. Больше люблю, что в переводе это другой язык. Это был переводчик.</small>
<b>№ 3 (острота зрения 0,8) шрифт 07</b> <small>Это была девушка. Она была очень красивая. Она была очень красивая. Она была очень красивая. Она была очень красивая. Она была очень красивая. Она была очень красивая.</small>	<b>№ 4 (острота зрения 0,7) шрифт 08</b> <small>На заводе работали люди, занимавшие разные должности и должности рабочих. Они работали в офисе, стояли один за другим, и потому было, что было особенно приятно. Было так приятно. Это была радость, радость за все.</small>
<b>№ 5 (острота зрения 0,6) шрифт 09</b> <small>Там растут несравненные деревья и цветы с самыми глубокими стеблями и листьями, что цветет только, словно выходя от маленького движения воды. А между ветвями сидят рыбы. Большие и маленькие, совсем как птицы в воздухе у нас наверху. В самом глубочайшем месте стоят дощери морского царя – стелы его из кораллов, высокие стрельчатые стелы.</small>	
<b>№ 6 (острота зрения 0,5) шрифт 10</b> <small>Господа заны вода бежала широким потоком, и в нем танцевали под свое чудное плени водички и русали. Такие прекрасные голоса не бывает у людей. Такие прекрасные голоса не бывает у людей. Русалочка пела лучше всех, и все клонили ей в ладоши. На минуте ей было особенно приятно. Было так приятно. Это была радость, радость за все.</small>	
<b>№ 7 (острота зрения 0,4) шрифт 11</b> <small>Видели вы когда-нибудь старинный-старинный шкаф, почерневший от времени и украшенный реальными завитками и листьями? Такой вот шкаф-пробушико наследство-стоит в гостиной. Он был весь покрыт резьбой-розами, топиливами и самыми незатейливыми завитками.</small>	
<b>№ 8 (острота зрения 0,3) шрифт 12</b> <small>А лесные думы уже кружились на волшебном холме. Они разучились танец с полупрозралами, составлен из тумана и лунного света, и тем, кто находит вкус в таких вещах.</small>	
<b>№ 9 (острота зрения 0,2) шрифт 14</b> <small>СНАЧАЛА МЫ СЛЫШАЛИ И ШЕЛЕСТ ЛИСТОВ ВОКРУГ, И ВСПЛЕСКИ ВОДЫ В ОЗЕРЕ. ЧУВСТВОВАЛИ ПОД СОБОЙ ЗЕМЛЮ... ПОТОМ ПОСТЕПЕННО ГОЛУБОЕ НЕБО.</small>	
<b>№ 10 (острота зрения 0,1) шрифт 18</b> <b>ПЛОТЫ ПЛЫЛИ ДАЛЬШЕ</b>	

**б)**



Рисунок 4.2 – Таблицы для проверки зрения с близкого расстояния

Поле зрения определяется пространством, наблюдаемым неподвижным глазом. Границы на белый цвет составляют: вниз – 70°, вверх – 55°, к носу – 60° и к виску 90° (т. е. 125° по вертикали и 150° по горизонтали). Поле зрения обоих глаз ≈ 180°. Движение глаз позволяет увеличить угловую величину просматриваемого пространства. Нормальными границами подвижности глаз принято считать: вниз – 53°, вверх – 37°, к носу – 46°, к виску – 44°.

Поле зрения одного глаза условно делится на три зоны:

- зона наиболее ясного зрения – *центральная*, с полем зрения ≈ 2°;
- зона ясного зрения, в которой различаются предметы без мелких деталей, с полем зрения ≈ 30° по горизонтали и ≈ 22° по вертикали;
- зона периферического зрения, важная для ориентации, но детали предметов ясно не различаются.

*Стереоскопическое разрешение глаза*, т. е. способность раздельно различать по глубине детали объекта, составляет ≈ 5...10" для оптимальных условий наблюдения, указанных выше. Применение специальных приборов повышает разрешение по глубине пропорционально их увеличению.

*Аккомодация глаза* определяется способностью глаза приспособляться к четкому видению различно удаленных предметов. Это достигается изменением преломляющей силы хрусталика благодаря изменению радиусов кривизны передней поверхности хрусталика.

Оптимальной освещенностью рабочих мест для работы с мониторами дефектоскопов считается освещенность 500 лк (допускается до 700 лк). Соотношение соотношения яркости монитора и ближайшего окружения рабочего места не должно превышать 3:1.

При визуальном и измерительном контроле происходят адаптация глаза оператора и постоянное изменение пороговой чувствительности зрения.



*Адаптация глаза* – способность его приспособливаться к различным условиям освещенности.

Различают световую (дневную) и темновую (ночную, сумеречную) адаптацию. Снижение чувствительности глаза при световом раздражении называется *световой адаптацией*.

При ярком освещении зрачок глаза сужается от 8 до 2 мм, т. е. его площадь уменьшается в 16 раз. Изображение воспринимают колбочки, защищаемые от яркого света пигментными зернами. Повышение чувствительности глаза при световом раздражении называется *темновой адаптацией*. При слабых яркостях работают только палочки, поэтому снижается острота зрения и цветоочувствительность.

Световая чувствительность глаза характеризуется наименьшим количеством световой энергии, вызывающим световое раздражение, и соответствует абсолютному световому порогу (в среднем – освещенности на зрачке глаза  $\approx 10^{-9}$  лк).

При различных освещенностях чувствительность изменяется в  $10^3$  раз. Процесс адаптации требует времени (рисунок 4.3).

При точных измерениях необходимо создать нормальную освещенность в пределах 50–250 лк. Продолжительность темновой адаптации составляет 1–2 ч, световой – 5–10 мин.

Высокая температура ( $>25$  °С), шум ( $>90$  дБ), резкие запахи на рабочих местах при длительном их воздействии приводят к снижению работоспособности, ускорению зрительного утомления, изменению цветоощущения, повышению расхода энергии.

Правильная организация рабочих мест при использовании таких методов НК, как ультразвуковой, феррозондовый, вихретоковый, рентгенографический и др., соблюдение санитарно-гигиенических, психофизиологических, эстетических факторов создают предпосылки для повышения качества контроля и его достоверности.

### Магнитопорошковый

При МПК наличие и протяженность индикаторных рисунков в виде полосок или валиков, вызванных полями рассеяния дефектов, можно регистрировать визуально с помощью оптических устройств (луп, зеркал, эндо-

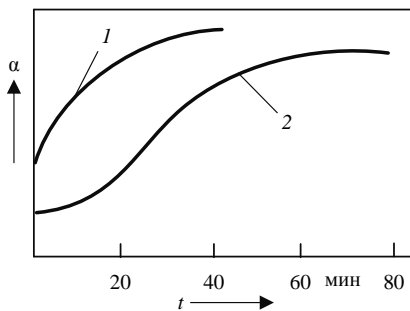


Рисунок 4.3 – Зависимость контрастной чувствительности от времени пребывания в темноте:  
1 – переход слабого освещения к темноте;  
2 – переход от сильного освещения к темноте

скопов, бинокулярных стереоскопических микроскопов и т. п.), а также с помощью автоматизированных систем обработки изображений.

Чувствительность МПК определяется магнитными характеристиками ОК, его формой, размерами и шероховатостью поверхности, напряженностью намагничивающего поля, местоположением и ориентацией дефектов, свойствами индикаторов дефектов, способами их нанесения на ОК, способами регистрации индикаторного рисунка выявляемых дефектов.

Согласно ГОСТ 21105–87 [22] установлено три условных уровня чувствительности, представленных в таблице 4.1.

Для подповерхностных дефектов, а также при  $R_a > 10$  мкм условный уровень чувствительности не нормируется.

**Таблица 4.1 – Параметры, определяющие условный уровень чувствительности**

Условный уровень чувствительности	Минимальная ширина условного дефекта, мкм	Минимальная протяженность условного дефекта, мм	Шероховатость поверхности, $R_a$ , мкм
А	2,0	0,5	< 2,5
Б	10,0		< 10,0
В	25,0		

Выявляемость дефектов МП-методом во многом зависит от свойств магнитных порошков: дисперсность, магнитные и оптические характеристики. Основным условием, обеспечивающим высокую вероятность обнаружения дефектов при визуальном контроле, является обеспечение контрастности индикаторного порошка и контролируемой поверхности. Обычно порошок имеет черный, серый, красный, желтый и зеленый пигменты (красители), а флюоресцирующий – различные цвета свечения. Иногда при МПК на поверхность контролируемого изделия наносится тонкий ( $\approx 20$  мкм) слой белой краски, чтобы увеличить контраст между частицами порошка и поверхностью ОК.

Все цвета можно разделить на *ахроматические* и *хроматические*. Резкой границы между ними не существует. К первой категории относят черный и белый цвета, а также промежуточную между ними гамму серых тонов. Наблюдается много цветов с едва различимыми цветовыми оттенками. Вместе с тем у других цветов интенсивность может быть сильно выражена. Эта особенность называется *насыщенностью*.

При средней яркости нормальный глаз оператора способен различать в спектре  $\approx 150$  цветовых тонов. Сочетание красных и синих тонов образует пурпурный цвет (глаз различает  $\approx 30$  таких тонов). Таким образом, оператор может различать 180 цветовых тонов. Изменение цветности наиболее хорошо ощущается в зелено-голубой ( $\lambda \approx 495$  нм), оранжево-желтой ( $\lambda \approx 585$  нм) и оранжево-красной ( $\lambda \approx 640$  нм) областях спектра.

Цвета, даже одинаковые по цветовому тону, могут казаться в зависимости от условий наблюдения светлее или темнее (различной светлоты). Цвет любого тела вызван избирательным поглощением и отражением, зависящим от  $\lambda$ . Поэтому для сравнения руководствуются светлотой соответствующих серых тонов. В таблице 4.2 приведены сведения о светлоте цветных поверхностей с указанием коэффициентов отражения, равных по светлоте ахроматических поверхностей.

Таким образом, три качества цвета: *цветовой тон, насыщенность и светлота* – являются основными характеристиками цвета.

Нормальный глаз человека неодинаково чувствителен к лучам с различной  $\lambda$ , наибольшая чувствительность лежит в области желто-зеленых лучей ( $\lambda \approx 555$  нм). В обе стороны к красному «К» и фиолетовому «Ф» концам спектра (рисунок 4.4) чувствительность резко падает.

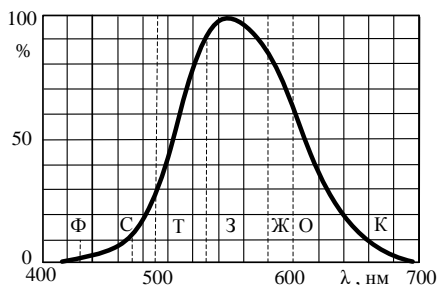
Эта кривая относительной яркости (светлоты) лучей спектра одинаковой интенсивности носит название *кривая видности*. Она показывает, что при равной насыщенности цветов более интенсивными будут светлые цвета, а при равной светлоте – более насыщенные.

ГОСТ 21105–87 [22] устанавливает значение минимальной освещенности в  $10^3$  лк при использовании магнитных индикаторов естественной окраски, а при использовании люминесцентных индикаторов уровень облученности УФ-излучением должен быть  $2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> при минимально допустимой освещенности поверхности 20 лк.

Дефектоскописты обязаны знать признаки индикаторных рисунков реальных дефектов и уметь распознавать ложные индикации.

Таблица 4.2 – Коэффициенты отражения цветных поверхностей

Цвет поверхности	Коэффициент отражения
Черный	0,04
Темно-синий	0,10
Темно-красный	0,10
Темно-серый	0,15
Зеленый	0,16
Оранжево-красный	0,23
Голубой	0,45
Желтый	0,55
Белый	0,70–0,90



Рисунке 4.4 – Кривая изменения относительной яркости лучей спектра одинаковой интенсивности (кривая видности)

Преобразование излучения в зрительное ощущение – достаточно сложный процесс, состоящий из ряда ограниченных во времени этапов. Временные характеристики зрительного процесса определяются также изменением чувствительности зрительного анализатора, его свойствами, приводящими к сложной нелинейной зависимости между уровнем зрительного ощущения – светлотой и яркостью излучения, действующего на глаз.

В 1850 г. Г. Фехнером открыт закон о том, что *интенсивность ощущения* пропорциональна логарифму интенсивности раздражения [18]:

$$R = C \lg(L/L_0), \quad (4.1)$$

где  $L$  – фактическая интенсивность раздражения;  $L_0$  – пороговое значение интенсивности раздражения, при котором орган может что-либо воспринять.

Для появления зрительного ощущения достаточно энергии  $10^{-3}$  Дж.

Э. Вебером сформулирован закон, согласно которому *разрешающая способность* (способность воспринимать два различных раздражения) пропорциональна интенсивности раздражения [18]. Если через  $L$  обозначить интенсивность раздражения, а через  $\delta L$  – линейное изменение раздражения, которое приводит к еще улавливаемому различию ощущений, то согласно этому закону:

$$\delta L = rL \text{ или } \delta(\ln L) = r. \quad (4.2)$$

Таким образом, в логарифмической шкале разрешающая способность оказывается постоянной как только раздражение превзойдет пороговое значение.

Значения безразмерной величины  $r$  зависят от рассматриваемого типа ощущения и индивидуальных особенностей испытуемого. Так, минимальные значения  $r$  составляют по яркости света  $\approx 0,015$ , по массе  $\approx 0,019$ , по длине отрезков  $\approx 0,025$ , по вкусу  $\approx 0,25$ , по громкости звука  $\approx 0,03$ , по запаху  $\approx 0,35$ , по высоте звука  $\approx 0,003$  [18].

Воспринимаемая интенсивность раздражения от порогового значения до границы болевого ощущения для большинства видов раздражения лежит в широких пределах: для яркости –  $1:10^{14}$ ; для громкости звука –  $1:10^6$ ; для высоты звука –  $1:10^3$ .

*Абсолютным порогом* или *пороговой яркостью* называют минимальную яркость объекта  $L_{п.ср}$ , обеспечивающую его обнаружение с заданной вероятностью  $P$  на фоне с коэффициентом отражения  $\rho_{\phi} = 0$  или появление (исчезновение) объекта на том же фоне.

Если дефект находится на освещенном фоне, то минимальную разность яркостей  $\Delta L_{п.ср}$ , объекта  $L_0$  и фона  $L_{\phi}$ , обеспечивающего обнаружение дефекта с заданной вероятностью  $P$  или появление (исчезновение) дефекта,

называют *пороговой разностью яркостей*. При  $L_0 > L_\Phi$  и  $L_0 < L_\Phi$  соответственно

$$\Delta L_{\text{п.ср.}} = (L_0 - L_\Phi). \quad (4.3)$$

Величина, обратная *пороговой разности яркости*, называется *контрастной чувствительностью*.

*Контрастная чувствительность* – минимальная обнаруживаемая разность яркостей объекта и фона  $K = \Delta L/L$ , причем  $K_{\text{пор}} \approx 0,01$  при  $L = 10 \dots 100$  кд/м<sup>2</sup> в зеленом свете и угловом размере дефекта  $\alpha > 1^\circ$ .

Качество изображения дефекта, определяющее его выявляемость, называется *видимостью* и определяется как

$$V_{\text{вид}} = K/K_{\text{пор}}, \quad (4.4)$$

где  $K$  и  $K_{\text{пор}}$  – соответственно контраст с фоном и пороговый контраст дефекта с вероятностью обнаружения  $P = 0,5$ .

*Видимость* одноцветного с фоном дефекта оценивается выражением

$$V_{\text{вид}} = \lg(10K/K_{\text{пор}}). \quad (4.5)$$

Максимальное значение видимости дефекта будет иметь место при таких же условиях освещения, когда он имеет минимальный пороговый контраст

$$V_{\text{вид max}} = \lg(10K/K_{\text{пор min}}). \quad (4.6)$$

где  $K_{\text{пор min}}$  – минимальное значение порогового контраста при соответствующей ему яркости  $K_{\text{опт}}$ .

Вышерассмотренные аспекты ВИК, имеющие место при проведении МПК, следует учитывать и при проведении контроля проникающими веществами, где применяются индикаторные пенетранты.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Физические основы визуального и измерительного метода НК.
- 2 Физические основы оптического вида НК.
- 3 Структура и элементная база приборов оптического контроля.
- 4 Методы и средства оптической дефектоскопии.

## **5 АКУСТИЧЕСКИЙ ВИД НК**

---

### **5.1 Методы акустического контроля и их классификация**

Акустический контроль занимает ведущее место среди других видов НК. В отдельных отраслях промышленности доля этого вида НК составляет более 50 % от общего объема контролируемой продукции. Не является исключением и железнодорожный транспорт, где на долю НК акустическими методами деталей железнодорожного подвижного состава (оси вагонов и локомотивов, бандажи и цельнокатаные колеса, коленчатые валы дизелей и компрессоров, детали тяговых передач локомотивов и пр.) приходится 35–40 % общего объема операций НК.

Отличительные особенности акустических методов состоят в возможности эффективного решения комплекса задач дефектоскопии, контроля физико-механических свойств материалов, измерения геометрических размеров объектов контроля. Автоматизация УЗ-контроля не только повышает производительность труда, но и обеспечивает получение экспрессной информации о соответствии контролируемого объекта установленным техническим требованиям. При этом методы УЗ-контроля не оказывают вредного влияния на окружающую среду, не опасны для здоровья обслуживающего персонала и позволяют при низких экономических затратах получать достоверную информацию о характере дефектов, расположенных на значительной глубине в материалах, металлоконструкциях и других промышленных изделиях.

В соответствии с классификационными признаками, указанными в ГОСТ Р 56542–2015 [8] существуют различные варианты применяемых методов акустического контроля.

Так, по характеру взаимодействия УЗ-излучения с контролируемым объектом методы акустического контроля делятся на следующие группы:

- прохождения (прошедшего излучения);
- отражения (отраженного излучения);
- комбинированные;
- собственных частот (свободных и вынужденных колебаний);
- акустико-топографический;
- импедансный;
- акустико-эмиссионный.

По первичному информативному параметру различают методы акустического контроля:

- амплитудный;
- временной;
- фазовый;
- частотный (по данному признаку акустические методы делят на низкочастотные и высокочастотные (ультразвуковые). К первым относят колебания в звуковом и низкочастотном, до нескольких десятков кГц, диапазонах частот, ко вторым – колебания в высокочастотном диапазоне частот: обычно от нескольких сотен кГц до 20 МГц.);
- спектральный.

По способу получения первичной информации различают методы:

- пьезоэлектрический;
- электромагнитно-акустический (ЭМА);
- микрофонный;
- порошковый.

Акустические методы можно разделить на две группы: активные и пассивные [23].

Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн, пассивные – только на приеме волн, источником которых служит сам контролируемый объект.

**Активные методы** делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), методы собственных частот и импедансные.

Методы прохождения используют излучающие и приемные преобразователи, расположенные по разные или по одну сторону контролируемого изделия. Применяют импульсное или (реже) непрерывное излучение и анализируют сигнал, прошедший через контролируемый объект.

К методам прохождения относят:

- *амплитудный теневой*, основанный на регистрации уменьшения амплитуды волны, прошедшей через контролируемый объект, вследствие наличия в нем дефекта;
- *временной теневой*, основанный на регистрации запаздывания импульса, вызванного увеличением его пути в изделии при огибании дефекта; тип волны при этом не меняется;
- *велосимметрический*, основанный на регистрации изменения скорости распространения дисперсионных мод упругих волн в зоне дефекта и применяемый при одностороннем и двустороннем доступе к контролируемому объекту.

В методах отражения используют как один, так и два преобразователя; применяют импульсное излучение. К этой подгруппе относят:

- *эхо-метод*, основан на регистрации эхо-сигналов от дефекта;

– *эхо-зеркальный метод*, основанный на анализе сигналов, испытавших зеркальное отражение от дефекта и донной поверхности изделия;

– *дельта-метод*, основанный на дифракционных эффектах, возникающих при распространении в пространстве изотропно рассеивающихся краевых продольных и поперечных волн;

– *дифракционно-временной метод*, основанный на излучении продольных и поперечных волн и на приеме этих волн, дифрагированных на верхнем и нижнем концах дефекта. Главная информационная характеристика – время прихода сигнала. Этот метод также называют *временпролетным*, буквальный перевод английского названия *Time of Flight Diffraction* (ToFD);

– *реверберационный метод*, основанный на анализе влияния дефекта на время затухания многократно отраженных УЗ-импульсов в контролируемом объекте.

В комбинированных методах используются явления как прохождения, так и отражения акустических волн. К ним относятся: *зеркально-теневой метод*, основанный на измерении амплитуды донного сигнала; *эхо-теневой метод*, в основу которого положен анализ как прошедших, так и отраженных волн; *эхо-сквозной метод*, при котором фиксируют сигналы многократного отражения волн от дефекта и испытавших также отражение от верхней и нижней поверхностей изделия.

Методы собственных частот основаны на измерении частот (или спектров) колебаний контролируемых объектов. Собственные частоты измеряют при возбуждении в изделиях как *свободных*, так и *вынужденных* колебаний. Свободные колебания обычно возбуждают механическим ударом, вынужденные – воздействием гармонической силы меняющейся частоты.

*Акустико-топографический метод* относится к методу вынужденных колебаний, имеет признаки интегрального и локального методов. Он основан на возбуждении в изделии интенсивных изгибных колебаний непрерывно меняющейся частоты и регистрации распределения амплитуд колебаний с помощью наносимого на поверхность порошка.

*Импедансный метод* относится к методу вынужденных колебаний. Он основан на анализе изменения механического или акустического *импедансов* участка поверхности, контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь. Имеет место зависимость импеданса ОК при его упругих колебаниях от параметров ОК и наличия в нем дефектов. Обычно оценивают механический импеданс.

Различают *интегральные* и *локальные* методы. В интегральных методах анализируют собственные частоты изделия, колеблющегося как единое целое, в локальных – колебания отдельных его участков.

**Пассивные методы** основаны на анализе упругих колебаний волн, возникающих в самом контролируемом объекте.



В практике НК получил распространение *метод акустической эмиссии* позволяющий выявлять зарождающиеся дефекты и прогнозировать остаточный ресурс деталей (надрессорные балки, боковые рамы тележек грузовых вагонов, котлы железнодорожных цистерн), выработавших свой нормативный срок службы.

Согласно ГОСТ 18353–79 [7] к пассивным акустическим методами следует отнести *вибрационно- и шумодиагностический*.

В первом анализируют параметры вибраций какой-либо отдельной детали или узла (ротора, подшипников, лопатки турбины) с помощью приемников контактного типа, во втором изучают спектр шумов работающего механизма, обычно с помощью микрофонных приемников. Данные методы служат для диагностики работающих механизмов.

Наибольшее применение получил эхо-метод (им проверяют > 90 % объектов, контролируемых акустическими методами). Он используется для дефектоскопии поковок, отливок, сварных соединений, неметаллических материалов, в толщинометрии, при определении физико-механических свойств материалов.

Зеркально-теневой метод применяют для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно поверхности ввода.

Эхо-зеркальный и эхо-теневой методы в варианте «тандем» используют для выявления вертикальных трещин и непроваров при контроле сварных соединений, дефектов округлой формы.

Теневой метод применяют для автоматического контроля изделий простой формы, для контроля изделий с большим уровнем реверберационных шумов, дефектоскопии многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков, при исследовании физико-механических свойств материалов с большим затуханием и рассеянием акустических волн.

Локальный метод вынужденных колебаний применяют для измерения малых трещин при одностороннем доступе.

Интегральный метод вынужденных колебаний используют для определения модуля упругости материала по резонансным частотам продольных, изгибных или крутильных колебаний при разрушающих испытаниях.

Велосиметрический, реверберационный, импедансный, акустико-топографический методы и локальный метод свободных колебаний используют в основном для контроля многослойных конструкций и полимерных композиционных материалов.

Дифракционно-временной метод используется для выявления дефектов в сварных швах сосудов, работающих под давлением, трубопроводов и металлоконструкций, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей толщиной от 6 до 300 мм. Этот метод применим, как правило, для материалов с относительно низкими уровнями затухания и рассеяния УЗ-волн, для нелегированных и низколегированных углеродистых сталей и сварных соединений, но также возможно его применение для мелкозернистых аустенитных сталей и алюминия.

## 5.2 Физические основы методов акустического контроля

### 5.2.1 Основные понятия акустики

**Акустика** (от греч. *akustikos* – слуховой) – в широком смысле – раздел физики, исследующий упругие волны от самых низких частот до самых высоких ( $10^{13}$  Гц). Общая и теоретическая акустика занимается изучением закономерностей излучения и распространения упругих волн в различных средах, а также взаимодействия их со средой.

**Волны** – изменения состояния среды (возмущения), распространяющиеся в этой среде. Волны, характеризуются такими объективными характеристиками, как частота, амплитуда, фаза колебаний, скорость распространения, интенсивность звука и др.

**Колебания** – перемещение частиц среды при распространении в ней звуковой волны.

Колебания в зависимости от частоты  $f$  разделяют:

– на инфразвуковые (от лат. *infra* – ниже, под) – упругие волны с частотой менее 16 Гц, которые не воспринимаются ухом человека.

– звуковые – упругие волны, распространяющиеся в твердых, жидких и газообразных средах и воспринимаемые ухом человека. Их частотный диапазон составляет 16–20000 Гц. Звуковые волны помимо вышеперечисленных имеют такие субъективные характеристики, как громкость звука, высота тона и тембр;

– ультразвуковые (от лат. *ultra* – сверх, за пределами) – упругие волны с частотой колебаний 0,02–1000 МГц;

– гиперзвуковые (от греч. *hyper* – над, сверх) – упругие волны с частотой, превышающей  $10^9$  Гц. Верхний предел частоты гиперзвука в кристаллах и жидкостях  $10^{12} \dots 10^{13}$  Гц, в газах  $10^9$  Гц соответствует частотам, при которых длина волны гиперзвука соизмерима с межмолекулярными расстояниями, а в случае газов – со средней длиной свободного пробега молекул.

При акустическом контроле используют колебания звукового и УЗ-диапазонов частот. Интенсивность этих колебаний невелика ( $\leq 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>). Такие колебания происходят в области упругих деформаций среды, где напряжения и деформации связаны пропорциональной зависимостью (область линейной акустики).

### 5.2.2 Основные акустические величины

В жидкостях и газах акустические волны характеризуются следующими параметрами:

– *смещение  $u$* , м, частиц среды из положения равновесия в процессе колебательного движения;

– *скорость колебательного движения частиц среды  $v = \frac{du}{dt}$* , м/с, где

$t$  – время;

– скорость распространения акустических волн  $c$ , м/с – характеризует скорость распространения определенного состояния (возмущения) среды;

– акустическое давление  $p$  (или его изменение)  $p = \rho c v$ ;  $\rho$  – плотность среды, Па = Н/м<sup>2</sup>.

Уравнение  $p = \rho c v$  называют акустическим законом Ома. Произведение  $\rho c$  получило название *акустического сопротивления (импеданса) среды Z*.

Если  $Z$  велико, то среда называется «жесткой» (акустически твердой): колебательные скорости и смещения частиц малы даже при высоких давлениях. Если же импеданс мал, то среда называется «мягкой» (податливой): даже при малых давлениях достигаются значительные колебательные скорости и смещения частиц.

Твердые тела отличаются от жидкостей тем, что при деформациях в них возникают не только давления, но и сдвиговые упругие напряжения.

*Энергия звуковой волны* – добавочная энергия среды, обусловленная наличием звуковых волн. Энергия звуковой волны единицы объема называется плотностью звуковой энергии  $w$  и определяется выражением

$$w = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{p^2}{2\rho c^2}, \quad (5.1)$$

где первый член – плотность кинетической энергии  $w_k$ ; второй – плотность потенциальной энергии  $w_p$ . Энергия в системе СИ измеряется в Дж.

*Плотность полной энергии*, Дж/м<sup>3</sup>, для плоской бегущей волны ( $w_k = w_p$ ) определяется выражением

$$w = \rho v^2 = \frac{p^2}{\rho c^2}. \quad (5.2)$$

Для гармонической плоской бегущей звуковой волны среднее по времени значение плотности энергии

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \rho v_0^2 = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{\rho c^2}, \quad (5.3)$$

где  $v_0$ ,  $p_0$  – амплитуды колебательной скорости и давления. Средняя по времени плотность полной звуковой энергии в стоячей волне

$$\langle w \rangle = \frac{1}{4} \frac{p_0^2}{\rho c^2}. \quad (5.4)$$

Средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени, называется *интенсивностью звука*. Для плоской синусоидальной бегущей волны интенсивность

$$I = \frac{\rho v}{2} = \frac{v^2 \rho c}{2}. \quad (5.5)$$

Для стоячей волны  $I = 0$ , т. е. потока энергии в среднем нет. В системе СИ интенсивность  $I$  измеряется в Вт/м<sup>2</sup>.

Гармонический колебательный процесс материальной точки (рисунок 5.1) описывается уравнением

$$u = u_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где  $u$  – отклонение колеблющейся частицы от положения равновесия в произвольный момент времени (смещение);  $u_0$  – максимальная амплитуда смещения;  $\omega t + \varphi_0$  – фаза колебаний;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний;  $\omega$  – круговая частота колебаний.

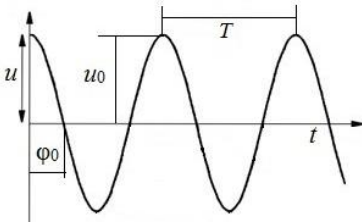


Рисунок 5.1 – Колебательный процесс материальной точки

Время  $T$ , в течение которого совершается один полный цикл колебания в УЗ-волне, называют *периодом колебаний*.

Число полных колебаний частицы около положения равновесия, совершаемых за 1 с, называют *частотой*  $f$  колебаний в УЗ-волне:  $f = 1/T$ . Круговая (циклическая) частота колебаний  $\omega = 2\pi f$ , рад/с.

Максимальное значение, которое принимает переменный параметр за период (смещение  $u$  или скорость  $v$ ), называют *амплитудой*.

*Фазой* УЗ-волны называют параметр, показывающий, какая часть периода прошла с момента начала последнего цикла колебания. Если нам известна фаза УЗ-колебания, это значит, что мы знаем, каковы смещение и скорость колеблющейся частицы, а также в каком направлении движется частица в данный момент времени.

*Длиной* УЗ-волны  $\lambda$  называется минимальное расстояние между двумя точками, колеблющимися в одной фазе (расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний её источника). Длина волны связана с частотой  $f$ , периодом и скоростью  $c$  соотношением

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT. \quad (5.6)$$

Длина волны  $\lambda$  является главным параметром, связывающим многие параметры волн, аппаратуры, среды.

Изменяя частоту  $f$  источника колебаний, можно регулировать длину волны  $\lambda$ . Этот параметр влияет на чувствительность методов УЗ-контроля, определяемую минимальными размерами (длина, ширина, глубина) дефектов, которые можно обнаружить этим методом.

Поскольку обнаружение дефектов в ОК основано на регистрации сигналов, отраженных от дефектов, то размер последних влияет на их выявляемость. Так, если размер дефекта  $2b$  в контролируемом изделии (рисунок 5.2, *a*) меньше длины волны  $\lambda$ , то волна огибает его не отражаясь, и на экране монитора дефектоскопа сигнал отсутствует. Если размер дефекта  $2b$  больше длины волны  $\lambda$  (рисунок 5.2, *б*), то волна отражается от дефекта и отраженный сигнал будет зарегистрирован дефектоскопом.

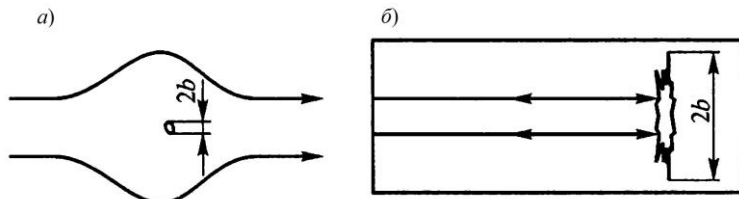


Рисунок 5.2 – Условия выявления дефекта:  
 $a - 2b < \lambda$ ;  $б - 2b > \lambda$

Для оценки способности систем передавать энергию принято использовать отношение величин на входе и выходе системы (мощность, интенсивность, звуковое давление) независимо от их абсолютной величины. У линейных систем мощность на выходе пропорциональна мощности, поданной на вход, и система характеризуется отношением этих двух мощностей, независимо от их абсолютной меры. На практике пользуются логарифмом этого отношения.

Для сравнения интенсивностей  $I$  и  $I_0$  или амплитуд  $A$  и  $A_0$  двух акустических волн используют специальные логарифмические единицы – децибелы (дБ) (названы в честь изобретателя телефона Белла,  $1 \text{ Б} = 10 \text{ дБ}$ ). Число децибел пропорционально десятичному логарифму отношения интенсивностей двух волн:

$$N = 10 \lg(I/I_0). \quad (5.7)$$

Принимая во внимание, что интенсивность акустической волны пропорциональна квадрату амплитуды волны ( $I \sim A^2$ ), можно получить выражение для определения числа децибел в зависимости от амплитуд волн:

$$N = 10 \lg(A^2/A_0^2) = 20 \lg(A/A_0). \quad (5.8)$$

Обычно измеряют отношение амплитуды  $A$  относительно возбужденных в изделии колебаний  $A_0$  зондирующего или начального сигнала. Поскольку в этом случае  $A < A_0$ , то число децибел, характеризующее амплитуду акустической волны, имеет знак «минус». В практике акустического контроля при оценке амплитуд знак «минус» обычно опускают.

Основное достоинство шкалы децибел состоит в том, что она позволяет сравнивать одноименные величины, значительно отличающиеся по абсо-

лютному значению. Это очень важно для практики акустического контроля, т. к. различие в амплитудах отраженного и зондирующего импульсов может составлять более чем три порядка.

Иногда для сравнения одноименных величин используются другие единицы измерения – непер, Нп. Число неперов равно натуральному логарифму отношения величин:

$$N = \ln(A/A_0) = 0,5 \ln(I/I_0). \quad (5.9)$$

Если рассматривается отношение давлений в звуковой волне, то поскольку  $I/I_0 = (p/p_0)^2$ , то  $N = 20 \lg(p/p_0)$ .

Между непером и децибелом имеют место соотношения: 1 Нп = = 8,686 дБ или 1 дБ = 0,115 Нп.

На практике, как правило, не занимаются расчетом десятичных логарифмов, а используют табличные данные или номограмму перевода (рисунок 5.3) относительных величин в децибелы.

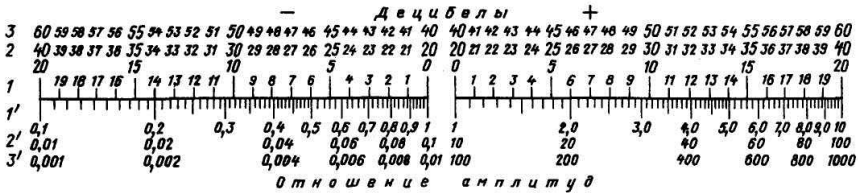


Рисунок 5.3 – Шкалы перевода относительных величин в децибелы

При пользовании номограммой следует сопоставлять значения на шкалах с одинаковым номером. Например, если  $N = -6$  дБ (1-я верхняя шкала), то  $A/A_0 = 0,5$  (1-я нижняя шкала); если  $A/A_0 = 500$  (3-я нижняя шкала), то  $N = 54$  (3-я верхняя шкала).

### 5.2.3 Волновое уравнение

Пусть сферическая волна возбуждается синусоидальными колебаниями в начале прямоугольной системы координат  $x, y, z$ . Эти возмущения повторяются с запаздыванием на время  $t = r/c$ , а также с некоторым уменьшением амплитуды на любом расстоянии  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  от начала координат. Если можно пренебречь затуханием волны в среде (внутреннее трение и т. п.), то амплитуда волны будет убывать пропорционально расстоянию  $r$ . С учетом запаздывания во времени и убывания амплитуды математическое выражение волны будет иметь следующий вид:

$$u = A_0 \frac{1}{r} \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{r}{c} \right). \quad (5.10)$$

При увеличении расстояния кривизна сферической поверхности стремится к нулю и волна на определенных, не слишком больших участках пространства может быть принята за плоскую волну, математическое выражение которой

$$u = A \sin \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x}{c} \right). \quad (5.11)$$

Обе волны являются частными решениями дифференциального уравнения 2-го порядка с частными производными, называемого *волновым уравнением*:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5.12)$$

или в сокращенном виде:

$$\Delta u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5.13)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа.

При помощи частных видов волнового уравнения описывается распространение волн в одном и двух измерениях. Так, распространение волн по струне (одно измерение), описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5.14)$$

а распространение волн по натянутым пленкам – мембранам (два измерения)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (5.15)$$

Уравнение для стоячих волн (уравнение собственных колебаний) получается, если принять  $u = A \sin \frac{2\pi}{T} t$ , где  $A$  – функция  $x, y, z$ . Подставляя это выражение в (5.12), получим волновое уравнение, не содержащее производной по времени (уравнение Гельмгольца):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2 u = 0, \quad (5.16)$$

где  $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c = 2\pi/cT = \omega/c$  – волновое число, которое соответствует числу волн, укладываемых на длине  $2\pi$ .

## 5.2.4 Типы акустических волн

В акустическом НК применяют разные типы (моды) волн, отличающиеся направлением смещения колебаний частиц, скоростью распространения и другими признаками. Различают три типа УЗ-волн:

- *продольные* (*l*-волны), называемые волнами растяжения-сжатия, в которых направление смещения частиц параллельно направлению распространения волны; в этих волнах существуют зоны повышенного и пониженного давления, обозначенные на рисунке 5.4, *а* зонами разной густоты частиц;
- *поперечные* (*сдвиговые*) (*t*-волны), в которых смещение частиц ортогонально направлению распространения волны (рисунок 5.4, *б*);
- *поверхностные* (*s*-волны) – упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела (рисунок 5.4, *в*); их разновидностью являются волны Рэлея (*R*-волны), распространяющиеся на границе «твердая среда – газ».

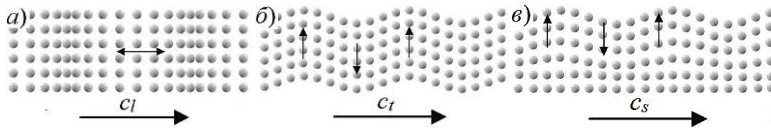


Рисунок 5.4 – Типы акустических волн:  
*а* – продольная; *б* – поперечная; *в* – поверхностная

Продольные волны могут существовать в любых средах (твердых, жидких, газообразных). Колебания частиц происходят в направлении распространения волны.

