

**И.Н. Ермолов, М.И. Ермолов**

# **Ультразвуковой контроль**

**Учебник для специалистов первого и второго  
уровней квалификации**

**Издание пятое, стереотипное**

**Москва, 2006**

И. Н. ЕРМОЛОВ, М. И. ЕРМОЛОВ

# **Ультразвуковой контроль**

**Учебник для специалистов первого и второго  
уровней квалификации**

Издание пятое, стереотипное

МОСКВА, 2006

Ермолов Игорь Николаевич, профессор, доктор технических наук,  
заслуженный деятель науки и техники РФ;  
Ермолов Михаил Игоревич, кандидат технических наук

Размножение и перепечатка – только с разрешения авторов

**И. Н. Ермолов, М. И. Ермолов.**

Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов первого и второго  
уровня квалификации. Издание пятое, стереотипное  
-М : 2006 – 208 с : 77 илл

[С] Ермолов И. Н., Ермолов М. И., 2006 г

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Трехуровневая система четко определяет права и обязанности специалиста каждого уровня. Здесь мы коротко отметим, что специалист первого уровня квалификации имеет право выполнять контроль без выдачи заключения о качестве объекта. Второй уровень квалификации дает право выполнять контроль и оценку качества объектов, наблюдать за работой специалиста первого уровня квалификации и давать заключение о качестве объекта по результатам выполненного им самим или специалистом первого уровня контроля, разрабатывать технологические карты контроля в соответствии с действующими нормативно-техническими документами (НТД) на контроль конкретных объектов. Этот уровень приблизительно соответствует четвертому, пятому и шестому разрядам. Специалист третьего уровня квалификации проверяет работу специалистов всех уровней, проводит арбитражный контроль, составляет методики и технологические карты контроля в соответствии с действующей НТД, ведет обучение и аттестацию специалистов. Естественно, что специалист более высокого уровня может выполнять обязанности специалиста низшего уровня квалификации.

Предлагаемый учебник содержит краткие, но исчерпывающие ответы на вопросы выпущенной в 1992 г. Национальным аттестационным комитетом (НАК) "Программы аттестации специалистов (общий экзамен). Вид контроля - акустический" для подготовки специалистов первого и второго уровней квалификации. В настоящее время функции НАК (общественной организации) перешли к Руководящему органу системы сертификации персонала в области неразрушающего контроля, учрежденной при ВНИИ-ОФИ Госстандартом, но новой программы этот орган не выпускал.

В программу входит тематика по ультразвуковому (УЗ) контролю металлов, но не входят вопросы акустического контроля (АК) изделий из неметаллических материалов и контроля акустикоэмиссионным методом, по которым составлены отдельные программы. Следует помнить, что специалист второго уровня должен знать все, что должен знать специалист первого уровня, а специалист третьего уровня - все, что знают специалисты первого и второго уровней.

Некоторые устаревшие вопросы программы, например, по резонансному методу контроля, в этом издании опущены, но формулировки вопросов сохранены. Вместе с тем многие разделы развиты и дополнены, исходя из опыта преподавания авторов. Опущен раздел программы "0. Общих вопросы НК", как относящийся ко всем методам неразрушающего контроля..

Учебник будет также полезен готовящимся к сдаче экзамена на специалиста третьего уровня квалификации, однако в этом случае его следует дополнить сведениями из книг [1, 2, 3]. Все справочные данные и ряд

примеров читатель найдет в справочнике [4], который следует рассматривать как необходимое приложение к данному учебнику. Авторы старались дать определения всем неясным терминам, но если возникли терминологические вопросы следует воспользоваться справочниками [6, 7]

Для лучшего усвоения материала возможно целесообразно изменить порядок его изучения. Например, начинать с раздела 2, а потом возвращаться к разделу 1. Тем не менее, порядок изложения материала в учебнике строго следует программе, чтобы подчеркнуть их полное соответствие.

Вопросы программы для первого и второго уровней сформулированы в начале каждого пункта. Далее дан ответ на вопрос для первого уровня, а потом указаны уточнения или дополнительные сведения, которые необходимо знать специалисту второго уровня квалификации.

Латинские буквы, аналогичные по написанию русским, и греческие буквы выделены курсивом. Фрагменты текста, необязательные к глубокому изучению, выделены мелким шрифтом. Список сокращений приведен ниже. Конкретные примеры работы с дефектоскопом и толщиномером даны применительно к приборам УД2-12 и УТ-93.

Настоящее третье издание дополнено вопросами для проверки и расширения знаний обучающихся с ответами на них. Внесены некоторые новые фрагменты, учитывающие развитие ультразвукового контроля.

Авторы будут благодарны всем, приславшим замечания и советы по содержанию книги. Адрес: 115088, Москва, Первая ул. машиностроения, д. 4, корп. 2, кв. 25, Ермолову И. Н. Тел. 275 47 13

**Список общих сокращений и аббревиатур:**

- АК - акустический контроль;
- АРД (диаграмма) - (диаграмма) амплитуда - расстояние - диаметр;
- АЭ - акустическая эмиссия;
- БЦО - блок цифровой обработки;
- ЗТ - зеркально - теневой (метод);
- НТД - нормативно-технический документ;
- ОК - объект контроля;
- РС - раздельно-совмещенный (преобразователь);
- СО - стандартный образец;
- СОП - стандартный образец предприятия;
- ПЭП - пьезоэлектрический преобразователь;
- УЗ - ультразвук, ультразвуковой;
- ЭАП - электроакустический преобразователь;
- ЭМА - электромагнито-акустический (преобразователь).

## 1. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

### 1.1. Классификация методов.

1. Понятие об активных и пассивных методах, использующих отражение и прохождение УЗ колебаний.

2. Классификационная система методов АК.

1. Методы АК делят на две большие группы: активные, в которых акустические колебания и волны возбуждаются и принимаются, и пассивные, использующие только прием колебаний и волн (понятия колебания, волны и величины, их характеризующие рассмотрены в п. 2.1). Колебания в последнем случае возбуждаются под действием процессов, происходящих в самом объекте контроля (ОК): механизме, изделии или образце. Например, образование трещин сопровождается возникновением акустических колебаний, выявляемых акустикоэмиссионным методом. К пассивным методам относят также вибрационно-диагностический (измеряют вибрации какого-либо узла или детали) и шумодиагностический (изучают шумы работающего механизма на слух или с помощью приборов).

Активные акустические методы делят на две подгруппы: в одной применяются бегущие (т. е. распространяющиеся в ОК) волны, а в другой - колебания ОК. Внутри подгрупп методы различают по способам выявления дефектов. В методах прохождения излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны ОК или контролируемого его участка. Информацию получают, измеряя амплитуду или время прихода прошедшего от излучателя к приемнику (сквозного) сигнала. Например, дефект ослабляет сквозной сигнал (амплитудный теневой метод). В методах отражения информацию о наличии дефектов получают, измеряя как время пробега отраженного сигнала, так и его амплитуду.

2. На рис. 1.1 приведена общая классификация методов АК. На схеме не показаны некоторые методы в целях ее упрощения, в частности, большинство методов, применяемых для контроля неметаллов. Как говорилось в подпункте 1, методы разделяют на активные и пассивные, бегущих волн и колебаний (точнее - собственных колебаний), прохождения и отражения. Описания методов даны в п.п. 1.2 - 1.7. О некоторых методах говорилось ранее.

Согласно общей классификации все методы НК делят на группы, называемые видами. Существует 9 различных видов НК: магнитный, электрический, вихревой, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами (капиллярный и теческанинг). Внутри каждого вида НК методы квалифицируют по рассматриваемым ниже признакам:

Характер взаимодействия поля или вещества с ОК. Для методов АК это деление на активные и пассивные методы. В первых акустическое поле взаимодействует с ОК, а во вторых - возбуждается самим ОК.

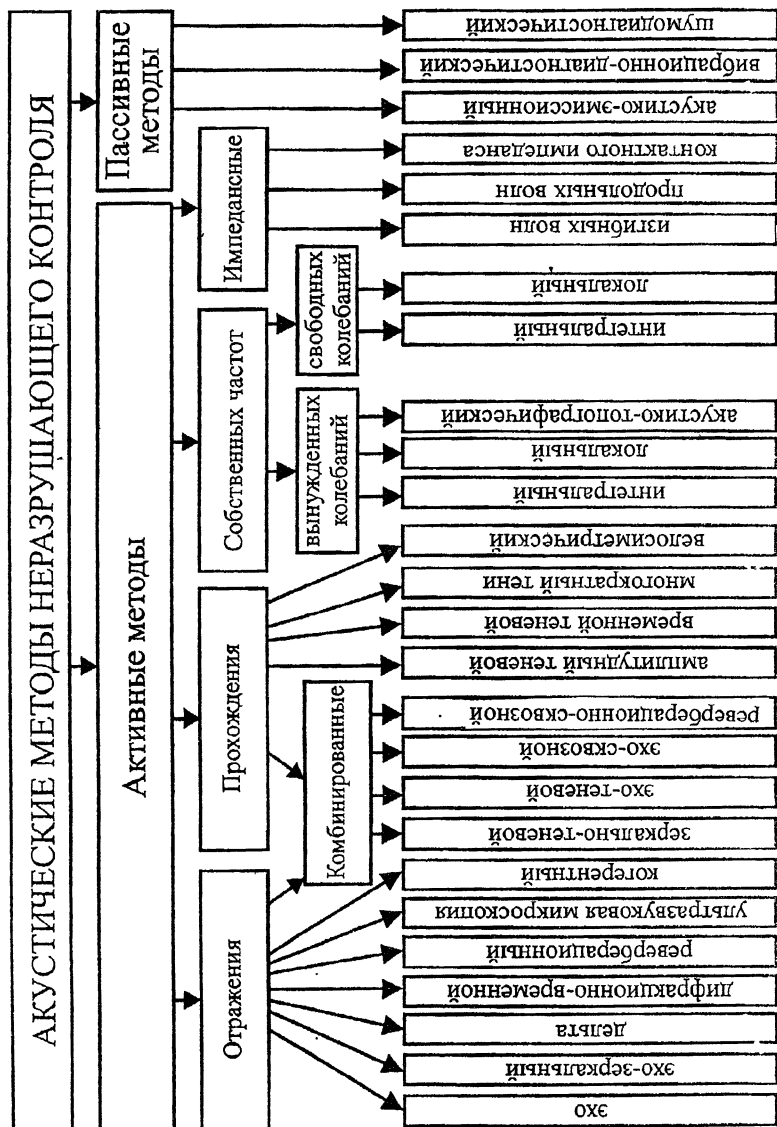


Рис. 1. Классификация акустических методов контроля



Первичный информативный параметр - конкретный параметр, который используют для характеристики контролируемого объекта. В УЗ контроле это амплитуда, время прихода УЗ сигнала, частота колебаний и т. п. Измеряемую характеристику, по которой принимают решение об отсутствии или обнаружении дефекта, называют главной измеряемой характеристикой.

Способ получения первичной информации - конкретный тип датчика, который используют для измерения и фиксации информативной характеристики. Для АК это чаще всего пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП).

## 1.2. Методы отражения.

1. Эхо-метод. Основные принципы. Зондирующий импульс, донный сигнал, эхосигналы от дефектов. Основные измеряемые характеристики эхосигналов: амплитуда и время прихода.

2. Варианты метода отражения: эхозеркальный и дельта-методы.

1. Эхо-метод основан на регистрации эхосигналов от дефектов - несплошностей. Он похож на радио- и гидролокацию. На рис. 1.2 показана упрощенная блок-схема импульсного эхо-дефектоскопа. Генератор 7 возбуждает короткие электрические импульсы. В преобразователе 3 они преобразуются в импульсы УЗ колебаний, которые распространяются в ОК 4, отражаются от дефектов 6 и противоположной поверхности (дна) ОК, принимаются тем же (совмещенная схема включения) или другим (раздельная схема включения) преобразователем 2. Преобразователь превращает сигналы из УЗ в электрические. От него сигнал поступает на усилитель 1, а затем на электроды, вызывающие вертикальное отклонение светящейся точки на экране 5.

Одновременно (а иногда спустя некоторый интервал времени) с запуском генератора импульсов начинает работать генератор развертки 9. Правильную последовательность включения их, а также других узлов дефектоскопа, не показанных на упрощенной схеме, обеспечивает синхронизатор 8. Сигналы от генератора развертки вызывают горизонтальное отклонение светящейся точки на экране.

В результате экран УЗ эхо-дефектоскопа отображает информацию двух видов. Горизонтальная линия (линия развертки дефектоскопа) соответствует времени пробега импульса в ОК, а это время пропорционально пути импульса. Высота пиков (импульсов) по вертикали пропорциональна амплитудам эхосигналов. Таким образом, по горизонтальной линии развертки определяют длину пути импульса, а по вертикальной шкале оценивают его амплитуду. Такое изображение называют разверткой типа А (А-разверткой).

Очень высокий (для совмещенной схемы - уходящий за пределы экрана) сигнал, обозначенный буквой З, соответствует возбуждаемому генератором и посылаемому в изделие УЗ импульсу. Он отмечает нулевое значение шкалы времени. Его называют зондирующим импульсом. Высокий сигнал Д соответствует импульсу, отраженному от дна ОК. Его называют

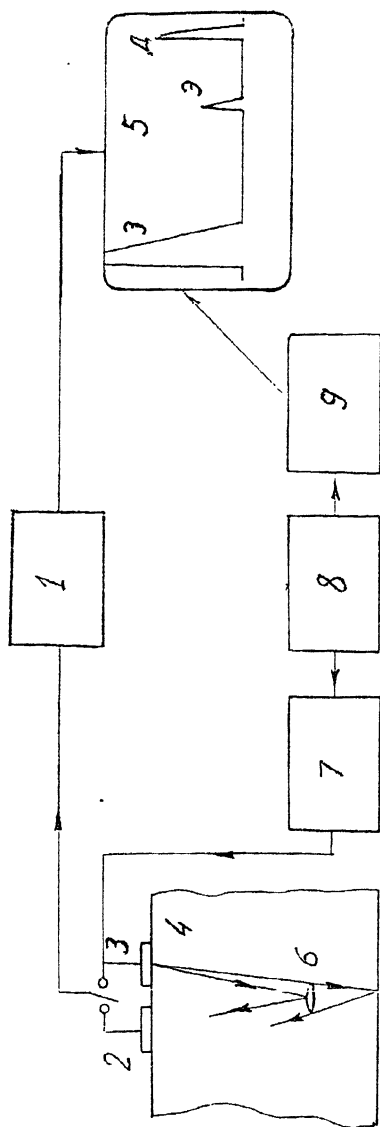


Рис. 1.2. Упрощенная структурная схема «шо-дефлектоскопа»

донным сигналом. Э - эхосигнал от дефекта. Он приходит раньше донного сигнала и амплитуда его обычно значительно меньше. Измеряя времена прихода сигналов по шкале на экране или специальным устройством (глубиномером) прибора, можно определить расстояние до дефекта или дна изделия и таким образом различить их. Амплитуда эхосигнала характеризует отражательную способность дефекта.

2. Другие методы отражения применяют для поиска дефектов, плохо выявляемых эхометодом, и для исследования дефектов.

**Эхозеркальный метод** основан на анализе акустических импульсов, зеркально отраженных от донной поверхности ОК и дефекта *B*, т. е. прошедшие путь *ABCD* (рис. 1.3,а). Вариант этого метода, рассчитанный на выявление вертикальных дефектов, называют методом тандем. Для его реализации при перемещении преобразователей *A* и *D* поддерживают постоянным значение  $I_A + I_D = 2H \operatorname{tg} \alpha$ , где *H* - толщина ОК. Для получения зеркального отражения от невертикальных дефектов значение  $I_A + I_D$  варьируют.

**Дельта-метод** (рис. 1.3,б) основан на использовании дифракции волн на дефекте. Часть падающей на дефект *B* поперечной волны от излучателя *A* рассеивается во все стороны на краях дефекта, причем частично превращается в продольную волну. Часть этих волн принимается приемником продольных волн *D*, расположенным над дефектом, а часть отражается от донной поверхности и также поступает на приемник. Варианты этого метода предполагают возможность перемещения приемника *D* по поверхности, изменения типов излучаемых и принимаемых волн.