Поперечные волны могут существовать только в твердых средах, обладающих объемной упругостью. В поперечных волнах движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, а деформация является чистым сдвигом. Смещения частиц в поперечной (сдвиговой) волне могут иметь различные направления. В связи с этим говорят о поляризации этих волн. Если смещения лежат в одной плоскости, проходящей через направление распространения, то волна плоско поляризована. Встречаются также сдвиговые волны с эллиптической и круговой поляризацией, в которые частицы движутся по эллипсу или окружности в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

Скорости распространения продольных  $c_l$  и поперечных  $c_t$  волн зависят от постоянных упругости и определяются соотношениями:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (5.17)$$

где  $E$ ,  $G$  – модули упругости и сдвига соответственно;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.



Поскольку для всех металлов при комнатной температуре значение коэффициента Пуассона  $\nu \approx 0,3$ , то отношение скоростей

$$\frac{c_t}{c_l} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} = 0,55. \quad (5.18)$$

Скорость распространения поверхностных волн Рэлея определяется выражением:

$$c_s = \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu} c_t. \quad (5.19)$$

Тогда для металлов  $c_s \approx 0,93c_t$ .

Поверхностные волны Рэлея являются комбинацией продольных и поперечных волн. Данные волны способны распространяться на большие расстояния по поверхности твердого тела. Их энергия локализована в поверхностном слое толщиной  $d = (1,0...1,5)\lambda$ . При распространении волны частицы совершают колебания в приповерхностном слое по эллиптическим орбитам, большая ось которых перпендикулярна границе и совпадает с фронтом волны, а малая параллельна направлению распространения (рисунок 5.5).

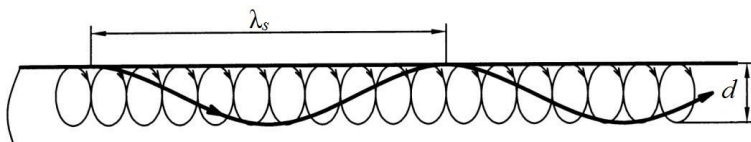


Рисунок 5.5 – Схема движения частиц в поверхностной волне

Поверхностные волны могут распространяться не только вдоль плоских, но и вдоль искривленных поверхностей, правда с большим затуханием. Эти волны чувствительны к шероховатости поверхности, грязи, защитным и другим покрытиям.

### 5.2.5 Акустические свойства сред

Акустические свойства сред определяют особенности генерации и распространения в данной среде упругих колебаний. Основные свойства сред проявляются через *скорости продольных и поперечных волн, характеристический импеданс и коэффициент затухания*.

Скорость звука как физическая константа упругой среды достаточно подробно рассматривалась нами ранее (см. п. 5.2.2).

Скорость звука зависит, вообще говоря, от самых разных факторов. Для газов существует явная зависимость от температуры, т. к. давление в газах определяется тепловым движением молекул. Однако в случае малых (акустических) колебаний давления и постоянной температуры скорость звука в

газах также постоянна. В твердых телах скорость звука является константой среды в широком температурном диапазоне. Это же относится и к механически нагруженным объектам – скорость звука постоянна в широком диапазоне нагрузок.

Упругие свойства изотропных твердых тел характеризуются двумя независимыми константами: модулем Юнга  $E$  и модулем сдвига  $G$ . Значения этих модулей однозначно определяют скорости продольных  $c_l$  и поперечных  $c_t$  волн в безграничной среде.

Для акустического контроля важной является такая характеристика среды, как *акустическое (волновое) сопротивление (импеданс)*, которое вводится при рассмотрении колебаний акустических систем (излучателей, приёмников звука и т. п.) по аналогии с электротехникой.

Волновое сопротивление (ВС) – важнейшая характеристика среды, определяющая условия отражения и преломления волн на её границе. При нормальном падении плоской волны на плоскую границу раздела двух сред коэффициент отражения определяется только отношением ВС этих сред; если ВС сред равны, то волна проходит границу без отражения.

Волновое сопротивление в газообразной или жидкой средах определяется отношением звукового давления  $p$  в бегущей плоской волне к колебательной скорости  $v$  частиц среды. Для твердого тела (для продольных и поперечных упругих волн в неограниченном твердом теле и для продольных волн в стержне) ВС определяется как отношение соответствующего механического напряжения, взятого с обратным знаком, к колебательной скорости частиц среды [24].

Для безграничной среды, где потери УЗ-энергии незначительны, ВС является действительной величиной, не зависит от формы волны и выражается формулой  $Z_a = p/v = \rho c$ , где  $\rho$  – плотность среды;  $v$  – колебательная скорость частиц среды;  $c$  – скорость звука.

Волновое сопротивление (акустический импеданс) в системе СИ имеет размерность акустических омов:  $[Z_a] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right]$ .

Значения импеданса различны для продольной и поперечной волн. Для твердых, жидких и газообразных сред значения характеристического импеданса различаются на несколько порядков:  $Z_a : Z_{ж} : Z_{т} = 1 : 10^3 : 10^5$ . Эта особенность приводит к тому, что полые дефекты в твердом теле при помощи УЗ выявляются с гораздо большей эффективностью, чем заполненные (например, поры, заполненные шлаком).

При распространении волн в реальных средах происходит уменьшение амплитуды колебаний частиц в волне, что может быть вызвано расхождением лучей (дифракционным ослаблением), характерным для сферических и цилиндрических волн, а также затуханием волн в среде. Подчеркнем, что

при затухании уменьшаются амплитуда и интенсивность всех типов волн, включая плоские волны. Затухание звука является важным свойством сред и обусловлено рядом причин. Основными из них являются:

1) *рассеяние* на неоднородностях (кристаллы, зерна) среды (рисунок 5.6), в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении;

2) *поглощение* звука – необратимый переход энергии волны в другие формы, в частности в тепло.

Основная причина затухания – наличие внутреннего трения в среде. Таким образом, затухание – акустическое свойство среды, в отличие от дифракционного ослабления, которое является свойством волны.

Затухание можно учесть введением дополнительного экспоненциального множителя в выражение для конкретного вида волн:

$$A(r) = A_0 e^{-\delta r}, \quad (5.20)$$

где  $A(r)$  – амплитуда в точке измерения;  $A_0$  – амплитуда волны в начальный момент времени;  $\delta$  – коэффициент затухания;  $r$  – расстояние, проходимое волной.

Коэффициент затухания  $\delta$  имеет размерность обратной длины (1/м), либо выражается в неперах на метр (Нп/м) и децибелах на метр (дБ/м).

Коэффициент  $\delta$  определяется как величина, обратная расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в «е» раз. Аналогичное выражение можно записать и для интенсивности волны:

$$I(r) = I_0 e^{-\delta r}, \quad (5.21)$$

где  $I(r)$  – интенсивность волны в произвольной точке среды.

Коэффициент затухания  $\delta$  представляет собой сумму коэффициентов поглощения  $\delta_n$  и рассеяния  $\delta_p$ :

$$\delta = \delta_n + \delta_p = Af + Bf^4 D^3, \quad (5.22)$$

где  $\delta_n = Af$ ;  $\delta_p = Bf^4 D^3$ ;  $f$  – частота;  $A$  и  $B$  – коэффициенты пропорциональности;  $D$  – средний диаметр зерна в твердом теле.

Для конкретных материалов существуют специальные таблицы для определения коэффициентов  $A$  и  $B$ .

Рассеяние обуславливается тем, что материал не является строго однородным. В нем имеются граничные поверхности, на которых звуковое сопротивление внезапно изменяется, поскольку там соприкасаются по сути

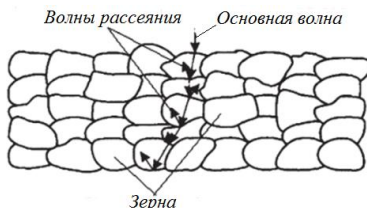


Рисунок 5.6 – Схема рассеяния акустических волн на неоднородностях среды

два вещества с различной плотностью или скоростью звука. Такими неоднородностями могут быть, *во-первых*, просто посторонние включения, например, неметаллические включения или поры, *во-вторых* – собственно дефекты материала – естественные или намеренно полученные, такие как пористость в материалах, изготовленных методами порошковой металлургии. Однако есть материалы, неоднородные по самой своей природе, например, литейный чугун, который представляет собой конгломерат зерен феррита и графита различных по своим упругим свойствам.

В других случаях кристаллиты различной структуры и разного химического состава «пронизывают» друг друга, как в латуни и сталях. Но даже если материал состоит только из кристаллов одного вида, он может быть неоднородным для УЗ-волн, если зерна расположены беспорядочно, поскольку отдельные кристаллы всегда имеют различные упругие свойства в различных направлениях и, следовательно, разные скорости звука. Такие материалы называют анизотропными. Упругая анизотропия является обязательным свойством металлов; только у разных металлов она проявляется по-разному.

В веществах с очень большими размерами зерен по сравнению с длиной волны процесс рассеяния можно представить геометрически: на наклонной границе раздела волна разделяется на различные отраженные и прошедшие виды волн. Для каждой из этих волн такой же процесс повторяется и на следующей границе зерна. Таким образом, от первоначального звукового пучка всё время отделяются составляющие волны, которые на своем длинном и сложном пути всё в большей степени превращаются в тепло вследствие имеющегося также истинного поглощения.

В диапазоне частот, применяемых при УЗ-контроле, размеры зерен, как правило, бывают меньше длины волны. В таком случае вместо геометрического расщепления происходит рассеяние, аналогичное рассеянию света прожектора на мелких капельках воды в тумане. При размерах зерна от  $10^{-3}$  до  $10^{-2}$  длины волны  $\lambda$  рассеяние практически не играет роли. Однако при дальнейшем увеличении размера зерна рассеяние очень быстро усиливается, примерно пропорционально кубу размера зерна, и при размерах зерна от  $0,1\lambda$  до  $\lambda$  достигает такого влияния, при котором контроль уже невозможен, поскольку материал анизотропен (рисунок 5.7).

Очевидно, что эти помехи нельзя преодолеть увеличением излучаемой мощности или повышением усиления, т. к. одновременно с этим будет увеличиваться и уровень шума. Здесь может помочь только переход в область более низких частот (больших длин волн).

Поглощение представляет собой непосредственное преобразование звуковой энергии в тепло, что может быть обусловлено многочисленными различными процессами, рассмотрение которых здесь невозможно. Нагляд-

но можно представить их как своего рода торможение колебаний частиц, вследствие чего понятно, что при быстрых колебаниях должно теряться больше энергии, чем при медленных. Поэтому поглощение, как правило, усиливается пропорционально частоте, т. е. намного медленнее, чем рассеяние. В чистых газах и жидкостях рассеяние отсутствует и затухание определяется только поглощением. При этом коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. Поэтому поглощение звука в газах и жидкостях характеризуют величиной  $\delta/f^2$ . Эта величина, как правило, в жидкостях меньше, чем в газах, а в твердых телах меньше, чем в жидкостях.

При *поглощении* звуковая энергия переходит в тепловую, а при *рассеянии* энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны в результате отражения от неоднородностей среды.

Оба вида потерь затрудняют контроль материалов, но по-разному. Чистое поглощение ослабляет прошедшую энергию или отражение (эхо) от дефекта и от задней стенки. Для компенсации этого можно применить повышенную мощность излучения и увеличить усиление, а также воспользоваться меньшим поглощением при работе с низкими частотами. Гораздо больше трудностей создает рассеяние, т. к., например, при эхо-методе ослабляются не только амплитуда отражения от дефекта и задней стенки, но и появляются многочисленные отражения, соответствующие разному времени прихода волн.

В твердых средах коэффициенты затухания для продольных и поперечных волн различны. Это связано как с различием скорости звука для этих волн, так и с тем, что в поглощение звука для продольной и поперечной волн могут вносить вклад различные механизмы. Большую роль в поглощении играет вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие волны с различными молекулярными процессами вещества, с тепловыми колебаниями кристаллической решетки и др. В кристаллических твердых телах преобладающую роль играет коэффициент рассеяния (особенно в бетоне, чугуне, граните и т. п.).

В монокристаллах и аморфных телах затухание определяется поглощением. При этом в зависимости от вида потерь коэффициент поглощения бы-

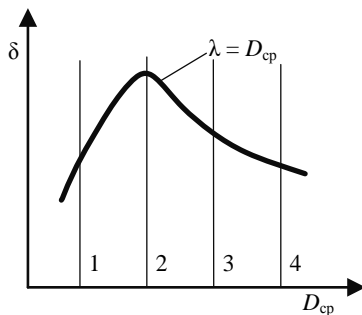


Рисунок 5.7 – Зависимость коэффициента затухания  $\delta$  УЗ-волны от соотношения среднего размера зерна  $D_{ср}$  и длины волны  $\lambda$   
 1 – зона рэлеевского рассеяния,  $\lambda \gg D_{ср}$ ;  
 2 – зона потерь за счет теплопроводности,  $\lambda = (3 \dots 4) D_{ср}$   
 3 – зона диффузионного рассеяния,  $\lambda \approx D_{ср}$ ;  
 4 – зона вязкого поглощения,  $\lambda \ll D_{ср}$

вает либо  $\sim f$  (стекло, металлы), либо  $\sim f^2$  (резина, полимеры), причем для продольных волн он больше, чем для поперечных.

Механизм затухания звука в металлах связан с их поликристаллическим строением, и затухание в них определяется в основном рассеянием, из-за упругой анизотропии. Это явление характеризуется зависимостью скорости и затухания звука от направления распространения волны относительно кристаллографических осей.

Сводка акустических свойств некоторых практически важных материалов представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Акустические свойства некоторых сред

Среда	Плотность $\rho$ , $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Скорость УЗ $c$ , $10^3$ м/с		Коэффициент затухания $\delta$ , м <sup>-1</sup> (при $f = 2,5$ МГц)
		$c_l$	$c_t$	
Воздух	0,0013	0,33	–	2,8
Вода	1,00	1,49	–	0,004
Органическое стекло	1,18	2,67	1,12	35
Кварц	2,65	5,74	3,75	–
Цирконат-титанат свинца	7,00	5,00	3,30	–
Алюминий	2,70	6,26	3,08	0,1–5,0
Медь	8,90	4,70	2,26	1,8–4,4
Сталь углеродистая	7,80	5,85	3,23	1,0–0,8
Сталь коррозионнотойкая	8,03	5,66	3,12	–

В металле кристаллы ориентированы случайным образом, поэтому при переходе УЗ из одного кристалла в другой, его скорость может изменяться в различной степени. В результате происходят частичное отражение, преломление УЗ и трансформация типов волн. При наличии рассеяния звука результирующее звуковое поле можно представить в виде суммы первичной звуковой волны (существовавшей в отсутствие препятствий) и рассеянной (вторичной волны), возникшей в результате взаимодействия первичной волны с препятствием. Из-за многих препятствий волны, рассеянные каждым из них, рассеиваются повторно и многократно другими препятствиями. Доля рассеянной энергии зависит, главным образом, от величины отношения длины упругой волны к среднему размеру кристаллита, а также от степени упругой анизотропии металла. Большим затуханием УЗ характеризуются такие металлы, как медь, цинк, никель; малым затуханием – вольфрам, магний, алюминий.

Зависимость коэффициента затухания от температуры определяется по формуле

$$\delta = \delta_0 [1 + K_\delta (t - t_0)], \quad (5.23)$$

где  $\delta_0$  – коэффициент затухания при исходной температуре  $t_0$ ;  $K_\delta$  – температурный коэффициент.

## 5.3 Возбуждение и регистрация УЗ-колебаний

### 5.3.1 Пьезоэффект и свойства пьезоматериалов

В настоящее время известны несколько способов возбуждения УЗ-колебаний, основанных на различных физических явлениях: *пьезоэлектрический, термоакустический, электромагнитоакустический эффекты*.

В 1880 г. французские ученые братья Кюри, изучая свойства кварца, открыли явление прямого и обратного пьезоэффекта [25].

Явление возникновения электрических зарядов на поверхности кварцевой пластины при ее деформировании называют **прямым пьезоэффектом**, а явление преобразования знакопеременного электрического напряжения, подаваемого на поверхность кварцевой пластины, в упругое колебание – **обратным пьезоэффектом**.

Суть **термоакустического эффекта** заключается в следующем. Если нагреть поверхностный участок какого-либо тела, то другие участки этого тела приобретут повышенную температуру не сразу, а лишь через некоторое время. Неравномерное распределение температуры приводит к неравномерному тепловому расширению тела, к появлению термомеханических напряжений, изменяющихся во времени. При этом возникают акустические волны, излучаемые слоем с изменяющейся температурой.

**Электромагнитоакустические методы** возбуждения и приема УЗ-колебаний основаны на явлениях магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействий.

Явления магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействия реализованы в электромагнитоакустических преобразователях (ЭМАП), которые позволяют бесконтактным способом возбуждать волны различных типов в ферромагнитных и токопроводящих материалах.

Для возбуждения и регистрации упругих волн в УЗ-приборах НК применяют преобразователи, реализующие вышеперечисленные эффекты.

Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) контактного типа. В последнее время расширяется сфера применения ЭМАП.

В ПЭП активными элементами являются пластины, изготовленные из искусственных пьезокерамических материалов (титаната бария, цирконата-титаната свинца) или природных монокристаллов кварца и других минералов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. На плоские поверхности пластин наносят тонкие слои серебра, служащие электродами.

Керамические пьезопластины приобретают пьезоэлектрические свойства только после поляризации, при которой случайно ориентированные векторы электрической поляризации элементарных частиц материалов – доменов – поворачиваются в направлении воздействующего поля.

Амплитуда колебаний пьезоэлемента зависит от напряжения на электродах и его собственной частоты колебаний. Наибольшая амплитуда колебаний пьезоэлемента достигается *при резонансе*, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой возбуждающего переменного напряжения или кратна ему. Собственная частота колебаний  $f$  зависит от толщины пьезопластины  $d$  и скорости упругих волн  $c$ :

$$f = c/2d. \quad (5.24)$$

Вынужденные колебания пьезоэлемента можно возбудить на любой частоте, но энергия излучения будет меньше, чем на резонансной. Зависимость амплитуды возбуждаемых пьезоэлементом колебаний от частоты подаваемого на него переменного напряжения постоянной амплитуды называется его *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ) (рисунок 5.8) [26].

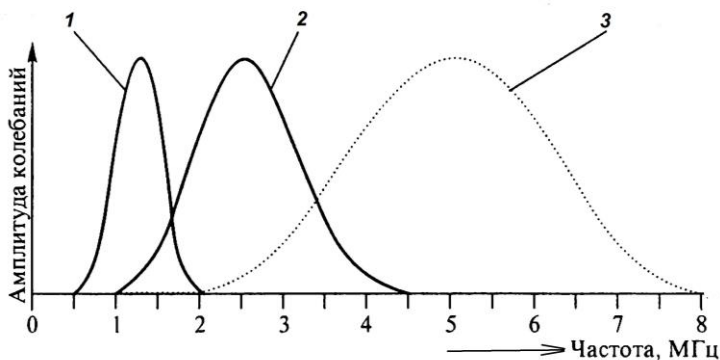


Рисунок 5.8 – АЧХ пьезопластин различной толщины, мм:  
1 – 0,3; 2 – 0,7; 3 – 1,3

Основными характеристиками пьезоэлементов являются: частотный спектр; излучаемая мощность звука; направленность излучения; относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ ; пьезомодуль  $d$ ; тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ; скорость распространения звука  $c$ ; плотность  $\rho$ ; предельно допустимая температура (минимальная температура, при которой материал теряет пьезопьезоэлектрические свойства, температура Кюри)  $T$ ; акустическая (механическая) добротность  $Q$ ; коэффициент электромеханической связи  $\beta$ .

Во многих случаях оценить пьезоэлектрические материалы применительно к различным режимам и условиям работы ПЭП оказывается удобнее параметрами, в которые вышеперечисленные величины входят в виде различных комбинаций.



Одним из таких параметров является *акустическая добротность*, являющаяся количественной характеристикой резонансных свойств пьезоэлемента, показывающей во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте, намного ниже резонансной, при одинаковой амплитуде вынуждающей силы. Короткое импульсное механическое воздействие на пьезоэлемент приводит к появлению на его обкладках (электродах) серии затухающих по экспоненте гармонических колебаний на собственной частоте пьезоэлемента. В УЗ-дефектоскопии используют пьезоэлементы с низкой добротностью (от 1 до 10). Вторым параметром, это *коэффициент электромеханической связи*  $\beta$ , характеризующий эффективность преобразования электрической энергии в упругую и обратно ( $<1$ ). Квадрат коэффициента электромеханической связи определяет чувствительность ПЭП при излучении и приеме УЗ-колебаний.

### 5.3.2 Отражение и преломление акустических волн на границе двух сред

В общем случае на границе раздела двух твердых сред могут происходить три явления: отражение, преломление и трансформация волн.

*Отражением* называют изменение направления УЗ-волны на границе раздела, при котором волна не переходит в другую среду.

*Преломлением* называют изменение направления УЗ-волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду.

*Трансформацией* называют преобразование волн общего типа в волны другого типа, происходящие на границе раздела двух сред.

Рассмотрим в упрощенном виде основные явления, происходящие при падении УЗ-волны на границу раздела двух сред, имеющих акустические сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$ .

В случае, когда плоская упругая волна, распространяясь в среде 1, падает под произвольным углом  $\beta$  на границу раздела, на рисунке 5.9 показаны геометрия задачи и направление координатных осей.

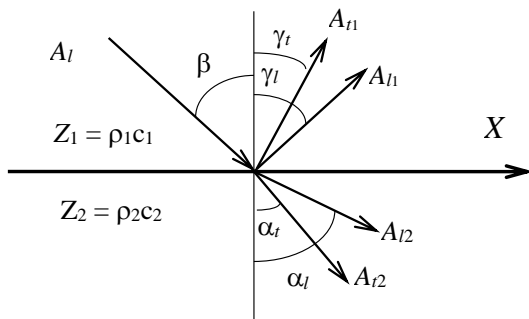


Рисунок 5.9 – Отражение и преломление волн на границе двух твердых сред

В отличие от анализа задачи с электромагнитными волнами для упругих волн необходимо принять во внимание не три, а пять волн: падающую, поперечную и продольную отраженные и поперечную и продольную преломленные. Если одна из сред является жидкостью или газом, поперечные волны в ней отсутствуют и общее число волн сокращается.

В случае плоской *продольной* падающей волны выполняются следующие соотношения:

$$\frac{\sin \beta}{c} = \frac{\sin \gamma_l}{c_{l1}} = \frac{\sin \gamma_t}{c_{t1}} = \frac{\sin \alpha_l}{c_{l2}} = \frac{\sin \alpha_t}{c_{t2}} = \text{const}, \quad (5.25)$$

где  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$  – углы падения отражения и преломления, индексы  $l$  и  $t$  отмечают параметры продольных и поперечных волн,  $c_{l1}$ ,  $c_{l2}$ ,  $c_{t1}$ ,  $c_{t2}$  – фазовые скорости распространения продольных и поперечных волн в верхней (индекс  $l$ ) и нижней ( $t$ ) средах.

Отсюда следует, что

$$\beta = \gamma; \quad \frac{\sin \beta}{\sin \gamma_l} = \frac{c}{c_{l1}}; \quad \frac{\sin \beta}{\sin \gamma_t} = \frac{c}{c_{t1}}; \quad \frac{\sin \beta}{\sin \alpha_l} = \frac{c}{c_{l2}}; \quad \frac{\sin \beta}{\sin \alpha_t} = \frac{c}{c_{t2}}. \quad (5.26)$$

Первое из этих соотношений есть закон равенства углов падения и отражения, а остальные являются обобщением закона Снеллиуса на случай упругих волн.

Если падающая волна является поперечной, то условия на углы находятся аналогичным образом.

Если на пути распространения УЗ-волны встречается другая среда (с другими акустическими свойствами), то часть энергии волны проходит через границу, а другая часть отражается от нее в первую среду.

Эти процессы характеризуются коэффициентами отражения  $R$  и прохождения (прозрачности)  $D$ .

*Коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $D$*  равны отношениям амплитуд соответствующих отраженных  $A_{\text{отр}}$ , прошедших  $A_{\text{пр}}$  и падающих  $A_0$  волн:

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_0}; \quad D = \frac{A_{\text{пр}}}{A_0}. \quad (5.27)$$

При нормальном падении волны *коэффициенты отражения и прохождения по амплитуде*

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; \quad D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (5.28)$$

На практике чаще используют *коэффициенты отражения и прохождения по энергии*

$$\bar{R} = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2; \quad \bar{D} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}. \quad (5.29)$$

Данное соотношение весьма важно для дефектоскопии, в связи с тем, что один и тот же преобразователь, как правило, используется для излучения и приема акустических волн.

Согласно закону сохранения энергии сумма всех коэффициентов отражения и прохождения по энергии равна единице:

$$\bar{R} + \bar{D} = 1.$$

При нормальном падении волны из среды с большим волновым сопротивлением на границу со средой с меньшим волновым сопротивлением коэффициент отражения  $R$  согласно формуле (5.28) отрицателен. Это означает, что фаза волны изменяется на обратную. Фаза отраженной волны обратна фазе падающей.

Увеличение отношения волновых сопротивлений сред уменьшает долю прошедшей энергии и увеличивает долю отраженной. Так, при нормальном падении продольной волны на границу сталь – воздух (или воздух – сталь) проходит только  $\approx 0,002$  % энергии, через границу вода – сталь  $\approx 12$  %, через границу оргстекло – сталь проходит  $\approx 25$  %. Это объясняется тем, что волновое сопротивление воды больше, чем воздуха, а оргстекла еще больше.

Так как несплошности материалов (трещины, поры, шлаковые включения, расслоения и т. д.) отличаются по своим акустическим свойствам от основного материала, то УЗ-волны, отражаясь от них, обуславливают их выявление при эхо-методе акустического контроля. Коэффициент отражения  $\bar{R}$  от трещин и пор близок к единице (при ширине раскрытия  $2b > 10^4$  мм), а от шлаковых включений колеблется от 0,15 (для продольных волн) до 0,65 (для поперечных волн).

Для улучшения прохождения волны от ПЭП к ОК и обратно промежуток между ними заполняют контактной жидкостью. Если толщина этого слоя  $< (1/4) \lambda$  в нем, то потери энергии на границе раздела будут минимальными.

В случае, когда скорость распространения падающей волны меньше, чем скорость распространения какой-либо преломленной (или отраженной) волны, то существует *критическое значение* угла падения, при котором соответствующая преломленная (или отраженная) волна превращается в неоднородную волну, т. е. концентрируется вблизи границы и быстро затухает при увеличении расстояния.

Рассмотрим условия существования критических углов. Если первой и второй средой являются твердые тела, то из закона синусов вытекает возможность существования следующих критических углов (рисунок 5.10).

*Первый критический угол*  $\beta_1$  при падении продольной волны соответствует условию слияния с поверхностью преломленной продольной волны:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{c_{l1}}{c_{l2}} \quad (5.30)$$

при условии  $c_{l1} < c_{l2}$ .

Распространяющаяся вдоль границы неоднородная волна называется *головной*. Максимальное значение напряжения головная волна имеет под поверхностью объекта и с ее помощью удается обнаруживать подповерхностные дефекты.

*Второй критический угол*  $\beta_2$  при падении продольной волны соответствует условию слияния с поверхностью преломленной поперечной волны:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{c_{t1}}{c_{t2}} \quad (5.31)$$

при условии  $c_{t1} < c_{t2}$ .

В этом случае неоднородная волна подобна поверхностной рэлеевской волне, и их трудно отличить друг от друга.

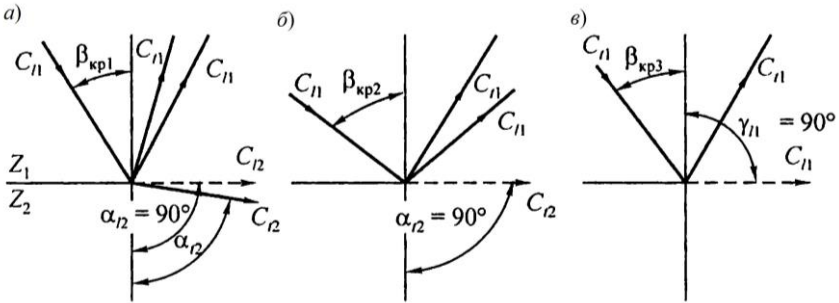


Рисунок 5.10 – Иллюстрация критических углов

*Третьим критическим углом* называют угол падения поперечной волны, при котором отраженная продольная волна превращается в неоднородную и начинает скользить по границе раздела. Наименьший угол падения поперечной волны, при котором еще отсутствует отраженная продольная волна определяется выражением:

$$\beta_3 = \arcsin \frac{c_{t1}}{c_{l2}} \quad (5.32)$$

при условии  $c_{t2} < c_{l2}$ .

Свойства упругих волн используют при конструировании наклонных преобразователей для контроля изделий продольными и поперечными волнами (первой средой при этом является призма из оргстекла, а вторая – контролируемое изделие).

В практике УЗ-контроля представляют интерес значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  при падении продольной  $l$ -волны из оргстекла (призма ПЭП) на границу раздела со сталью (контролируемая изделие).

Подставив значения скоростей распространения  $l$ - и  $t$ -волн, получим:  $\beta_1 \approx 27^\circ$ ;  $\beta_2 \approx 56^\circ$ ; для границы сталь – воздух  $\beta_{крз} \approx 34^\circ$ .

Рассматривая явления при падении акустических колебаний на границу раздела двух сред, можно сделать ряд практических выводов.

1 При нормальном падении УЗ-волн ( $\beta = 0^\circ$ ) трансформации не происходит. Коэффициенты отражения  $R$  и прозрачности  $D$  зависят только от соотношения акустических сопротивлений сред  $Z_1$  и  $Z_2$ .

2 При наклонном падении УЗ-волн ( $\beta > 0^\circ$ ) отраженные продольные и поперечные волны существуют при любых углах падения, а существование прошедших зависит от соотношения соответствующих скоростей (таблица 5.2).

**Таблица 5.2 – Условия существования преломленных волн при падении плоской волны**

Значение угла падения $\beta$	Типы преломленных волн
$\beta < \beta_1$	$l, t$
$\beta_1 > \beta > \beta_2$	$t$
$\beta > \beta_2$	–

В практике акустического контроля деталей подвижного состава применяются ПЭП с углами падения (углами призмы) 0, 6, 8, 40 и 50°.

При обозначении ПЭП ранее указывался угол призмы  $\beta$ , а в настоящее время – угол ввода луча  $\alpha$  (таблица 5.3).

**Таблица 5.3 – Соотношение между углами  $\beta$  и  $\alpha$**

Угол	Значение					
	В градусах					
Падения $\beta$	0	6	8	33	40	64
Ввода $\alpha$	0	13	18	40	52	90

Значения угла ввода  $\alpha$  можно рассчитать, зная скорость распространения УЗ-колебаний в призме и контролируемом изделии, в зависимости от угла  $\beta$  призмы, используя закон Снеллиуса.

### 5.3.3 Преобразователи для акустического контроля

Пьезоэлектрические преобразователи представляют собой устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии в акустическую, и наоборот.

Пьезопреобразователи можно классифицировать по ряду признаков: способу конструктивного исполнения и ввода УЗ-колебаний, направлению

УЗ-колебаний в объект контроля, форме рабочей поверхности ПЭП или пьезоэлемента, направленности поля излучения, числу пьезоэлементов в ПЭП.

В практике УЗ-контроля наибольшее применение получили контактные преобразователи (рисунок 5.11).

Пьезопластина 1 в прямом контактном совмещенном преобразователе (рисунок 5.11, а) приклеена или прижата с одной стороны к демпферу 2, с другой приклеена к протектору 3. Соединенные между собой пьезопластины, демпфер и протектор называют вибратором. Вибратор размещен в корпусе 6. Пьезопластина с помощью выводов 7 соединяется с электронным блоком дефектоскопа. Контактная жидкость 4 обеспечивает передачу упругих колебаний УЗ-частоты ПЭП к контролируемому изделию 5, и наоборот.

Прямые преобразователи предназначены для возбуждения в объекте контроля продольных волн.

Для ввода УЗ-колебаний под углом к поверхности контролируемого изделия применяют наклонные совмещенные преобразователи (рисунок 5.11, б), снабженные призмой 8. Эти преобразователи предназначены для возбуждения в основном поперечных (сдвиговых) и поверхностных волн, а также продольных волн.

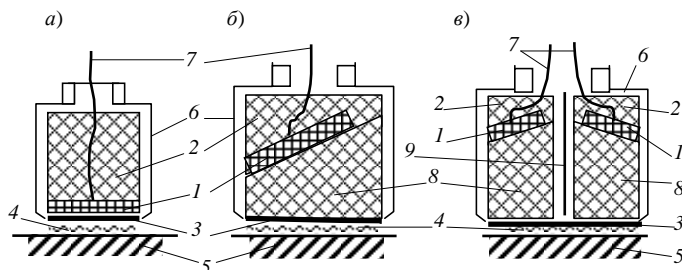


Рисунок 5.11 – Конструктивное исполнение основных типов ПЭП:  
а – прямой; б – наклонный; в – раздельно-совмещенный  
(обозначения расшифрованы в тексте)

Вибратор контактных раздельно-совмещенных преобразователей (рисунок 11, в) состоит из двух призм 8 с приклеенными к ним пьезоэлементами 7, разделенными электроакустическим экраном 9.

Пьезопластина обычно имеет толщину, равную половине длины волны в пьезоматериале на рабочей частоте. Обе противоположные поверхности пьезопластины покрывают серебряными электродами для равномерного приложения электрического поля. Края пластины во избежание пробоя не металлизуют.

Демпфер, изготовленный чаще всего из эпоксидных смол с добавкой порошковых наполнителей, предназначен для ослабления свободных колебаний пьезопластины, управления добротностью преобразователя и защиты

пъезопластины от механических повреждений. Ослабление колебаний пьезопластины тем сильнее, чем лучше согласованы акустические импедансы материалов пьезопластины и демпфера.

*Протектор* служит для защиты пьезопластины от механических повреждений и воздействия иммерсионной или контактной жидкости, улучшения акустического контакта при контроле контактными способом. Для изготовления протекторов применяют кварц, сапфир, бериллий, сталь, твердые сплавы, керамику, эпоксидные смолы с порошковыми наполнителями, характеризующиеся высокой износостойкостью и скоростью распространения в них УЗ-колебаний. Толщина протектора обычно составляет 0,1–0,5 мм. Протектор может быть изготовлен из эластичного материала – полиуретана, обладающего способностью облегать неровности поверхности изделия и тем самым обеспечивать стабильность акустического контакта.

*Призма* обычно изготавливается из материала с небольшой скоростью распространения УЗ-колебаний (оргстекло, капролон, поликарбонат, эпоксидные компаунды), что позволяет при относительно малых углах падения  $\beta$  получать углы ввода  $\alpha$  до  $90^\circ$ .

*Корпус* служит для защиты элементов от механических воздействий, а также экранирования от электромагнитных помех.

Преобразователь как акустическая система представляет собой пьезопластину с акустическим сопротивлением  $Z_0 = \rho_0 c_0$ , нагруженную одной стороной на демпфер с  $Z_1 = \rho_1 c_1$ , а другой на контролируемое изделие (прямой ПЭП) или на материал призмы (наклонный ПЭП) с  $Z_2 = \rho_2 c_2$ .

Одной из важнейших характеристик ПЭП является **чувствительность**, определяемая передаточной функцией, позволяющей при излучении найти акустический сигнал по известному электрическому, а при приеме – наоборот. Передаточная функция зависит от частоты и называется коэффициентом двойного преобразования

$$K = \frac{32}{\pi^3} \beta^2 \frac{Z_2}{Z_0} \frac{Q_3 Q_a}{\left(1 + \frac{8}{\pi^2} \beta^2 Q_3 Q_a\right)^2}, \quad (5.33)$$

где  $Q_a$  и  $Q_3$  – соответственно акустическая и электрическая добротности.

Акустическую добротность определяют по приближенной формуле

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \beta^2 \frac{Z_1}{Z_0 + Z_2}, \quad (5.34)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – волновые сопротивления сред, контактирующих с пьезопластиной без промежуточных слоев.

Максимального значения  $K$  достигает

при  $Q_3 = \frac{\pi^2}{8 \beta^2 Q_a}$ , тогда  $K_{\max} = \frac{0,5 Z_2}{Z_2 + Z_1}$ .

Повышенная чувствительность требуется для получения сигналов большой амплитуды, а расширение полосы частот – для формирования коротких импульсов.

Для наиболее эффективной работы преобразователя необходимо обеспечить высокий электрический КПД (т. е. передачу значительной доли электрической энергии от генератора преобразователю) и высокий акустический КПД (т. е. передачу значительной доли энергии упругих колебаний преобразователя в среду).

### 5.3.4 Пьезопреобразователь в виде фазированной решетки

Фазированной антенной решеткой (ФАР) называют преобразователь в виде элементов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Возбуждающие электрические импульсы на отдельные элементы подаются со сдвигом фазы (с запаздыванием по времени). Изменяя параметры сдвига фазы, управляют акустическим полем преобразователя.

Такие преобразователи применяют:

- для изменения угла ввода акустического излучения в контролируемый объект;
- регулировки диаграммы направленности;
- подавления боковых лепестков;
- фокусировки (изменения фокусного расстояния).

На рисунке 5.12 приведена схема линейной (одномерной) фазовой решетки, предназначенная для регулировки параметров акустического поля в плоскости  $XOY$ .

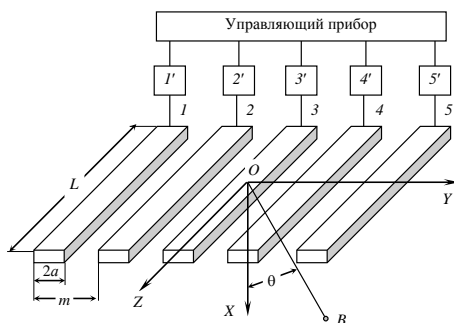


Рисунок 5.12 – Схема ПЭП на основе ФАР:

$1 \dots 5$  – элементы решетки;  $I' \dots 5'$  – элементы задержки управляющих импульсов;

$2a$  – ширина элемента решетки;

$m$  – шаг решетки;  $L$  – длина элемента решетки

Все элементы сделаны одинаковыми. Шаг решетки  $m$  делают обычно равным половине длины используемой акустической волны, потому что в этом случае влияние элементов друг на друга минимально. На практике также находят применение двумерные решетки с управлением акустическим лучом по двум плоскостям и кольцевые, позволяющие изменять величину фокусного расстояния.