**Дифракционно-временной метод** (рис. 1.3,в) основан на приеме волн, возникающих в результате рассеяния на верхнем и нижнем кончиках дефекта, причем обычно излучаются и принимаются продольные волны, так как соответствующие импульсы приходят раньше, чем для поперечных волн. Разделение излучателя и приемника дает возможность со значительно более высокой чувствительностью регистрировать волны, рассеянные на концах дефекта типа трещины или непровара, чем в случае применения совмещенной схемы контроля. Главная информационная характеристика - время прихода сигнала. Этот метод также называют времяпролетным, буквально переводя английское название (TOFD).

Более подробно эти методы рассмотрены в п. 6.1.5.

### 1.3. Методы прохождения

1. Теневой амплитудный метод. Основные принципы, области применения.

2. Теневой и зеркально-теневой (ЗТ), амплитудный и временной методы, их особенности.

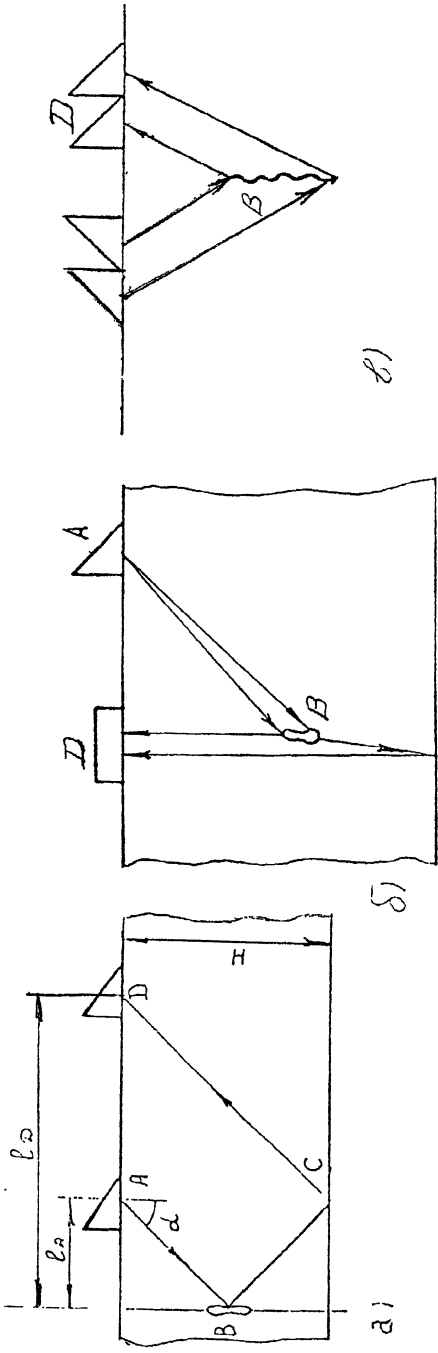


Рис 1.3 Методы отражения а - зеркальный, б - дельта, в - дифракционно-временной

1. Теневой (или амплитудно-теневой) метод основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны (сквозного сигнала) под влиянием дефекта. Для контроля этим методом можно использовать тот же импульсный дефектоскоп (рис. 1.2), который включают по отдельной схеме, причем излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны ОК. Иногда применяют специализированные более простые приборы (рис. 1.4,а).

Метод применяют для контроля изделий простой формы (например, листов) и многослойных объектов, в которых многократные отражения между слоями мешают использовать эхо-метод.

2. К методам прохождения кроме теневого относят временной теневой метод (рис. 1.4,б), основанный на измерении запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. В этом случае информационным параметром будет время прихода сигнала. Метод эффективен при контроле материалов с большим рассеянием УЗ.

ЗТ метод основан на измерении амплитуды донного сигнала. На рис. 1.5,а отраженный луч показан смещенным в сторону. По технике выполнения (фиксируется эхосигнал) - это метод отражения, а по физической сущности (измеряют ослабление дефектом сигнала, дважды прошедшего ОК) он близок к теневому методу, поэтому его обычно относят не к методам прохождения, а к комбинированным методам (см. п. 1.4).

ЗТ метод часто применяют одновременно с эхометодом. Наблюдают одновременно за появлением эхосигналов и за возможным ослаблением донного сигнала дефектами, которые не дают четких эхосигналов и плохо выявляются эхометодом. Это может быть скопление очень мелких дефектов или дефект, расположенный так, что отраженный от него сигнал уходит в сторону и не попадает на приемный преобразователь.

#### 1.4. Комбинированные методы

1. -  
2. Методы эхо-теневой, эхо-сквозной, многократной тени. Их основные принципы и особенности.

2. В комбинированных методах используют принципы как отражения так и прохождения волн, как это показано на примере ЗТ метода, рассмотренного в п. 1.3. Метод многократной тени аналогичен ЗТ, но использует многократные отражения между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или ЗТ. т. к. волны проходят через дефектную зону много раз, но менее помехоустойчив. Эхо-теневой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 1.5,б)

При контроле эхо-сквозным методом (рис. 1.5,в) излучатель и приемник располагают по разные стороны ОК. Наблюдают сквозной сигнал I, сигнал II, двукратно отраженный в изделии, а в случае появления полупрозрачного дефекта - также эхо-сквозные сигналы III и IV, соответствующие отражениям от дефекта волн, идущих от верхней и нижней поверхностей ОК. Большой непрозрачный дефект обнаруживают по

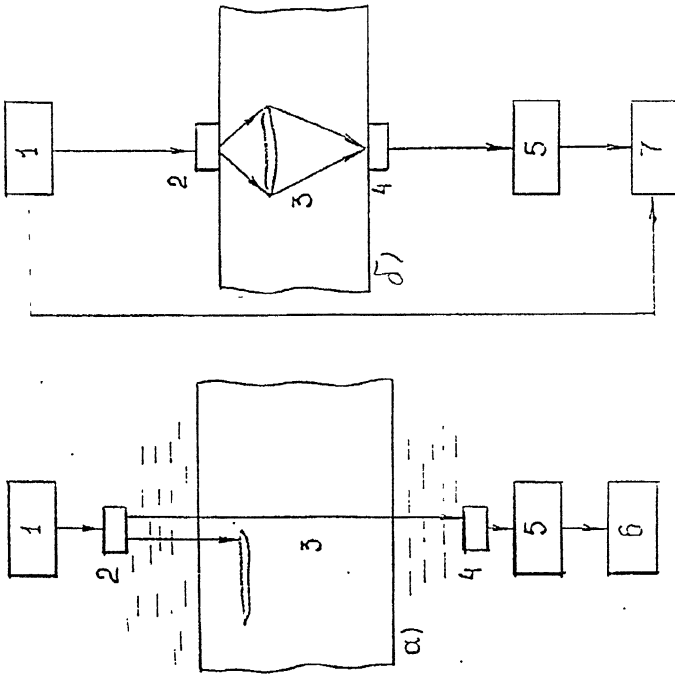


Рис. 1.4. Методы прохождения: а - амплитудно-теневой, б - временной теневой; 1 - генератор, 2 - излучатель, 3 - ОК, 4 - приемник, 5 - усилитель, 6 - измеритель амплитуды, 7 - измеритель времени прихода импульса

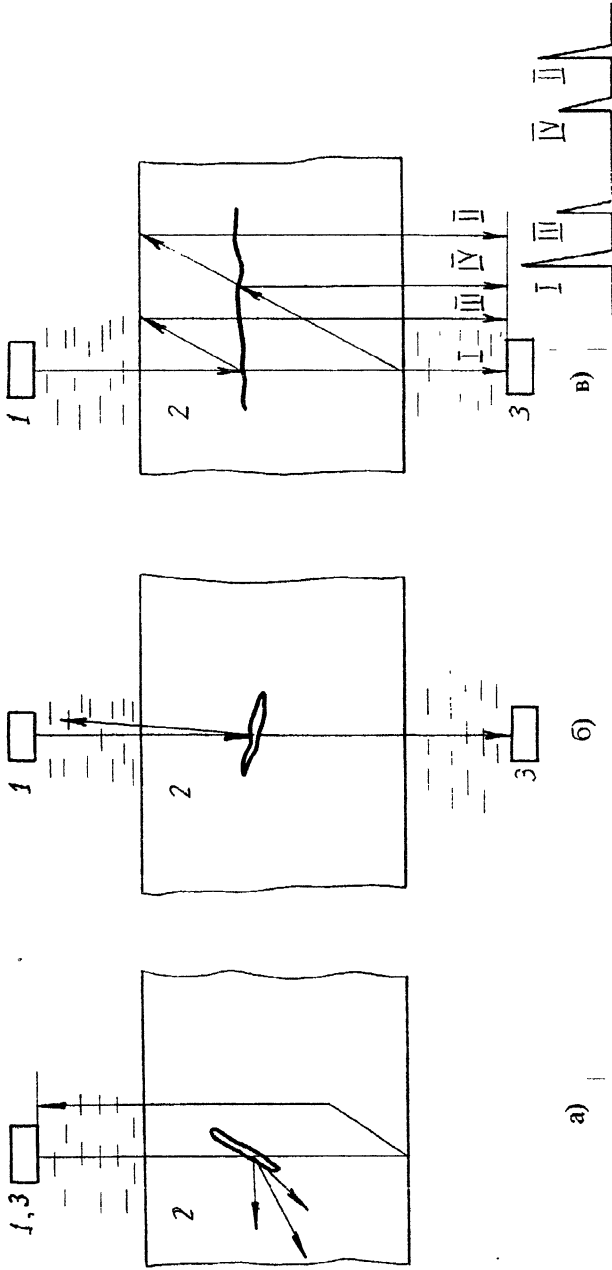


Рис. 1.5. Комбинированные методы: а - зеркально-линзовой, б - эхо-линзовой, в - сквочной. 1 - излучатель, 2 - ОК, 3 - приемник

исчезновению сигнала I, т. е. теньевым методом, а также сигнала II. Полупрозрачные или небольшие дефекты обнаруживают по появлению эхо-сквозных сигналов III и IV.

### 1.5. Импедансный метод.

1. -
2. Основные принципы.

2. Импедансный метод основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым взаимодействует преобразователь. Генератор 2 (рис. 1.6) возбуждает колебания преобразователя (стержня) с помощью элемента 1. Элемент 4 - приемник, 5 - усилитель. Изменение режима колебаний фиксируется сигнализатором 3.

Импеданс в данном случае характеризует способность системы сопротивляться возбуждению колебаний (определение нестрогое). Наличие дефекта (непроклея, непрояя) вблизи поверхности изделия 7 уменьшает импеданс. Дефекты отмечают по увеличению амплитуды колебаний преобразователя, изменению его фазы и частоты. В изделии и его отслоившейся части возбуждаются изгибные волны в пластинах. Метод применяют для контроля непрочесов в многослойных конструкциях (см. п. 0.5). При контроле металлов его используют для измерения твердости (см. п. 3.10)

### 1.6. Методы собственных частот (колебаний).

- 1.-
2. Интегральные и локальные методы. Свободные и вынужденные колебания. Области применения.

2. При использовании методов колебаний возбуждают свободные или вынужденные колебания, либо ОК в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы). Свободные колебания возбуждают путем кратковременного воздействия на ОК, например, ударом, после чего он колеблется свободно. Вынужденные колебания предполагают постоянную связь (через преобразователь) ОК с генератором, частоту которого варьируют во время контроля. Последние методы часто называют резонансными (см. п. 3.8).

Интегральными методами колебаний проверяют наличие дефектов в ОК, его геометрические размеры (например, толщину), свойства материала. Эти факторы влияют на частоты свободных или резонансные частоты вынужденных колебаний (которые несколько отличны от свободных из-за связи с возбуждающим генератором). Они также влияют на амплитуду колебаний и ее изменение в функции от частоты.

Примеры применения интегрального метода свободных колебаний: контроль "на слух" стеклянной посуды после удара, контроль абразивных кругов по спектру возбуждаемых частот с приборной регистрацией спектров.

Пример применения локального метода свободных колебаний - контроль слоистых конструкций по изменению спектра частот в части изделия, возбуждаемых в результате удара.

Резонансный локальный метод применяют для контроля очень тонких изделий. Частоту возбуждаемых колебаний плавно изменяют. На частотах, где по толщине изделия укладывается целое число полуволи, возникают резонансы. Их фиксируют на экране, где горизонтальная ось - меняющаяся частота. Изменение толщины вызовет сдвиг резонансных частот, появление дефектов - исчезновение резонансов (если дефект наклонный к поверхности изделия) или изменение их частоты (если дефект параллелен поверхности) Этим методом можно проверять очень тонкие изделия, недоступные контролю эхометодом.



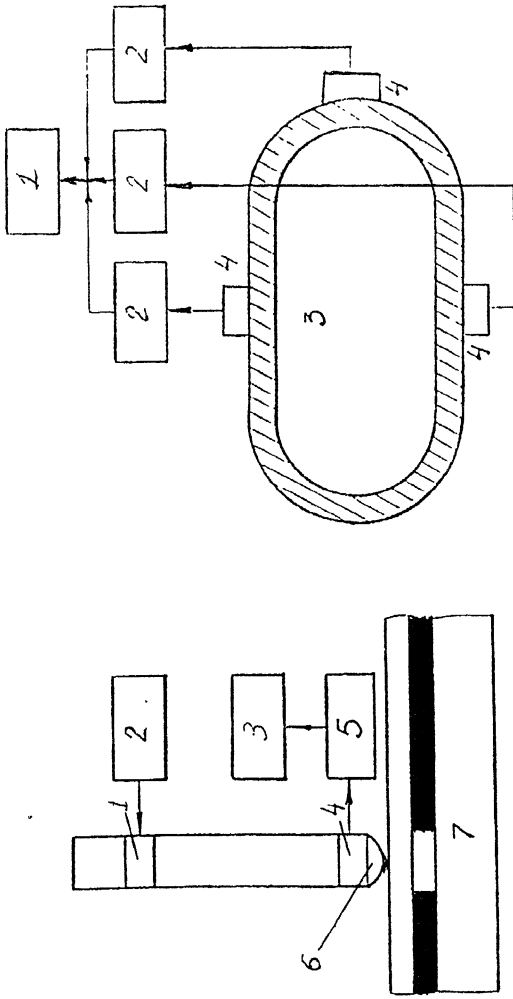


Рис. 1.6. Импедансный метод: 1 - излучатель, 2 - генератор, 3 - индикатор, 4 - приемник, 5 - приемник, 6 - наконечник, 7 - ОК

1.7. Акустико-эмиссионный метод: 1 - блок обработки информации, 2 - усилители, 3 - ОК, 4 - приемные ПЭП

## 1.7. Акустикоэмиссионный метод

1. -

2. Основные принципы. Области применения.

2 Явление акустической эмиссии (АЭ) состоит в излучении упругих волн в результате внутренней динамической локальной перестройки структуры материала ОК. Так определяет ГОСТ. Акустикоэмиссионный метод основан на регистрации этих волн. Акустические (обычно ультразвуковые) волны возникают в процессе образования и развития трещин в ОК 3 (рис. 1.7), а также при перестройке кристаллической структуры его материала (например, мартенситного превращения гамма-железа в альфа-железо при закалке), движении нарушений кристаллической структуры (дислокаций) При ударах, трении других тел о поверхность ОК также возникают упругие волны, но это не волны АЭ, а помехи, так как не связаны с внутренними процессами в материале.

Приборы для контроля акустикоэмиссионным методом обычно делают многоканальными. Приемники 4 улавливают упругие волны. Сигналы проходят через усилители 2 и поступают в блок обработки 1, который помогает выделению сигналов от трещин на фоне помех (см. п. 2.9) и формирует изображение на экране участка ОК с сигналами от развивающейся трещины.

Основное применение - наблюдение за возникновением и развитием трещин в процессе испытаний или эксплуатации. Метод используют также для исследования процессов сварки, механообработки, коррозии, механических испытаний образцов и т. д.

## 1.8. Способы акустического контакта

1. Контактный способ. Жидкие контактные среды.

2. Контактный и иммерсионный способы. Преобразователи с эластичным протектором, со струйным иммерсионным контактом, локальные иммерсионные ванны. Бесконтактные способы.