Акустическое поле ФАР определяют, как произведение поля отдельного элемента на множитель,

учитывающий совместное действие всех элементов



$$P = P_0 \frac{S_a \sin X}{\lambda r} \frac{\sin NX}{\sin Y}, \quad (5.35)$$

где  $P_0$  – амплитуда давления у поверхности элементов решетки;  $S_a$  – суммарная площадь элементов;  $\lambda$  – длина волны;  $r$  – расстояние от центра решетки до точки наблюдения;  $N$  – число элементов в решетке;  $X = a k \sin \theta$ ;  $Y = 0,5km \left( \sin \theta - \frac{\lambda \psi}{m} \right)$ ;  $\psi$  – сдвиг фазы между соседними элементами (в долях  $2\pi$ ),  $\psi = \frac{t}{T}$ ;  $t$  – соответствующая временная задержка;  $T$  – период акустических колебаний.

Ширину элементов  $2a$  выбирают не более  $0,5m$ , т. е.  $a \leq \frac{\lambda}{8}$ .

Благодаря этому диаграмма направленности отдельного элемента определяется диаграммой направленности точечного источника.

Для формирования поля продольных волн используют центральный лепесток диаграммы направленности –  $\theta \leq 30^\circ$ , а для возбуждения поперечных волн – боковые лепестки с  $\theta = 35 \dots 80^\circ$ .

Чтобы обеспечить угол ввода  $\alpha$ , сдвиг фазы должен быть равен значению, определяемому по формуле

$$\psi = \frac{m \sin \alpha}{\lambda}. \quad (5.36)$$

Тогда акустическое поле решетки определяется выражением

$$P = P_0 \chi(\theta) \frac{S_a \sin \left[ 0,5kmN |\sin \theta - \sin \alpha| \right]}{\lambda r \sin \left[ 0,5km |\sin \theta - \sin \alpha| \right]}, \quad (5.37)$$

где  $\chi(0)$  – диаграмма направленности точечного источника.

В этом случае основной максимум соответствует условию  $\theta = 0$ , первые минимумы – условию

$$\sin \theta = \sin \alpha \pm \frac{\pi}{0,5kmN} = \sin \alpha \pm \frac{2}{N}, \quad (5.38)$$

если положить  $m = \frac{\lambda}{2}$ .

Если диаграмму направленности рассматривать по уровню 0,1, то направления на эти точки диаграммы определяются выражением

$$\sin \theta = \sin \alpha \pm \frac{1,6}{N}. \quad (5.39)$$

Применение ФАР требует использования импульсов большой длительности, чтобы обеспечить интерференцию акустических волн, приходящих в точку наблюдения от различных элементов решетки.

Для фокусировки акустических волн с помощью ФАР увеличивают запаздывание фазы на элементах, по мере удаления их от центра решетки. Изменяя запаздывание фазы, изменяют фокусное расстояние, т. е. осуществляют динамическую фокусировку.

### **5.3.5 Бесконтактные способы излучения и приема акустических волн**

Применение акустического контроля часто ограничивается необходимостью использования жидкой среды для передачи колебаний от преобразователя к изделию и обратно. Особенно если контроль ведется при больших скоростях и вибрациях объекта, высоких и низких температурах, шероховатой и загрязненной поверхности, а также при реализации автоматического контроля. В этих случаях применяют иммерсионный способ акустического контакта. Однако при этом существенно усложняется конструкция установок и уменьшается чувствительность за счет двукратного прохождения границы жидкость – объект. Бесконтактные методы возбуждения акустических волн расширяют возможности акустического НК.

Рассмотрим основные бесконтактные методы.

#### **Воздушно-акустическая связь**

В принципе УЗ-колебания могут передаваться через воздушную среду. При этом из-за сильного затухания эффективный частотный диапазон колебаний составляет 0,1–1,0 МГц. Существенным ограничивающим фактором является низкий коэффициент прохождения через границу воздух – твердое тело. Для сравнения отметим, что ослабление сигнала при сквозном прозвучивании образца через воздушные слои в 2–3 тыс. раз больше, чем при иммерсионном способе контроля.

Воздушный контакт может быть эффективен при прохождении низкочастотных колебаний через тонкие слои твердого материала толщиной меньше четверти длины волны.

Практически данный метод ввода используется при экспресс-контроле чистоты обработки поверхности изделия, дистанционной виброметрии и толщинометрии листов (при двустороннем доступе). Как правило, применяются пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи, а также ударные волны.

#### **Термоакустические эффекты**

Термоакустический эффект – это возникновение акустических волн, вызванное изменяющимися во времени термомеханическими напряжениями в результате неравномерного нестационарного распределения температур.

Существует несколько способов быстрого бесконтактного нагрева участка твердого тела. Например, электроискровой посредством электрического конденсатора. При этом амплитуда акустического импульса в десятки тысяч

раз меньше, чем при использовании пьезопреобразователей, частотный диапазон составляет 0,1–1,0 МГц.

Перспективным является нагрев лучом лазера, который позволяет возбудить акустические импульсы с большой амплитуды и с малой длительности. Экспериментально установлено, что производительность контроля при лазерном возбуждении на 2–4 порядка меньше, чем при контактном способе ввода УЗ-колебаний.

Для нагрева также могут быть использованы индукционный метод и пучок электронов.

При амплитуде колебаний температуры 100 °С на частоте  $\approx 1$  МГц напряжения, возбуждаемые в металле термоакустическим методом, на порядок меньше, чем напряжения, полученные пьезоэлектрическим. Прием акустических колебаний, полученных за счет термоакустического эффекта представляет большую сложность.

### **Эффект электрического поля**

Если токопроводящую поверхность изделия сделать одной из обкладок конденсатора, то акустические колебания в ней могут быть вызваны за счет сил взаимодействия электрических зарядов. Прием колебаний может быть осуществлен за счет обратного эффекта, т. е. появления переменного электрического напряжения на обкладках конденсаторного преобразователя при изменении расстояния между обкладками.

Как правило, для устранения удвоения частоты на конденсатор подается постоянное напряжение  $U_0$ . Напряжение акустического поля в этом случае при некоторых допущениях описывается выражением

$$P = -\frac{U_0 U_1 \varepsilon_0 \varepsilon}{h^2}, \quad (5.40)$$

где  $\varepsilon = 1$  для воздуха;  $U_1$  – переменное напряжение на обкладках;  $h$  – зазор между обкладками. Оно в  $\approx 10^3$  раз меньше значения, достигаемого с помощью иммерсионного преобразователя.

В режиме приема реализуется аналогичный принцип. При этом чувствительность конденсаторного приемника будет также в  $10^3$  раз меньше, чем иммерсионного преобразователя.

Описанные преобразователи используются в научных исследованиях. Их основное достоинство – широкополосность.

На аналогичном эффекте электростатического поля основано действие электретных преобразователей, в которых в отличие от конденсаторных на электроде, обращенном к изделию, закрепляется электретная пленка. Чувствительность таких преобразователей пропорциональна отношению  $g/h$ , где  $g$  – поверхностный заряд,  $h$  – зазор, и того же порядка, что и у конденсаторных.

## Эффекты электромагнитного поля

Возбуждение акустических колебаний под действием электромагнитного поля происходит в результате магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействий.

Магнитострикцией называют изменение формы и объема ферромагнитных материалов под действием внешнего магнитного поля. Обратный эффект – появление магнитного поля в результате деформации элементов ферромагнитного тела – называют магнитоупругим эффектом.

В практике широкое применение получили преобразователи из магнитодиэлектриков: ферритов, оксиферов. Данные типы преобразователей применяются в низкочастотной УЗ-технике (до 40–50 кГц), т. к. на более высоких частотах они имеют очень большие потери.

Магнитное взаимодействие состоит во взаимном притяжении и отталкивании ферромагнитного материала и катушки с переменным электрическим полем. Если ОК намагнитить постоянным магнитом и поместить над ним катушку с переменным током, то она будет притягиваться и отталкиваться от него в зависимости от направления магнитного поля. Это вызовет возбуждение упругих колебаний поверхности изделия, т. к. магнитные полюса образуются только на поверхности изделия. Прием колебаний осуществляется на основе возникновения электрического тока в катушке при приближении и удалении поверхности изделия.

Электродинамическое воздействие основано на эффекте вихревых токов, индуцируемых в изделии под действием переменного тока в катушке, расположенной вблизи изделия, и проявляется в их взаимодействии с внешним магнитным полем от постоянного магнита. Упругие силы при этом будут концентрироваться в узком поверхностном слое. Обратный эффект состоит в том, что вихревые токи, возбуждаемые в металле под действием упругих волн, индуцируют переменный ток в катушке, которая служит приемником.

Магнитострикционный и магнитный эффекты позволяют возбуждать продольные УЗ-волны в ферромагнитных материалах и в магнитодиэлектриках. Электродинамический эффект позволяет возбуждать как продольные, так и поперечные волны в любых электропроводящих материалах.

### Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи

Работа данных преобразователей основана на действии одновременно всех трех эффектов электромагнитного поля в ферромагнитных металлах.

Рассмотрим принцип действия и конструкции ЭМА-преобразователей.

В приведенной схеме преобразователь состоит из электромагнита 3 (рисунк 5.13, а), питаемого постоянным током, и катушки 2, питаемой переменным током. В преобразователе магнитное поле с индукцией  $B_n$  в зоне действия вихревых токов расположено по нормали к поверхности изделия. Вихревой ток же в изделии создает катушка 2. Сила  $F$ , которая определяет смещение точек среды, направлена в этом случае по касательной к поверхности, т. е. возбуждаются *поперечные* акустические волны.

Как видно из схемы преобразователя (рисунок 5.13, б), магнитное поле  $B_t$  направлено по касательной к поверхности изделия, поэтому в изделии будут возникать *продольные* волны.

Чувствительность ЭМА-преобразователей в  $\approx 10^3$  раз меньше, чем ПЭП при контроле иммерсионным способом.

С помощью ЭМА-преобразователей могут быть возбуждены самые различные типы волн. Как видно из приведенных схем, продольные и поперечные волны могут быть возбуждены раздельно, если токовые катушки располагать над такими участками поля магнитной индукции, где существует только одна нормальная или тангенциальная его составляющие.

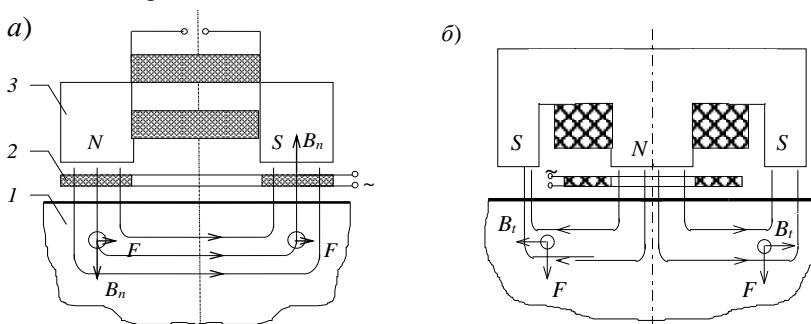


Рисунок 5.13 – Схемы ЭМА-преобразователей для возбуждения волн различного типа

Если расстояние между проводниками с одинаковым направлением тока сделать равным длине соответствующей волны, то возможно возбуждение волн Рэлея и Лэмба.

С помощью ЭМА-преобразователей удастся возбудить нормальные поперечные волны, что сложно сделать другими способами.

Важным достоинством ЭМА-метода является возможность его использования при высоких температурах.

Преимуществами ЭМА-преобразователей является более высокая чувствительность по сравнению с другими способами бесконтактного возбуждения на частотах, применяемых в дефектоскопии, широкополосностью, возможностью возбуждать волны разных типов, температуростойкостью. К недостаткам следует отнести громоздкость, энерго- и материалоемкость и малую чувствительность по сравнению с ПЭП.

### 5.3.6 Акустическое поле преобразователя

Область пространства, в которое преобразователь излучает и откуда может принимать волны называют *акустическим полем*.

*Поле излучения* преобразователя – зависимость амплитуды излучения от положения исследуемой точки в пространстве.

*Поле приема* – зависимость амплитуды принятого преобразователем сигнала от положения в пространстве точечного источника.

*Поле излучения-приема* – зависимость амплитуды принятого преобразователем сигнала от положения в пространстве точечного отражателя, рассеивающего одинаково по всем направлениям и облучаемого тем же преобразователем.

Поскольку поле приема пропорционально полю излучения, то поле излучения-приема пропорционально квадрату поля излучения.

*Акустической осью* нормального преобразователя называют перпендикуляр к его излучающей (принимающей) поверхности, восстановленный в геометрическом центре тяжести площади пьезопластины. На достаточно большом расстоянии от преобразователя при равномерном синфазном излучении всеми точками его поверхности акустическая ось совпадает с направлением максимума поля излучения, называемого центральным лучом.

При воздействии ПЭП на поверхность контролируемого изделия в последнем возбуждаются как объемные (продольная и поперечная), так и поверхностные волны. Доля энергии, уносимая каждой из волн, зависит от соотношения скоростей и волнового размера зоны возбуждения. Возбужденные объемные волны расходятся от центра зоны со сферическими фронтами, а поверхностные – с цилиндрическим фронтом. Если возбуждается несколько колебательных процессов, то результирующее колебание можно найти путем суммирования отдельных составляющих колебаний. При сложении векторных величин (сила, скорость) учитывается направление каждой составляющей, при сложении скалярных величин (например, смещение) результат зависит только от амплитуды и фазовых соотношений всех составляющих.

Наложение двух или более когерентных колебаний, имеющих одинаковые или кратные частоты и неизменную разность фаз, называется *интерференцией*.

Вблизи излучателя акустическое поле вследствие интерференции имеет сложную структуру с чередующимися минимумами и максимумами звукового давления вдоль и поперек акустической оси излучателя (рисунок 5.14).

В практической УЗ-дефектоскопии используются законы так называемой геометрической оптики (ГО). Это означает, что акустические лучи распространяются по прямым линиям, а если попадают на границу раздела, то на ней происходят явления, описываемые законом Снеллиуса. Однако если на пути УЗ-колебаний встречается звуконепроницаемое препятствие, то по законам ГО за препятствием должна возникнуть область, куда не проникает звуковое поле, т. е. область звуковой тени. На самом деле в зависимости от соотношения размеров этого препятствия и длины на некотором расстоянии за препятствием в области геометрической тени обнаруживаются звуковые волны, т. е. звук «огibt» преграду. Это свойство звуковых волн получило название *дифракция*.

Поскольку в практике акустического контроля наибольшее применение нашли дисковые пьезопреобразователи, рассмотрим поле излучения на его примере.

Поле на акустической оси преобразователя при непрерывном излучении звука (рисунок 5.14) определяется зависимостью

$$\frac{P}{P_0} \approx \left| 2 \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right| \quad (5.41)$$

где  $P$  и  $P_0$  – амплитуды акустического сигнала на поверхности среды, соприкасающейся с преобразователем и на расстоянии  $r$  по оси преобразователя;  $a$  – радиус пьезопластины.

Эта зависимость имеет максимумы при

$$r = \frac{a^2}{(2n-1)\lambda} \quad (5.42)$$

и минимумы при

$$r = \frac{a^2}{2n\lambda}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5.43)$$

Число максимумов составляет  $2a/\lambda$ . Видно, что функция испытывает осцилляции с увеличением расстояния  $r$ . Последнего максимума функция достигает при

$$r = r_0 = \frac{a^2}{\lambda}. \quad (5.44)$$

За пределами ближней зоны (см. рисунок 5.14) акустическое поле приобретает форму усеченного конуса с небольшим углом  $\theta$  при вершине. Затем она монотонно уменьшается по закону  $\sim S_a/\lambda r$ .

Область, прилегающая к поверхности преобразователя, в которой акустическое поле изменяется немонотонно при изменении расстояния от преобразователя вдоль оси ( $r < r_0$ ), называется *ближней зоной (зона дифракции Френеля)*. В случае излучения коротких импульсов, имеющих колоколообразную форму, максимумы и минимумы заметно сглаживаются (рисунок 5.15).

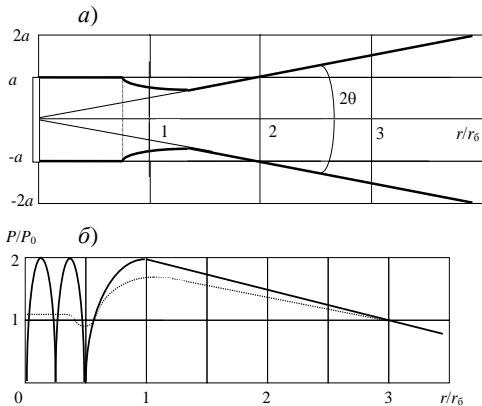


Рисунок 5.14 – Поле излучения на оси дискового преобразователя (а) и его схематическое изображение (б)

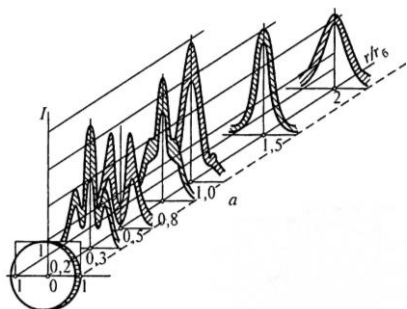


Рисунок 5.15 – Поле излучения-приема  
дискового преобразователя

Обычно акустическое поле изображают в виде *диаграммы направленности*, характеризующей изменение поля в зависимости от угла между направлением луча и акустической осью (рисунок 5.16). За единицу принимают амплитуду на акустической оси.

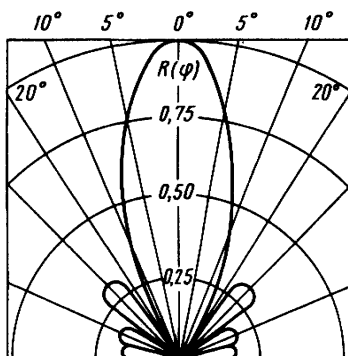


Рисунок 5.16 – Диаграмма  
направленности поля излучения  
дискового преобразователя

Обычно за нижнее значение амплитуды основного лепестка принимают величину 0,1. Раскрытие лепестка на этом уровне

$$\theta'' = \arcsin 0,54 \frac{\lambda}{a}. \quad (5.47)$$

В пределах основного лепестка диаграммы сосредоточено  $\approx 85\%$  энергии поля. Вне основного лепестка диаграмма имеет вид боковых лепестков, уровень которых определяется отношением поля на акустической оси к максимальной величине поля вне основного лепестка. В случае излучения

В ближней зоне около 80 % полученной энергии находится в пределах цилиндра, ограниченного краями преобразователя, однако по сечению цилиндра энергия распределена неравномерно.

Дальней зоной преобразователя (зона дифракции Фраунгофера) называют область, в которой акустическое поле монотонно уменьшается с увеличением расстояния от преобразователя до точки вдоль акустической оси. В дальней зоне поле будет иметь вид лучей, выходящих из центра пластины.

Часть диаграммы направленности, в пределах которой амплитуда уменьшается до нуля от единицы, называют основным лепестком. Диаграмма направленности в дальней зоне определяется выражением

$$\frac{P}{P_0} \approx \left| \frac{2J_1(ak \sin \theta)}{ak \sin \theta} \right|, \quad (5.45)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка;  $k$  – волновой вектор,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\theta$  – угол между направлением луча и акустической осью.

Раскрытие основного лепестка определяется выражением

$$\theta' = \arcsin 0,61 \frac{\lambda}{a} = \arcsin \left( 0,61 \frac{c}{af} \right). \quad (5.46)$$



коротких импульсов минимумы поля между лепестками сглаживаются. Удвоенный угол раскрытия основного лепестка  $2\theta$  называют *шириной диаграммы направленности*.

Из уравнения 5.46 следует, что при постоянной частоте  $f$  излучения УЗ-колебаний, чем больше диаметр пьезопластины, тем уже диаграмма направленности. При больших размерах пьезоэлемента диаграмма направленности становится достаточно узкой, кроме того, у нее появляются боковые лепестки.

Акустическое поле преобразователя, в котором пьезопластина отделена от поверхности изделия линией задержки, отличается тем, что возбуждение волн происходит сначала в призме, а затем, после преломления на границе, в контролируемом объекте (во второй среде).

В наклонных ПЭП между пьезопластиной и контролируемым объектом устанавливают призму из материала, в котором скорость звука меньше чем в материале объекта контроля. Эту призму называют *акустической задержкой*. Иногда такую призму (плоскопараллельную пластину) устанавливают и в прямом ПЭП для уменьшения величины «мертвой зоны» преобразователя.

Расчет акустического поля преобразователя с задержкой основан на введении мнимой пьезопластины, которой заменяют действительную. Принцип замены состоит в том, что для каждого элементарного источника (рисунок 5.17, *а*) строят расходящийся пучок лучей с учетом преломления призма-объект контроля, преломленные лучи продолжают за границы преломления, определяя мнимое положение излучателя. Совокупность мнимых источников образует мнимый излучатель.

В случае плоскопараллельной акустической задержки акустическое поле можно описать и в ближней, и в дальней зонах как поле мнимой пьезопластины. При этом границу ближней зоны определяют из соотношения:

$$X_A + nX_B = \frac{a^2}{\lambda}, \quad (5.48)$$

где  $X_A$  – толщина задержки (призмы);  $n$  – отношение скоростей звука в материале призмы и в контролируемом объекте,  $n = \frac{c_A}{c_B}$ ;  $X_B$  – расстояние до точки наблюдения в объекте контроля;  $a$  – радиус пьезопластины;

Для наклонного пьезопреобразователя построение проводится похожим образом. На рисунке 5.17, *б* такое построение приведено для центрального участка пьезопластины. Из этого участка проводятся два луча к границе призма-объект контроля (один из лучей проведен в направлении акустической оси) и с учетом закона преломления акустических волн эти лучи продолжают в объекте контроля.

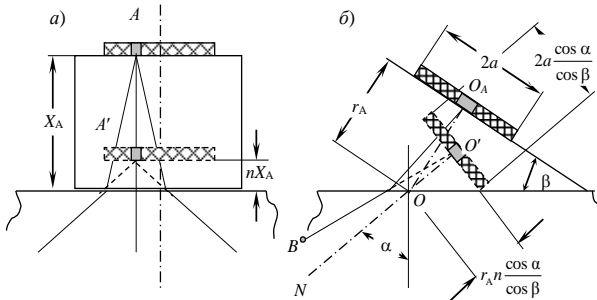


Рисунок 5.17 – Схема расчета поля преобразователя с плоскопараллельной (а) и клиновидной (б) акустической задержкой (призмой)

Пересечение этих продолжений в призме дает мнимое изображение центрального участка пьезопластины. Построив такие мнимые изображения для других точек пьезопластины, можно получить полностью мнимое изображение пьезопластины, излучение от которой определяет акустическое поле наклонного пьезопреобразователя.

Одной из характерных особенностей мнимой пьезопластины является то, что размер ее в плоскости чертежа уменьшается по сравнению с аналогичным размером реальной пластины, а в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, остается неизменным; другой – то, что мнимая пластина не параллельна реальной.

Удовлетворительное соответствие экспериментально наблюдаемого акустического поля наклонного преобразователя с рассчитанным полем от мнимой пьезопластины наблюдается лишь в дальней зоне. В ближней же зоне осцилляции давления отсутствуют. Поэтому для расчета акустического поля излучения-приема в дальней зоне наклонного пьезопреобразователя применяется приближенная формула [23].

### 5.3.7 Методы УЗ-контроля

Из широкого спектра методов УЗ-контроля, которые мы перечислили выше, для дефектоскопирования деталей ПС в основном применяются три метода:

- эхо-метод;
- теневой;
- зеркально-теневой метод (ЗТМ).

На долю эхо-метода приходится  $\approx 97\%$  общего объема УЗ-контроля при плановых видах ремонта ПС.

В последние годы получил большое распространение дифракционно-временной метод (ToFD), который стал общепризнанным и используемым после появления мощных портативных компьютеров (во второй половине 1980-х гг.). Метод ToFD не заменяет полностью традиционные УЗ-методы, но делает его вспомогательным или дублирующим [27–29].

Также широкое распространение для НК получил метод с использованием ФАР. Технология с использованием ФАР – это более усовершенствованный и мощный по сравнению традиционным УЗ-методом контроля метод, основанный на анализе амплитуды сигнала с возможностью визуализации и записи дефектов в виде *A, B, C, D*-сканов [30, 31].

**Эхо-метод** основан на способности УЗ-волн, излучаемых в контролируемое изделие, отражаться от дефектов с последующей регистрацией эхо-сигналов индикаторами дефектоскопов.

К достоинствам эхо-метода относятся:

- односторонний доступ к изделию;
- высокая чувствительность при выявлении внутренних несплошностей в контролируемых объектах;
- высокая точность определения координат дефектов.

К недостаткам эхо-метода можно отнести: зависимость амплитуды отраженного сигнала от ряда факторов (размера, координат, ориентации, типа дефектов и отражающей способности поверхностей отражателей); низкую помехоустойчивость к поверхностным дефектам; невозможность контроля качества акустического контакта при сканировании ПЭП. На рисунке 5.18 приведена схема формирования эхо-сигналов при контроле эхо-методом.

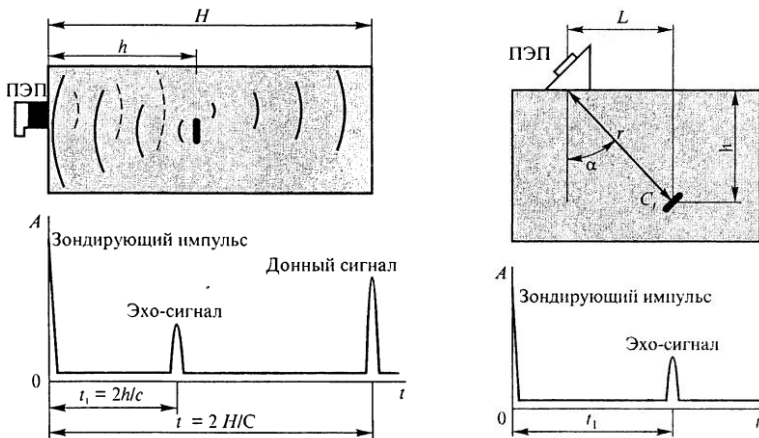


Рисунок 5.18 – Схема реализации эхо-метода при использовании прямого (а) и наклонного (б) ПЭП

Излучаемые в изделие через определенные промежутки времени импульсы УЗ-волн (зондирующие) отражаются от противоположной (донной) поверхности изделия и, возвращаясь, попадают на ПЭП (рисунок 5.18, а). На экране монитора возникает донный сигнал через время  $t = 2H/c$  ( $H$  – тол-

щина контролируемого изделия). Если в изделии на глубине  $h$  имеется дефект, то между зондирующим импульсом и донным через время  $t_1 = 2h/C$  появится эхо-сигнал от дефекта.

При контроле тонких изделий с плоскопараллельными поверхностями получают серию донных сигналов с постепенно убывающей амплитудой, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга (уменьшение амплитуды связано с затуханием УЗ). Донные сигналы могут отсутствовать на экране монитора в тех случаях, когда дефект имеет значительный размер и полностью перекрывает УЗ-пучок, если донная поверхность не параллельна поверхности ввода УЗ-колебаний, когда толщина детали  $H$  настолько велика, что вследствие затуханий УЗ-колебаний амплитуда эхо-сигнала от противоположной поверхности очень мала.

При наклонном вводе УЗ-колебаний (рисунок 5.18, б) временной интервал между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от дефекта определится из соотношения

$$t = \frac{2r}{C_t} = \frac{2h}{C_t \cos \alpha}, \quad (5.49)$$

где  $r$  – расстояние от точки ввода УЗ-колебаний до дефекта;  $C_t$  – скорость поперечных УЗ-колебаний в изделии;  $\alpha$  – угол ввода УЗ-колебаний.

Глубина залегания дефекта определяется следующим образом: при выявлении дефекта прямым ( $\alpha = 0^\circ$ ) преобразователем

$$h = \frac{C_t t}{2} \quad (5.50)$$

при обнаружении дефекта наклонным преобразователем

$$h = \frac{C_t t \cos \alpha}{2}, \quad (5.51)$$

а расстояние  $L$  между точкой ввода УЗ-колебаний и проекцией дефекта на поверхность сканирования

$$L = \frac{C_t t \sin \alpha}{2}. \quad (5.52)$$

Конструктивно между пьезоэлементом прямого ПЭП ( $\alpha = 0^\circ$ ) и поверхностью объекта контроля находится протектор (рисунок 5.19, а). Для прохождения УЗ-колебаний через протектор толщиной  $h_n$  необходимо время  $t_n$ , которое следует учитывать при точном определении глубины залегания дефекта.

Так как толщина протектора ПЭП, работающих в совмещенном режиме, не превышает 2,0 мм, то время  $t_n \leq 1$  мкс и им можно пренебречь.

В наклонных ПЭП пьезопластину помещают на специальную призму из органического стекла (рисунок 5.19).

В этом случае путь УЗ-колебаний складывается из пути в призме  $r_n$  и пути  $r$  в контролируемом изделии. При этом путь в призме составляет в зависимости от угла призмы  $\beta$  от 4 до 9 мм, а двойное время распространения УЗ-колебаний в призме  $2t_n$  – от 3 до 8 мкс.

Этим временем при определении координат дефектов пренебречь нельзя. В этом случае глубина залегания дефекта

$$h = \frac{C_t(t - 2t_n)\cos\alpha}{2}. \quad (5.53)$$

Основными первичными измеряемыми характеристиками сигналов от дефектов при эхо-импульсном методе акустического контроля являются: максимальная амплитуда  $U$ , эхо-сигнала; временной сдвиг  $t$ , эхо-сигнала относительно зондирующего импульса.

Эти параметры измеряют в точке, соответствующей максимальной амплитуде эхо-сигнала.

Если дефект имеет протяженность, то его границы, определенные эхо-импульсным методом, также могут отличаться от истинных (рисунок 5.20).

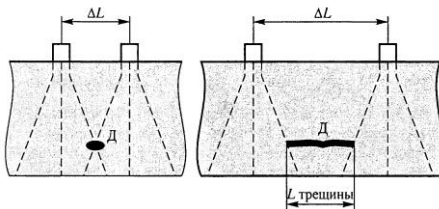


Рисунок 5.20 – Условные размеры точечного и протяженного дефектов

чувствительности дефектоскопа (рисунок 5.21).

Условная ширина дефекта  $\Delta X$ , мм, измеряется по длине зоны между крайними положениями ПЭП, перемещаемого вдоль контролируемого изделия.

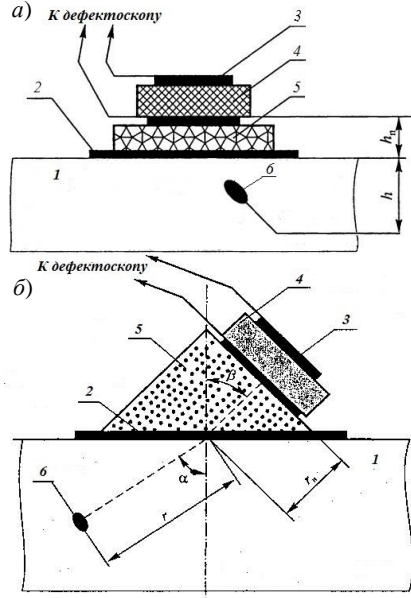


Рисунок 5.19 – Ввод УЗ-колебаний с помощью прямого (а) и наклонного (б) ПЭП:  
1 – контролируемое изделие;  
2 – контактная жидкость; 3 – электроды;  
4 – пьезоэлемент; 5 – протектор (призма);  
6 – дефект

В УЗ-дефектоскопии используются понятия условных размеров дефекта: условная ширина  $\Delta X$ ; условная высота  $\Delta H$ ; условная длина  $\Delta L$ .

Условный размер  $\Delta L$ , мм, характеризуется длиной зоны перемещения ПЭП, в пределах которого формируется сигнал от дефекта при заданной условной

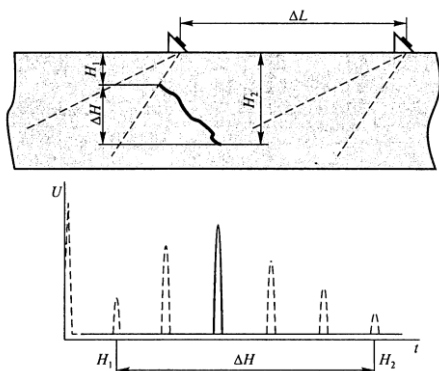


Рисунок 5.21 – Измерение условного размера  $\Delta L$  и условной высоты  $\Delta H$  дефекта

ление прохождения УЗ-волн, был теневого метод. Схема контроля теневого методом представлена на рисунке 5.22.

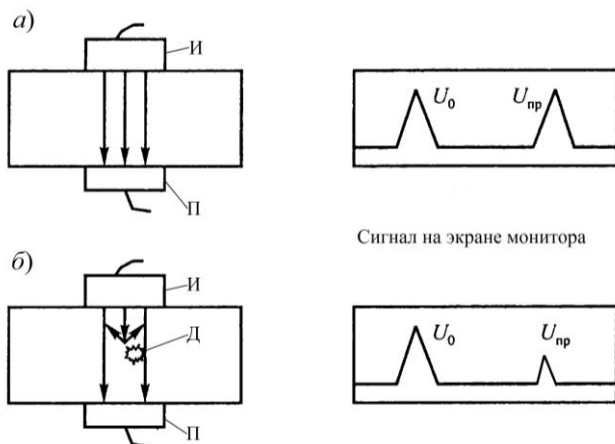


Рисунок 5.22 – Изменение уровня принятого сигнала при теневого методе контроля:

*a* – при отсутствии дефекта; *б* – при наличии дефекта

На контролируемую деталь с двух сторон соосно устанавливается два ПЭП, один из которых является излучателем (И) УЗ-волны, а второй – приемником (П). Если на пути УЗ-волны от И до П нет дефектов (Д), то уровень принятого сигнала  $U_{пр}$  на экране дефектоскопа максимален. При наличии дефекта сигнал резко падает почти до нуля, т. к. дефект создает «акустическую тень». Недостатками теневого метода являются: необходимость двустороннего доступа к детали, строго соосного расположения ПЭП,

Условная высота  $\Delta H$  дефекта, мм – разность показаний дефектоскопа в положениях, соответствующих измерению условного размера  $\Delta L$ .

Крайними положениями ПЭП при измерениях  $\Delta L$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta H$  считают положения, при которых амплитуда эхо-сигнала от выявленного дефекта уменьшается до уровня срабатывания автоматического сигнализатора дефектов.

**Теневой и зеркально-теневой методы.** Одним из первых УЗ-методов, в которых используется явление

нестабильность акустического контакта ПЭП с деталью, малая информативность о координатах и типе дефекта.

При зеркально-теновом методе ПЭП, являющийся и излучателем, и приемником, устанавливается на поверхность контролируемой детали (рисунок 5.23). Возбуждаемая УЗ-волна проходит через деталь, отражается от второй поверхности (дно) и воспринимается этим же ПЭП. Донный сигнал  $U_d$  при этом на экране монитора максимален.

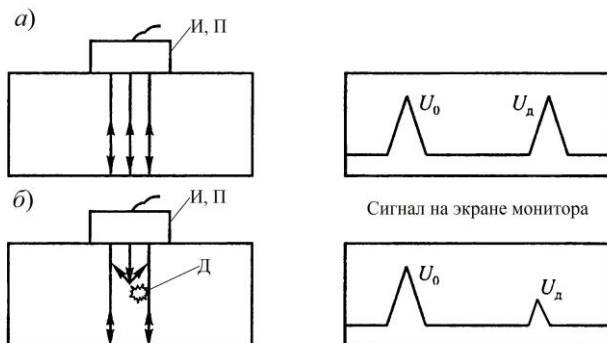


Рисунок 5.23 – Изменение уровня донного сигнала при зеркально-теновом методе контроля:  
 а – при отсутствии дефекта; б – при наличии дефекта

Признаком обнаружения дефекта при зеркально-теновом методе является падение амплитуды донного сигнала.

Временной сдвиг донного сигнала относительно зондирующего импульса в два раза превышает временной сдвиг прошедшего сигнала в сравнении с теновым методом.

При зеркально-теновом методе в качестве излучателя и приемника УЗ-колебаний могут использоваться:

- два рядом расположенных ПЭП (раздельный режим работы);
- две пьезопластины в одном корпусе ПЭП (раздельно-совмещенный ПЭП, и режим – раздельно-совмещенный);
- одна пьезопластина, являющаяся поочередно то излучателем, то приемником УЗ-колебаний (совмещенные ПЭП и режим работы).

Количественно выявляемость дефектов оценивается с помощью коэффициента ослабления донного сигнала, называемого коэффициентом выявляемости дефектов  $K_d$ :

$$K_d = U_d / U_0, \quad (5.54)$$

где  $U_d$  – амплитуда донного сигнала при наличии дефекта в зоне УЗ-пучка;  $U_0$  – амплитуда донного сигнала при отсутствии дефекта.

$K_d$  изменяется от 0 до 1 в зависимости от размера и ориентации дефекта. Для дефекта, размеры которого меньше длины волны  $\lambda$  (или ориентированного по направлению УЗ-пучка)  $K_d = 1$ . Если дефект полностью перекрывает УЗ-пучок, то  $K_d = 0$ .

Зеркально-теневой метод реализуется при акустическом контроле осей колесных пар подвижного состава на «прозвучиваемость» [30].

### Дифракционно-временной метод (ToFD)

*Общие положения.* ToFD-метод основан на взаимодействии УЗ-волн с краями несплошностей. Это взаимодействие приводит к излучению дифракционных волн в широком диапазоне углов. Обнаружение дифракционных волн позволяет установить наличие несплошности.

Время прохождения регистрируемых сигналов является мерой оценки высоты несплошности, тем самым позволяя измерить дефект. Размер несплошности всегда определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Амплитуда сигнала не используется для определения размера.

Основная конфигурация ToFD-метода состоит из разделенных УЗ-излучателя и приемника (рисунок 5.24). В связи с тем, что дифракция УЗ-волн слабо зависит от ориентации края несплошности, обычно используются преобразователи продольной волны с широко расходящимся пучком лучей. Это дает возможность проведения контроля требуемого объема за одно линейное сканирование. Однако при этом предъявляются ограничения к объему, который может быть проконтролирован за одно сканирование.