1. УЗ волны отражаются от тончайших воздушных зазоров (см. п. 2.3), поэтому, чтобы ввести их в ОК, между ним и преобразователем вводят жидкие контактные среды. Чаще всего применяют контактный способ контроля, в котором преобразователь прижимают к поверхности ОК (рис. 1.8,а), предварительно смазанной контактной жидкостью (маслом, глицерином, обойным клеем и т. п.). Жидкость должна быть безвредной для дефектоскописта. Кроме того она должна обладать хорошими смачивающими свойствами и не вызывать коррозии ОК. Вода не обладает последними двумя свойствами, поэтому ее обычно не применяют.

2. Для улучшения контакта применяют преобразователи с эластичным протектором (слоем, закрывающим пьезопластину, см. п. 2.3) - пленкой из маслостойкой резины или другого материала, облегчающего неровности поверхности ОК (рис. 1.8,б). Кроме контактного применяют следующие способы акустического контакта:

Иммерсионный способ, в котором между преобразователем и поверхностью ОК вводят толстый слой жидкости (толщина его во много раз превышает длину волны). При этом изделие либо целиком погружают в иммерсионную ванну (рис. 1.8,в), либо используют струю воды (струйный

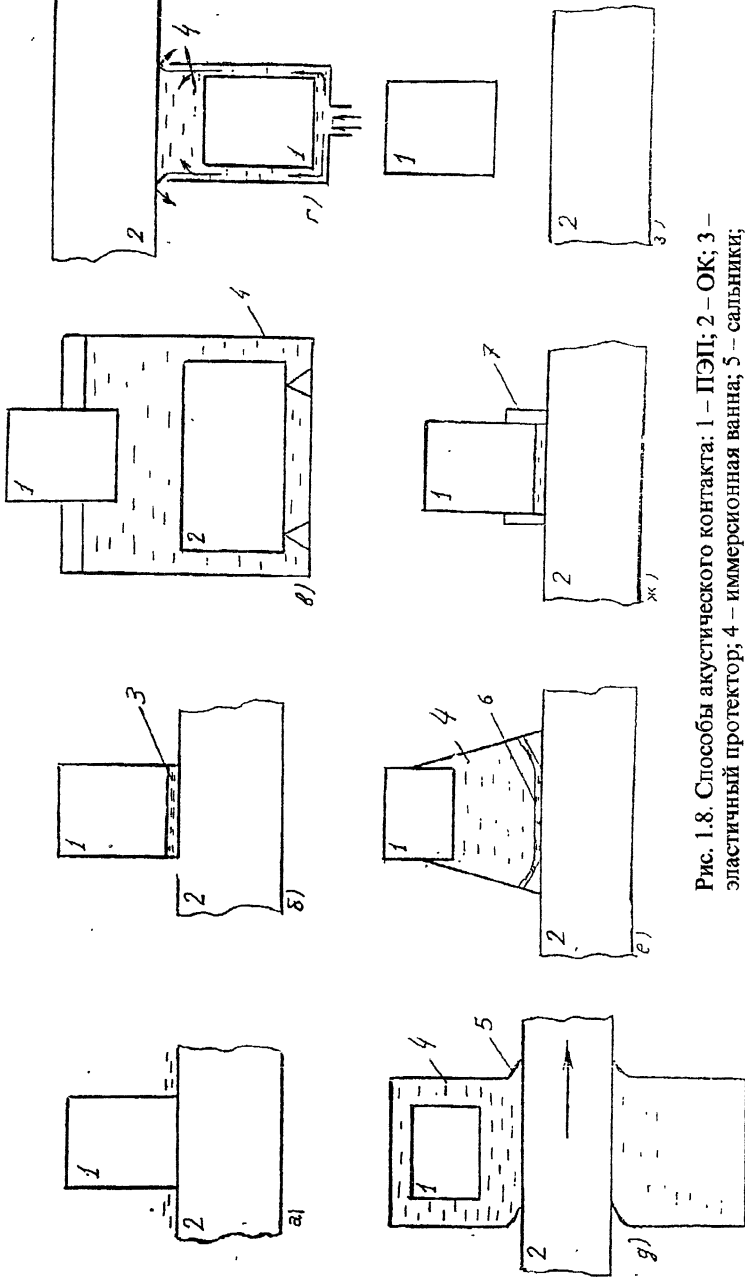


Рис. 1.8. Слобобы акустического контакта: 1 – ПЭД; 2 – ОК; 3 – эластичный протектор; 4 – иммерсионная ванна; 5 – сальники; 6 – эластичная мембрана; 7 – ограничитель

контакт, рис. 1.8,з), либо применяют локальную ванну для части ОК (рис. 1.8,д). Используют также локальную иммерсионную ванну, контактирующую с изделием через эластичную мембрану (рис. 1.8,е). Иммерсионный способ контакта применяют, когда очень важна стабильность акустического контакта, например, при контроле теневым или эхо-сквозным методами.

Щелевой (менисковый) способ контакт предусматривает создание между преобразователем и поверхностью ОК зазора толщиной около длины волны УЗ. Жидкость удерживается в зазоре силами поверхностного натяжения (рис. 1.8,ж).

Бесконтактный способ, в котором акустические колебания в ОК возбуждаются через слой воздуха (воздушно-акустическая связь) или с помощью электромагнитных, оптико-тепловых и других явлений (рис. 1.8,з) как рассмотрено в п. 2.5. Бесконтактные способы не нашли широкого применения в связи с низкой чувствительностью - в тысячи раз меньше, чем у контактного. Иммерсионный способ также имеет чувствительность в 10 - 100 раз меньше контактного.

## **2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

### **2.1. Колебания и волны.**

1. Непрерывные колебания и импульсы. Частота колебаний. Упругие волны. Скорость распространения волн. Длина волны. Слышимый звук и ультразвук. Продольные и поперечные волны. Ослабление волн.

2. Спектральный состав акустических импульсов. Упругие волны различных типов, в том числе поверхностные, головные, в пластинах и стержнях. Скорость их распространения. Причины ослабления волн при распространении.

1. Колебание - движение вокруг некоторого среднего положения, обладающее повторяемостью, например, колебание маятника. Наибольшее отклонение от среднего положения называют амплитудой колебаний. В акустике обычно рассматривают колебания точки среды относительно положения, в котором точка находилась в покое. Волны - колебательные движения, распространяющиеся в пространстве. Колебания одной точки передаются соседней и т. д.

В акустике рассматриваются упругие колебания. Упругость - свойство точек среды возвращаться к первоначальному состоянию. Жидкие, газообразные и твердые среды восстанавливают свой объем после сжатия или разрежения, но под действием сил инерции точки продолжают движение после достижения первоначального состояния. В результате сжатие переходит в растяжение, а потом опять в сжатие - возникают упругие колебания. Такой процесс распространяется в пространстве и образует упругую волну (рис. 2.1,а,б).