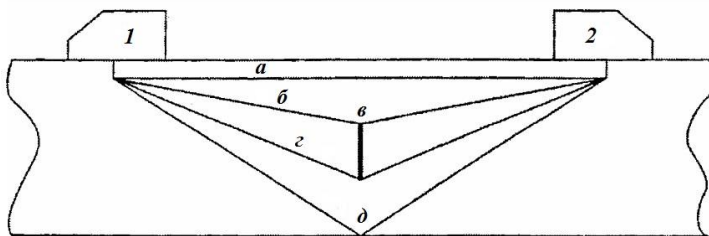


Рисунок 5.24 – Основная конфигурация ToFD-метода:

1 – излучатель; 2 – приемник; a – головная волна; б – сигнал от верхней кромки дефекта; в – верхняя кромка дефекта; г – нижняя кромка дефекта; д – донный сигнал

В зависимости от формы объекта контроля могут быть использованы различные схемы реализации (рисунок 5.25).

Первым сигналом, попадающим на приемник после излучения УЗ-импульса, обычно является головная волна, которая проходит прямо под верхней поверхностью объекта контроля.



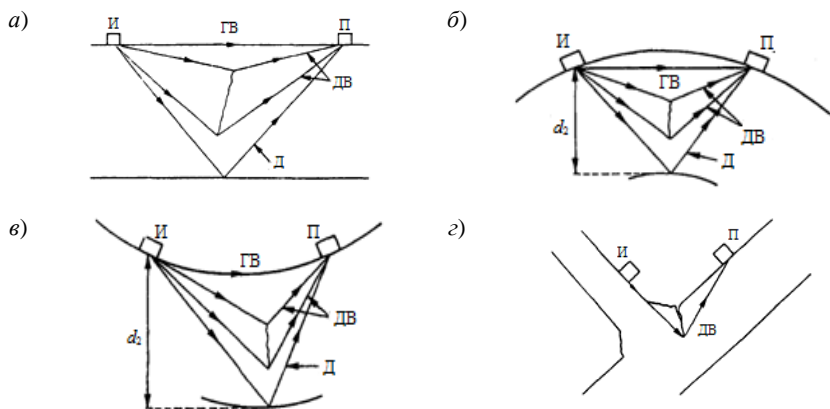


Рисунок 5.25 – Схемы контроля ToFD-методом:

- a* – плоская поверхность; *б* – выпуклая поверхность; *в* – вогнутая поверхность;
- г* – тавровый сварной шов; И – излучающий преобразователь; П – приемный преобразователь;
- ГВ – головная волна; ДВ – дифрагированные волны; Д – донный сигнал;
- $d_1$  – расстояние от преобразователя до выпуклой поверхности, меньшее толщины стенки;
- $d_2$  – расстояние от преобразователя до вогнутой поверхности, большее толщины стенки

При отсутствии несплошностей вторым сигналом, прибывающим на приемник, является эхо-сигнал от донной поверхности.

Эти два сигнала обычно применяются для установления контрольных точек. Если пренебречь изменением фазы волны, любые сигналы, создаваемые несплошностями в материале, должны поступать между головной волной и эхо-сигналом от донной поверхности с учетом того, что последние две отвечают, соответственно, самому короткому и самому длинному путям между излучателем и приемником.

По тем же причинам дифракционный сигнал, созданный верхним краем несплошности, придет до сигнала, созданного нижним краем несплошности. Типичный пример отображения (*A*-развертки) показан на рисунке 5.26.

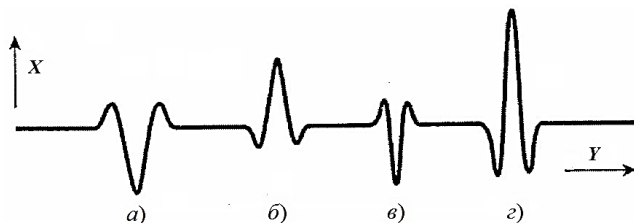


Рисунок 5.26 – Вид единичной *A*-развертки при контроле:

- X* – амплитуда; *Y* – время; *a* – боковая волна; *б* – сигнал от верхнего края несплошности;
- в* – сигнал от нижнего края несплошности; *г* – эхо-сигнал от донной поверхности

Высота несплошности может быть получена из разности времени прихода двух дифракционных сигналов. Следует отметить изменение фаз между головной волной и эхо-сигналом от донной поверхности, а также между сигналом от верхнего и нижнего края несплошности. В случаях, когда имеется доступ к обеим поверхностям объекта контроля и несплошности расположены по всей толщине объекта, сканирование с обеих поверхностей улучшит общую точность, особенно в отношении подповерхностных несплошностей.

Дифракционно-временной метод является достаточно точным и в некоторых случаях способен полностью заменить использование рентгенографического метода. Согласно анализу результатов, полученных при сравнении эффективности применения ToFD-метода и радиографии, ToFD-метод позволяет провести измерения размеров дефекта и глубину его залегания в материале. В частности, ToFD-метод показал себя более чувствительным к таким дефектам, как плоскостные трещины. Из прочих преимуществ данного метода контроля можно отметить безопасность, отсутствие расходных материалов и быстроту получения результатов.

Некоторые типовые ToFD-изображения несплошностей в сварных соединениях, полученных сваркой плавлением, приведены на рисунках 5.27–5.31.

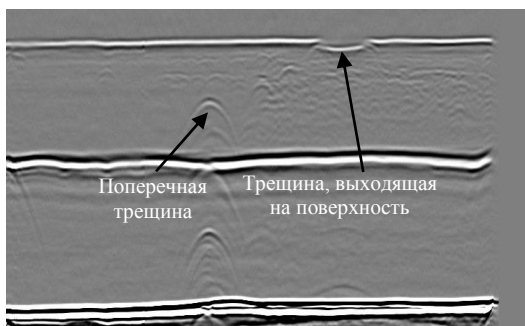


Рисунок 5.27 – Поперечные и продольные дефекты на TOFD-изображении

К основным достоинствам ToFD-метода можно отнести следующие.

1 Более высокая точность контроля  $\pm 1$  мм (при повторном проходе  $\pm 0,3$  мм) и вероятность обнаружения дефектов. По результатам европейского проекта «Эффективность применения метода ToFD для контроля сварных соединений сосудов под давлением на стадии изготовления» (ToFDPROOF) было проведено сравнение эффективности метода с радиографией и традиционным эхо-импульсным методом УЗ-контроля (таблица 5.4).

Таблица также включает данные, полученные в проекте KINT, реализованном голландским Обществом проверки качества и НК.

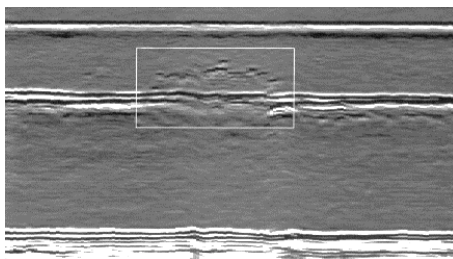


Рисунок 5.28 – Непровар в корне шва

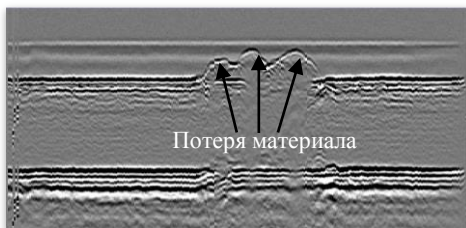


Рисунок 5.29 – Коррозия в резервуаре

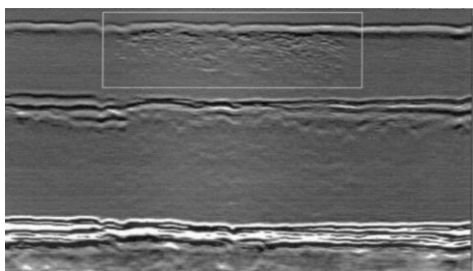


Рисунок 3.30 – Скопление газовых пор в сварном шве

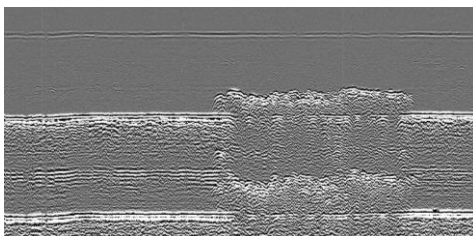


Рисунок 5.31 – Водородное растрескивание

2 Возможность выявления дефектов независимо от их пространственного расположения. Из-за распространения дифрагированных сигналов во всех направлениях ToFD-метод чувствителен фактически к любому типу дефектов, независимо от их ориентации.

Таблица 5.4 – Сравнение эффективности методов контроля

Метод	Европейский проект			
	ToFDPROOF		KINT	
	Вероятность обнаружения дефекта, %	Вероятность обнаружения ложного дефекта, %	Вероятность обнаружения дефекта, %	Вероятность обнаружения ложного дефекта, %
ToFD	70–90	<10	82,4	11,1
Радиографический метод	60–70	Нет данных	60,1	10,8
Традиционный УЗ-контроль	55–65	Нет данных	52,3	22,7

Благодаря широкому охвату контролируемой поверхности сигналы малой амплитуды, дифрагированные от краев дефекта, выводятся на экране в корректном относительном положении, это снимает необходимость контроля околошовной зоны прямыми преобразователями. Высокую вероятность обнаружения дефектов при проведении контроля ToFD-методом можно продемонстрировать на примере обнаружения межваликового несплавления. При контроле ToFD межваликовое несплавление отображается как сплошная линейная индикация. При использовании традиционного УЗ-метода дефекты такого типа выявляются крайне плохо.

3 Сканирование охватывает весь объем сварного шва вдоль одной линии, повышая эффективность и производительность контроля. При выполнении контроля ToFD-методом скорость получения результатов ограничивается только скоростью самого сканирования. Для ручного контроля околошовной зоны обычной является скорость 100–150 мм/с, скорость автоматизированного контроля, как правило, еще выше. Испытания показали, что при высокой скорости контроля ToFD-метод имеет самую высокую вероятность обнаружения дефектов по сравнению с другими методами НК. Еще одно преимущество заключается в том, что с помощью этого метода можно выявить дефект и измерить его параметры без проведения повторного сканирования, значительно сокращая время проведения контроля и его стоимость.

4 Документирование и хранение результатов контроля в виде *A*- и *B*-сканов (*D*-сканов) с дальнейшей возможностью их повторного анализа. Системы ToFD обеспечивают сохранение результатов контроля на любом цифровом накопителе. Любые сохраненные данные могут быть найдены и повторно воспроизведены. Эта функция может быть полезна при сравнении результатов периодического контроля, проводимого для отслеживания изменений в структуре материала. Хранение цифровых данных позволяет разрабатывать методы, способные облегчить проведение анализа, например, при подавлении шумов, распознавании образа дефектов, вычитание сигнала с его последующим выделением и многие другие.

5 Идентичность результатов при повторном проведении контроля. Сканирование сварного соединения ToFD-методом, выполненное разными специалистами, будет практически идентичным (при использовании тех же преобразователей и параметров настройки аппаратуры). Это делает ToFD очень удобным при отслеживании развития дефектов. Поскольку данные могут храниться в цифровом виде, имеется возможность снизить требования к контроллеру. Если настройку прибора должны выполнять специалисты 2-го или 3-го уровня, то сам процесс контроля может проводиться специалистами 1-го уровня квалификации.

Наряду с достоинствами, метод ToFD имеет ряд ограничений, основные из которых перечислены ниже.

1 Величина амплитуды эхо-сигнала не используется в ToFD-методе для определения величины дефекта. В ToFD-методе отсутствует простой амплитудный порог для выборки предельно допустимых дефектов с целью их последующей регистрации. Приёмы методов, основанных на измерении амплитуд, в большинстве случаев оказываются непригодными при проведении контроля ToFD-методом.

2 Слабые сигналы от дифрагированных волн. Обычно амплитуда дифрагированных сигналов при контроле ToFD на 20–30 дБ ниже, чем амплитуда сигналов, получаемых при контроле эхо-импульсным методом. Электрические помехи – типичная проблема для многих систем ToFD. Для снижения этих помех приходится использовать предусилители или комбинацию «генератор – предусилитель».

3 Наличие «мёртвых зон» у поверхности ввода и обратной поверхности. Самое общепризнанное ограничение ToFD связано с потерей данных в «мёртвой зоне». Особенно это заметно у поверхности ввода и противоположной стенки. Однако недостаток не представляет серьёзной проблемы, если не требуется оценка размеров дефектов, выходящих на поверхность.

4 ToFD-метод обычно применяется для контроля материалов с низким уровнем затухания и рассеивания УЗ-волн, например, низколегированной и нелегированной углеродистой стали и сварных соединений.

5 Наиболее подходящими для контроля являются плоские поверхности или поверхности с небольшой кривизной. Контроль с сильно искривленных поверхностей может вызвать затруднения.

6 Чувствительность к шуму от зёрен металла в материале контролируемого изделия. Большое количество индикаций от дифрагированных сигналов, связанных с неоднородностью структуры сварного шва может быть ошибочно принято за его дефекты.

7 ToFD-метод требует дополнительной подготовки специалиста, проводящего контроль.

Для реализации ToFD-метода используются механизированные сканирующие устройства (рисунок 5.32).



Рисунок 5.32 – Различные конструкции УЗ-сканеров

Механизированное сканирование позволяет облегчить труд оператора, исключить ошибки, связанные с несоблюдением регламента сканирования при поиске дефектов, а в некоторых случаях повысить общую производительность контроля (с учетом подготовительно-вспомогательных операций).

**Метод с использованием фазированной антенной решетки (ФАР).** Обеспечение безаварийной работы современного оборудования требует высокой точности и воспроизводимости результатов различных видов НК. Развитие информационных технологий является ключевым в улучшении визуализации дефектов при использовании УЗ-метода контроля. Современные специализированные методики УЗ-контроля основаны на применении ToFD-метода и датчиков с ФАР [31, 32].

Использование ФАР имеет большие преимущества при контроле изделий со сложной геометрией. УЗ-контроль таких изделий сопровождается большим количеством паразитных сигналов, которые отрицательно сказываются на скорости и достоверности контроля. Кроме того, ограниченный доступ часто не позволяет выполнить требуемое сканирование, что также снижает достоверность контроля.

Разработка и применение средств УЗ-контроля на основе датчиков с ФАР и соответствующего программного обеспечения для анализа данных позволяют с высокой надежностью быстро сканировать и получать изображение объектов сложной геометрии. Электронное сканирование позволяет выполнить контроль объектов с ограниченным доступом путем виртуального перемещения преобразователя; полученные данные запоминаются для последующей обработки, если в этом есть необходимость.

Преобразователи с ФАР содержат много элементов; сканирование может осуществляться механически (перемещение преобразователя), электронно (качение луча) или путем комбинации обоих способов. Для упрощения интерпретации сигналов и для последующего их анализа три проекции и аксонометрия объекта контроля могут быть совмещены на дисплее с проекционными изображениями дефектов, полученными с помощью ФАР. Это позволяет быстро и надежно сканировать объекты сложной геометрии.

### Типы преобразователей на ФАР

Фазированные решетки, используемые в промышленности, и типы обеспечиваемой ими фокусировки перечислены в таблице 5.5 и представлены на рисунках 5.33–5.38. Кроме этих возможно применение и других конфигураций ФАР в зависимости от задач контроля и формы объектов.

Таблица 5.5 – Фазированные решетки, используемые на практике

Тип	Управление лучом	Форма фронта луча
Концентрическая (рисунок 5.33)	По глубине	Сферическая
Одномерная линейная плоская (рисунок 5.34)	По глубине, углу	Эллиптическая
Двумерная матрица (рисунок 5.35)	По глубине, телесному углу	Эллиптическая
Полторамерная матрица (рисунок 5.36)	По глубине, небольшому телесному углу	Эллиптическая
Двумерная концентрическая (рисунок 5.37)	По глубине, телесному углу	Сферическая
Одномерный кольцевой преобразователь (рисунок 5.38)	По глубине, телесному углу	Сферическая

### Основные принципы технологии УЗ-контроля на ФАР

Исследование ФАР в качестве УЗ-преобразователей для НК материалов и изделий и разработка аппаратуры с их использованием в Беларуси и за рубежом начались в 1970-х годах. В настоящее время это направление УЗ-дефектоскопии является одним из наиболее перспективных, особенно при контроле толстостенных и сложнопрофильных изделий.

Основные преимущества преобразователей в виде ФАР – значительное увеличение производительности контроля по сравнению с механическим сканированием, возможности оперативного изменения формы диаграммы направленности, фокусировки УЗ-энергии и применения методов оптимальной обработки эхосигналов. Аппаратура УЗ-контроля с использованием ФАР может обеспечивать три типа разверток *A*, *B*, *C*, а также трехмерное изображение дефектов и других нарушений сплошности.

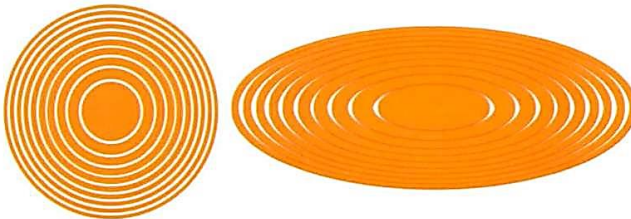


Рисунок 5.33 – Концентрическая ФАР с равными по площади элементами



Рисунок 5.34 – Одномерная матрица ФАР-преобразователя



Рисунок 5.35 – Двумерная матрица ФАР-преобразователя

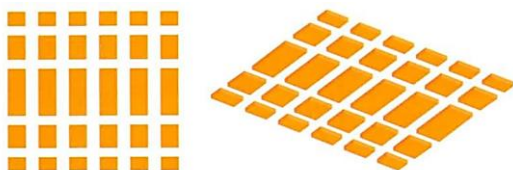


Рисунок 5.36 – Полуторамерная матрица ФАР-преобразователя

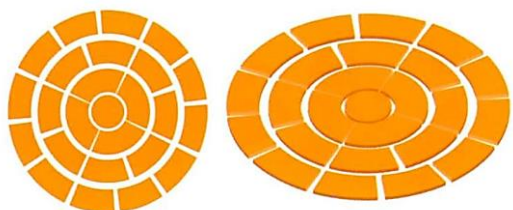


Рисунок 5.37 – Двумерная концентрическая матрица ФАР-преобразователя

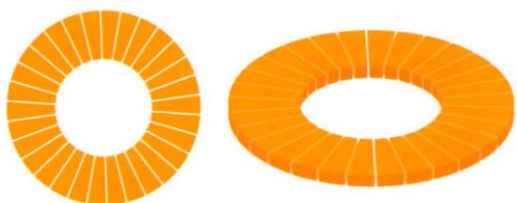


Рисунок 5.38 – Одномерный кольцевой ФАР-преобразователь «ромашка»



По функциональным возможностям и геометрии ФАР делятся на линейные (одномерные) и двумерные. Первые позволяют осуществлять электрическое сканирование в одной плоскости, вторые – в двух ортогональных плоскостях.

Представим, что пьезоэлемент разрезан на множество идентичных элементов, ширина  $e$  каждого из которых многократно меньше его длины  $W$  ( $e < W$ ). Каждый из этих элементов может рассматриваться как источник цилиндрической волны. Волновые фронты от множества узких пьезоэлементов будут интерферировать, создавая суммарный волновой фронт.

Волновые фронты могут быть задержаны во времени и синхронизированы по фазе и амплитуде таким образом, чтобы создавать сфокусированный и управляемый УЗ-луч.

Главная особенность технологии ФАР – управляемые компьютером амплитуда и фаза импульсов возбуждения отдельных пьезоэлементов в многоэлементном преобразователе.

Возбуждение пьезоэлементов может осуществляться так, чтобы была возможность управлять параметрами УЗ-луча, например, углом, фокусным расстоянием, размером фокусного пятна, посредством компьютерной программы. Это позволяет обнаруживать различно ориентированные относительно акустической оси дефекты (рисунок 5.39).

Простой одноэлементный преобразователь с высокой вероятностью может пропустить дефекты, расположенные под большим углом к акустической оси преобразователя или в стороне от УЗ-луча.

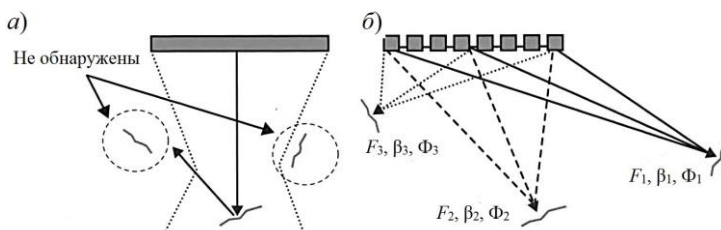


Рисунок 5.39 – Обнаружение различно ориентированных дефектов одноэлементным (а) и многоэлементным (б) преобразователями

Луч от преобразователя типа «ФАР» может быть направлен под различными углами и сфокусирован, обеспечивая обнаружение различно расположенных дефектов.

Для того чтобы создать луч под требуемым углом и с требуемой фокусировкой, отдельные элементы возбуждаются в несколько отличающиеся моменты времени. Как показано на рисунке 5.40, эхо-сигнал от определенной точки приходит на отдельные элементы преобразователя в различные моменты времени, которые можно рассчитать. Эхо-сигналы на каждом эле-

менте задерживаются по времени, затем суммируются. Их сумма отображается на *A*-скане, который отражает усиленный эхо-сигнал от требуемой фокальной точки и ослабленный от всех остальных точек на пути луча.

При излучении генератор импульсов синхронизации посылает синхроимпульс на блок фазовых задержек. Последний генерирует импульс высокого напряжения заданной длительности и с заданной задержкой, определенной фокальным законом. На каждый элемент решетки поступает один задержанный импульс. Сумма волн, излученных каждым элементом, представляет собой луч, распространяющийся под определенным углом и сфокусированный на определенном расстоянии. Этот луч отражается от дефекта.

При приеме сигнал принимается каждым элементом решетки, затем задерживается во времени в соответствии с заданным фокальным законом. Задержанные импульсы суммируются и формируют единый импульс, который поступает в устройства приемного тракта.

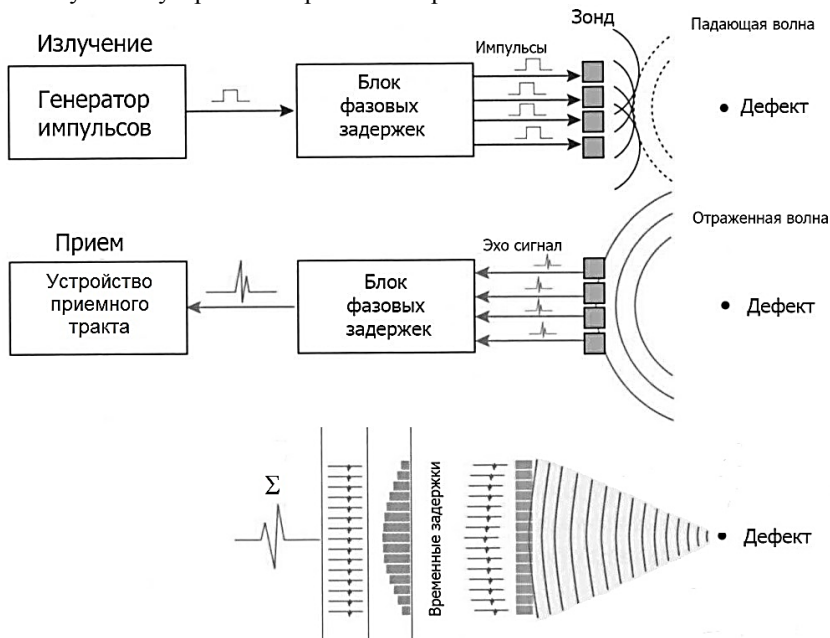


Рисунок 5.40 – Схема формирования луча и временных задержек при излучении и приеме  $\Sigma$

Величина временной задержки на элементах ФАР зависит от величины апертуры, типа волны, требуемого угла и глубины фокусировки. Принцип фокусировки луча для прямого и наклонного ввода показан на рисунке 5.41.

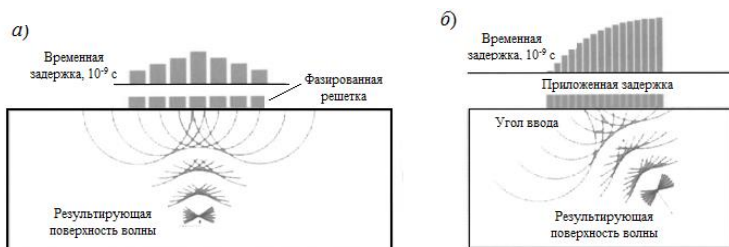


Рисунок 5.41 – Принцип фокусировки луча для прямого (а) и наклонного (б) вводов

Существуют три основных способа управления лучом.

*Электронное сканирование:* один фокальный закон переключается в пределах группы элементов (рисунок 5.42); сканирование выполняется с постоянным углом и вдоль длинной стороны решетки.

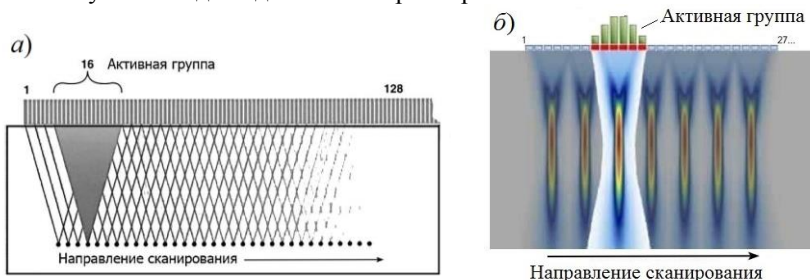


Рисунок 5.42 – Электронное сканирование (активная апертура 16 элементов) прямым лучом (а) и формирование акустического поля активными группами решетки (б)

Этот процесс эквивалентен механическому перемещению обычного одноэлементного преобразователя, например, с целью записи профиля донной поверхности.

*Динамическая фокусировка* по глубине, вдоль акустической оси (рисунок 5.43): сканирование выполняется посредством изменения фокусного расстояния преобразователя.

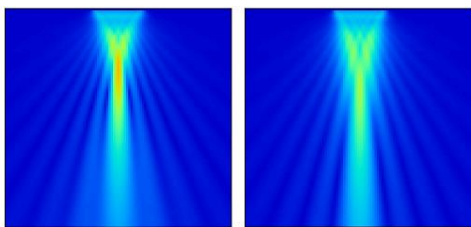


Рисунок 5.43 – Динамическая фокусировка пучка по глубине

На практике для излучения используется один и тот же импульс, а в режиме приема решетка перефокусируется последовательно на различные значения глубины.

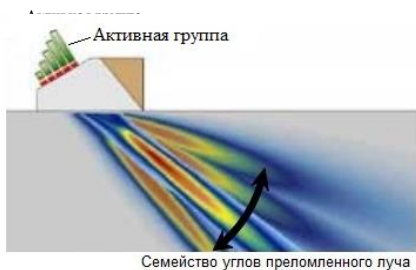


Рисунок 5.44 – Секторное, или угловое, сканирование

*Секторное сканирование* (также называемое азимутальным), или угловое сканирование: излучение производится одной и той же группой элементов последовательно под различными углами с сохранением одного и того же фокусного расстояния (рисунок 5.44).

Диапазон углов и шаг изменения угла могут быть различными в зависимости от параметров объекта контроля.

#### *Основные компоненты системы для работы с ФАР*

Основные блоки, требующиеся для построения простейшей системы для работы с ФАР, приведены на рисунке 5.45.



Рисунок 5.45 – Взаимосвязь основных компонентов системы для работы ФАР

На схеме обозначены: компьютер с программой, например, TomoView, специальный дефектоскоп, например, Tomoscan III PA, блок управления сканером MCDU-02, контролируемый образец, преобразователь-ФАР, сканер.

Фазированные решетки требуют применения импульсов повышенной длительности, чтобы обеспечить интерференцию сигналов, приходящих от разных элементов. Это особенно существенно при больших углах ввода.

При применении ФАР с целью уменьшения боковых лепестков диаграммы направленности амплитуды возбуждаемых и принимаемых сигналов уменьшают от центрального элемента к периферийным. Фазированные решетки для излучения и приема наклонных к поверхности волн, как правило, располагают на призме так же, как и для наклонного преобразователя. Призма обеспечивает основное значение угла ввода, а с помощью решетки варьируют этот угол в узких пределах.

### *Конструктивные особенности преобразователей на ФАР*

В настоящее время технология изготовления многоэлементных преобразователей гораздо более сложная и дорогая, чем технология производства одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. Преобразователь на фазированной решетке (ПФР) примерно в 10 раз дороже одноэлементного ПЭП. И даже, несмотря на то, что единственный ПФР способен заменить несколько одноэлементных ПЭП, большинство заказчиков не могут преодолеть психологический барьер, связанный со стоимостью ПФР.

В настоящее время стоимость высококачественных ПФР составляет примерно до 20 % стоимости дефектоскопа, что создает проблемы в промышленности и ограничивает распространение этой технологии контроля. Основная трудность заключается в том, что потребитель начнет инвестировать средства в ПФР лишь тогда, когда убедится в их эффективности.

Большинство ПФР на рынке представлено линейными преобразователями, содержащими до 128 активных элементов и работающими на частотах 1–10 МГц. Такие преобразователи достаточно дорого стоят. К примеру, 32-элементный преобразователь на рабочую частоту 5 МГц и относительную ширину полосы пропускания 65 % стоит  $\approx 4\text{--}5$  тыс. дол.

*Процесс изготовления.* Цилиндрическая заготовка изготавливается из порошка пьезокерамического материала. Далее заготовка разрезается (рисунок 5.46, а) и промежутки между элементами заполняются полимером (рисунок 5.46, б). Затем диски полируются и производится металлизация поверхностей нарезанных элементов. Далее элементы подвергаются механической обработке для создания одной или нескольких апертур ПФР.

Для лучшего прохождения акустических волн через призму и создания плавного перехода через границу между материалами наносится один или два четвертьволновых переходных слоя. Последняя операция при обработке пьезоматериала – это поляризация подложки.

На следующем этапе элементы решетки соединяют с печатными платами. Печатные платы микроаксиальными кабелями подпаивают к разъему, сопрягаемому с дефектоскопом. Далее проводят электрический контроль элементов. Полученная сборка называется акустическим пакетом. Затем акустический пакет вставляют в корпус преобразователя. Пространство между задней стенкой акустического пакета и верхней частью корпуса заполняется демпфирующим составом на основе эпоксидной смолы.

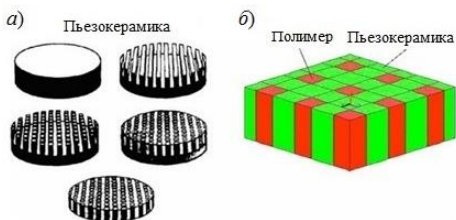


Рисунок 5.46 – Заготовки для изготовления ПФР

Последняя операция состоит в проверке общих характеристик ПФР. При этом все элементы подвергаются контролю по центральной частоте, полосе частот и чувствительности. К каждому поставляемому ПФР прилагается паспорт с протоколом испытаний.

Описанный выше процесс изготовления связан с большим числом ручных операций, требующих профессиональных навыков и затрат времени. Иногда получаются дефектные преобразователи, что приводит к повышению их стоимости.

Единственным вариантом, с помощью которого НК может получить выигрыш за счет изготовления более дешевых ПФР, является ограничение числа конструкций ПФР и возможность отделения активной части.

В настоящее время предлагается новая концепция изготовления ПФР, основанная на стандартизации максимально возможного числа элементов в конструкции ПФР. Ее суть в поиске достаточно дешёвых элементов ПФР, создании съёмных преобразователей на ФАР со стандартными разъёмами и контактными поверхностями. В течение многих десятилетий одноэлементные ПЭП отсоединялись от кабеля, поэтому предлагаемая конструкция ПФР представляется их эквивалентом.

Предусмотрены два варианта исполнения. Первый вариант характеризуется наличием плоской решётки элементов и отверстий в корпусе для внешнего крепления призмы, второй – наличием встроенной, выполненной под определенным углом для генерирования продольных или сдвиговых УЗ-волн (с профилированной рабочей поверхностью).

Новый подход имеет определенные преимущества:

- снижение стоимости производства, позволяющее поставщикам накапливать запасы оборудования в нескольких регионах вблизи от их конечного пользователя и снижение розничной цены ПФР с 20 до 5–8 % от стоимости дефектоскопа;

- снижение стоимости процесса контроля как за счёт стоимости съёмного ПФР, так и за счет экономии времени на его разработку и определение характеристик;

- многие пользователи могут применять стандартные преобразователи, не требуется разработка преобразователей для конкретной задачи;

- соединительный кабель может сопрягаться с различными приборными разъёмами;

- сокращение числа разъемов непосредственно в приборе, а также наличие разветвителей, которые могут объединять несколько ПФР в одном разъёме;

- стандартизация контактной поверхности преобразователя приводит к стандартизации призм и методов подключения координаторов положения;

- появляется возможность иметь запас съёмных ПФР.

Новая технология изготовления съёмных ПФР представляется весьма многообещающей, поскольку последние получают расширенные функции и обеспечивают свободу выбора модели дефектоскопа. Среди многочисленных достоинств новой концепции можно отметить низкую стоимость и высокую работоспособность ПФР.

В зависимости от применения преобразователя на ФАР делятся на три основных вида.

*Иммерсионные преобразователи* (рисунок 5.47) разработаны специально для работы с водяными призмами или иммерсионными емкостями, в которые частично или полностью погружается контролируемый объект.

*Контактные преобразователи* (рисунок 5.49) за счет различных вариантов исполнения получили наибольшее распространение и широко применяются в различных отраслях промышленности.

*Гибкие преобразователи* (рисунок 5.49) за счет инноваций и оригинальной сборки решают часто возникающие проблемы качества акустического контакта при контроле неровных поверхностей.

#### *Особенности при работе с ФАР*

Надежное обнаружение и определение размеров дефекта в большой степени определяется схемой сканирования.

Сканирование может быть:

- автоматическое, когда преобразователь перемещается посредством электронно-механического устройства;
- полуавтоматическое, когда преобразователь перемещается вручную, однако перемещение преобразователя записывается датчиком координаты;
- ручное, когда преобразователь перемещается вручную, а данные считываются прибором через заданные интервалы времени.

Перемещение преобразователя может осуществляться в различной последовательности.

При однонаправленном сканировании (рисунок 5.50, а) сбор данных производится только при перемещении преобразователя в одном направлении. Затем сканер смещается на один шаг сканирования и т. д.



Рисунок 5.47 – Иммерсионный преобразователь



Рисунок 5.48 – Контактный преобразователь с призмой



Рисунок 5.49 – Гибкий контактный преобразователь

При двунаправленном сканировании (рисунок 5.50, б) сбор данных производится при прямом и обратном ходе преобразователя.

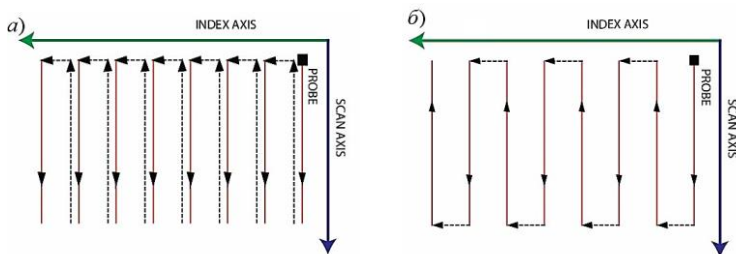


Рисунок 5.50 – Схемы однонаправленного (а) и двунаправленного (б) сканирования объектов

*Линейное сканирование* – перемещение преобразователя, задаваемое только одной координатой (рисунок 5.51).

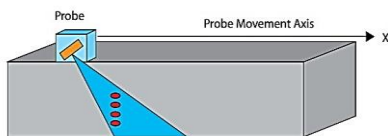


Рисунок 5.51 – Схема линейного сканирования простых объектов

Линейное сканирование является однонаправленным и проводится по линейной траектории. Оно характеризуется скоростью сканирования, границами траектории сканирования и шагом между точками, в которых происходит запись данных. Линейное сканирование часто применяется при контроле сварных швов и записи профиля коррозии. Линейное электронное сканирование по одной оси (поперек шва) в сочетании с механическим перемещением преобразователя по другой оси (вдоль шва) производится существенно быстрее, чем аналогичное механическое растровое сканирование обычным наклонным преобразователем.

*Наклонное сканирование* является разновидностью нормального двунаправленного скана (рисунок 5.52).

Оно позволяет использовать угол ввода УЗ-луча, произвольно ориентированный относительно оси механического перемещения преобразователя.

Данный способ сканирования полезен в случае, когда, например, ориентация и расположение дефектов требуют специфического способа озвучивания для распознавания формы и размеров.

Особенности наклонного сканирования следующие:

- увеличивается скорость сканирования;

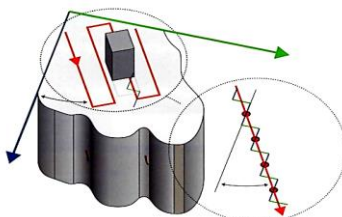


Рисунок 5.52 – Схема наклонного сканирования



– применяется для контроля деталей сложной геометрии, в которых дефекты ориентированы под углом к удобным осям перемещения преобразователя;

– позволяет адаптировать обычную линейную ФАР для контроля деталей сложной геометрии;

– размер файла данных уменьшается в два раза;

– амплитуды сигналов от дефектов увеличиваются в 6–8 раз;

*Круговое сканирование* используется для контроля деталей цилиндрической формы (рисунок 5.53). Перемещение контролируется двумя независимыми датчиками координаты.

Датчик продольного перемещения контролирует положение преобразователя по окружности детали, а датчик поперечного перемещения – положение преобразователя по длине детали.

Для того чтобы обнулить датчик кругового перемещения после совершения полного оборота, используется специальный сигнал синхронизации, частота которого задает также скорость линейного перемещения. Комбинация этих двух перемещений дает в итоге объемно-спиральную траекторию.

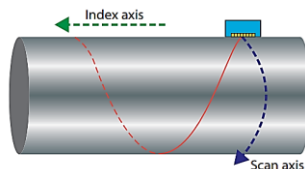


Рисунок 5.53 – Схема кругового сканирования цилиндрической детали

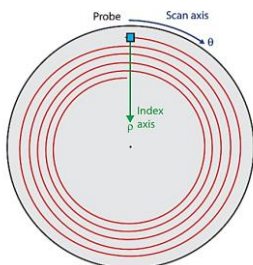


Рисунок 5.54 – Схема спирального сканирования круглой детали

*Спиральное сканирование* удобно использовать для контроля круглых деталей небольшой толщины (рисунок 5.54). Механизм обеспечивает перемещение преобразователя по плоской спирали на поверхности детали.

Два независимых датчика контролируют перемещения. Датчик кругового перемещения (*scan-axis*) обеспечивает вращательное движение преобразователя вокруг центра вращения, а датчик линейного перемещения (*index-axis*) задает радиус этого перемещения. Сигнал синхронизации используется для задания скорости линейного перемещения и обнуления датчика вращательного движения при совершении полного оборота.

### Ультразвуковые изображения (сканы)

Виды УЗ-изображений определяются взаимным расположением пути УЗ-луча и параметрами сканирования (оси продольного и поперечного перемещения преобразователя).

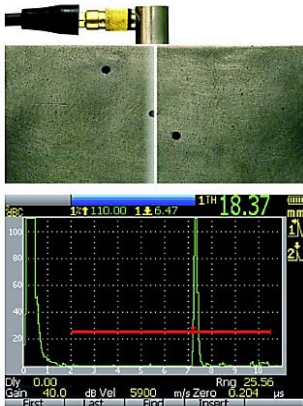


Рисунок 5.55 – Схема получения *A*-скана

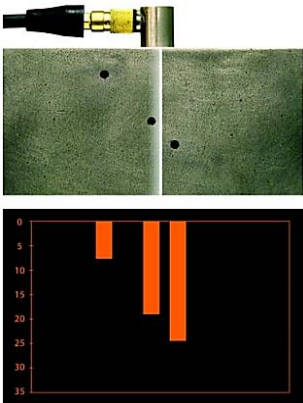


Рисунок 5.56 – Схема получения *B*-скана

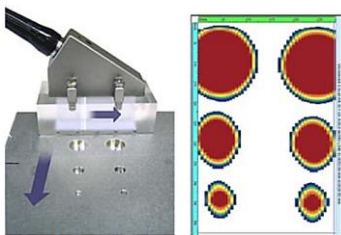


Рисунок 5.57 – Схема получения *C*-скана

*A*-скан представляет собой вид УЗ-сигналов как зависимость амплитуды принятого сигнала от времени его прихода (или от пройденного им расстояния). *A*-скан может быть представлен либо в виде радиочастотного сигнала, либо в виде детектированного сигнала (рисунок 5.55).

Положение данных на скане связано с показанием датчика координаты (или времени) в момент записи данных в определенной точке.

*B*-скан представляет собой двумерное изображение данных УЗ-контроля (рисунок 5.56). По сути, *B*-скан представляет собой множество собранных в пакет *A*-сканов, полученных в последовательных точках траектории сканирования.

Чаще всего горизонтальная ось используется для координаты преобразователя, а по вертикальной оси откладывается время прихода сигнала (или пройденное им расстояние).

*C*-сканом называется двумерное изображение (рисунок 5.57) результатов УЗ-контроля (представляющее собой изображение контролируемой детали в плане). Оси изображения соответствуют направлениям продольного и поперечного сканирования по поверхности образца. При использовании линейной ФАР – контроль в поперечном направлении обеспечивается электронным сканированием, а контроль в продольном направлении – механическим сканированием. Положение данных на изображении определяется показанием датчика координаты, контролирующего процесс сканирования.

*D*-сканом называется двумерное изображение, на котором одна из осей соответствует положению преобразователя по траектории сканирования, а вторая – времени прихода сигнала (или пройденному им пути). Этим *D*-скан напоминает *B*-скан.

Основное отличие состоит в том, что при контроле сварных швов *B*-скан отражает поперечное сечение сварного шва, а *D*-скан – проекцию его внутренней структуры на продольную плоскость.

При использовании ФАР с призмой *B*-скан формируется за счет электронного сканирования из одного положения преобразователя, а формирование *D*-скана обеспечивается механическим перемещением преобразователя вдоль шва (рисунок 5.58).

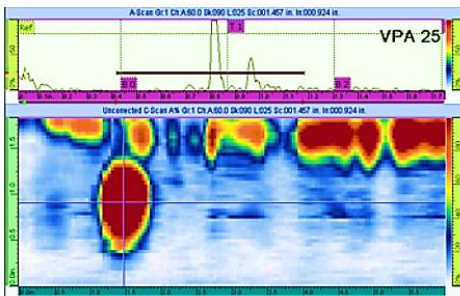


Рисунок 5.58 – Схема получения *D*-скана

*S*-скан (секторный или азимутальный скан) представляет собой двумерное изображение, полученное из множества *A*-сканов из одного положения преобразователя под различными углами ввода (рисунок 5.59).

Типичный *S*-скан представляется в диапазоне углов с использованием одного фокусного расстояния. Горизонтальная ось изображения соответствует горизонтальной координате на контролируемой детали, а вертикальная ось изображения – глубине.

*S*-скан является характерным для ФАР и может использоваться при контроле продольными, поперечными волнами в контактном или иммерсионном вариантах прямым преобразователем или с призмой.

#### **Двумерные (матричные) ФАР**

Двумерные фазированные решетки применяются как в совмещенном, так и в раздельном режимах работы. Основные достоинства матричных решеток:

- возможность электронного управления фокусом в трех измерениях;
- возможность фокусировки по линейным, сферическим и эллиптическим поверхностям;

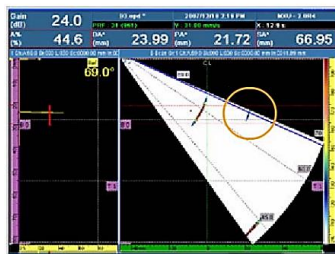
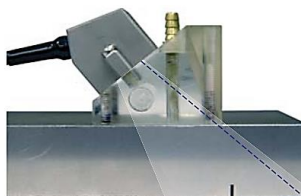


Рисунок 5.59 – Схема получения *S*-скана

– возможность фокусировки на различных глубинах при разных углах отклонения в разных плоскостях.

На рисунке 5.60 в качестве примера приведены значения акустических задержек на элементах решетки размером 4x8 элементов при наклоне 15° и угле ввода 45° (продольные волны в стали) с фокусным расстоянием 50 мм.

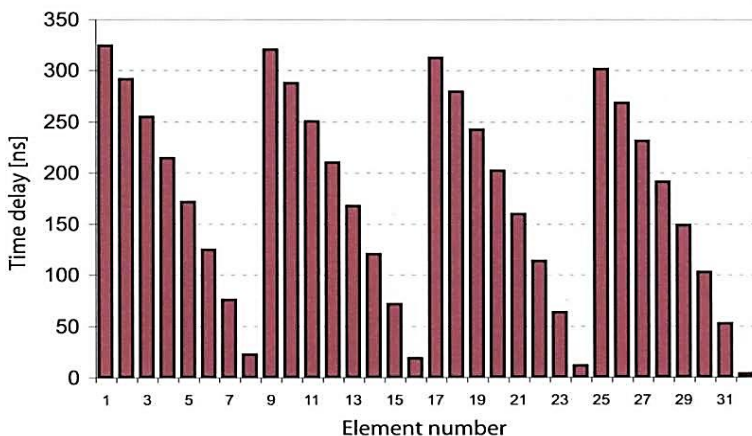


Рисунок 5.60 – Значения задержек для элементов двумерной решетки размером 4×8 элементов в совмещенном режиме работы

На рисунке 5.61 приведен пример размещения двумерных решеток для работы в раздельно-совмещенном режиме.

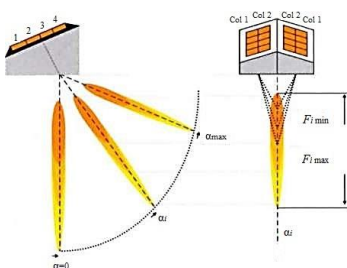


Рисунок 5.61 – Примеры раздельно-совмещенного размещения двумерных ФАР на призмах с наклонной гранью: размер 4×2

### **Производительность контроля**

Важным достоинством использования ФАР при контроле сварных швов является многократное повышение производительности контроля вследствие замены растрового сканирования на линейное – вдоль шва (рисунок 5.62).

Эта возможно за счет того, что, благодаря использованию электронного сканирования, ФАР производит одновременный контроль всего сечения шва без необходимости смещения датчика.

### **Технические средства с ПФР**

В настоящее время в практике НК широко применяется микропроцессорная техника. Происходит переход с аналоговой обработки информации

на цифровую. Это относится и к УЗ-дефектоскопам. Главной особенностью УЗ-дефектоскопии в наше время стала разработка и применение преобразователей на ФАР.

На нашем рынке можно встретить модели различных производителей: Olympus Scientific Solutions Americas (США), Olympus NDT Inc. (США, Канада), GE Inspection Technologies, LP (США), GE Sensing EMEA (Ирландия), GE Sensing & Inspection Technologies GmbH (Германия), Panametrics Ltd. (Ирландия, США), Harfang Microtechniques, Inc. (Канада), Sonotron NDT (Израиль), Sonatest Ltd. (Великобритания), Zetec Inc. (Канада), SIUI (Китай), Starmans (Чехия), Metalscan SAS» (Франция), НПЦ «Кропус», ООО «Акустические Контрольные Системы» (Россия), ООО НПЦ неразрушающего контроля «Эхо+» и др. (рисунок 5.63)

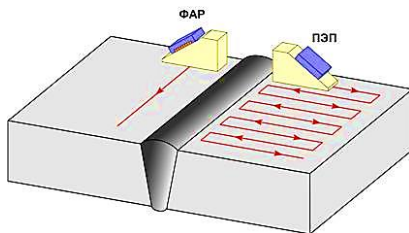


Рисунок 5.62 – Схема процесса сканирования с использованием ПЭП и ФАР



Рисунок 5.63 – УЗ-дефектоскопы, работающие на ФАР:

- a* – X-32 (Harfang Microtechniques, Inc., Канада);
- б* – OmniScan MXU-M (Olympus, Канада);
- в* – Phasor XS (GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Германия);
- г* – SIUI CTS-602 (SIUI, Китай, Krautkramer, Германия);
- д* – A1550 IntroVisor (ООО «АКС», Россия);
- е* – УСД-60ФР («Кропус», Россия)

## Пассивные методы акустического контроля

Пассивные акустические методы основаны на анализе упругих волн, возникающих в самом контролируемом объекте. К этим методам относятся акустико-эмиссионный метод [33, 34], вибрационно-акустический и шумо-диагностический.

*Акустико-эмиссионный (АЭ) метод* – один из наиболее динамично развивающихся. Его физическая сущность заключается в регистрации с помощью преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), размещенных на поверхности контролируемого объекта, упругих волн напряжения, излучаемым самим материалом, вызванных локальной перестройкой структуры материала.

На рисунке 5.64 показана схема локализации развивающегося дефекта по длине образца с использованием двух преобразователей.

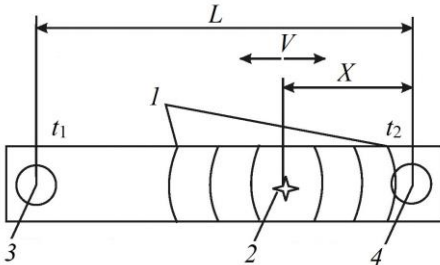


Рисунок 5.64 – Схема локализации источника АЭ:

1 – фронт сигнала АЭ; 2 – развивающийся дефект;  
3, 4 – датчики ПАЭ

После излучения сигнал АЭ распространяется по образцу длиной  $L$  во все стороны с одинаковой скоростью  $V$  и регистрируется ПАЭ1 и ПАЭ2 при временах  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Затем производится вычисление разности времен прихода  $\Delta t$  и координаты  $X$  источника АЭ по формулам

$$\Delta t = t_1 - t_2; \quad (5.55)$$

$$X = 0,5(L - V\Delta t). \quad (5.56)$$

## Виды акустической эмиссии

Если число элементарных событий, приводящих к возникновению упругих волн, велико, а энергия, высвобождаемая при каждом событии, мала, то АЭ-сигналы воспринимаются как слабый непрерывный шум, получивший название *непрерывной АЭ*, которая представляет собой колебания с относительно малыми амплитудами и широким частотным спектром, верхняя граница которого достигает 30 МГц. Характеристики непрерывной АЭ меняются во времени сравнительно медленно, что позволяет рассматривать этот тип эмиссии как квазистационарный процесс. Непрерывную АЭ связывают с пластической деформацией, коррозией материалов и другими физическими процессами.

Если состояние тела далеко от равновесного, возможны процессы лавинного типа, при которых за малый промежуток времени в процесс вовлекается большое число элементарных событий. Энергия упругой волны при этом может на много порядков превосходить энергию упругих волн при непрерывной эмиссии.

Акустическая эмиссия, характеризующаяся большой амплитудой регистрируемых акустических импульсов, получила название *дискретной*. Она представляет собой последовательность коротких импульсов сложной формы (рисунок 5.65) с крутым фронтом и гораздо большими амплитудами.

Основная часть энергии приходится на низкочастотную часть спектра.

Дискретная АЭ характерна для процессов, в ходе которых возможно образование трещин (сварка, закалка, диффузионное насыщение и др.), а также имеет место при исследовании и контроле коррозионного растрескивания, прочности, термостойкости, усталостного разрушения, а также процессов трения и изнашивания.

### Информативные параметры дискретной АЭ

*Акустический сигнал акустической эмиссии* – генерируемое источником АЭ акустическое поле, параметры которого несут информацию об источнике АЭ и объекте испытаний.

*Электрический сигнал акустической эмиссии* – сигнал АЭ на выходе преобразователя АЭ.

*Число импульсов акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$*  – число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за время регистрации.

Этот параметр характеризует только потоки неперекрывающихся импульсов, определяется процессами разрушения и указывает на число отдельных актов зарождения и распространения дефектов в материале или конструкции.

*Активность акустической эмиссии  $N_{\Sigma}$*  – общее число импульсов, отнесенное к единице времени.

Информативность этого параметра такая же, как и предыдущего, но с большей детализацией во времени, что дает возможность наблюдать динамику процесса разрушения.

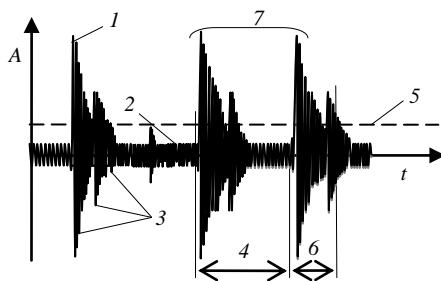


Рисунок 5.65 – Схематическое представление электрического сигнала АЭ:  
 1 – максимальная амплитуда импульса АЭ;  
 2 – уровень шума; 3 – отдельные осцилляции;  
 4 – время между импульсами; 5 – уровень дискриминации; 6 – длительность импульса;  
 7 – события

*Суммарный счет акустической эмиссии  $N$*  – число зарегистрированных превышений (выбросов) АЭ-сигналов установленного уровня за время регистрации (в случае дискретной АЭ эта величина характеризует число событий с энергией, превышающей установленное пороговое значение).

*Скорость счета акустической эмиссии  $\dot{N}$*  – число зарегистрированных превышений АЭ-сигналов установленного уровня в единицу времени. Эта характеристика является производной суммарной АЭ по времени.

*Амплитуда импульса АЭ* – максимальное значение импульса АЭ.

*Амплитудное распределение импульсов АЭ* – график, связывающий амплитуды импульсов АЭ с числом этих импульсов.

*Плотность вероятности амплитуды импульсов  $w(A)$*  – функция, определяющая вероятность того, что амплитуда АЭ-импульса  $A_0$  находится в интервале от  $A$  до  $A + dA$ , характеризует АЭ как случайный процесс.

На практике чаще используют характеристику  $n(A)$ , называемую амплитудным распределением импульсов. Эта функция указывает количество импульсов, амплитуда которых заключена в малом интервале от  $A$  до  $A + dA$ . Если общее число зарегистрированных импульсов равно  $N$ , то амплитудное распределение связано с плотностью вероятности  $w(A)$  соотношением  $n(A) = Nw(A)$ .

*Распределение временных интервалов  $w(\tau)$*  между отдельными АЭ-импульсами содержит важную информацию о физике явлений и характере его развития.

*Амплитудно-временное распределение импульсов АЭ  $n(A; t)$*  – функция, указывающая количество импульсов АЭ  $dN$ , зарегистрированных в промежутке времени от  $t$  до  $t + dt$ , амплитуда которых заключена в интервале от  $A$  до  $A + dA$ . Другими словами, амплитудно-временное распределение отражает изменение амплитудного распределения импульсов АЭ во времени.

*Спектральная плотность* дискретной АЭ совпадает с соответствующей характеристикой случайного процесса и равна мощности процесса в единичной полосе частот. Информативность спектральной плотности обусловлена ее связью со скоростью протекания процесса, инициирующего сигналы АЭ.

К достоинствам АЭ-метода относятся:

- возможность дистанционного интегрального контроля состояния крупногабаритных объектов (например, котлы железнодорожных цистерн, сосуды, работающие под давлением, литые детали тележек грузовых вагонов и др.), документирования и хранения информации на электронных носителях;

- возможность выявления опасных (развивающихся) дефектов независимо от их ориентации в зонах конструкций, недоступных никаким другим методам;

- возможность определения момента образования и оценки развития дефекта в реальном масштабе времени без прекращения ресурсных испытаний;



- возможность локализации дефектных зон и оценки остаточного ресурса конструкций на основе статистических характеристик сигналов от дефектов;

- оперативность оценки технического состояния объекта, связанная с отсутствием операций сканирования;

- не критичность к шероховатости поверхности ОК.

Акустико-эмиссионный метод может выступать как самостоятельный, если по результатам критического анализа зарегистрированной информации состояние объекта признается удовлетворительным.

Наибольшая надежность при оценке состояния объектов контроля достигается, если применяют АЭ-метод в комплексе с такими традиционными методами, как визуально-измерительный, капиллярный, магнитопорошковый, ультразвуковой, рентгеновский, дополняющими предварительную оценку сведениями о размерах, форме, ориентации, глубине залегания дефектов, степени их опасности.

Недостатками АЭ-метода являются:

- необходимость деформирования материала контролируемого объекта, предполагающая строгий подход к выбору направления и скорости режима нагружения;

- высокая чувствительность к разнообразным помехам (электромагнитные, радиационные, вибрационные, акустические, климатические).

Область применения АЭ-метода:

- выявление разнообразных дефектов материала (развивающиеся трещины, коррозионные поражения, места эрозионного изнашивания) с определением их местоположения;

- контроль герметичности конструкций в режиме течеискания, выявление сквозных дефектов (свищи, коррозионные проедания, неплотности соединений);

- контроль сварных швов;

- выявление участков повышенной напряженности конструкций по регистрации зон локальных пластических деформаций и общей текучести материалов.

В России накоплен большой опыт по использованию метода АЭ в практике нефтеперерабатывающих предприятий, предприятий газовой промышленности и других отраслей промышленности, разработана соответствующая нормативно-техническая документация [35, 36], большое число фирм и компаний занято разработкой АЭ-аппаратуры, появились разработки, учитывающие специфику железнодорожного транспорта [37–39].

Специалистами Сибирского государственного университета путей сообщения и Сибирского НИИ авиации им. С. А. Чаплыгина (г. Новосибирск, Россия) разработана 16-канальная система АЭ-диагностики СЦАД-16 (ри-

сунок 5.66, а). По их мнению, проведение АЭ-испытаний целостности котлов железнодорожных вагонов-цистерн следует проводить при плановых пневмоиспытаниях этих объектов, что позволяет минимизировать расходы на проведение НК и повышает его эффективность. Для уверенной локализации источников АЭ с достаточной точностью целесообразно использовать не менее 16 каналов приема АЭ.

В ООО «Интерюнис» (г. Москва, Россия), разработан многоканальный акустико-эмиссионный измерительный комплекс «Лель» (A-Line 32D), который за счет различных схем подключения обеспечивает гибкость и удобство проведения контроля объектов различного типа, формы, протяженности и степени доступности (рисунок 5.66, б).

Комплекс «Лель», основанный на модульной схеме подключения и на радиоканале позволяет широко варьировать способы установки датчиков при проведении измерений, организовывать системы непрерывного мониторинга объектов, что повышает надежность их эксплуатации.

Основные возможности мониторинговой системы «Лель» связаны с комплексным контролем всей конструкции; контролем с предельно малой периодичностью; выявлением наиболее опасных развивающихся дефектов; предварительной идентификацией типа дефекта; автоматическим самотестированием в течение всего срока службы; формированием оптимальных решений по данным контроля; ведением протокола контроля; архивацией данных контроля.

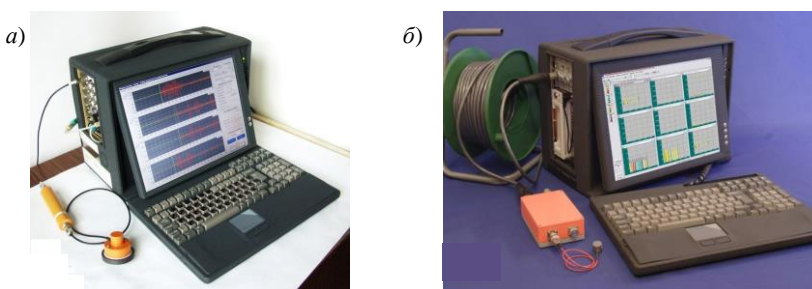


Рисунок 5.66 – Комплексы для регистрации АЭ:  
а – система цифровая акустическая диагностическая СЦАД 16.0203;  
б – акустико-эмиссионная система A-LINE 32D

### **Акустико-эмиссионный контроль на железнодорожном транспорте**

Одной из главных задач на железной дороге является обеспечение безопасной эксплуатации сложных технических объектов ответственного назначения. В общем случае прочность элементов конструкций и машин, а также их ресурс задаются на стадии разработки и проектирования. Однако воздействие на деталь знакопеременных нагрузок, коррозионных сред, ко-

лебаний температуры и наличие в материале детали технологических или эксплуатационных дефектов существенно снижают срок службы объекта.

Выход из строя детали в эксплуатации способен привести к катастрофическим последствиям: аварии или крушению.

Для предотвращения внезапного разрушения, вызванного развитием усталостных дефектов, проводят периодический НК. Используемые методы и средства дефектоскопии ориентированы на выявление значительных по размерам, критически развитых дефектов. Так, магнитный метод контроля позволяет обнаруживать трещины с минимальной протяженностью 0,5 мм и площадью 0,25 мм. Ультразвуковые средства дефектоскопии способны регистрировать трещины с минимальной глубиной до 1 мм.

Информация о дефекте, полученная активными методами, не содержит сведений о динамике развития дефектов и поведении объекта в процессе нагружения. В некоторых случаях активно растущие малозначительные дефекты с высоким коэффициентом концентрации напряжений способны привести к разрушению детали за время между периодическими ремонтами.

В процессе эксплуатации в материале деталей накапливаются усталостные повреждения, которые на начальной стадии развития не обнаруживаются средствами магнитного, вихретокового и УЗ-контроля. Вопрос о безопасной эксплуатации таких деталей может быть решен только с использованием средств НК, чувствительных к малозначительным развивающимся дефектам. В связи с этим задача выявления растущих трещин, в том числе находящихся на начальной стадии развития, представляется особенно актуальной. Для решения такой задачи хорошо зарекомендовал себя интегральный метод обследования на основе явления акустической эмиссии (АЭ) [39].

Метод АЭ, обладая интегральными свойствами, не требует выполнения большого объема трудоемких работ по зачистке поверхности ОК. В процессе выполнения технического диагностирования возникает необходимость определения предразрушающего состояния, которое характеризуется экспоненциальным ростом параметров сигналов АЭ при увеличении нагрузки.

*Контроль литых деталей тележки грузового вагона.*

Применительно к железнодорожному транспорту метод АЭ впервые был применен при контроле боковых рам и надрессорных балок. Надрессорные балки и боковые рамы, изготавливаемые в основном из стали 20 ФЛ литьем, представляют коробчатые конструкции переменной толщины с множеством ребер жесткости и технологических отверстий неправильной формы, изменяющиеся от детали к детали. При разработке методики АЭ-контроля боковых рам и надрессорных балок решалась сложная задача, связанная с выделением полезных сигналов на фоне значительного уровня шумов, появляющихся в местах приложения нагрузки, а также реакции опоры. Причиной этих шумов являются микроразрушения, происходящие под действием внешней силы на поверхности ОК.

Основной особенностью НК литых деталей железнодорожного транспорта является сильное затухание звуковой волны, что объясняется повышенной пористостью и крупнозернистостью структуры материала.

В обеспечении достоверности результатов АЭ-контроля важную роль играют методы нагружения ОК. При испытании боковых рам и наддрессорных балок необходимо создавать нагрузки, соответствующие их реальным условиям эксплуатации. В контролируемых зонах обеспечивается определенный уровень деформаций растяжения, при котором появляются акустические сигналы определенной активности, характеризующие дефектные зоны.



Рисунок 5.67 – Участок для АЭ-контроля боковых рам и наддрессорных балок в вагонном депо

На рисунке 5.67 приведен внешний вид стоек для нагружения боковой рамы и наддрессорной балки, установленных в вагонном депо.

При расчете диагноза система по результатам локализации выделяет группы сигналов, каждой из которых соответствует один источник акустической активности. Для таких источников рассчитывается интегральный коэффициент опасности  $R$  и его основные параметры (амплитуда  $A$ , частота  $F$  и время нарастания  $t_n$ ).

Коэффициент опасности одного сигнала  $R_i$  находится из соотношения:

$$R_i = \left[ 1 + R_A(A_i) + R_f(F_i) + R_n(t_n) \right]. \quad (5.57)$$

Он принимается равным максимальному из  $R_i$  для отдельных групп (т. е. по наиболее развитому источнику). Зависимости  $R_A(A_i)$ ,  $R_f(F_i)$  и  $R_n(t_n)$  определяются для простоты как кусочно-линейные функции и имеют различный вид для каждого ОК. Вид функций подбирается по результатам корреляционного анализа набора сигналов из банка данных с априорно заданным коэффициентом опасности.

Обработка полученных результатов показала, что даже опасные дефекты в деталях, подвергаемых АЭ-диагностике, могут быть по разным причинам, относительно слабыми источниками упругих волн, которые регистрируются приемниками. Это связано с протяженными зонами контроля, грубой структурой литого металла, невысокими нагрузками, расположением и видом источника АЭ в ОК. Браковке или дополнительному освидетельствованию подлежат детали, при диагностике которых зарегистрировано 3–5 сигналов из локализованного участка.

Испытания боковых рам и надрессорных балок, проведенные в различных депо, показали, что использование метода АЭ позволяет не только определять координаты, но и тип дефекта, степень его опасности, а также производить оценку остаточного ресурса по алгоритму с использованием АЭ-информации. В процессе испытаний разработаны методики и программное обеспечение, позволяющие выставлять значение амплитуды, меньше которой сигналы АЭ не принимаются системой к рассмотрению, предложена методика отбраковки сигналов по спектральным характеристикам.

Для определения степени опасности дефекта и остаточного срока службы ОК используются зависимости параметров сигналов АЭ от степени развития дефекта усталостного типа, найденные в результате статистической обработки значительного числа экспериментальных данных. Определение степени опасности производится в режиме реального времени. При наличии критически опасных источников сигналов АЭ ОК бракуется.

#### *Контроль нефтеналивных и газовых цистерн*

Железнодорожные цистерны являются главными средствами при транспортировке жидкостей и газов. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию ударных нагрузок при остановке, трогании, выполнении маневренных работ, в результате чего в их материале происходит образование различного рода дефектов. Самым распространенным типом дефекта является коррозия как внутренняя, так и внешняя. Внутренняя коррозия может быть представлена несколькими формами: уменьшением толщины, питтинговой коррозией, образованием раковин, коррозионным растрескиванием под на-пряжением и т. д.

Котел цистерны подвергается и внешней коррозии, которая часто находится под слоем изоляции. Она может появляться вокруг горловины, в местах, где при заливке продукт попадает на котел.

Образование трещин в котлах цистерн – часто встречающийся дефект, поскольку нагрузки создают большие напряжения, приводящие к появлению трещин в сварных швах, в районе подушек и т. д. Трещины часто начинаются от небольших дефектов в конструкции, таких как подрез сварного шва, неполное сплавление шва, непровар, шлаковое включение. В процессе эксплуатации вследствие усталости или повторного перенапряжения трещины начинают расти, что может вызвать разрушение конструкции.

При контроле котлов цистерн особую значимость приобретает решение задачи по выявлению растущих сквозных и неразвивающихся сквозных дефектов. Их обнаружение традиционными методами течеискания и дефектоскопии требует длительного времени. При использовании УЗ-метода необходима тщательная зачистка всех сварных швов и сканирование датчиком всей поверхности котла.

В процессе проведения прочностных испытаний производится нагружение котла за счет создания избыточного давления. Перед проведением гид-

роиспытаний измеряется затухание акустических сигналов на границах контролируемой зоны. При этом на поверхность котла устанавливаются 16 ПАЭ (рисунок 5.68) и определяются калибровочные характеристики (коэффициенты затухания, скорости распространения сигналов АЭ по различным направлениям).

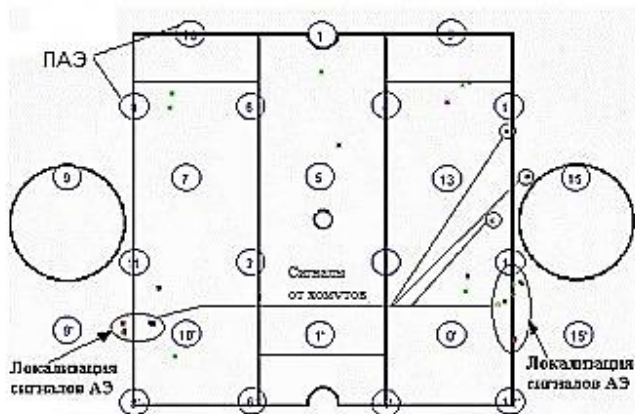


Рисунок 5.68 – Локализация сигналов АЭ на развертке котла цистерны

Использование метода АЭ в процессе гидроиспытаний позволяет контролировать целостность котла и выявлять имеющиеся дефекты. При этом обнаруживаются практически все виды дефектов на ранней стадии их зарождения и развития и при этом не требуется вывода ОК из эксплуатационного режима.

#### *Контроль колесных пар грузовых вагонов*

Колесная пара является одним из основных элементов вагона и ее прочность во многом определяет безопасность движения. В процессе эксплуатации оси колесных пар кроме вертикальных нагрузок на шейки воспринимают дополнительно разнообразные внешние усилия (боковые удары на гребни колес, тормозное нажатие на колеса, воздействие неисправности пути, рессорного подвешивания и т. д.). Долговечность осей во многом зависит от величины напряжений и количества циклов их изменения.

Эффективность АЭ-контроля во многом определяется характером напряженного состояния и уровнем напряжений, создаваемых в ОК. К основным факторам, влияющим на долговечность колесных пар, относятся наличие термических трещин и других концентраторов напряжений в осях, дефекты колес по кругу катания (раковины, ползуны). Данные факторы могут привести к перенапряжениям в различных сечениях осей, что связано с зарождением и развитием усталостных трещин на ранней стадии эксплуатации осей. Это ведет к преждевременному выходу последних из строя.

При АЭ-контроле колесных пар грузового вагона ПАЭ устанавливаются на диски колес и ось колесной пары. После последовательного приложения вертикальной нагрузки к оси, горизонтальной нагрузки к дискам колес и совместных нагрузок осуществляется локализация сигналов АЭ, затем колесную пару поворачивают на угол,  $\varphi = \frac{360}{n}$ , где  $n$  – число поворотов, определяемых из условия, что деформации  $\varepsilon$  в контролируемой зоне колесной пары должны быть не менее  $0,87 \varepsilon_{\max}$ , где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальная деформация в наиболее нагруженном сечении колесной пары (рисунок 5.69).

Причем местоположение дефекта при повороте колесной пары на угол  $\varphi$  будет также смещаться на этот угол, а местоположение сигналов от прикладываемой нагрузки будет оставаться неизменным. Кроме того, если при повороте центр кластера в зоне, где колесо опирается на рельс, смещается на угол поворота, то в этой зоне также находится дефект.

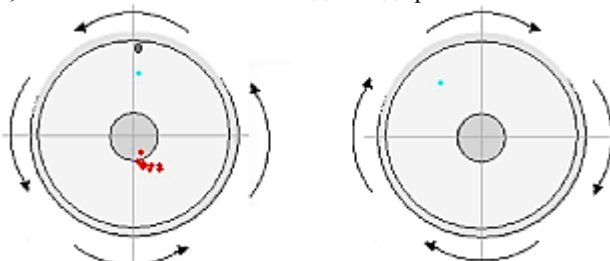


Рисунок 5.69 – Локализация сигналов АЭ в протоколе испытаний при автоматическом контроле колесной пары

Поэтому при контроле колес локализация осуществляется со значительной погрешностью. Успешное решение задачи локализации дефектов в колесах при автоматической установке датчиков возможно благодаря использованию более чувствительных ПАЭ.

#### *Контроль свободных колец подшипников буксовых узлов*

При диагностике колец подшипников получает распространение метод АЭ. Он позволяет автоматизировать процесс измерения и определять усталостные дефекты микроскопических размеров.

Подшипниковые буксовые узлы, устанавливаемые на осях и валах подвижного состава, являются важнейшими конструктивными элементами, от состояния которых в значительной степени зависит безопасность движения. Основная причина выхода из строя подшипников качения – нарушение режимов работы, загрязненность смазки, наличие в кольцах трещин, сколов, раковин и выкрашиваний на дорожках качения. Совокупность многих факторов приводит к тому, что контакт «металл – металл» между вращающимися элементами подшипника создает высокие напряжения в зоне контакта.

При правильной эксплуатации подшипники качения могут находиться в работоспособном состоянии вплоть до наступления предела прогнозируемой усталостной долговечности. Однако чаще всего выход из строя подшипников случается преждевременно. В отличие от усталостной долговечности, преждевременные разрушения происходят по многим причинам: неправильный монтаж колец, недостаточное смазывание вращающихся элементов, попадание внутрь подшипникового узла инородных частиц или веществ, а также чрезмерный перегрев подшипника.

Технология деповского ремонта узлов с подшипниками качения предусматривает полный либо частичный демонтаж и проведение дефектоскопирования всех деталей подшипников магнитопорошковым и вихретоковым методами НК.

В настоящее время известны как безразборная, так и разборная технологии АЭ-контроля колец подшипников. Источниками сигналов АЭ являются упругие волны от нормальных и касательных напряжений пятен контакта в дорожках качения, микроудары вследствие шероховатости поверхности тел и дорожек качения, микроудары и удары от перекатывания дефектных поверхностей (шелушение, развитые трещины, сколы, раковины).

В отечественной безразборной технологии подшипникового узла применяется один ПАЭ. Основными регистрируемыми параметрами служат суммарный счет и распределение энергии в функции времени либо нагрузки. Локализация дефекта отсутствует, что существенно ограничивает возможность данного метода.

Проведение АЭ-диагностики колец подшипников с определением координат дефектов повышает достоверность контроля. За рубежом безразборная технология производится с применением четырех ПАЭ, устанавливаемых на подшипниковый узел. При этом используется линейная локализация сигналов АЭ, изображаемая на развертке кольца подшипника. В процессе диагностики определяется корреляция между энергией сигналов АЭ и размерами дефектов. Отмечена взаимосвязь между размером дефекта дорожки качения подшипника и активностью сигналов АЭ, а также установлена линейная зависимость между длительностью сигнала АЭ и длиной дефекта.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Физические основы методов акустического контроля: определения, основные акустические величины и формулы, понятие децибела, номограмма перевода относительных величин в децибелы.
- 2 Волновое уравнение (сферическая, плоская волны, частные виды уравнения).
- 3 Типы акустических волн, упругие постоянные, схематическое представление волн.
- 4 Акустические свойства сред (акустический импеданс, затухание звука и его причины).



5 Отражение и преломление акустических волн на границах сред: законы, коэффициенты, критические углы.

6 Дифракция упругих волн в твердых телах (типы дифракции).

7 Преобразователи для акустического контроля: пьезоэффект, свойства пьезоматериалов.

8 Преобразователи для акустического контроля: схема ПЭП, основные типы ПЭП, соотношения, определяющие работу ПЭП (амплитуда, добротность, мощность).

9 Преобразователи для акустического контроля: основные параметры, характеризующие свойства преобразователей (коэффициент преобразования, АХЧ, полоса пропускания).

10 Преобразователи для акустического контроля: акустическое поле преобразователя, диаграмма направленности.

11 Классификация акустических методов (определения и общая схема).

12 Активные акустические методы прохождения: сущность и примеры.

13 Активные акустические методы отражения: сущность и примеры.

14 Активные акустические методы комбинированные: сущность и примеры.

15 Активные акустические методы собственных частот и импедансные.

16 Пассивные акустические методы: сущность и примеры.

17 Достоинства и недостатки АЭ-метода НК.

18 Примеры применения АЭ-метода на железнодорожном транспорте.

## 6 МАГНИТНЫЙ ВИД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

---

**М**агнитный вид неразрушающего контроля применяют для объектов, хотя бы частично изготовленных из ферромагнитных материалов, существенно изменяющих свои свойства при воздействии магнитного поля [40].

Для контроля параметров неферромагнитных частей объекта этот вид контроля применяется в том случае, когда происходит взаимодействие магнитного поля с ферромагнитными частями объекта, а немагнитные части, находящиеся на пути магнитного потока, влияют на его величину. Степень влияния зависит от размеров немагнитных частей.

На железнодорожном транспорте магнитному контролю подвергают следующие объекты подвижного состава: детали ударно-тягового и тормозного оборудования, рамы тележек различных моделей в сборе и по элементам, шкворни, оси колесных пар всех типов как в сборе, так и в свободном состоянии, диски, гребень и спицы локомотивных колес, свободные кольца буксовых подшипников, а также внутренние кольца, напрессованные на шейки оси, венцы зубчатых колес и шестерни тягового редуктора, валы генераторов, тяговых двигателей и шестерен в сборе, упорные кольца, стопорные планки, пружины, болты и т. п.

Методические основы технологии магнитного контроля изложены в нормативной документации [40–48].