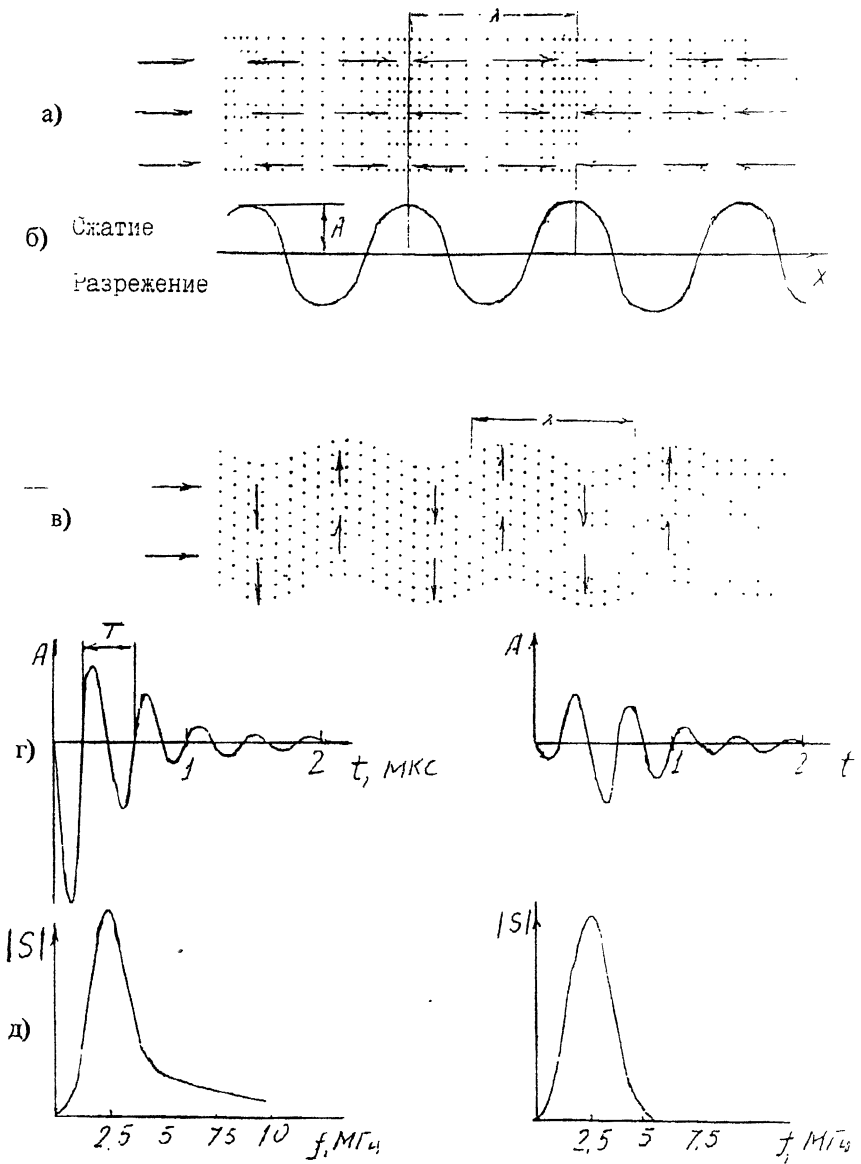


Рис. 2.1. Волны: продольные (а), поперечные (в); волновой процесс (б). г - ударный импульс (слева) и эхосигнал от дефекта (справа); г - их спектры

Если пренебречь потерями, то колебательный процесс продолжается очень долго. Это непрерывные колебания. В УЗ контроле обычно колебания возбуждают и тут же стараются погасить. В результате возникает кратковременный волновой процесс - импульс (рис. 2.1,з).

Частота - количество колебаний в секунду ( $c$ ). Ее обозначают буквой  $f$ . Одно колебание в секунду - 1 герц (Гц). При УЗ контроле обычно частоту колебаний измеряют в мегагерцах (МГц) - миллионах колебаний в секунду. 1 килогерц (кГц) = 1000 Гц. Время одного колебания называют периодом  $T$ . Его измеряют в секундах или величинах в миллион раз меньших - микросекундах (мкс),

$$f = 1/T.$$

Ухо человека воспринимает упругие колебания частотой приблизительно от 20 Гц до 20 кГц. Этот диапазон частот называют звуком. Частоты выше 20 кГц называют ультразвуком, выше 100 МГц - гиперзвуком, а ниже 20 Гц - инфразвуком.

Как упоминалось, амплитуда колебаний  $A$  - наибольшее отклонение от положения равновесия (рис. 2.1,б). Ее обычно измеряют путем сравнения с некоторой заданной амплитудой колебания  $A_0$ :  $A/A_0$ . Эту величину принято выражать в децибелах (дБ):

$$\langle A/A_0 \rangle = 20 \lg(A/A_0).$$

Величины в децибелах здесь записаны в угловых скобках. Нограмма для перевода относительных величин в дБ приведена в [4], рис. 1.1. В УЗ дефектоскопии за  $A_0$  часто принимают амплитуду зондирующего импульса. Величина  $A_0 > A$ , а логарифмы чисел, меньших единицы, отрицательны, поэтому в УЗ контроле всегда используют отрицательные децибелы, но знак минус не пишут. Мы также не будем каждый раз отмечать, что пользуемся отрицательными децибелами. Часто встречающиеся значения: уменьшение амплитуды в 2 раза соответствует 6 дБ, а в 10 раз - 20 дБ.

Энергия колебаний и волн или интенсивность волн (величина, характеризующая распространение энергии в пространстве) пропорциональна квадрату амплитуды. В УЗ контроле измеряют не интенсивность, а амплитуду колебаний и волн.

Колебания от точки к точке среды передаются с определенной скоростью. Это скорость распространения волны. В акустике - скорость звука  $c$ . Расстояние, на которое волна за одно колебание (говорят - за один период колебаний  $T$ ) называют длиной волны  $\lambda$ . Одна из основных формул:

$$\lambda = cT = c/f.$$

Скорость звука во многих металлах - около 6000 м/с = 6 мм/мкс (6 миллиметров в микросекунду). При частоте 6 МГц длина волны равна 1 мм. Волны длиной около 1 мм (точнее, от 0,2 до 10 мм) обычно употребляют для УЗ контроля металлов. Небольшая длина волны по сравнению с размером преобразователя позволяют создать направленно распространяющуюся волну, которую рассматривают как пучок лучей.

В твердых, жидких и газообразных средах существует упругость объема, а в твердом теле также упругость формы, т. е. твердое тело стремится сохранить свою форму. Это свойство твердого тела связано со сдвиговой упругостью. Например, два слоя жидкости можно легко сдвинуть друг относительно друга, а две плоскости в твердом теле сопротивляются сдвигу. Попытка их сдвинуть ударом или переменной по направлению силой приведет к возникновению колебаний.

Таким образом, во всех средах (кроме вакуума) существуют колебания растяжения - сжатия. Волны с такими колебаниями это продольные волны или волны растяжения - сжатия. Колебания в них происходят вдоль направления распространения волны (рис. 2.1,а).

В твердом теле существуют также волны сдвига. Колебания частиц в них происходят поперек направления распространения волны, их поэтому называют поперечными волнами (рис. 2.1,б) Скорость распространения поперечной волны приблизительно в два раза (точнее в 1,8 - 1,9 раза) меньше, чем продольных. Например, в стали скорость продольной волны - 5,92 мм/мкс, а поперечной - 3,23 мм/мкс. Скорость волны (конечно, продольной) в жидкости значительно меньше. Например, в воде при комнатной температуре - 1,49 мм/мкс. Значения скоростей волн в различных средах приведены в [4], табл. 2.1.

При распространении амплитуда волны уменьшается - происходит ослабление волны. Главные причины ослабления - расхождение лучей и затухание волн в среде. В сферической волне (излучаемой во все стороны сферическим источником, рис. 2.2,б) расхождение лучей происходит в двух плоскостях, поэтому ослабление с расстоянием происходит наиболее быстро. В цилиндрической волне (излучаемой длинным стержнем, рис. 2.2,в) расхождение происходит в одной плоскости (перпендикулярной оси стержня), поэтому она медленнее ослабевает с расстоянием. В плоской волне (излучаемой большой пластиной, рис. 2.2,а) лучи не расходятся и волна ослабевает только под действием затухания.

2. В математике строго доказано, что любой импульс можно представить как сумму непрерывных (гармонических) колебаний разной частоты, имеющих разные амплитуды и начальные фазы (см. ниже). Набор таких гармонических колебаний называют спектром импульса. Он зависит от формы и длительности импульса. Чем короче импульс, тем в его спектре больше разных частот (спектр шире) за счет увеличения амплитуд высокочастотных (по сравнению с основной частотой) составляющих. Для непрерывных колебаний спектр - одна частота.