### 6.1 Общие представления о магнетизме

Магнитное поле – это один из видов силовых полей. В отличие от электростатического оно действует только на движущиеся заряды. На неподвижные заряженные предметы даже в самых сильных магнитных полях никакая сила не действует. Сила, приложенная к движущемуся заряженному телу со стороны магнитного поля, называется силой Лоренца:

$$F_{\text{л}} = qv\mu_0 H \sin \alpha, \quad (6.1)$$

где  $q$  – электрический заряд тела;  $v$  – скорость заряженного тела;  $\alpha$  – угол между направлениями векторов скорости  $\vec{v}$  и напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  в точке, где находится тело;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная, или магнитная проницаемость вакуума.

Направление действия силы можно определить по правилу «левой руки» (рисунок 6.1). Если ладонь левой руки поместить в магнитное поле так, чтобы силовые линии входили в ладонь и четыре вытянутых пальца ее указывали направление тока в проводнике, то отставленный большой палец покажет направление действия механической силы.

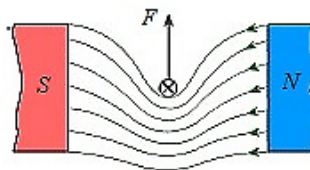


Рисунок 6.1 – Взаимодействие проводника с током и магнитного поля

Носители магнетизма в металле – элементарные электрические токи в атомах (гипотеза Ампера), создаваемые вращением электронов вокруг ядра (рисунок 6.2, а), прецессионным движением (качанием) электронных орбит (рисунок 6.2, б) и вращением электронов вокруг своей оси – спином электрона (рисунок 6.2, в), который вносит наибольший вклад в образование магнитного поля в атоме.

Элементарные токи в каждом атоме формируют атомные магнитные моменты  $P_{mv}$ ,  $P_{mi}$ ,  $P_{mc}$  которые, складываясь между собой, образуют магнитное поле атома и, в конечном счете, вещества в целом.

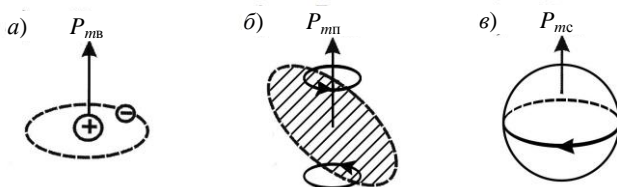


Рисунок 6.2 – Магнитные моменты в атоме, формируемые элементарными токами:

а – движение электрона вокруг ядра; б – прецессия электронной орбиты; в – вращение электрона вокруг своей оси

Однако большинство веществ не проявляет магнитных свойств, т. к. магнитные моменты их атомов направлены произвольно и взаимно компенсируют друг друга, т. е. размагничиваются уже в небольшом своем объеме.

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами. Поле действует только на движущиеся электрически заряженные частицы и тела, на проводники с токами и на частицы и тела, обладающие магнитным моментом. Все материалы могут рассматриваться как имеющие магнитные свойства, и следовательно, все они могут реагировать на наличие внешнего магнитного поля.

Магнитные поля на чертежах изображают замкнутыми непересекающимися кривыми, которые называют магнитными силовыми линиями.

Участок поверхности тела, из которого выходят магнитные силовые линии условно назвали северным магнитным полюсом « $N$ », а другой, участок поверхности на котором силовые линии входят в тело – южным « $S$ ».

Магнитное поле в магнитных методах НК используется для намагничивания и размагничивания проверяемых объектов.

Магнитные силовые линии следуют по пути наименьшего сопротивления. В куске железа (в ферромагнетиках), помещённом между полюсами магнита, силовые линии сконцентрированы в большей степени, чем в воздухе или немагнитном материале.

Другим важным свойством магнитного поля является то, что оно всегда возникает в плоскости перпендикулярной плоскости, в которой движутся электрические заряды.

Наиболее простые и часто встречающиеся примеры такого взаимодействия электрических зарядов и магнитного поля приведены на рисунке 6.3.

Силовые линии проводника с током (рисунок 6.3, *а*) имеют вид concentрических окружностей, расположенных вокруг проводника в плоскости перпендикулярной проводнику. Каждая силовая линия – кривая, на которой напряженность магнитного поля одинакова по величине и направлена по касательной в каждой ее точке. Направление силовых линий определяется по *правилу буравчика*: если буравчик вращать так, чтобы его поступательное движение совпадало с направлением тока в проводнике, то направление движения рукоятки укажет направление силовых линий.

На рисунке 6.3, *б*) представлен соленоид, или катушка, в которой ток течет по круговой спирали витков, соответственно магнитные силовые линии внутри соленоида направлены вдоль его продольной оси. У крайних витков соленоида образуются магнитные полюсы  $S$  и  $N$ .

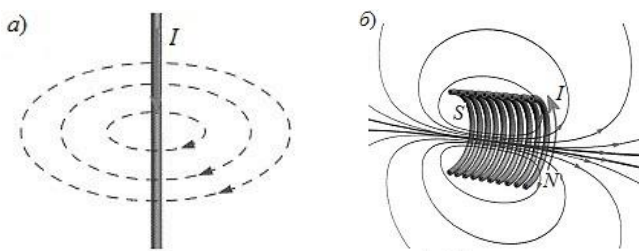


Рисунок 6.3 – Магнитное поле проводника с током (*а*) и соленоида (*б*)

Внутри соленоида плотность силовых линий высока и напряженность поля примерно одинакова, однако она сильно ослабляется за пределами внутренней части соленоида.

Вокруг проводника с током возбуждается неоднородное магнитное поле. Неоднородное магнитное поле – магнитное поле, магнитные силовые линии которого в различных точках пространства имеют различные направления и величину. Это поле также убывает при удалении от проводника с током обратно пропорционально расстоянию.

Также магнитные поля могут создаваться постоянными магнитами (рисунок 6.4), в которых силовые линии идут частично внутри магнита от полюса к полюсу, а частично по внешнему пространству, и их большая часть сосредоточена на кратчайшем расстоянии от полюса к полюсу.

Магнитное поле обладает следующими свойствами:

- силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, никогда не пересекаются и проходят через любую среду, в том числе вакуум;

- магнитное поле взаимодействует только с движущимися электрическими зарядами, с неподвижными – не взаимодействует;

- магнитные поля взаимодействуют друг с другом, поля одного направления – отталкиваются (одинаковые полюса отталкиваются), поля различных направлений – притягиваются (разные полюса притягиваются);

- магнитные поля непрерывны в пространстве;

- при большом удалении от источника магнитные поля ослабевают настолько, что ими можно пренебречь.

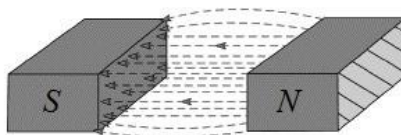


Рисунок 6.4 – Магнитное поле постоянных магнитов

## 6.2 Характеристики магнитного поля

*Напряженность магнитного поля*  $\vec{H}$  – векторная величина, силовая характеристика магнитного поля. Напряженность зависит от силы тока и формы проводников и не зависит от магнитных свойств однородной среды. Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м) или в амперах на сантиметр (А/см).

В прямоугольной системе координат на поверхности детали вектор напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  можно разложить на составляющие  $\vec{H}_x, \vec{H}_y, \vec{H}_z$  (рисунок 6.5).

Такое представление удобно, т. к. на практике обычно измеряют не сам вектор в целом, а его компоненты. Особенно часто используют компоненты  $\vec{H}_z = \vec{H}_n$  – нормальная составляющая, как правило, перпендикулярная поверхности детали, и  $\vec{H}_t$  – тангенциальная составляющая, имеющая мо-

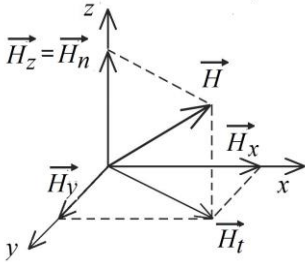


Рисунок 6.5 – Компоненты вектора  $\vec{H}$  в прямоугольной системе координат

доль  $|\vec{H}_t| = \sqrt{\vec{H}_x^2 + \vec{H}_y^2}$ , направленная параллельно поверхности.

Намагниченность – векторная физическая величина, характеризующая состояние вещества при воздействии на него магнитного поля  $\vec{H}$  :

$$J = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum p_i}{V}, \quad (6.2)$$

где  $V$  – объем вещества;  $p_i$  – элементарный магнитный момент. Намагниченность измеряется в А/м.

Магнитная индукция – векторная величина, силовая характеристика магнитного поля напряженностью  $\vec{H}$ . Значения магнитной индукции и напряженности связаны соотношением  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ .

Магнитная индукция определяется по механическому действию магнитного поля на проводник длиной  $l$  с током  $I$  по закону Ампера:

$$F_A = BIl, \text{ т. е. } B = \frac{F_A}{Il}. \quad (6.3)$$

Положив  $F = 1 \text{ Н}$ ,  $I = 1 \text{ А}$ ,  $l = 1 \text{ м}$ , получим, что в системе единиц СИ магнитная индукция измеряется в ньютонах, деленных на ампер  $\times$  метр, или килограммах/ампер  $\times$  секунда в квадрате:

$$\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2} = 1 \text{ Тл}.$$

Единица измерения магнитной индукции – вебер на квадратный метр или тесла. Одна тесла – это индукция такого равномерного магнитного поля, в котором магнитный поток  $\Phi$ , проходящий через площадку в  $1 \text{ м}^2$ , равен одному веберу (Вб):  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$ .

Вблизи поверхности детали магнитная индукция  $\vec{B}$  может быть направлена под некоторым углом  $\alpha$  к нормали  $\vec{n}$  (рисунок 6.6).

Проецируя индукцию  $\vec{B}$  на направление нормали  $\vec{n}$ , получаем нормальную (перпендикулярную) составляющую  $\vec{B}_n$ .

Проецирование вектора  $\vec{B}$  на направление касательной к поверхности дает

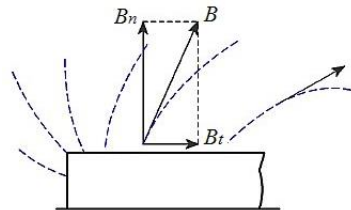


Рисунок 6.6 – Разложение вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  на составляющие

тангенциальную (касательную) составляющую  $\vec{B}_t$  магнитной индукции. Величины составляющих  $\vec{B}_n$  и  $\vec{B}_t$ , называемых координатами вектора магнитной индукции, определяются формулами  $B_n = B \cos \alpha$ ;  $B_t = B \sin \alpha$ .

Линии магнитного поля, пронизывающие деталь или вещество, называют линиями магнитной индукции. Они, как и линии напряженности  $H$ , нигде не пересекаются. Любая магнитная линия индукции является замкнутой на себя независимо от того, через какие среды ей приходится проходить.

*Магнитный поток* – физическая величина, равная плотности потока силовых линий магнитного поля, проходящих через бесконечно малую площадку  $dS$  (рисунок 6.7)

Магнитный поток можно рассчитать как скалярное произведение вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  на вектор элементарной площадки  $d\vec{S}$ :  $\alpha$

$$\Phi = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S} = B\Delta S \cos \alpha, \quad (6.4)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости поверхности.

На основании закона электромагнитной индукции  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ , где  $e$  – наведенная

ЭДС,  $V$ ,  $t$  – время,  $s$ , магнитный поток  $\Phi$  равен одному веберу (Вб), если его убывание до нуля за 1 с приводит к возникновению в сцепленном с ним электрическом контуре ЭДС индукции  $e$ , равной одному вольту. Следовательно,  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ .

Таким образом, магнитный поток  $\Phi$  – графически характеризуется общим количеством силовых линий магнитного поля, пересекающих сечение детали, а магнитная индукция  $\vec{B}$  – их плотностью.

Линии магнитной индукции, пересекая границы различных веществ, никогда не разрываются. Магнитный поток целиком проходит через соединение ферромагнетиков. Такое соединение называют *магнитной цепью*, которая представляет собой, например, деталь, намагничиваемую соленоидом, либо изделие, сопряженное с приставным магнитом. Здесь, так же как и для электрических цепей, используют законы, аналогичные законам Ома и Кирхгофа. Если линии магнитной индукции замыкаются через ферромагнитный сердечник (магнитопровод), то магнитный поток в нем

$$\Phi = \frac{wI}{l_{cp} / \mu_a S} = \frac{F}{R_m}, \quad (6.5)$$

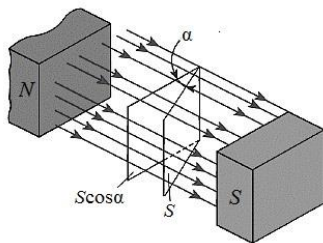


Рисунок 6.7 – К определению магнитного потока

где  $F = Iw$  – магнитодвижущая сила,  $I$  – ток,  $A$ ;  $w$  – число витков;  $l_{cp}$  – длина средней линии, м;  $S$  – сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $R_m = \frac{l_{cp}}{\mu_a S}$  – магнит-

ное сопротивление,  $\frac{1}{\Gamma_H} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{с}} = \frac{\text{См}}{\text{с}}$ .

Магнитный поток в магнитной цепи прямо пропорционален  $F$  и обратно пропорционален  $R_m$ . Магнитное сопротивление  $R_m$  ферромагнетика прямо пропорционально его длине, обратно пропорционально площади поперечного сечения и магнитной проницаемости.

Для замкнутой магнитной цепи, содержащей участки  $l_1, l_2, l_3, \dots$ , МДС определяется *законом полного тока*:

$$\oint H dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots = wI. \quad (6.6)$$

Так как  $H = B/\mu_a = \Phi/\mu_a S$ , то

$$\frac{\Phi l_1}{\mu_{a1} S} + \frac{\Phi l_2}{\mu_{a2} S} + \frac{\Phi l_3}{\mu_{a3} S} + \dots = wI. \quad (6.7)$$

Отсюда следует *основной закон магнитной цепи*:

$$\Phi = \frac{wI}{(l_1 / \mu_{a1} S) + (l_2 / \mu_{a2} S) + (l_3 / \mu_{a3} S) + \dots} = \frac{wI}{\sum_i l_i / \mu_{ai} S} = \frac{wI}{R_\Sigma}. \quad (6.8)$$

*Магнитная восприимчивость* – безразмерная величина  $\chi_m$ , характеризующая способность вещества (магнетика) намагничиваться в магнитном поле. Для изотропного магнетика  $\chi_m = J/H$ .

Магнитная восприимчивость может быть, как положительной, так и отрицательной. Отрицательной ( $<0$ ) магнитной восприимчивостью обладают диамагнетики.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков и парамагнетиков мала по абсолютной величине  $\sim 10^{-6} \dots 10^{-4}$ , для ферромагнетиков  $\chi_m > 10^4$ .

*Магнитная проницаемость.*

Все вещества обладают магнитными свойствами. Следовательно, все они могут взаимодействовать с внешним магнитным полем. Однако для разных материалов характер этого взаимодействия существенно отличается.

*Абсолютная магнитная проницаемость*,  $\mu_a$ , – скалярная величина, характеризует магнитные свойства среды (вещества) или способность материала намагничиваться. Единица измерения – Гн/м.

Опытным путем установлено, что абсолютная магнитная проницаемость вакуума  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Размерности  $\mu_a$  и  $\mu_0$  совпадают.

Абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитных материалов в тысячи и даже сотни тысяч раз больше магнитной проницаемости вакуума.



В инженерной практике чаще пользуются *относительной магнитной проницаемостью*  $\mu = 1 + \chi_m$ , которая показывает во сколько раз магнитная индукция  $B$  при распространении магнитного поля в данном материале (среде) отличается от магнитной индукции  $B_0$  в вакууме:

$$\mu = B/B_0 = \mu_a H / \mu_0 H = \mu_a / \mu_0 \quad (6.9)$$

$$[\mu] = \left[ \frac{\text{Тл}}{\text{А/м}} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м} \cdot \text{А}} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right].$$

Для большинства диамагнитных и парамагнитных материалов магнитная проницаемость мало отличается от единицы и на практике часто этим отличием пренебрегают, считая  $\mu = 1$ . На самом же деле у диамагнитных материалов (медь, свинец, цинк, серебро, висмут, стекло, вода, водород)  $\mu < 1$ . Например, у меди  $\mu = 0,99995$ . У парамагнитных материалов (алюминий, марганец, олово, вольфрам, платина, воздух, кислород)  $\mu > 1$ . Например, у алюминия  $\mu = 1,000023$ . Ферромагнитные материалы имеют  $\mu \gg 1$ , исчисляемое сотнями и тысячами единиц.

Разделение веществ на диа-, пара- и ферромагнетики носит в значительной степени условный характер, т. к. первые два вида веществ отличаются по магнитным свойствам от вакуума менее чем на 0,05 %. На практике все вещества обычно разделяют на ферромагнитные (ферромагнетики) и неферромагнитные, для которых относительная магнитная проницаемость  $\mu$  может быть принятой равной 1,0.

### 6.3 Намагничивание и магнитные свойства ферромагнетиков

Все вещества являются магнетиками, т. е. они способны под действием внешнего магнитного поля намагничиваться. В зависимости от численного значения  $\mu$  все вещества можно поделить на три группы: *диамагнетики*, *парамагнетики* и *ферромагнетики*.

Как уже отмечалось, вещества, для которых  $\mu < 1$ , называются *диамагнетиками*. К ним относятся висмут, медь, ртуть, серебро, золото, хлор, инертные газы и др. В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетик немагнитен, поскольку магнитные моменты электронов в нём взаимно компенсированы и суммарный магнитный момент атома равен нулю.

При наложении внешнего поля наведённые составляющие магнитных полей атомов складываются и образуют собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле. Этот эффект получил название диамагнитного эффекта, а вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле против направления поля, называются *диамагнетиками*.

Так как диамагнитный эффект обусловлен действием внешнего магнитного поля на электроны атомов вещества, то диамагнетизм свойственен всем веществам.

Вещества, относительная магнитная проницаемость которых  $\mu > 1$ , называются *парамагнетиками*. У парамагнитных веществ при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты электронов не компенсируют друг друга, и атомы (молекулы) парамагнетиков всегда обладают магнитным моментом.

Однако вследствие теплового движения молекул их магнитные моменты ориентированы беспорядочно, поэтому парамагнитные вещества магнитными свойствами не обладают. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов).

Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. Этот эффект называется парамагнитным. При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается. К парамагнетикам относятся натрий, калий, магний, кальций, марганец, платина, редкоземельные элементы, растворы некоторых солей и др.

Однородное магнитное поле в диамагнетиках ослабляется, в парамагнетиках – усиливается. Среда с неоднородным магнитным полем диамагнитные вещества выталкивает, парамагнитные – втягивает в себя (рисунок 6.8).

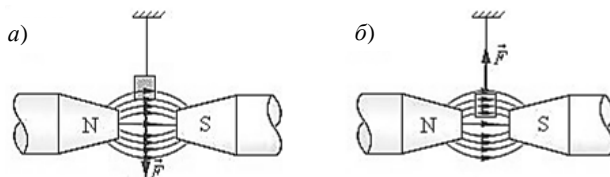


Рисунок 6.8 – Парамагнетик (а) и диамагнетик (б) в неоднородном магнитном поле

Особый класс магнетиков образуют *ферромагнетики*. Такое название они получили по своему наиболее распространённому представителю – железу. Кроме железа к их числу относятся никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами. Ферромагнетизм присущ всем этим веществам только в кристаллическом состоянии.

Ферромагнетики являются сильномагнитными веществами. Их намагниченность до  $10^{10}$  раз превосходит намагниченность диа- и парамагнетиков.

Объяснение свойств ферромагнетиков даётся только квантовой механикой. Основы теории ферромагнетизма разработаны русским физиком Я. И. Френкелем и немецким физиком В. Гейзенбергом. Они показали, что магнитные свойства ферромагнетиков обусловлены спиновыми магнитными моментами электронов.

При определённых условиях в кристаллах могут возникать обменные силы, которые заставляют спиновые магнитные моменты электронов выстраиваться параллельно друг другу (рисунок 6.9). В результате возникают области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания, называемые *доменами*<sup>1)</sup>. Домены имеют размеры  $\sim 10^{-6}$  м.

В пределах каждого домена ферромагнетик намагничен до насыщения и обладает магнитным моментом. Направления этих моментов для разных доменов различны (рисунок 6.10), так что в отсутствие внешнего поля суммарный момент всего тела равен нулю.

Если образец ферромагнетика поместить во внешнее магнитное поле, то размеры доменов, магнитные моменты которых ориентированы вдоль поля, увеличиваются из-за смещения их границ. В результате этого в ферромагнетике возникает сильное внутренне поле, индукция которого  $B$  совпадает по направлению с индукцией внешнего поля  $B_0$ . Так как  $B > B_0$ , то образец остается намагничённым после снятия внешнего поля. Остаточная намагниченность различных ферромагнетиков неодинакова.

Поле  $J$  от доменов и намагничивающее поле  $H$  складываются, образуя в веществе суммарное поле, характеризующее магнитной индукцией:

$$B = \mu_0 (J + H). \quad (6.10)$$

Формула (6.10) учитывает и воздействующее поле  $H$ , и тот вклад  $J$ , который приносит само вещество. Если  $H$  характеризует магнитное поле, внешнее по отношению к ферромагнетика, то  $B$  определяет значение и направление поля в нем.

Свойство вещества увеличивать свой магнитный момент за счет возникновения элементарных магнитных моментов под действием внешнего магнитного поля называют *намагничиванием*.

Следует отметить, что при достижении определенной температуры магнитная проницаемость ферромагнитных тел резко падает до значения, близ-

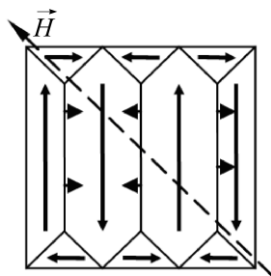


Рисунок 6.9 – Доменная структура ферромагнетиков

<sup>1)</sup> *Domaine* (фр.), от лат. (*terra dominica* – господская земля; средневековое герцогство, в котором пики всех воинов повернуты в одну сторону по приказу герцога.

кого к единице. Эта температура, характерная для каждого ферромагнитного вещества, носит название точки Кюри по имени французского физика Пьера Кюри (1859–1906). В ферромагнетиках при температуре выше точки Кюри тепловое движение атомов кристалла разрушает параллельную ориентацию магнитных моментов, и ферромагнетизм исчезает: ферромагнетик становится парамагнетиком. Домены при этом исчезают. У железа точка Кюри равна 767 °С, у никеля – 360 °С, у кобальта – около 1130 °С. У некоторых ферромагнитных сплавов точка Кюри лежит вблизи 100 °С.

Ферромагнетики обладают сильно выраженной нелинейной зависимостью индукции  $\vec{B}$  от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ . При перемагничивании связь между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  становится неоднозначной.

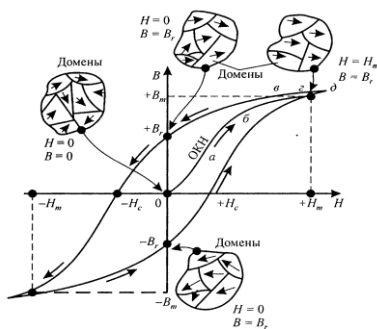


Рисунок 6.10 – Основная кривая намагничивания и петля гистерезиса

Эти функции бывают двух видов: *кривые намагничивания* и *петли гистерезиса*.

Кривые намагничивания и петли гистерезиса показывают процесс изменения намагниченности ферромагнетиков. Кривая намагничивания (рисунок 6.10) представляет собой графическое изображение зависимости  $B = \mu_a H$ .

Магнитная индукция в материале формируется как сумма намагниченности  $J$ , т. е. индукции, создаваемой доменами, и напряженности внешнего магнитного поля (см. формулу (6.10)). Складывая ординаты кривых  $\mu_0 H$  и  $\mu_0 J$ , получаем зависимость, изображаемую кривой  $B = \mu_a H$  (рисунок 6.11), называемой *кривой первоначального намагничивания*.

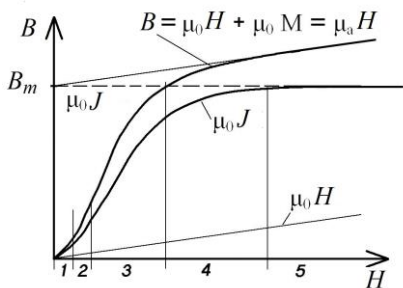


Рисунок 6.11 – Зависимость магнитной индукции  $B$  и намагниченности  $J$  от намагничивающего поля  $H$

Кривая  $B = \mu_a H$  (см. рисунок 6.11) нелинейна и может быть условно разделена на пять участков. Участок 1 (0– $a$  на рисунке 6.11) соответствует упругому смещению границ между доменами. На участке 2 ( $a$ – $b$ ) ориентация доменов в направлении внешнего поля скачкообразно изменяется и намагниченность ферромагнетика увеличивается.

Участок 3 ( $b$ – $c$ ) соответствует процессу переориентации доменов. На участке 4 ( $c$ – $d$ ) ориентация доменов в направлении внешнего поля скачкообразно изменяется и намагниченность ферромагнетика увеличивается.

Участок 3 (б-в) показывает необратимые смещения границ между доменами. Здесь магнитная проницаемость достигает максимального значения в точке перегиба кривой намагничивания.

В пределах участка 4 (в-г) домены вырастают до максимально возможных размеров и большинство атомных магнитных моментов в материале оказывается выстроенным вдоль внешнего поля. Резервы роста внутреннего поля  $J$  за счет доменов исчерпаны, материал достигает состояния намагниченности насыщения  $J_s$  или технического насыщения, характеризуемого индукцией  $B_m$  и напряженностью  $H_m$ .

Увеличение  $H > H_m$  на участке 5 (г-д) уже не приводит к увеличению внутреннего поля  $J$ , индукция  $B$  возрастает только за счет увеличения  $H$ . Здесь основная кривая намагничивания становится линейной,  $\mu \rightarrow 1$ ,  $\chi \rightarrow 0$ .

Из-за нелинейного характера кривой первоначального намагничивания выделяют начальную и максимальную магнитную проницаемость (рисунок 6.12), которая определяется как тангенс углов наклона касательных к кривой намагничивания в точках  $H = 0$  и  $H = H_m$ :

$$\mu_H = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H} = \operatorname{tg} \alpha_H; \quad (6.11)$$

$$\mu_{\max} = \left. \frac{B}{\mu_0 H} \right|_{H=H_m} = \operatorname{tg} \alpha_m. \quad (6.12)$$

Используют также понятие дифференциальной магнитной проницаемости (см. рисунок 6.12):

$$\mu_{\text{диф}} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} = \frac{dB}{\mu_0 dH}. \quad (6.13)$$

Если напряженность  $H$  уменьшать, поле  $B$  будет в материале также уменьшаться, но не «вдоль» той кривой, по которой оно нарастало (см. рисунок 6.11). Это явление называется *магнитным гистерезисом* (уменьшение  $B$  «запаздывает»). При  $H = 0$  индукция  $B$  не становится равной нулю в материале, а принимает положительное значение  $B_r$ . Это значение индукции, которая «остается» в материале.

*Остаточной индукцией*  $B_r$  (см. рисунок 6.11) называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения ферромагнетике после снятия намагничивающего поля. Если значение индукции велико, то материал может быть хорошим постоянным магнитом. Чтобы размагнитить стержень, т. е. уменьшить  $B_r$  до нуля, необходимо изме-

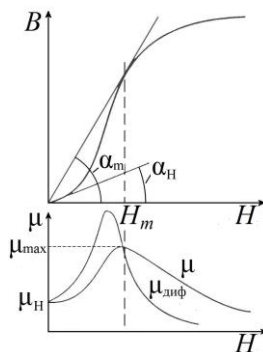


Рисунок 6.12 – Связь  $\mu$  и  $\mu_{\text{диф}}$  с  $B$  и  $H$

нить знак и увеличивать внешнее поле  $H$  в обратном направлении до значения коэрцитивной силы  $H_c$ , т. е. удерживающей намагниченность (см. рисунок 6.11).

Коэрцитивной силой  $H_c$  называют величину размагничивающего поля, которое должно быть приложено, чтобы установить значение индукции в ферромагнетике, равное нулю (рисунок 6.13).

Когда воздействующее поле совершает полный цикл изменения (от  $+H_m$  до 0 и далее до  $-H_m$ , а затем в обратную сторону до 0 и далее до  $+H_m$ ), магнитная индукция  $B$  изменяется по симметричной замкнутой кривой, называемой *петлей гистерезиса*.

При совершении нескольких таких циклов перемагничивания петля принимает окончательную неизменяемую форму и называется *предельной*. Существуют также *частные петли гистерезиса*, получаемые при меньших, чем  $H_m$ , значениях предельной напряженности поля.

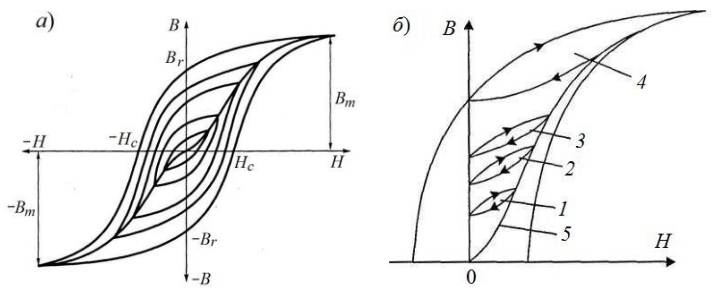


Рисунок 6.13 – Кривые намагничивания при циклическом перемагничивании ферромагнетика:

основная кривая намагничивания (а); петли предельного и частных циклов намагничивания (б); несимметричные петли гистерезиса: 1–3 – промежуточные петли; 4 – предельная петля; 5 – кривая начального намагничивания

При несимметричном относительно нуля изменении значений напряженности поля (материал подвергается действию полей одного знака), обычно в небольших пределах, но с сохранением знака, формируются несимметричные *частные циклы*.

Если время установления напряженности поля соизмеримо со временем перемагничивания материала, то определяемые в этом режиме характеристики называют динамическими.

Основным влияющим фактором при этом являются *вихревые токи*. Они создают магнитное поле, направленное навстречу внешнему полю, уменьшающему магнитную индукцию. При увеличении частоты вихревые токи возрастают и кривая намагничивания снижается.

Вихревые токи вызывают тепловые потери, что приводит к расширению петли гистерезиса. В связи с этим различают *статическую* и *динамическую* петли гистерезиса.

Статическую петлю получают при очень медленном изменении  $H$ , при котором допустимо пренебречь действием вихревых токов. при перемагничивании ферромагнетиков переменным полем  $H$ , когда влияние вихревых токов становится значительным, получают динамическую петлю. Она может быть представлена как геометрическое место вершин частных динамических петель гистерезиса.

Отметим, что рассмотренные выше параметры: остаточная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu_n$  и  $\mu_{max}$  – являются основными, по ним производят анализ и выбор магнитных материалов для решения различных задач, в том числе и дефектоскопических. Их значения приводятся в справочниках по магнитным материалам.

Чем выше намагниченность материала при данном значении напряженности внешнего поля, тем выше его относительная проницаемость и индукция поля внутри материала. Проницаемость  $\mu_{нач}$  характеризует свойства материала в слабых магнитных полях. Если материал имеет узкую петлю ( $H_c \rightarrow 0$ ), более высокие значения  $\mu_{нач}$ , то его относят к магнитомягким материалам (МММ) (рисунок 6.14). Это незакаленные малоуглеродистые электротехнические стали и пермаллои – предельно магнитомягкие ( $H_c \leq 1$  А/м), преимущественно железоникелевые сплавы.

О принадлежности ферромагнетиков к магнитотвердым материалам (МТМ) обычно судят по значению  $H_c$  ( $H_c \geq 10^3$  А/м). Ширина петли магнитотвердых сталей в десятки, сотни раз превышает ширину петли гистерезиса магнитомягких. К магнитотвердым относят закаленные высокоуглеродистые (инструментальные) легированные конструкционные стали, ферриты, а также сплавы для постоянных магнитов.

На подвижном составе железных дорог к магнитомягким материалам относят стали для изготовления ударно-тяговых механизмов, рам тележек, колесных пар и др., к магнитотвердым – стали роликов, внутренних и наружных колец буксовых подшипников, шарикоподшипниковые стали (ШХ9, ШХ15С и др.), рельсовые стали.

*Коэффициент размагничивания.* Всё вышеизложенное справедливо для намагничивания бесконечных ферромагнитных сред или однородных магнитных цепей замкнутой формы. В реальных случаях объекты магнитного контроля, будучи телами конечных размеров, намагничиваются во внешнем

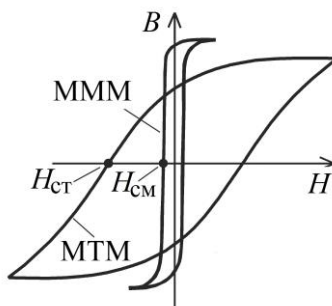


Рисунок 6.14 – Петли гистерезиса магнитомягких (МММ) и магнитотвердых (МТМ) ферромагнетиков

однородном поле  $H_B$  не так, как намагничивается сам ферромагнетик: на процесс намагничивания деталей оказывает действие размагничивающий фактор. При помещении детали в магнитное поле  $H_B$  неизбежно на ее торцах-границах образуются магнитные полюса, которые вызывают появление внутри детали размагничивающего поля  $H_p$ , направленного против внешнего магнитного поля. Величина этого поля зависит от намагниченности:

$$H_p \approx NJ, \quad (6.14)$$

где  $N$  – коэффициент размагничивания, зависящий главным образом от геометрических свойств намагниченной детали, а не от ее магнитных свойств.

Тогда результирующее поле внутри детали определяется формулой

$$H_{и} = H_B - H_p = H_B - NJ. \quad (6.15)$$

Видно, что чем больше  $N$ , тем меньше в детали напряженность поля  $H_{и}$ , следовательно, индукция  $B$ .

Объекты контроля магнитной дефектоскопии представляют собой довольно короткие детали с большими диаметрами, которые размагничивают друг друга. Следовательно, чем больше диаметр или чем меньше длина детали, тем меньшее значение индукции она приобретет при намагничивании.

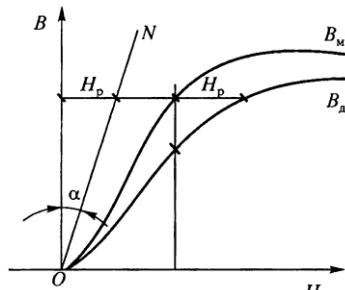


Рисунок 6.15 – Построение кривой намагничивания результирующего поля в детали

Истинное (результатирующее) внутреннее поле можно найти путем смещения кривой намагничивания или петли гистерезиса материала в каждой точке с намагниченностью  $J$  влево на величину  $NJ$  (рисунок 6.15).

Если учесть, что  $H_p = Jtg\alpha$  и  $tg\alpha = N$ , то, проводя кривую сдвига  $ON$  под углом  $\alpha$ , можно сместить точки кривой намагничивания на величину отрезков  $Jtg\alpha$  между осью ординат и линией  $ON$ , т. е. кривая намагничивания детали есть не что иное, как сдвинутая вправо кривая намагничивания ее материала.

В общем случае  $0 < N < 1$ . Для деталей, у которых поперечные и продольные размеры одинаковы,  $N \approx 0,3 \dots 0,4$ .

В практике дефектоскопии для уменьшения действия размагничивающего фактора принимают следующие меры:

- составляют детали в цепочки, при этом площадь соприкосновения торцевых поверхностей деталей должна быть  $\geq 30\%$ ;
- «удлиняют» детали специальными удлинителями из магнитомягкой стали.



## 6.4 Связь магнитных и физико-механических свойств ферромагнетиков

С физической точки зрения ферромагнетики обладают характерными механическими, магнитными и электрическими свойствами, которые описываются упругими константами, магнитной восприимчивостью, электропроводностью и могут быть измерены. С технической точки зрения интерес представляют такие параметры металлов, как твердость, пластичность, предел прочности, геометрические размеры. В магнитном контроле используются зависимости, существующие между отдельными физическими (магнитными) свойствами и техническими, например, приведенные в таблице 6.3.

Эти связи возникают тогда, когда одни и те же физические и химические процессы образования структуры и фазового состава ферромагнитных сталей формируют также и их магнитные свойства, или в процессе эксплуатации изделий, когда их свойства деградируют. Закономерности данных связей не поддаются расчету, носят корреляционный характер и устанавливаются в основном экспериментально.

Исследованиями установлено [49], что существует связь между магнитными и физико-механическими свойствами ферромагнитных материалов.

*Химический состав ферромагнетиков.* У сплавов ферромагнитных материалов друг с другом или с неферромагнитными материалами магнитные свойства могут изменяться в широких пределах.

Даже небольшие колебания содержания углерода, легирующих элементов приводят к резким изменениям магнитных свойств. Например, при увеличении содержания углерода на 1,5 мас. % магнитная проницаемость  $\mu_{\max}$  стали может уменьшаться, а коэрцитивная сила  $H_c$  – увеличиваться более чем в 10 раз, в то время как индукция насыщения  $B_m$  и остаточная индукция  $B_r$  почти не меняются.

Таблица 6.1 – Измеряемые физические и технические свойства ферромагнетиков

Измеряемая физическая величина	$H_c, B_r, J_s, \mu$	Поле рассеяния	Петля гистерезиса	Шумы Баркгаузена
Контролируемые технические свойства	Твердость, предел прочности, структура	Дефекты, толщина	Твердость, предел прочности, состав сплавов	Внутренние напряжения

Такие изменения, с одной стороны, позволяют контролировать химический состав ферромагнитных материалов (сортировка сталей по маркам), а с другой – являются факторами, затрудняющими реализацию магнитного контроля. Исследования свидетельствуют о том, что оценку значений магнитных параметров одного вида стали нельзя распространять на другие

близкие по физико-механическим свойствам стали, т. к. даже незначительные примеси могут сильно изменить магнитные свойства.

*Термическая обработка.* Закалка и отпуск – основные виды термической обработки – сильно изменяют структуру и магнитные свойства стали.

К значительным изменениям магнитных свойств сталей приводит химико-термическая обработка, которая основана на поверхностном насыщении стальных деталей углеродом (цементация), азотом (азотирование), бором (борирование) и другими элементами с целью повышения их поверхностной прочности.

*Механическая обработка* проявляется как влияющий фактор при целенаправленной обработке или как сопутствующее явление при реализации разнообразных технологических операций. Например, наклеп, сопровождающий штамповку или токарную обработку, приводит к увеличению коэрцитивной силы  $H_c$  и уменьшению магнитной проницаемости  $\mu$ . Аналогичный эффект имеет место на поверхностях катания колес и рельсов в процессе эксплуатации подвижного состава железных дорог.