На рис. 2.1,д показаны спектры амплитуд  $|S|$  импульсов, изображенных на рис. 2.1,г. Слева - импульс, возбужденный ударным генератором, а справа - отраженный от дефекта. Форма импульса изменилась главным образом благодаря затрудненному прохождению ударного импульса через излучающий и принимающий преобразователи. Они не пропустили самые

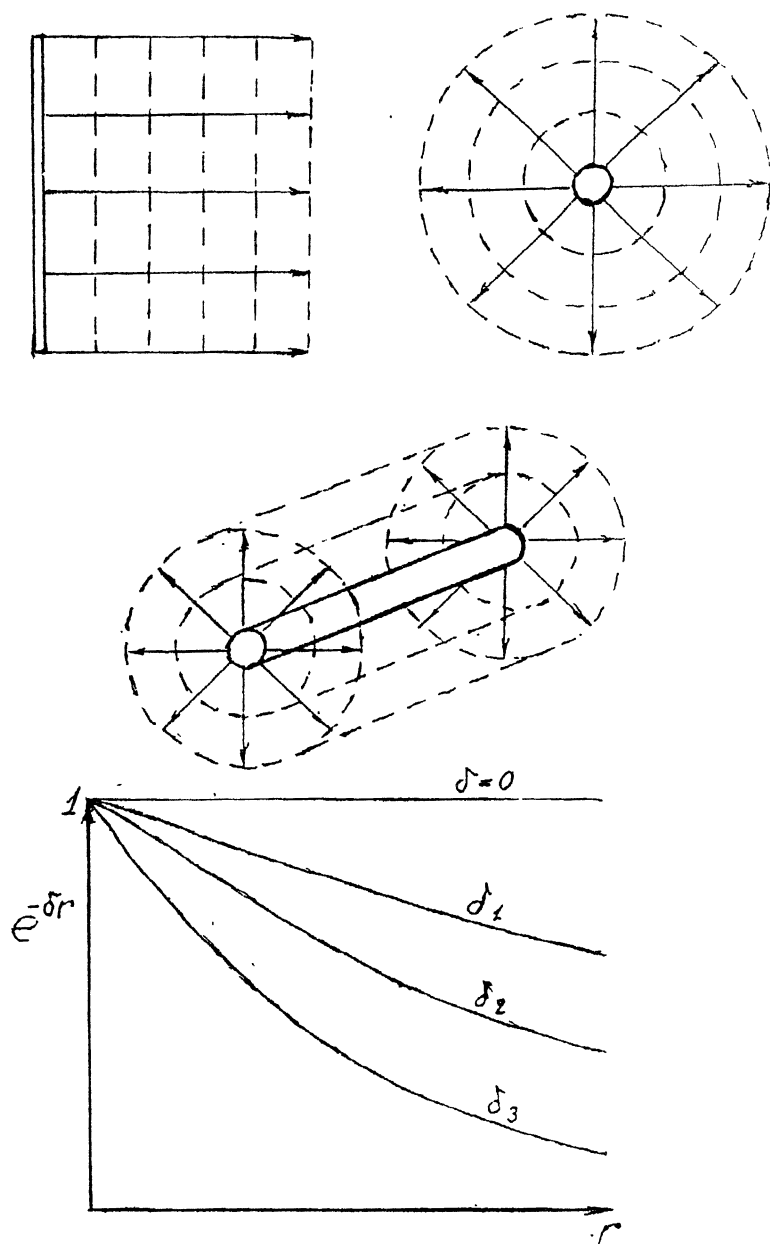


Рис. 2.2. Причины ослабления волн: форма фронта волны: а - плоская, б - сферическая, в - цилиндрическая; г - ослабление под действием затухания, коэффициенты затухания  $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$ .



высокие частоты. Соответствующие изменения хорошо видны на спектрах импульсов.

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

В твердом теле кроме продольных и поперечных существуют также специфические волны вдоль поверхности - поверхностные волны. Это волны Рэлея. Скорость их немного меньше поперечных (для стали - 3 мм/мкс). Вдоль поверхности распространяются также волны, которые в нашей стране называют головными (скорость как у продольных). Рэлеевская волна медленно ослабляется с расстоянием, а головная - очень быстро, т. к. в каждой точке поверхности она порождает поперечную волну, отходящую от поверхности. Об их свойствах также см. п. 7.1.

Рэлеевские волны как бы "облизывают" плавные выпуклости и впадины на поверхности ОК. Они рассеиваются на неровностях поверхности и хорошо выявляют дефекты, на самой поверхности, но чувствительность быстро убывает с глубиной залегания дефектов. Дефекты на глубине большей длины волны не выявляются. Эти волны иногда применяют для контроля изделий на поверхностные дефекты вместо магнитного или капиллярного методов. Если нажать на поверхность перед отражателем ультразвука пальцем, смоченным в масле, амплитуда эхосигнала рэлеевской волны уменьшится - так определяют место, где расположен дефект.

Головные волны это продольные волны вдоль поверхности. Они распространяются расходящимся от преобразователя пучком. Они нечувствительны к поверхностным дефектам и не реагируют на неровности поверхности, но хорошо выявляют дефекты на глубине 2 - 8 мм. Для их излучения и приема применяют специальные раздельно-совмещенные (РС) преобразователи. Эти волны применяют для контроля сварных швов на дефекты под валиком усиления, выявления дефектов под наплавкой, резкой.

Для всех перечисленных волн скорость не зависит от частоты. В ограниченных твердых телах (пластинах, стержнях, поперечные размеры которых превосходят длину волны не более, чем в 2 - 3 раза, существуют волны в пластинах (Лэмба) и в стержнях (Похгаммера). Скорость их распространения изменяется в зависимости от частоты (явление дисперсии), упругих свойств материала и поперечных размеров пластины или стержня. Скорость определяют по графикам - дисперсионным кривым (см. [4], рис. 1,5). Пластиночные волны применяют для УЗ контроля тонких листов, труб, оболочек, а волны в стержнях - для контроля проволоки.

Как отмечалось в подпункте 1, при распространении происходит ослабление волны с увеличением расстояния  $r$ . Основные причины ослабления - расхождение лучей (точнее - дифракционное ослабление) и затухание

волн. На рис. 2.2 направления лучей показано сплошными линиями, а фронты волн (поверхности, на которых фаза волны одинакова) - штриховыми. Дифракционное ослабление амплитуды для сферических объемных (т.е. продольных и поперечных) волн (волн со сферическим фронтом, рис. 2.2,б) обратно пропорционально расстоянию:  $1/r$ . Для цилиндрических волн (с цилиндрическим фронтом, рис. 2.2,в) - обратно пропорционально корню квадратному из расстояния:  $1/\sqrt{r}$ . Для плоской волны (параллельного пучка лучей с плоским фронтом, рис. 2.2,а) это ослабление отсутствует.

Ослабление под действием затухания пропорционально  $e^{-\delta r}$ , где  $e = 2,73...$  - число Непера,  $\delta$  - коэффициент затухания,  $r$  - расстояние, пройденное волной. Величину  $\delta$  измеряют в неперах на метр или на миллиметр пути (Нп/мм). Чем больше величина  $\delta$ , тем больше затухание и тем меньше множитель  $e^{-\delta r}$  (рис. 2.2, г). Когда отношение амплитуд измеряют в дБ, удобно измерять в дБ/м или дБ/мм также затухание  $\langle \delta \rangle$ :

$$\langle \delta \rangle = 8,68 \delta.$$

Величину  $\langle \delta \rangle r$  прибавляют к ослаблению (в дБ), вызываемому другими факторами.

## 2.2. Акустические свойства сред

1. Скорости продольных и поперечных волн. Волновое сопротивление (удельный характеристический импеданс). Коэффициент затухания.

2. Влияние материала изделия на скорость волн. Коэффициенты поглощения и рассеяния, их зависимость от свойств материала и частоты. Способы измерения скорости и оценки коэффициента затухания.

1. Скорость волн является свойством среды: для жидкостей и газов - продольных волн, а для твердых тел - продольных и поперечных. Волновое сопротивление  $z$  равно произведению скорости звука  $c$  на плотность среды  $\rho$ :  $z = \rho c$ . Коэффициент затухания определяет способность среды гасить акустические волны.

2. Скорость продольной волны пропорциональна, а поперечной - равна  $\sqrt{M/\rho}$ , где  $M$  - модуль нормальной упругости  $E$  для продольной волны или модуль сдвига  $G$  для поперечной волны, а  $\rho$  - плотность среды. Таким образом, скорость продольной и поперечной волн определяется физическими свойствами среды и не зависит от частоты или амплитуды волн. Скорости возрастают с увеличением упругости среды (которая показывает величину деформации при заданной нагрузке) и уменьшаются с увеличением плотности.