## 6.5 Физические основы магнитной дефектоскопии

### *Магнитные поля дефектов*

Если поместить бездефектный образец ферромагнетика с однородными магнитными свойствами и магнитной проницаемостью  $\mu$  в продольное однородное магнитное поле  $H_0$  (рисунок 6.16), то он намагнитится и в соответствии со своей кривой намагничивания приобретет магнитную индукцию  $B_0$ , линии которой распределяются равномерно внутри образца и не выходят за его поверхность. Это объясняется тем, что внешняя среда (воздух) имеет магнитную проницаемость  $\mu_0 \ll \mu$ , и, следовательно, значительно большее магнитное сопротивление  $R_m$ .

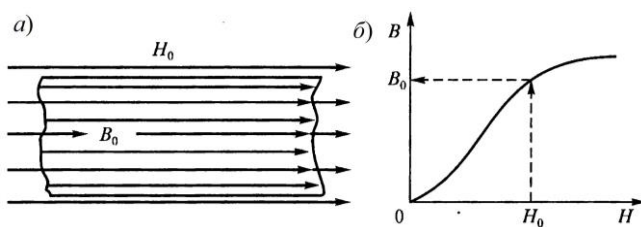


Рисунок 6.16 – Кривая намагничивания бездефектного ферромагнетика:  
а – бездефектный образец ферромагнетика; б – его кривая намагничивания

Если в это же магнитное поле поместить такой же образец ферромагнетика, имеющего поверхностную трещину, ориентированную перпендикулярно направлению поля  $B_0$ , то произойдет перераспределение магнитного

потока  $\Phi$  как в пределах профиля трещины, так и в окружающем ее пространстве (рисунок 6.17).

В области трещины, из-за более высокого магнитного сопротивления в ее воздушной полости плотность линий существенно снизится. При этом часть линий индукции, расположенных ниже трещины, уплотнится, если образец не намагничен до насыщения.

Часть магнитных линий выйдет наружу и преодолет трещину по воздуху. Каждый выход и вход линий поля формирует магнитные полюсы. Это соответствует представлениям магнитостатики, когда каждый конец линии магнитной индукции, где она встречает воздушную среду с проницаемостью  $\mu_0 \ll \mu_1$ , можно рассматривать как положительный «магнитный заряд» (северный полюс  $N$ ), а каждое ее начало – как «отрицательный» (южный полюс  $S$ ) (рисунок 6.18, а).

Такое явление в магнитостатике называют *магнитной поляризацией стенок дефекта* и в примыкающей к ним окружающей зоне его поверхности.

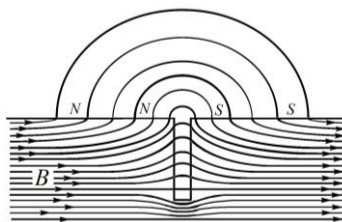


Рисунок 6.17 – Топография магнитного поля вблизи дефекта

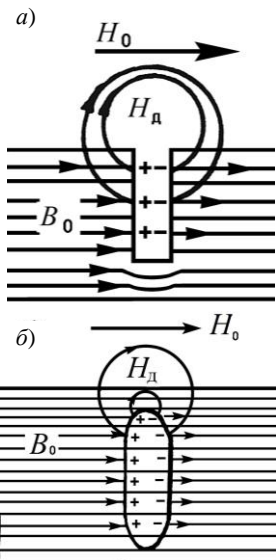


Рисунок 6.18 – Магнитные поля рассеяния над поверхностным (а) и внутренним (б) дефектами

Каждый положительный заряд создает магнитное поле, направленное из него как из центра. При этом магнитные линии поля, выходя за пределы образца, снова входят в него, замыкаясь с отрицательными магнитными зарядами. В результате над поверхностью в зоне трещины формируется суммарное поле рассеяния магнитных зарядов  $H_d$ , которое направлено в сторону внешнего намагничивающего поля  $H_0$ , обеспечивая его местную концентрацию. В этом случае говорят, что поле становится неоднородным.

Суммарное поле  $H_d$  называют магнитным полем рассеивания дефекта, или полем дефекта. *Магнитное поле рассеивания дефекта* – это локальное магнитное поле, возникающее в зоне дефекта вследствие поляризации его границ [40].

Случай внутреннего расположения дефекта показан на рисунке 6.18, б. Здесь также имеет место явление магнитной поляризации стенок полости дефекта. Однако

степень неоднородности магнитного поля в данном случае уменьшается за счет экранирующего эффекта приповерхностного слоя ферромагнетика над дефектом. Чем толще этот слой, тем сильнее ослабляется поле рассеяния внутреннего дефекта, тем меньшее количество магнитных линий этого поля выходит за поверхность ферромагнетика.

Возникновение неоднородного магнитного поля над поверхностью намагниченной детали свидетельствует о наличии дефекта. Таким образом сущностью и содержанием *магнитной дефектоскопии* является обнаружение этого поля каким-либо физическим методом.

#### *Модели магнитных полей дефектов*

Магнитные поля дефектов исследуют теоретическими методами, аналогичными используемым в электростатике. Дефект, представляющий протяженную трещину или шаровое включение, заменяют моделями в виде бесконечно протяженной нити, совокупности отрезков или шаровой полости. Этим моделям приписывается магнитный заряд, затем рассчитывают напряженность поля, создаваемого этим зарядом.

Если в качестве модели подповерхностного дефекта взята шаровая полость внутри ферромагнитного материала с магнитной проницаемостью  $\mu$ , (рисунок 6.19, а), то, составляющие напряженности магнитного поля в ферромагнитном материале, окружающем полость, определяются по формулам

$$H_x = H_0 \left[ 1 + \frac{\mu - 1}{1 + 2\mu} a^3 \frac{y^2 + z^2 - 2x^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \right]; \quad (6.16)$$

$$H_y = -\frac{\mu - 1}{1 + 2\mu} a^3 H_0 \frac{3xy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}; \quad (6.17)$$

$$H_z = -\frac{\mu - 1}{1 + 2\mu} a^3 H_0 \frac{3xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}}. \quad (6.18)$$

Недостатком этой модели дефекта является то, что магнитное поле рассчитывается внутри ферромагнетика, окружающего дефект. В то же время чаще необходимо знать топографию поля вблизи поверхности вне ОК. Некоторые модели позволяют получить ее, например, модель бесконечно протяженного цилиндрического дефекта в полупространстве (рисунок 6.19, б).

В результате можно получить функции распределения тангенциальной  $H_x$  и нормальной  $H_y$  составляющих по поверхности ОК в области дефекта (рисунок 6.20). Тангенциальная составляющая не изменяет знака при переходе через дефект и для узких дефектов имеет один максимум, для широких – два. Обычно магнитный контроль используют для контроля узких дефек-

тов, типа трещин, поэтому можно считать, что максимум тангенциальной составляющей всегда располагается над дефектом.

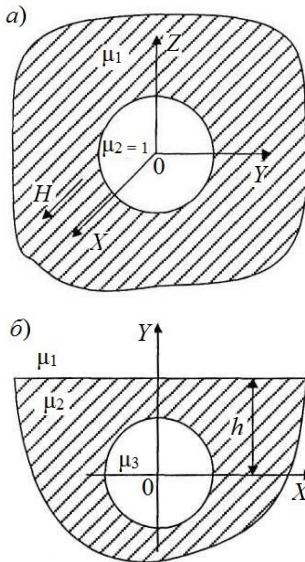


Рисунок 6.19 – Модель дефекта:  
 а – в виде шаровой полости,  
 б – в виде цилиндра в полупространстве

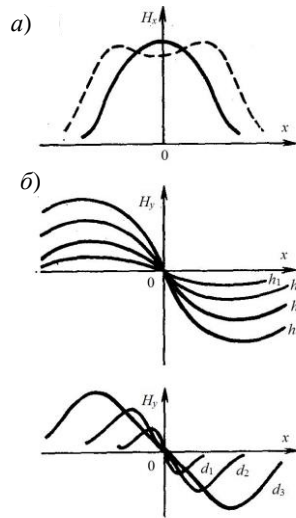


Рисунок 6.20 – Тангенциальная (а) и нормальная (б) составляющие напряжённости поля над трещиной;  $d, h$  – ширина и глубина дефекта

Нормальная составляющая  $H_y$  при переходе через дефект изменяет знак. С увеличением глубины дефекта от  $h_1$  до  $h_4$  характер зависимости не изменяется и максимальное значение  $H_y$  возрастает.

Таким образом, оценить глубину расположения дефекта можно по нормальной составляющей напряжённости магнитного поля. При изменении ширины  $d$  ( $d_1 < d_2 < d_3$ ) дефекта происходит не только увеличение значения  $H_y$ , но и смещение экстремума.

Следовательно, информация о ширине трещины содержится как в значении, так и в положении максимума  $H_y$ .

При перемещении первичного преобразователя в направлении, перпендикулярном направлению трещины, нормальная составляющая напряжённости магнитного поля изменяет знак, проходя через нулевое значение, и имеет второй экстремум. В точке прохождения через нуль нормальной составляющей  $H_y$  тангенциальная составляющая  $H_x$  имеет максимум, а в случае широких трещин – значение, близкое к максимальному.

Обычно предпочитают иметь дело только с нормальной составляющей  $H_y$ , которая за пределами дефекта практически равна нулю. Это повышает достоверность контроля, к тому же постоянная составляющая функции  $H_x$  является помехой.

Так как между краями трещины, которые соответствуют экстремумам сигнала дефекта по  $H_y$  (см. рисунок 6.21, б), крутизна  $H_y$  больше, чем в бездефектных зонах, можно измерять в каждой точке и сравнивать с порогом не значения функции  $H_y$ , а значения ее производной по координате  $x$ , которые более четко характеризуют неоднородность магнитного поля рассеяния над дефектом. Такая производная называется *градиентом напряженности магнитного поля*.

Практическое применение данных способов определения размеров дефектов сильно осложнено таким мешающим фактором, как изменение магнитных характеристик от образца к образцу. С уменьшением магнитной индукции материала уменьшается напряженность магнитного поля рассеяния дефекта, что приводит к ошибкам при оценке параметров дефекта непосредственно по какой-либо составляющей напряженности магнитного поля. По этой причине предпочтительнее проводить контроль по топографии магнитного поля. Однако и здесь существуют свои сложности – локальные неоднородности поля, отличать которые от дефектов крайне трудно. Такие неоднородности могут появиться в результате механических ударов, термических воздействий, поднесения магнита к детали. Чтобы его устранить, можно повторно намагнитить деталь и снова ее проконтролировать.

Неоднородности магнитных свойств, вызванные механическими напряжениями (в результате ударов, перегревов), устраняют отжигом, если позволяют условия производства или эксплуатации ОК.

## 6.6 Классификация методов магнитного НК

Методы неразрушающего контроля каждого вида классифицируют по следующим признакам [7]:

- а) характер взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- б) первичные информативные параметры;
- в) способы получения первичной информации.

По *характеру взаимодействия физического поля с объектом контроля* (ОК) магнитный вид НК на методы не разделяют, т. к. во всех случаях используют одно явление – намагничивание ОК – и измеряют *первичные параметры*, имеющие магнитную природу: коэрцитивная сила  $H_c$ , намагниченность  $J$ , остаточная индукция  $B_r$ , магнитная проницаемость  $\mu$ , параметры магнитного шума, возникающего в результате эффекта Баркгаузена.

По *способу получения первичной информации* магнитный вид НК подразделяют на семь методов: магнитопорошковый, индукционный, феррозондовый, магнитографический, с использованием эффекта Холла, пондеромоторный и магниторезисторный.

Все они основаны на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами, но с применением различных первичных преобразователей (индикаторов) магнитного поля, материалов и способов контроля. Так, в магнитопорошковом методе в качестве индикатора используют магнитные порошки или суспензии, в индукционном – индукционные преобразователи, измеряющие параметры ЭДС, наведенной в этом преобразователе, в феррозондовом – феррозонды, измеряющие напряженность или градиент магнитного поля рассеяния, в магнитографическом применяют магнитные ленты, в пондеромоторном измеряют силу отрыва (притяжения) пробного магнита (электромагнита) от ОК. В методах эффекта Холла и магниторезисторном используют гальваномагнитные преобразователи: в первом случае это датчики Холла, измеряющие холловскую ЭДС, во втором – магниторезисторы или магнитодиоды, по изменению сопротивления.

Поскольку чувствительность магниторезисторов и магнитодиодов к слабым магнитным полям меньше, чем у преобразователей Холла, то для регистрации полей рассеяния дефектов они не используются. Применяют их в основном при измерении индукции намагничивающих полей с  $B > 0,2$  Тл.

На железнодорожном транспорте из вышеназванных методов для дефектоскопии применяют: магнитопорошковый и феррозондовый методы в вагонном хозяйстве для контроля деталей и узлов вагонов различного назначения; магнитопорошковый в локомотивном хозяйстве; индукционный в путевом хозяйстве для контроля рельсов, уложенных в путь. Для контроля сварных соединений различных конструкций нашёл применение магнитографический метод НК.

## 6.7 Способы магнитного контроля

Магнитный контроль в зависимости от физико-химических свойств ОК, его формы и размеров, типа и расположения искомого дефектов, а также мощности намагничивающих устройств с точки зрения воздействия магнитного поля на ОК проводят способом *приложенного* магнитного поля (СПП) или способом *остаточной намагниченности* (СОН).

Контроль в *приложенном поле* заключается в том, что деталь намагничивают и одновременно контролируют.

*Достоинства:*

– СПП дает возможность создать достаточно большую индукцию, вплоть до насыщения. Это позволяет получить значительные поля рассеяния дефектов и повысить их выявляемость;

– СПП обеспечивает высокую чувствительность, позволяет контролировать объекты из материалов с малой индукцией насыщения.

*Недостатки:* сильное магнитное поле, действующее на ОК, воздействует также и на магнитный первичный измерительный преобразователь, создавая мощную помеху, что затрудняет контроль.

Способом приложенного поля контролируют объекты из материалов с малой индукцией насыщения – детали из магнитомягких, малоуглеродистых сталей, обладающих значениями  $B_r < 0,6$  Тл и коэрцитивной силы  $H_c < 800$  А/м. Например, оси колесных пар, детали автосцепки и тормозной системы и др. контролируют в приложенном переменном магнитном поле при продольном намагничивании магнитопошковым методом.

Контроль способом *остаточной намагниченности* заключается в том, что ОК вначале намагничивают, затем устраняют намагничивающее поле и только после этого начинают контроль.

*Достоинства:* возможность установки детали в любое положение для выбора лучшего освещения и удобного осмотра; нанесение суспензии как путем полива, так и окунанием в ванне с суспензией одновременно ряда деталей не только непосредственно за операцией намагничивания, но и спустя несколько часов; меньшую вероятность появления ложных отложений порошка в местах грубой обработки поверхности, наклепа, по рискам и т. п.; простоту расшифровки результатов контроля; возможность контроля в условиях, когда отсутствуют источники питания электромагнитов; улучшение безопасности труда. Всё это свидетельствует о более высокой технологичности СОН.

*Недостатки:* из-за меньших значений индукции чувствительность этого способа меньше, но здесь исключено мешающее влияние намагничивающего поля, что частично компенсирует потерю чувствительности.

Этот способ применяется для контроля *магнитотвердых* материалов (термически обработанные конструкционные стали) с большими остаточной индукцией  $B_r > 0,6 \dots 0,8$  Тл и коэрцитивной силой  $H_c > 800 \dots 1000$  А/м. СОН используется для обнаружения трещин в роликах и кольцах буксовых подшипников, в боковых рамах и надрессорных балках. В *магнитомягком* материале даже при достаточно большом значении  $B_r$  индукция может оказаться маленькой из-за размагничивающего влияния ОК.

Контроль СОН дает следующие преимущества: возможность установки детали в любое положение для выбора лучшего освещения и удобного осмотра; нанесение суспензии как путем полива, так и окунанием в ванне с суспензией одновременно ряда деталей не только непосредственно за операцией намагничивания, но и спустя несколько часов; меньшую вероятность появления ложных отложений порошка в местах грубой обработки поверхности, наклепа, по рискам и т. п.; простоту расшифровки результатов контроля; возможность контроля в условиях, когда отсутствуют источники



питания электромагнитов; улучшение безопасности труда. Всё это свидетельствует о более высокой технологичности СОН.

Способ контроля выбирают в зависимости от магнитных свойств материала проверяемого объекта (рисунок 6.21).

Для этого выполняют следующие операции:

- определяют марку материала проверяемого объекта, используя техническую документацию на его изготовление;

- вычисляют значение коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$  материала объекта, используя соответствующие справочники по магнитным свойствам сталей;

- исходя из положения точки с координатами  $H_c$  и  $B_r$  делают заключение о возможности применения того или иного способа контроля, руководствуясь следующим: если на графике точка  $(H_c, B_r)$  расположена выше кривой, то возможен контроль объекта как СОН, так и СПП, если точка  $(H_c, B_r)$  расположена ниже кривой, то рекомендуется контроль СПП.

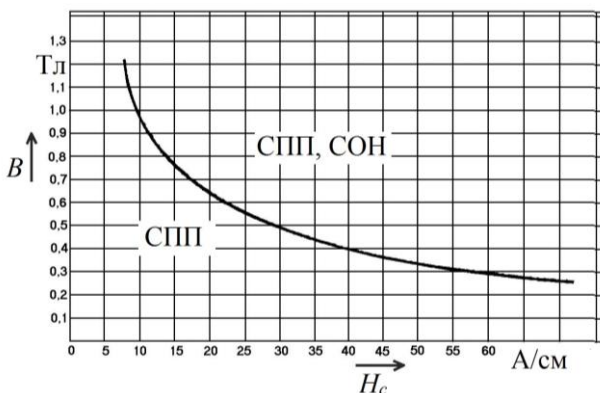


Рисунок 6.21 – Номограмма для выбора способа магнитного контроля

## 6.8 Виды (способы) и схемы намагничивания ОК

Поскольку магнитный контроль основан на регистрации магнитных полей рассеяния, то обязательной операцией контроля является намагничивание контролируемой детали. Лучше всего дефекты обнаруживаются в случае, когда плоскость дефекта перпендикулярна направлению намагничивания. Из-за того, что положение плоскости дефекта заранее не известно, детали простой формы намагничивают в одном или двух направлениях, а детали сложной формы – в нескольких направлениях.

Магнитное поле рассеяния дефекта формируется только тангенциальной составляющей  $H_t$  вектора напряженности намагничивающего поля. Для

надежного выявления дефектов на контролируемой поверхности детали при намагничивании должно выполняться условие  $H_n/H_t < 3$ .

При магнитном контроле применяют следующие виды намагничивания: *полюсное (продольное, поперечное, нормальное), циркулярное и комбинированное*.

Они отличаются преимущественным направлением магнитного потока относительно наибольшего размера объекта контроля.

**Полюсное намагничивание** – это такое намагничивание, при котором магнитный поток проходит по детали только часть пути, а другую часть пути по воздуху, по постоянному магниту или по магнитопроводу.

Полюсное намагничивание называется *продольным*, если поле  $\vec{H}$  направлено вдоль оси детали; *поперечным*, если поле  $\vec{H}$  направлено перпендикулярно продольной оси деталей; *нормальным*, при поле  $\vec{H}$  перпендикулярном плоскости детали.

Этот способ намагничивания, чаще всего, служит для выявления поперечных дефектов относительно продольной оси детали. Именно поэтому часто полюсное намагничивание называют *продольным*. Поперек детали можно эффективно намагничивать далеко не все детали.

Продольное намагничивание используется для выявления поперечных трещин (рисунок 6.22, а), поперечное – для выявления продольных трещин (рисунок 6.22, б), нормальное – для выявления трещин параллельных плоскости детали (рисунок 6.22, в).

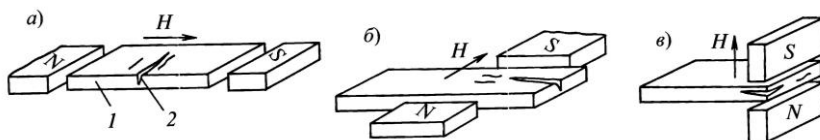


Рисунок 6.22 – Полюсное намагничивание детали:  
а – продольное; б – поперечное; в – нормальное

Полюсное намагничивание проводят: с использованием постоянного магнита (рычажного или с гибким магнитопроводом) или в стационарных электромагнитах, переносного электромагнита; катушки (соленоида), надеваемой на деталь; гибкого кабеля, охватывающего деталь (рисунок 6.23).

Перечисленные разновидности отличаются только способом создания магнитного поля. Средство и схему полюсного намагничивания выбирают исходя из величины и вида намагничивающего поля.

Намагничивание постоянным магнитом удобно при контроле в полевых условиях, а также при использовании магнитного контроля как дополнительного к каким-либо другим видам, когда отсутствует специальное оборудование магнитного контроля.

В то же время изменение напряженности поля и, следовательно, магнитного состояния ОК здесь почти невозможно. Достоинством элетромагнита является возможность управления режимом контроля.

Постоянные магниты и электромагниты применяют при контроле плоских или слабо искривленных участков поверхности детали. Намагничивание электромагнитами используют преимущественно для намагничивания участков крупных деталей и всей детали, которую располагают между полюсами электромагнита как замыкающее звено магнитопровода. Примером такой схемы является намагничивание надрессорной балки и боковых рам тележек вагонов с помощью намагничивающих систем МСН-10, МСН-31 или МСН-32.

При этом направление выявляемых дефектов – поперечное.

Полусное (продольное) намагничивание соленоидом применяют в основном для осесимметричных деталей или по участкам деталей типа валов, например, на участках средней и подступичных частей, а также шеек оси колесной пары. При этом имеет место влияние размагничивающего фактора (коэффициент формы): на границах намагничиваемого участка магнитные силовые линии выходят из ОК.

Истинная напряженность магнитного поля внутри объекта оказывается меньше расчетной. Влияние намагничиваемых областей детали и сложность конфигурации намагничиваемой области не позволяют рассчитать магнитное поле внутри детали и правильно выбрать режим контроля. Поэтому для выбора режима намагничивания деталей сложной формы и определения чувствительности необходимо измерять напряженность намагничивающего поля.

**Циркулярным намагничиванием** называется намагничивание, при котором магнитные силовые линии, являясь замкнутыми, проходят только внутри проверяемой детали.

Циркулярное намагничивание осуществляют, пропуская ток через деталь или проводник, проходящий сквозь отверстие в ОК. Этот вид намагничивания применяют для выявления продольных дефектов, а также дефектов, расположенных под небольшим углом к оси детали (выявляются трещины и другие дефекты радиальной направленности).

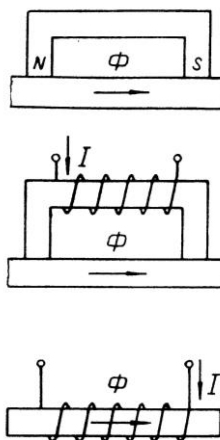


Рисунок 6.23 – Разновидности полюсного намагничивания

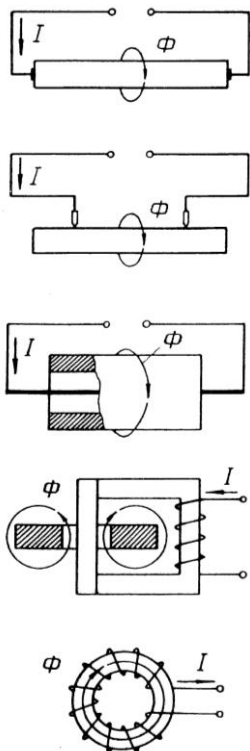


Рисунок 6.24 – Разновидности циркулярного намагничивания

детали обычно переменными полями в двух взаимно перпендикулярных направлениях с целью выявления дефектов разной ориентации. Очевидно, что намагничивающие поля не могут быть одинаковой частоты, т. к. в этом случае получалось бы просто поле одного направления, представляющее векторную сумму полей. На рисунке 6.26 показаны основные варианты комбинированного намагничивания. Видно, что комбинация здесь образована двумя предыдущими вариантами. В результате с максимальной чувствительностью можно выявлять дефекты, ориентированные в двух ортогональных направлениях.

Основные разновидности *циркулярного* намагничивания показаны на рисунке 6.24.

Для *циркулярного* намагничивания участков длинных деталей, а также в случае недоступности торцов контакты устанавливают на боковую поверхность детали.

Недостатком этого способа является то, что в местах контактов возможен сильный разогрев детали и образование прижогов (областей термического воздействия с измененными механическими свойствами), что недопустимо для хорошо обработанных рабочих поверхностей. Этот недостаток отсутствует при контроле деталей в виде труб, колец, поскольку в этом случае ток проходит по проводу, пропущенному через отверстие.

В отличие от полюсного при циркулярном намагничивании во многих случаях удастся приближенно оценить напряженность магнитного поля, т. е. рассчитать режим контроля (рисунок 6.25):

$$H = \frac{nI}{\pi d}, \quad (6.19)$$

где  $n$  – число витков,  $I$  – сила тока,  $d$  – диаметр детали.

#### Комбинированное намагничивание

осуществляется одновременным намагничи-

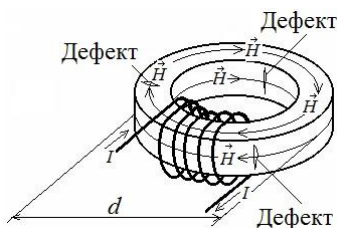


Рисунок 6.25 – Пример циркулярного намагничивания детали пропусканьем тока

Дефекты промежуточных направлений будут, конечно, также выявлены, но с меньшей чувствительностью; пропуска дефектов из-за того, силовые линии параллельны дефекту, не будет.

Поэтому с помощью комбинированного намагничивания выявляют дефекты, ориентированные произвольно.

**Погрешности, связанные с намагничиванием.** Существует источник погрешностей, связанный с намагничиванием детали. На участках изменения сечения детали возникают магнитные поля рассеяния, которые маскируют поля рассеяния дефекта. На рисунке 6.27 показано продольное намагничивание детали переменного сечения. В угловых областях наблюдается искривление силовых линий и частичный выход их на поверхность.

При наличии дефектов в этих областях на магнитное поле рассеяния дефектов накладываются поля рассеяния, появившиеся из-за изменения сечения, в результате чего возможен пропуск дефектов именно в этих местах.

Если такому контролю подвергаются детали, имеющие малое отношение длины к диаметру, то из-за влияния размагничивающего фактора напряженность поля в детали оказывается значительно меньшей напряженности, создаваемой соленоидом. Уменьшение напряженности поля может привести к пропуску дефектов.

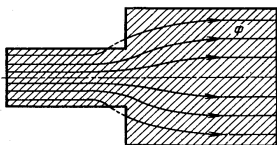


Рисунок 6.27 – Продольно намагниченная деталь переменного сечения

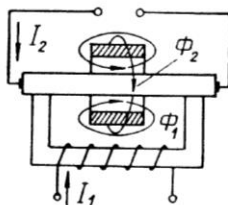
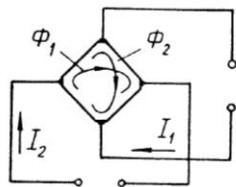
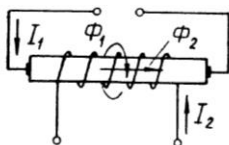
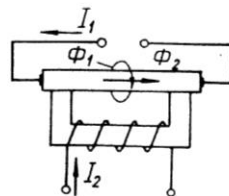


Рисунок 6.26 – Разновидности комбинированного намагничивания

Только при намагничивании достаточно длинных деталей можно не учитывать влияние размагничивающего фактора.

Считается, что ослаблением напряженности поля можно пренебречь лишь при значении размагничивающего фактора, отношение длины изделия  $L$  к его диаметру,  $N > 10 \dots 30$ .

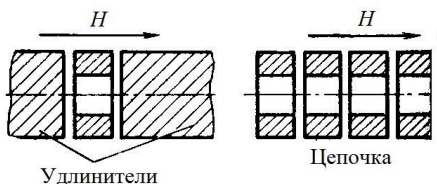


Рисунок 6.28 – Способы предотвращения размагничивания деталей

Для предотвращения влияния размагничивающего фактора применяют либо специальные удлинители, либо детали собирают в цепочки (рисунок 6.28).

Намагничивание и обработка суспензией производится без разбега этих цепочек, а осматривать каждую деталь можно отдельно.

## 6.9 Виды намагничивающих токов

В магнитном неразрушающем контроле намагничивание ОК проводят постоянным, переменным и импульсным полями.

Для их реализации применяют следующие виды электрического тока: постоянный, переменный однофазный или трехфазный, выпрямленный одно- или двухполупериодный, выпрямленный трехфазный, импульсный. При этом при контроле СПП используют переменный, постоянный и импульсный (последовательность импульсов); при контроле СОИ – импульсный (не менее трех импульсов), постоянный.

При намагничивании *постоянным полем* в ОК любым из ранее рассмотренных способов создают постоянное магнитное поле напряженностью  $H_{\max}$ , достаточной для насыщения материала (рисунок 6.29).

Считается, что в поле напряженностью  $H_{\max}$  практически достигается насыщение, если уменьшение напряженности поля на 25 % (до значения

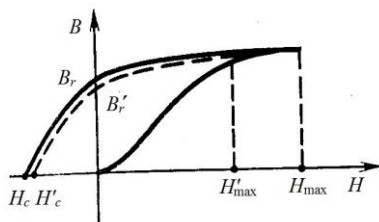


Рисунок 6.29 – Намагничивание детали до насыщения

$H'_{\max}$ ) приводит к уменьшению остаточной индукции  $B_r$  и коэрцитивной силы  $H_c$  не более чем на 1 %. Намагничивание может быть осуществлено с помощью как постоянного магнита, так и электромагнита. Достоинства намагничивания в постоянном поле – его стабильность и отсутствие влияния вихревых токов. В постоянном поле намагничивают только малогабаритные детали или отдельные участки деталей.

Намагничивание в *переменных полях* удобнее, т. к. с помощью трансформатора удается получить достаточно большой ток, но в этом случае необходимо обеспечить выключение тока в момент достижения амплитудного значения, что технически не просто.

При выключении же тока в произвольный момент времени требуемого намагничивания детали получить не удастся (рисунок 6.30).

Если выключение внешнего поля произошло в точке 1, то изменение магнитного состояния происходит по предельной петле гистерезиса в направлении, указанном стрелкой, и достигается значение  $B_r$  (без учета влияния размагничивающего действия концов детали).

Если же выключение произошло в точке 2, то размагничивание происходит уже по частному циклу до значения  $B'_r < B_r$ . Когда же выключение поля произойдет в точке 3, материал окажется полностью размагниченным и придется

проводить многократное намагничивание с выключением поля в случайный момент времени и последующей оценкой степени намагниченности.

*Импульсный метод* намагничивания сочетает достоинства намагничивания с помощью постоянного и переменного полей, хотя технически он сложен. Чаще всего импульсное намагничивание осуществляется импульсом тока в результате разряда конденсатора большой емкости. Длительность и амплитуда импульса напряженности намагничивающего поля должны быть выбраны такими, чтобы при минимальных энергетических затратах и высокой производительности обеспечить техническое насыщение материала. Благодаря отсутствию магнитопровода импульсные установки имеют относительно небольшую массу и являются высокоэкономичными.

Следует иметь в виду, что вследствие влияния вихревых токов, возникающих в ОК во время действия импульса, намагничивание различных областей ОК происходит неодинаково. В то время как поверхностные слои намагничиваются до насыщения, внутренние области оказываются недонамагниченными. Таким образом, деталь не намагничивается полностью. Но это же как раз и позволяет очень эффективно уменьшить влияние размагничивающего действия концов детали путем перемагничивания поверхностного слоя импульсным полем в направлении, противоположном основному направлению намагничивания в постоянном поле.

При этом импульсным полем перемагничивается поверхностный слой детали, в результате чего образуется «замкнутая» магнитная цепь.

Комбинацией намагничивания в постоянном и импульсном полях является намагничивание *пульсирующим (выпрямленным)* током, что обеспечивает намагничивание всего объема ОК постоянной составляющей тока и перемагничивание только поверхностного слоя переменной составляющей.

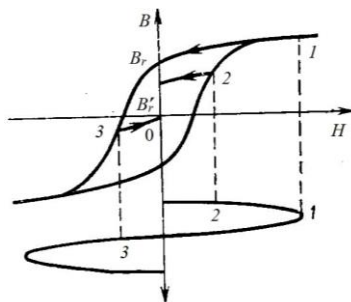


Рисунок 6.30 – Намагничивание детали в переменных полях

При таком намагничивании оказывается возможным контроль деталей при значении размагничивающего фактора  $N \leq 3...5$ . Это расширяет номенклатуру объектов, контролируемых методом остаточной намагниченности.

## 6.10 Размагничивание ОК

Намагниченные детали после контроля должны быть размагничены, т. к. остаточная намагниченность может вызвать нежелательные последствия. Например, поверхности плохо размагниченных роликов и колец подшипников притягивают ферромагнитные продукты износа, что вызывает ускоренный износ подшипников и последующие осложнения в эксплуатации вагонов. Во избежание этого контролируемые детали тщательно размагничивают и проверяют степень размагниченности. Существуют следующие способы размагничивания:

- нагревание объекта до точки Кюри (для большинства ферромагнетиков она лежит в диапазоне  $\approx 650...700$  °С, у железа она соответствует 768 °С), при которой самопроизвольная намагниченность ферромагнетиков исчезает, и они становятся парамагнетиками. Однако этот способ практически не находит применения, поскольку при нагревании могут измениться механические свойства материала детали, что, как правило, недопустимо, а для массивных деталей это еще и дорогой способ;

- однократное приложение встречного поля «большой силы».

- воздействие на объект контроля знакопеременным магнитным полем с убывающей во времени до нуля амплитудой;

Первые два способа, в отличие от последнего, в практике магнитного НК не применяются в силу ряда технологических и технических ограничений. Сущность третьего способа размагничивания состоит в следующем. Деталь подвергают циклическому перемагничиванию переменным полем, напряженность которого по амплитуде с каждым полупериодом уменьшается до нуля, т. е.  $H_{m0} > H_{m1} > H_{m2} > \dots > 0$ .

К моменту, когда она достигнет нулевого значения, остаточная индукция также будет близка к нулю (рисунок 6.31).

Существенным является выбор частоты переменного поля или частоты коммутации постоянного поля. Это связано с влиянием вихревых токов, которое тем более сильно, чем больше габариты детали и ее магнитная проницаемость.

Вследствие сложной зависимости характера распределения вихревых токов от конфигурации деталей частоту и амплитуду размагничивающего поля выбирают исходя из приближенных рекомендаций. Для деталей с толщиной стенок 2–3 мм из материала с  $H_c = 10...15$  А/см можно использовать ток промышленной частоты 50 Гц. Для деталей с толщиной стенок до 30 мм частота составляет единицы Гц. С увеличением значения  $H_c$  вслед-



ствии падения магнитной проницаемости вихревые токи уменьшаются, и допустимая толщина деталей на частоте 50 Гц составляет 10–15 мм и на частоте 1 Гц – 50–60 мм.

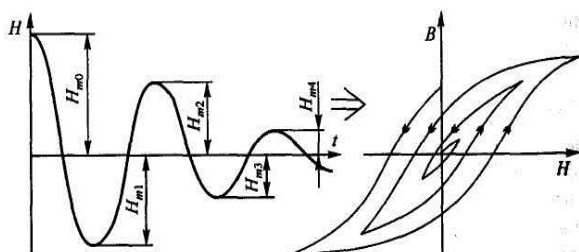


Рисунок 6.31 – Иллюстрация сущности размагничивания

Амплитуда напряженности размагничивающего поля, как правило, выбирается равной или больше амплитуды намагничивающего поля. Число периодов размагничивания обычно 40–50, т. е. уменьшение амплитуды должно быть плавным. Имеют место два варианта исполнения данного способа, когда величину размагничивающего поля уменьшают:

- 1) ОК медленно выдвигается из соленоида. Вне соленоида деталь оказывается размагниченной;
- 2) уменьшение тока в обмотке соленоида.

Ряд дефектоскопов имеет режимы автоматического снижения тока в намагничивающих устройствах, но в большинстве случаев детали помещают в соленоид, включают его и плавно, в течение не менее 5 с, осуществляют их удаление на расстояние не менее 0,5 м, после чего соленоид выключают. Независимо от путей исполнения данного способа процесс размагничивания идет по частным петлям гистерезиса. Из рисунка 6.31 видно, что остаточная индукция уменьшается от цикла к циклу. Полного размагничивания достичь, конечно, не удается, поскольку все детали находятся в магнитном поле Земли (20–30 А/м).

Детали необходимо размагничивать до уровня, при котором остаточная намагниченность не нарушает нормальной работы машин и механизмов. На подвижном составе железнодорожного транспорта установлены предельные уровни остаточного поля: для колец буксовых подшипников  $\leq 3$  А/см; для всех остальных деталей  $\leq 5$  А/см. Для размагничивания ОК используют *демагнетизаторы* – соленоиды, питаемые переменным током различной частоты. Для размагничивания применяют те же устройства, что и для намагничивания: МД-12ПШ, МД-12ПЭ, МД-12ПС, МД-13ПР.

Контроль размагниченности осуществляют миллитесламетром ТП2-2У или измерителями напряженности магнитного поля МФ-107А, МФ-109, а также прибором для измерения остаточной магнитной индукции МФ-24ФМ.

## 6.11 Методы и средства магнитного контроля

### 6.11.1 Магнитопорошковый метод НК

Магнитопорошковый контроль (МПК) основан на притяжении магнитных частиц силами неоднородных магнитных полей, возникающих над дефектами в намагниченной детали, с образованием в зонах дефектов индикаторных рисунков в виде скоплений магнитных частиц. Наличие и протяженность индикаторных рисунков регистрируют визуально, а также с помощью оптических приборов или автоматическими устройствами обработки изображения.

Основные положения МПК приведены в ГОСТ Р 56512–2015 [41]. Общие требования к средствам и методикам проведения МПК при всех видах планового ремонта вагонов изложены в соответствующих нормативных документах [42, 43].

Магнитопорошковый контроль позволяет обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты типа нарушений сплошности металла: трещины различного происхождения, флокены, закаты, надрывы, волосовины, расслоения, дефекты сварных соединений в деталях, изготовленных из ферромагнитных материалов.

Необходимым условием применения МПК для выявления дефектов является наличие доступа к объекту контроля для намагничивания, обработки индикаторными материалами и оценки качества.

Магнитопорошковый метод НК позволяет контролировать полуфабрикаты, изделия, сварные соединения и наплавки любых размеров и форм, изготовленные из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью  $\mu \geq 40$  [41, 44–46]. Метод может быть использован для контроля объектов с немагнитными покрытиями.

Чувствительность магнитопорошкового метода определяется следующими характеристиками: магнитная индукция насыщения  $B_{\max}$ ; остаточная магнитная индукция  $B_r$ ; коэрцитивная сила  $H_c$ ; шероховатость поверхности ОК; форма и размеры ОК; напряженность намагничивающего поля  $H_{\text{пр}}$ ; толщина немагнитных покрытий; форма, размер и ориентация дефекта; ориентация намагничивающего поля по отношению к плоскости дефекта; качество дефектоскопических средств; освещенность поверхности объекта и др.

С помощью магнитопорошкового метода удастся обнаруживать дефекты самой различной формы и размеров. В зависимости от размеров выявляемых поверхностных несплошностей устанавливаются три *условных уровня чувствительности*, определяемых минимальной шириной раскрытия и протяженностью условного дефекта (таблица 6.2).

При этом под условным дефектом понимается поверхностный дефект в форме плоской щели с параллельными стенками, ориентированный перпендикулярно к контролируемой поверхности и направлению магнитного поля.

Таблица 6.2 – Условные уровни (пороги) чувствительности

Условный уровень (порог) чувствительности	Размеры искусственного дефекта, мкм		Минимальная протяженность* выявляемой части дефекта, мкм	Шероховатость поверхности $R_a$ , мкм
	ширина	глубина		
А	2,5 (2,0)	25	0,5	$\leq 2,5$
Б	10	100	0,5	$\leq 10$
В	25	250	0,5	$\leq 10$

\* Протяженность определяется по длине валика осаждения порошка дефекта. При выявлении подповерхностных дефектов, а также при  $R_a > 10$  мкм чувствительность метода понижается и условный уровень чувствительности не нормируется.

*Примечание* – При контроле изделий с немагнитными покрытиями с увеличением толщины покрытия чувствительность метода понижается.

Модель дефекта в виде такой щели удобна тем, что, во-первых, ее параметры точно известны, а во-вторых, этот дефект сравнительно легко можно реализовать на любом ОК.

Исследования показывают, что при выбранных уровнях чувствительности могут быть также выявлены дефекты вдвое меньшей ширины, но обязательно при вдвое большей глубине (рисунок 6.32).

Следует заметить, что требуемого уровня чувствительности можно достичь лишь в том случае, когда поверхность детали обработана с шероховатостью лучше, чем та, которая приведена в таблице 6.2.

Такой выбор уровней чувствительности позволяет количественно сопоставлять между собой различные условия контроля, главным образом условия намагничивания. Уровень *Б* – основной, уровень *А* применяется для особо ответственных деталей. Уровень *В* применяется на стадии предварительного контроля или в тех случаях, когда свойства материала ОК не позволяют снизить порог чувствительности, т. е. перейти к уровням *Б* или *А*.

При контроле СОН возможность достижения требуемого условного уровня чувствительности определяется по зависимостям, приведенным на рисунке 6.33.

Режим намагничивания при контроле СПП (требуемая напряженность поля  $H_{np}$ ) определяют по графикам в зависимости от коэрцитивной силы материала объекта контроля и условного уровня чувствительности (рисунок 6.34).

Магнитопорошковый контроль проводится по технологическим картам, в которых указываются следующие сведения: номер документа, по которому проводится контроль; обозначение типа изделия; наименование изделия; объём контроля; эскиз детали с указанием габаритных размеров; условный

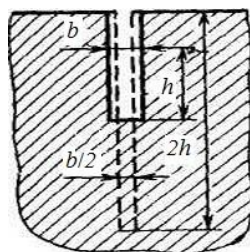


Рисунок 6.32 – Параметры минимального обнаруживаемого дефекта

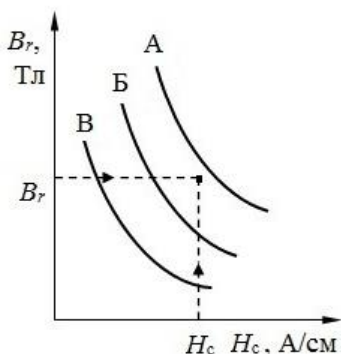


Рисунок 6.33 – Определение возможности достижения при контроле СОН требуемого условного уровня чувствительности

Наибольшая плотность магнитных силовых линий поля рассеяния наблюдается непосредственно над трещиной (или другой несплошностью) и уменьшается с удалением от нее. Для обнаружения несплошности на поверхность детали наносят магнитный порошок, взвешенный в воздухе («сухой» способ) или в жидкости («мокрый» способ). Однако для контроля поверхностей с большим наклоном «мокрый» способ неудобен. При «сухом» способе применяют более крупные частицы, т. к. они меньше задерживаются неровностями поверхности. Поэтому применение «сухого» способа предпочтительнее для деталей литых или грубо обработанных. «Мокрый» способ эффективен для деталей с чистой поверхностью.

На частицу в поле рассеяния будут действовать силы (рисунок 6.35): магнитного поля  $F_z$ , направленная в область наибольшей плотности магнитных силовых линий, т. е. к месту расположения трещины; тяжести  $F_T$ ; выталкивающего действия жидкости  $F_a$ , трения  $F_{тр}$ , силы электростатического  $F_e$  и магнитного  $F_M$  взаимодействия, возникающие между частицами. В магнитном поле частицы намагничиваются и соединяются в цепочки.

Под действием результирующей силы  $F_p$  частицы притягиваются к трещине и накапливаются над ней, образуя скопление порошка – *индикаторный рисунок*. Ширина валика из осевшего порошка значительно больше ширины

уровень чувствительности; вид и способ намагничивания; значение намагничивающего тока или напряженности поля; средства контроля; тип магнитного индикатора; метрологическое обеспечение контроля; необходимость размагничивания.

Для регистрации магнитных полей рассеяния от дефектов в качестве индикаторов несплошностей используются чёрные и цветные магнитные, магнитолюминесцентные порошки. При этом перед проведением контроля порошки тоже должны проходить контроль качества.

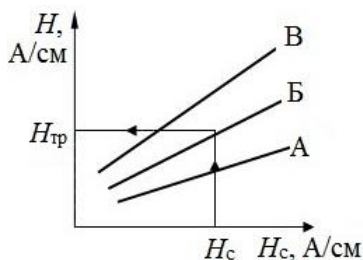


Рисунок 6.34 – Определение режима намагничивания при контроле СПП

раскрытия трещины. Порошок образует цепочки, которые взаимодействуют друг с другом. По индикаторному рисунку определяют наличие дефектов.

*Технология магнитопорошкового контроля*

Рассмотрим технологию МПК, т. к. ее соблюдение является одним из основных условий надежности контроля. Даже самое незначительное отклонение от технологии может привести к тому, что дефекты не будут обнаруживаться, т. е. будут не только потеряны все достоинства магнитного контроля, но и сделаны ошибочные суждения о состоянии ОК. Поэтому следует иметь в виду, что все операции технологии чрезвычайно важны и нарушение хотя бы одной из них может свести на нет усилия, затрачиваемые на соблюдение всех требований при проведении остальных.

В ремонтном производстве вагонов технология МПК включает следующие операции [42, 43]:

- подготовка деталей к контролю;
- намагничивание детали (выбор способа контроля; вида и схемы намагничивания);
- нанесение магнитного индикатора;
- оценка результатов контроля (осмотр деталей, отметка дефектного места) и разбраковка.
- размагничивание;
- контроль размагниченности.

Размагничивание часто считают дополнительной операцией. Она почти всегда присутствует при контроле, но это скорее не контроль, а приведение детали в состояние, пригодное для дальнейшего использования.

Смысл каждой из операций понятен, однако существуют некоторые особенности их выполнения.

**Подготовка детали к контролю.** Подготовительные операции при МПК имеют огромное значение, т. к. они решающим образом влияют на выявляемость дефектов и, в конечном счете, определяют достоверность результатов контроля. Содержание работ при данной операции следующее:

- деталь очищается до металла, при этом должны быть удалены ржавчина, шлак, окалина, загрязнения смазкой, слой старой краски и другие покрытия, мешающие проведению контроля;

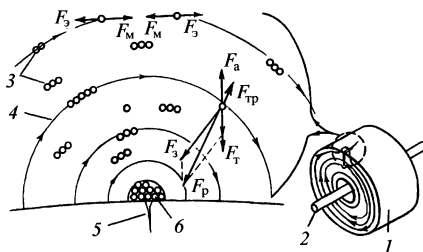


Рисунок 6.35 – Силы, действующие на частицу в поле рассеяния трещины:

- 1 – деталь; 2 – проводник с током;
- 3 – цепочки из частиц порошка;
- 4 – поле рассеяния; 5 – трещина;
- 6 – порошок над трещиной

– детали, подвергавшиеся машинной мойке, дополнительно очищают вручную, если на поверхности остались загрязнения;

– при контроле сварных швов удаляют шлак и зачищают шов заподлицо с основным металлом;

– при очистке применяют волосяные и металлические щетки, скребки, ветошь и салфетки, не оставляющие ворса на очищенной поверхности. Применение металлических щеток или скребков после намагничивания не допускается, т. к. это может привести к ложным «осаждениям» магнитных индикаторов;

– при контроле детали «сухим» способом нанесения магнитного порошка необходимо удалить масляные загрязнения и просушить деталь, т. к. масляная или влажная поверхность затрудняет движение магнитных частиц;

– при контроле деталей с темной поверхностью и при использовании темных магнитных порошков на очищенную поверхность необходимо наносить тонкий слой светлой краски или алюминиевого порошка; толщина контрастного слоя не должна превышать 30 мкм;

– при использовании водных магнитных суспензий на основе КМС «ДИАГМА» подлежащие контролю поверхности обезжиривают с помощью губки, смоченной этой же суспензией.

**Намагничивание** (выбор способа контроля, вида и схемы намагничивания были рассмотрены выше).

При *циркулярном* намагничивании максимальное значение намагничивающего тока, для получения заданной напряженности магнитного поля  $H_{пр}$  (А/см) определяется по формулам:

– для объектов цилиндрической формы с круглым сечением

$$I = 2\pi r H_{пр}, \quad (6.20)$$

где  $r$  – радиус круглого сечения, см. При циркулярном намагничивании отверстий при помощи кабеля или металлического стержня в этой формуле  $r$  – радиус отверстия;

– для объектов с прямоугольным сечением

$$I = 2H_{пр}a, \text{ при } a/b > 10(5.5); I = 2H_{пр}(a + b), \text{ при } a/b < 10, \quad (6.21)$$

где  $a$  и  $b$  – длина и ширина прямоугольного сечения, см;

– для участков крупногабаритных объектов

$$I = KH_{пр} \sqrt{L^2 + C^2}, \quad (6.22)$$

где  $L$  – расстояние между электрическими контактами или длина контролируемого участка, см;  $C$  – ширина контролируемого участка, см;  $K$  – коэффициент, учитывающий род тока и расстояние между электрическими контактами; для действующего значения переменного тока  $K = 1,8$ , для выпрямленного тока  $K = 1,5$ .

С целью упрощения и удобства пользования этой формулой расчета тока циркулярного намагничивания участков крупногабаритных изделий можно использовать условие, когда  $C = 0,6L$ . Тогда формула примет вид:

– для переменного тока

$$I = 2,1H_{\text{пр}}L; \quad (6.23)$$

– для выпрямленного тока

$$I = 1,7H_{\text{пр}}L. \quad (6.24)$$

На практике расстояние между электрическими контактами  $L$  выбирают в диапазоне 75–250 мм.

При циркулярном намагничивании изделий кольцевой (тороидальной) формы с помощью гибкого кабеля, навитого на деталь, с числом витков  $n$ , намагничивающий ток через маловитковую обмотку, необходимый для достижения заданной напряженности поля  $H_{\text{пр}}$ , рассчитывается по формуле

$$I = \pi DH_{\text{пр}}/n, \quad (6.25)$$

где  $D$  – внешний диаметр объекта контроля, см;  $H_{\text{пр}}$  – напряженность приложенного поля (А/см).

Для *полюсного* намагничивания трубчатых изделий разомкнутой формы, с помощью гибкого токового кабеля, навитого на изделие ( $n \leq 10$ ), намагничивающий ток, пропускаемый по обмотке, рассчитывается по формуле

$$I = L(H_{\text{пр}} + H_p)/n = L(H_{\text{пр}} + NJ)/n, \quad (6.26)$$

где  $L$  – длина участка изделия (трубы), занятого обмоткой, между секциями обмоток и по обе стороны от краёв обмотки или секций соленоида.

Общая длина участка не должна превышать 50 см. Длина участка между двумя секциями обмоток берется не более 20 см;  $N$  – размагничивающий фактор, зависящий от отношения длины изделия к его диаметру  $L/D$  или к корню квадратному из сечения трубы  $L/\sqrt{S}$ ;  $J$  – намагничённость материала изделия, для магнитомягких сталей  $\approx 1000$  А/см, при поле  $H_{\text{пр}}$  и индукции  $B$  в материале – 1,2 Тл ( $\geq 0,8$  Тл);  $NJ = H_p$  – размагничивающее поле полюсов контролируемого изделия. Это поле направлено навстречу внешнему полю источника поля. Значение размагничивающего фактора  $N$  для разных отношений  $L/D$  ( $L/\sqrt{S}$ ) приведены в таблице 6.3.

Намагничённость материала изделия рассчитывается по формуле

$$J = (B / \mu_0) - H_{\text{пр}}, \quad (6.27)$$

где  $B$  – индукция материала, необходимая для обеспечения чувствительности контроля.

Зная размеры объекта контроля, определяем размагничивающий фактор  $N$ . После этого находим размагничивающее поле полюсов:

$$H_p = JN. \quad (6.28)$$

Таблица 6.3 – Значение размагничивающего фактора  $N$

$L/D(L/\sqrt{S})$	5	10	15	20	25	35
$N$	0,5	0,2	0,1	0,07	0,05	0,03
Примечание – $L, D$ – длина и диаметр изделия соответственно, см; $\sqrt{S}$ – эквивалентное сечение детали.						

Суммарное поле источника поля (соленоида), необходимое для эффективного намагничивания и контроля данного изделия с учетом размагничивающего фактора, определяем из выражения

$$H = H_{пр} + H_p. \quad (6.29)$$

После того как рассчитан ток намагничивания производится намагничивание ОК. Если необходимо продольно намагнитить короткую деталь, обладающую большим размагничивающим фактором, то на практике необходимо использовать следующие приемы.

Если короткая деталь имеет ровные торцы, то необходимо плотно прижать торцами друг к другу несколько деталей (так, чтобы отношение длины к диаметру всей конструкции было  $L/D > 10 \dots 30$ ) и затем намагнитить все детали вместе. Если деталь имеет сложную форму, то для намагничивания изготавливают специальные удлинители из магнитомягкой стали, которые увеличивают соотношение длины к диаметру в момент намагничивания.

#### **Нанесение магнитного индикатора**

Когда ОК будет намагничен, на его поверхность наносят магнитный индикатор. Магнитный индикатор на контролируемую поверхность наносится сухим или мокрым способом в виде порошка или суспензии. Основное условие надежного выявления дефектов – равномерное нанесение магнитного индикатора на поверхность ОК. Дополнительным способом можно считать магнитогуммирование, т. е. использование упругой массы наподобие резины, обладающей магнитными свойствами.

При сухом способе магнитный порошок напыляется на контролируемую поверхность с одновременным удалением его с бездефектной поверхности слабым потоком воздуха или другим способом. Сухой способ в ряде случаев обладает более высокой чувствительностью – отложения порошка возникают даже над подповерхностными дефектами (картина отложения порошка при этом отличается меньшей контрастностью и более размытыми границами по сравнению с индикацией поверхностного дефекта).



Сухой магнитный порошок применяют при контроле ферромагнитных объектов с грубой поверхностью (грубо обработанной или необработанной послековки, прокатки и т. д.). Частицы сухого порошка не скапливаются в неровностях поверхности в отличие от магнитных частиц суспензии. Контроль осуществляют СПП, причем, чтобы обеспечить подвижность частиц магнитного порошка следует применять пульсирующее магнитное поле (лучше всего для намагничивания использовать однополупериодный выпрямленный ток). «Сухой» метод более чувствителен при обнаружении подповерхностных (особенно глубинных) дефектов, чем «мокрый». Это объясняется тем, что магнитная суспензия обладает определенной вязкостью и для перемещения частицы в ней требуется большая сила, чем для перемещения той же частицы в воздухе.

Широко применяют сухой магнитный порошок для обнаружения трещин, усадочных раковин, надрывов в крупногабаритных отливках. При этом намагничивание осуществляют с помощью электрических контактов. Недостаток – сухие магнитные порошки весьма чувствительны к воздушным потокам, которые могут уносить их с поверхности. Поэтому следует принимать меры для устранения сквозняков или конвекционных потоков воздуха, которые могут возникать, например, вследствие нагрева изделий при циркулярном намагничивании сильным током. Кроме того, сухие магнитные порошки не обеспечивают высокой чувствительности при обнаружении узких поверхностных трещин, особенно на гладкой, расположенной не горизонтально поверхности.

При *мокром* способе магнитная суспензия наносится на контролируемую поверхность путем погружения в ванну, распыления или полива слабой струей, не смывающей осевший порошок над несплошностью, с обязательным стеканием её с поверхности. Наиболее часто применяют простую водную суспензию ( $25 \pm 5$  г/л воды). Использование слишком жесткой воды может привести к коагуляции суспензии на поверхности детали, что затрудняет расшифровку результатов контроля. Для смягчения воды в нее добавляют вещества, снижающие поверхностное натяжение воды (стиральный порошок или хозяйственное мыло). Кроме того, в рецептуру суспензии могут входить антикоррозионные и антивспенивающие присадки.

Основной недостаток водной суспензии – непригодность для работы при отрицательных температурах. Поэтому используют также керосиновые, масляные и керосино-масляные суспензии. Достоинством керосиновых суспензий является то, что керосин обладает очень хорошей смачиваемостью и проникающей способностью (что используется, например, для контроля герметичности сосудов). Поскольку керосин является горючим материалом, то при использовании его в составе суспензии запрещается циркулярное намагничивание электрическими контактами во избежание загорания суспензии при искрении в зоне электрических контактов. Применение масля-

ной суспензии, конечно, удорожает процесс контроля, но за счет более высокой вязкости масляная суспензия более медленно стекает с поверхности объекта контроля и дает отложение порошка на более мелких дефектах.

Жидкая магнитная суспензия используется для выявления трещин в деталях с хорошо обработанными поверхностями (шлифование, полирование). Суспензии очень чувствительны к трещинам малого раскрытия благодаря тому, что дисперсионная среда удерживает частицы магнитного порошка вблизи поверхности. Причем хорошие результаты получаются как при применении СПП, так и СОН. Магнитные суспензии можно наносить погружением объекта контроля в суспензию, поливом, а также аэрозольным способом. Если контролю подлежит крупногабаритный объект, то контроль может осуществляться в несколько приемов, при каждом последующем приеме деталь, например, поворачивают.

При контроле объектов с грубой поверхностью магнитные суспензии не так эффективны, как сухие порошки. Менее эффективны суспензии и при обнаружении подповерхностных дефектов.

Магнитные порошки получают путем размолла в шаровых мельницах до частиц размером 0,1–60 мкм. Для облегчения условий работы оператора, контролирующего поверхность детали, порошки окрашивают.

Наибольшее распространение при контроле светлых деталей получили черный порошок окиси-закиси железа  $Fe_3O_4$ , и буровато-красный порошок  $\gamma$ -оксида железа ( $\gamma-Fe_2O_3$ ). Для контроля деталей с темной поверхностью используют светлые порошки с добавлением алюминиевой пудры либо люминесцентные порошки. Использование последних эффективно только при УФ-освещении.

Порошки подразделяют:

– по химическому составу на марки ПЖВ1, ПЖВ2, ПЖВ3, ПЖВ4, ПЖВ5. Отличие указанных марок состоит в количественном содержании примесей углерода, кремния, марганца, серы, фосфора и кислорода. Наилучшим по минимальному количеству примесей является порошок ПЖВ1;

– по гранулометрическому составу (максимальной крупности зерна) на средние – 450 мкм, мелкие – 160 мкм, весьма мелкие – 71 мкм. Различие состоит в процентном содержании частиц разных фракций. Так, для порошка ПЖВ5-71 частицы размером 0,25–0,45 мм отсутствуют, а у ПЖВ5-160 таких частиц содержится 10–30 %;

– по насыпной плотности на 22, 24, 26, 28 и 32-й классы. Насыпная плотность характеризуется массой единицы объема порошка, например, для 22-го класса – 2,3 г/см<sup>3</sup>, 32-го – 3,0 г/см<sup>3</sup>.

Основные типы магнитных индикаторов, применяемых на предприятиях вагонного хозяйства, приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Основные типы магнитных индикаторов (порошки и концентраты)

Индикатор	Цвет	Способ нанесения (вид дисперсионной среды)	Назначение
1 Концентрат магнитной суспензии (КМС) ДИАГМА 1100	Черный	Мокрый способ (вода)	Контроль деталей со светлой поверхностью любой шероховатости
2 КМС ДИАГМА 1200	Красно-коричневый	То же	Контроль деталей с темной поверхностью любой шероховатости
3 Магнитный порошок (МП) ДИАГМА 0473	Зеленый	Сухой способ	Контроль деталей с темной поверхностью с $R_a > 10$ мкм
4 МП ДИАГМА 0400 «ОРИОН»	Серый	То же	То же
5 Порошок железный ПЖВ5-160	Темно-серый	»	Контроль деталей со светлой поверхностью с $R_a > 10$ мкм
6 Порошок железный ПЖВ5-71	То же	»	Контроль деталей со светлой поверхностью с $R_a < 10$ мкм
7 Порошок железный ПЖВ5-71	»	Мокрый способ (трансформаторное масло или его смесь с дизельным топливом или керосином)	Контроль деталей со светлой поверхностью любой шероховатости
8 Магнитный порошок	Черный	Мокрый способ (трансформаторное масло или его смесь с дизельным топливом или керосином, дизельное топливо, вода с кондиционирующими добавками)	Контроль деталей со светлой поверхностью любой шероховатости
9 КМС ДИАГМА 1613	Люминесцентный желто-зеленый	Мокрый способ (вода)	Контроль деталей с темной поверхностью любой шероховатости
10 КМС ДИАГМА 2623	Люминесцентный серый	То же	То же

Существуют методы и средства проверки качества магнитных порошков (МП) и суспензий по их выявляющей способности с помощью *специальных устройств* МФ-10СП, МОН-721, по виду и длине индикаторных рисунков с помощью *стандартных образцов предприятия* (СОП) и *тест-объекта* (для индикаторов типа ДИАГМА).

### **Оценка результатов контроля**

Осмотр ОК проводят практически сразу после обработки суспензией, которая быстро высыхает на поверхности детали. Некоторое практически незаметное движение суспензии не влияет на результаты контроля.

Результаты контроля оцениваются по наличию на поверхности индикаторного следа в виде чёткого плотного валика магнитного порошка, видимого невооруженным глазом или с использованием лупы до 6-кратного увеличения. При этом длина индикаторного следа линейной несплошности равна протяженности выявленного дефекта.

Каждая выявленная несплошность должна быть отмечена краской или другим способом. Освещенность поверхности объекта контроля должна быть  $\geq 10^3$  лк. Необходимо помнить, что порошок может залегать в таких местах, где на самом деле дефектов нет. Ложными могут индикаторные следы порошка, вызванные:

- контактом с другим ферромагнетиком или магнитом (магнитный след), исчезающие после размагничивания;
- наличием внутренних механических напряжений;
- наличием вкраплений немагнитного материала;
- переходом одного сечения изделия к другому (размытые нечеткие);
- местными изменениями магнитных свойств металла (размытые нечеткие), например, по границам сварных швов;
- избыточным намагничивающим полем, в виде широких групп мелких и параллельных осадений порошка.

При нечеткой картине осаждения порошка или в случае сомнений в достоверности результата необходимо размагнитить деталь и повторить операции контроля.

### **Размагничивание**

Заключительным этапом контроля является размагничивание и составление отчетной документации. Необходимость размагничивания, проверка степени размагничивания, а также допустимая норма остаточной намагниченности ОК устанавливаются производственно-технологической документацией. Размагничивание осуществляется путем воздействия на деталь знакопеременного магнитного поля с убывающей до нуля амплитудой. Начальное значение напряженности размагничивающего магнитного поля должно быть не меньше величины намагничивающего поля, а в случае от-

сутствия данных о начальном значении поля  $\geq 5H_c$  материала изделия. Степень размагничивания определяется с помощью полемеров или градиентометров магнитных полей.

#### *Средства МПК*

При магнитопорошковом контроле деталей применяют переносные, передвижные и стационарные дефектоскопы и (или) намагничивающие устройства (НУ). В зависимости от принципа действия и функционального назначения в состав дефектоскопа входят:

- а) блок питания или управления;
- б) НУ (соленоиды, электромагниты, постоянные магниты, гибкие токопроводящие кабели или стержни, электроконтакты для пропускания электрического тока по контролируемой детали или ее части и т. п.);
- в) вспомогательные устройства и приспособления.

Типы дефектоскопов и НУ выбирают с учетом формы и размеров контролируемой детали, а также необходимой для выявления дефектов напряженности магнитного поля.

К вспомогательным средствам контроля относятся:

- а) устройства для нанесения магнитных индикаторов на контролируемую поверхность деталей;
- б) устройства для осмотра контролируемой поверхности деталей;
- в) приборы и устройства для проверки режима намагничивания и степени размагничивания деталей;
- г) приборы и устройства для проверки выявляющей способности магнитных индикаторов.

Устройства для нанесения магнитных индикаторов должны обеспечивать равномерное распределение магнитных частиц на контролируемой поверхности деталей. Их изготавливают из немагнитных материалов (алюминий, медь, латунь, пластмасса и т. п.). Для нанесения магнитного порошка применяют распылители – емкости диаметром 40–50 мм, покрытые провололочной сеткой с ячейками размером от 0,5 до 1,0 мм. При нанесении магнитной суспензии вручную применяют флажки, кружки, лейки, распылители, ванночки, поддоны для ее сбора. В состав дефектоскопов стационарного типа входят механизированные устройства, обеспечивающие перемешивание, подачу и сбор (циркуляцию) суспензии.

При осмотре деталей применяют переносные светильники, УФ-облучатели [47], а также различные оптические устройства (лупы, эндоскопы и др.).

Для проверки режимов намагничивания и степени размагничивания деталей применяют приборы для измерения напряженности магнитного поля МФ-107А, МФ-109, МФ-23И, ТП-2У.

Работоспособность (порог чувствительности) средств контроля проверяют с помощью СОП с искусственными дефектами. Допускается проводить проверку работоспособности средств контроля с помощью СОП с естественными дефектами (трещинами) при обеспечении выявляющей способности магнитных индикаторов и режима намагничивания деталей.

*Дефектоскоп магнитопорошковый МД-12П.* Выпускается в трех модификациях: МД-12ПШ (шечный); МД-12ПЭ (эксцентричный); МД-12ПС (седлообразный). Содержит блок управления и намагничивающее устройство соответствующего типа (рисунок 6.36). Технические характеристики дефектоскопов приведены в таблице 6.5.



Рисунок 6.36 – Внешний вид дефектоскопов:  
а – МД-12ПШ; б – МД-12ПЭ; в – МД-12ПС

Намагничивающие устройства дефектоскопа МД-12П всех модификаций имеют в качестве НУ катушку, помещенную в пластмассовый корпус.

*Дефектоскоп МД-12ПШ* предназначен для контроля шеек осей колесных пар и других деталей. НУ дефектоскопа выполнено в виде круглого соленоида. Магнитное поле соленоида по мере удаления от обеих торцевых поверхностей корпуса симметрично убывает (рисунок 6.37, а). Помещенные внутрь соленоида протяженные детали, имеющие одинаковое сечение по всей длине, намагничиваются также симметрично относительно торцевых поверхностей корпуса соленоида.

*Дефектоскоп МД-12ПЭ* содержит круглый соленоид и плоский кольцевой магнитопровод, находящийся у одного из торцов соленоида. Создаваемое им магнитное поле несимметрично (рисунок 6.37, б) и со стороны магнитопровода силовые линии магнитного поля, создаваемого на

поверхности детали намного слабее, чем со стороны катушки без магнитопровода. Поэтому контролируемый участок детали всегда должен находиться с противоположной от магнитопровода стороны. На корпусе соленоида со стороны магнитопровода имеется тумблер для включения намагничивающего тока.

Дефектоскоп МД-12ПС имеет седлообразное НУ, которое представляет собой прямоугольный соленоид, изогнутый в виде «седла». Последний предназначен для локального намагничивания крупногабаритных деталей сложной формы, протяженных деталей (длиной >600 мм), а также для намагничивания отдельных участков изделий в сборе в тех случаях, когда намагничивание с помощью неразъемных соленоидов невозможно (например, при контроле средней части оси колесной пары в сборе).

При работе с седлообразным НУ необходимо учитывать характер распределения магнитного поля вокруг проводников, обусловленный особенностями его конструкции. В центре намагничивающего устройства в пространстве между проводниками катушки магнитное поле имеет большую нормальную составляющую, а необходимая для выявления дефектов тангенциальная составляющая практически отсутствует (рисунок 6.37, в).

С двух меньших по отношению к проводникам катушки сторон магнитное поле содержит незначительную нормальную составляющую и достаточную для выявления дефектов тангенциальную составляющую.

Учитывая вышесказанное, необходимо контролировать участки детали с внешних сторон от проводников катушки седлообразного НУ. Участок детали, находящийся под центральной частью между проводниками катушки седлообразного устройства, является неконтролируемой зоной (на этом участке дефекты могут не выявляться).

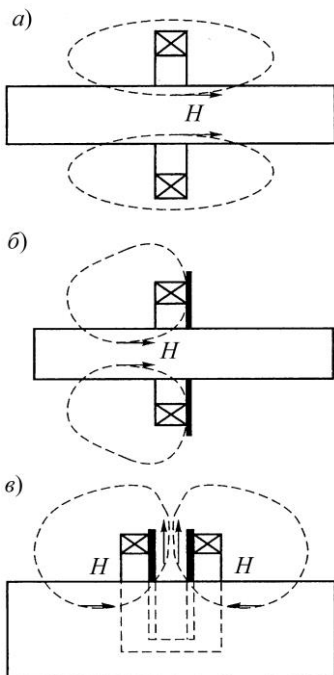


Рисунок 6.37 – Силовые линии магнитного поля, создаваемого на поверхности детали НУ дефектоскопов  
а – МД 12ПШ; б – МД-12ПЭ;  
в – МД-12ПС







Дефектоскоп МД-13ПР предназначен для контроля средней части оси КП в сборе «сухим» способом путем нанесения порошка ПЖВ5-160 (рисунок 6.38). Дефектоскоп МД-13ПР может быть использован при контроле средней части оси «мокрым способом», если блок контроля и проводники соленоида защищены от попадания на них суспензии.

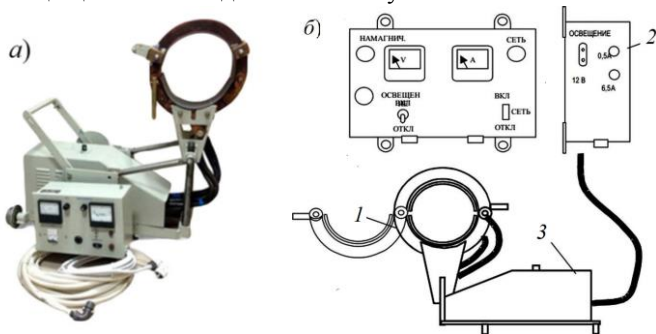


Рисунок 6.38 – Внешний вид (а) и основные блоки дефектоскопа МД-13ПР (б):  
1 – разъемный соленоид; 2 – блок управления; 3 – блок контроля

Устройство намагничивающее переносное УНМ-300/2000 (рисунок 6.39) предназначено для магнитного НК различных изделий, узлов и деталей машин. На железнодорожном транспорте применяется для магнитопорошковой дефектоскопии деталей и узлов тягового подвижного состава в условиях депо и ремонтных предприятий [48].

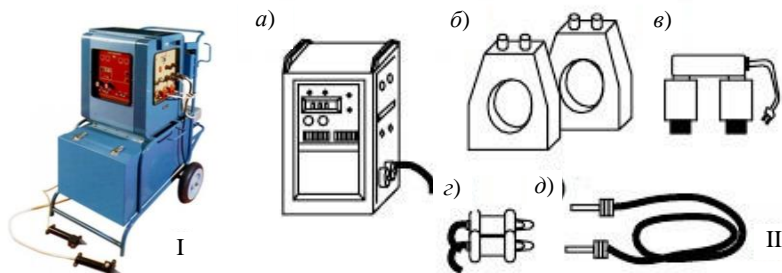


Рисунок 6.39 – Внешний вид (I) и составляющие (II) намагничивающего устройства УНМ-300/2000:  
а – блок питания; б – двухсекционный соленоид; в – электромагнит;  
г – ручные электроконтакты с кабелями; д – гибкий кабель

Дефектоскопная установка Р861 (рисунок 6.40) предназначена для выявления поверхностных усталостных трещин на шейках, предподступичных и средних частях осей на колёсной паре в сборе, а также на внутренних кольцах

роликовых подшипников, насаженных на шейки осей. Намагничивание колец подшипников осуществляется импульсами тока путём разряда конденсаторной батареи через ось и соленоиды, охватывающие шейки оси. Контроль шеек осуществляется в приложенном переменном магнитном поле.

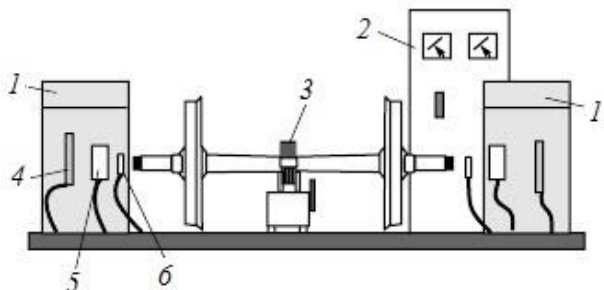


Рисунок 6.40 – Общий вид базовой модели установки серии P861:

1 – пульт управления; 2 – шкаф с электроаппаратурой; 3 – съемный соленоид с тележкой для намагничивания средней части оси; 4 – шеечный соленоид для намагничивания и размагничивания шейки оси (при снятых внутренних кольцах); 5 – соленоиды для продольного намагничивания и размагничивания внутренних колец; 6 – контактные головки с пневматическим приводом для циркулярного намагничивания внутренних колец подшипников, напрессованных на шейки оси, пропуская импульсный ток по оси

Такое устройство позволяет осуществлять намагничивание колец одновременно двумя взаимно перпендикулярными полями (продольным магнитным полем соленоидов и циркулярным полем, возникающим при прохождении импульса тока через ось), что позволяет выявлять трещины любой ориентации.

*Дефектоскоп МД-14ПКМ* предназначен для дефектоскопии магнитопорошковым методом средней части оси сформированной колесной пары РУ1-950 и РУ1-950Ш, шеек оси при снятых внутренних кольцах подшипников. Также МД-14ПКМ применяется для контроля внутренних колец, напрессованных на шейку.

Магнитопорошковый дефектоскоп МД-14ПКМ позволяет производить:

- контроль способом остаточной намагниченности (СОН) с намагничиванием деталей в автоматическом или ручном режимах пропуская импульсы тока;
- контроль способом приложенного поля (СПП) с намагничиванием деталей в автоматическом или ручном режимах током синусоидальной формы;
- автоматическое размагничивание деталей переменным током убывающей амплитуды;
- контроль величины тока намагничивания.

Дефектоскоп МД-14ПКМ позволяет контролировать:

– шейки и среднюю часть оси СПП с условным уровнем чувствительности «Б по ГОСТ Р 56512-2015;

– кольца, напрессованные на шейку оси с условным уровнем чувствительности «А» по по ГОСТ Р 56512-2015.

*Малогабаритный электромагнит МЭД-40/120* предназначен для магнитопорошкового контроля деталей из ферромагнитных материалов, в т. ч. деталей сложной формы, а также труднодоступных участков крупногабаритных деталей в условиях вагонных депо и ремонтных предприятий железной дороги.

Электромагнит может применяться для контроля таких деталей, как сварные швы и кронштейны рам, балок и других деталей тележек, зев и хвостовик корпуса автосцепки, внутренние поверхности переходных зон тягового хомута, валы, оси, тяги, детали удлинённой формы, крестовины, ступицы, фланцы, головки шатунов, шлицевые поводки и других деталей сложной формы.

Также электромагнит может использоваться для вторичного контроля отдельных зон таких деталей, как диски и центры колёс, гребни и боковые поверхности бандажей, а также других деталей, в которых предполагается наличие трещины по показаниям вихретокового дефектоскопа или визуального осмотра.

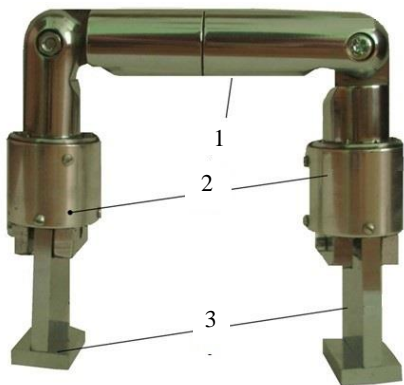


Рисунок 6.41 – Внешний вид

дефектоскопа МД-4КМ

1 – шарнирный магнитопровод;

2 – блоки намагничивания;

3 – полюсные наконечники

*Дефектоскоп МД-4К* предназначен для проведения магнитопорошкового контроля локальных участков сварных соединений; строительных металлоконструкций; подъемных механизмов; котельных установок; деталей железнодорожного транспорта; объектов трубопроводного транспорта путем намагничивания поверхностей изделий или сварных соединений приложенным магнитным полем для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов (рисунок 6.41).

Дефектоскоп может эксплуатироваться в цеховых, лабораторных, полевых условиях во взрыво- и пожароопасных средах

на строительных площадках, высотных объектах и в условиях, где энергоснабжение затруднено или недопустимо по правилам техники безопасности. Усовершенствованный *МД-4КМ* дополнен набором полюсных наконечников различной конфигурации и тросовой перемычкой, а также оснащен высококоэрцитивными постоянными магнитами.