Волновое сопротивление пропорционально величине колеблющейся массы. Вспомните, что, чем тяжелее человек на качелях, тем труднее раскачать качели. Величина  $c$  определяет толщину слоя, участвующего в колебаниях, а умножение на  $\rho$  дает массу этого слоя.

Коэффициент затухания складывается из коэффициентов поглощения и рассеяния  $\delta = \delta_n + \delta_p$ . При поглощении акустическая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается акустической, но уходит из направленно распространяющейся волны. Поскольку

$$e^{-(\delta_n + \delta_p)r} = e^{-\delta_n r} \cdot e^{-\delta_p r},$$

действие поглощения и рассеяния определяется двумя независимыми множителями.

Для жидкостей и газов, незасоренных пылью, пузырьками рассеяние отсутствует, а коэффициент затухания пропорционален квадрату частоты. Для твердых материалов коэффициент поглощения обычно пропорционален частоте. Коэффициент рассеяния равен нулю для аморфных тел (стекла, однородной пластмассы). Для поликристаллических веществ, в частности металлов, рассеяние увеличивается с ростом упругой анизотропии (которая проявляется в изменении скорости звука по разным направлениям в кристалле), среднего размера кристаллитов  $\bar{D}$  и частоты  $f$ .

Например, в малоуглеродистой стали при длине волны  $\lambda > 10\bar{D}$  для продольных и поперечных волн

$$\delta_l \approx 0,12 f + 20 \bar{D} f^4;$$

$$\delta_t \approx 0,1 f + 105 \bar{D} f^4$$

Здесь  $\bar{D}$  в мм,  $f$  - в МГц,  $\delta$  - в Нп/м. Первый член определяет поглощение, а второй - рассеяние. Отметим, что коэффициент затухания всегда возрастает с ростом частоты.

Способ измерения скорости продольных волн с помощью универсального ультразвукового дефектоскопа типа УД2-12 состоит в измерении разности времен  $t_2$  и  $t_1$  прихода второго и первого донных сигналов в ОК заданной толщины  $H$  ( $t = t_2 - t_1$ ) и вычислении  $c_l = 2H/t$ . Для поперечных волн, получаемых с помощью наклонного ПЭП, скорость обычно определяют по измерению разности времен прихода  $t$  сигналов от какого-либо отражателя прямым и однажды отраженным лучами наклонного преобразователя с углом ввода, близким к  $45^\circ$ . Например, используют эхосигналы от верхнего (однажды отраженным лучом) и нижнего (прямым лучом) двугранных углов ОК толщиной  $H$  и преобразователь с углом ввода  $50^\circ$ . Тогда  $c_t = 2H/(t \cos 50^\circ)$ . Этот вариант рассмотрен в п. 7.3, рис. 7.11,а.

Коэффициент затухания оценивают по тем же схемам, но измеряют не времена прихода, а изменение амплитуд эхосигналов. При этом необходимо учитывать уменьшение амплитуд, вызываемое дифракционным ос-

лаблением и другими факторами. Подробно способы измерения скорости и коэффициента затухания описаны в [4], пп. 2.3 и 2.4.

### 2.3. Отражение и прохождение волн на границах сред

1. Коэффициенты отражения и прозрачности при нормальном падении. Расчет углов отражения и преломления при наклонном падении (закон Снеллиуса). Трансформация упругих волн. Полное отражение и критические углы.

2. Расчет коэффициентов отражения и прозрачности при нормальном падении. Влияние тонкого слоя на прохождение волн. Достижение максимальной прозрачности (просветление).

1. При падении упругих волн на границу раздела двух сред волны частично проходят во вторую среду, а частично отражаются. Коэффициент отражения  $R$  определяется как отношение амплитуды  $A_{отр}$  отраженной волны, к амплитуде  $A_{пад}$  падающей волны:

$$R = A_{отр}/A_{пад}.$$

Коэффициент прозрачности  $D$  это отношение амплитуд для прошедшей  $A_{пр}$  и падающей волн:

$$D = A_{пр}/A_{пад}.$$

Также определяются коэффициенты отражения и прозрачности по энергии, но вместо амплитуд в формулы входят значения энергий волн.

Чем больше разница (или отношение) волновых сопротивлений сред (произведений плотности среды на скорость звука в ней, см. п. 2.2), тем меньше доля прошедшей энергии и больше - отраженной. Например, при нормальном падении продольной волны на границу сталь - воздух (или воздух - сталь) проходит только 0,002% энергии, через границу сталь - вода проходит около 12% энергии, а оргстекло - сталь - 25% (отражается 75%). Это объясняется тем, что волновое сопротивление воды больше, чем воздуха, а у оргстекла - еще больше. Они последовательно приближаются к волновому сопротивлению стали.

Если волны проходят из одной твердой среды в другую через зазор, заполненный воздухом, то прохождение очень плохое, потому что для газа волновое сопротивление в тысячи раз меньше, чем у твердых тел. Это обстоятельство способствует хорошему обнаружению очень тонких несплошностей (дефектов) в твердом теле: УЗ волны от них практически полностью отражаются. Но это же затрудняет передачу УЗ волны от преобразователя в ОК.

Для передачи УЗ колебаний от преобразователя в ОК зазор между ними заполняют жидкостью - контактной средой, как рассмотрено в п. 1.8. Если контактная жидкость полностью заполняет зазор и слой ее тонкий (тоньше четверти длины волны), то прохождение вполне удовлетворительное.

При наклонном падении упругой волны на границу раздела двух сред происходит ее отражение и преломление, как для оптических волн (света).

Угол отражения  $\gamma$  (для волн того же типа) равен углу падения  $\beta$ , а угол преломления  $\alpha$  определяется законом Снеллиуса или законом синусов

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c'}{c} \quad \text{или} \quad \frac{\sin \beta}{c} = \frac{\sin \alpha}{c'},$$

где  $c$  и  $c'$  - скорости волн в первой и второй средах. Первая форма записи принята в оптике, а вторая более удобна в акустике, где существуют волны различных типов. Для всех этих волн отношение синуса угла (между направлением волны и нормалью к поверхности раздела) к скорости волны будет постоянной величиной.

Если нижняя среда - твердое тело, то в ней при падении упругой волны на границу возникает сразу две волны - продольная и поперечная. Явление превращения одного типа волн в другой называют трансформацией волн. Закон Снеллиуса остается справедливым для образовавшихся волн.

В УЗ контроле чаще всего встречается случай, когда падает продольная волна, а в результате преломления возникают продольная и поперечная волны, причем скорости обеих волн больше, чем падающей волны (рис. 2.3,б). Возникают также отраженные волны: продольная, если верхняя среда жидкая, продольная и поперечная, если верхняя среда твердая, как на рис. 2.3.

Будем увеличивать угол падения, тогда при некотором значении угла падения угол преломления для продольной волны будет равен  $90^\circ$  (рис. 2.3,в). Преломленная продольная волна будет распространяться вдоль поверхности. Она станет головной волной. Этот угол падения называют первым критическим. При еще больших углах падения (рис. 2.3,з) во второй среде останется только поперечная волна. При втором критическом угле (рис. 2.3,д) поперечная волна пойдет вдоль поверхности, т. е. обе преломленные волны испытают полное внутреннее отражение.

Критические углы рассчитывают по формуле

$$\beta = \arcsin(c/c'),$$

где  $c'$  - скорость продольной или поперечной преломленных волн. Наиболее распространенный способ возбуждения поперечных волн в изделии - с помощью преобразователя с призмой, угол которой лежит между первым и вторым критическими углами. Для границы органическое стекло (плексиглас) - сталь первый критический угол падения продольной волны в плексигласе равен  $27,5^\circ$ . При этом угол преломления для продольной волны равен  $90^\circ$ , а для поперечной волны  $\beta = \beta'$  будет  $33^\circ$ . Вторым критический угол  $\beta = \beta'' = 57,5^\circ$ .

Когда распространяющаяся в твердом теле волна падает на его поверхность, возникают также две отраженные волны. При падении на поверхность поперечной волны существует третий критический угол. При нем продольная отраженная волна сливается с поверхностью и отражается одна поперечная волна. Для стали угол  $\varphi' = 33^\circ$ .

Колебания частиц в поперечных волнах, возникающих в результате трансформации из продольной волны, происходит в той же плоскости, что

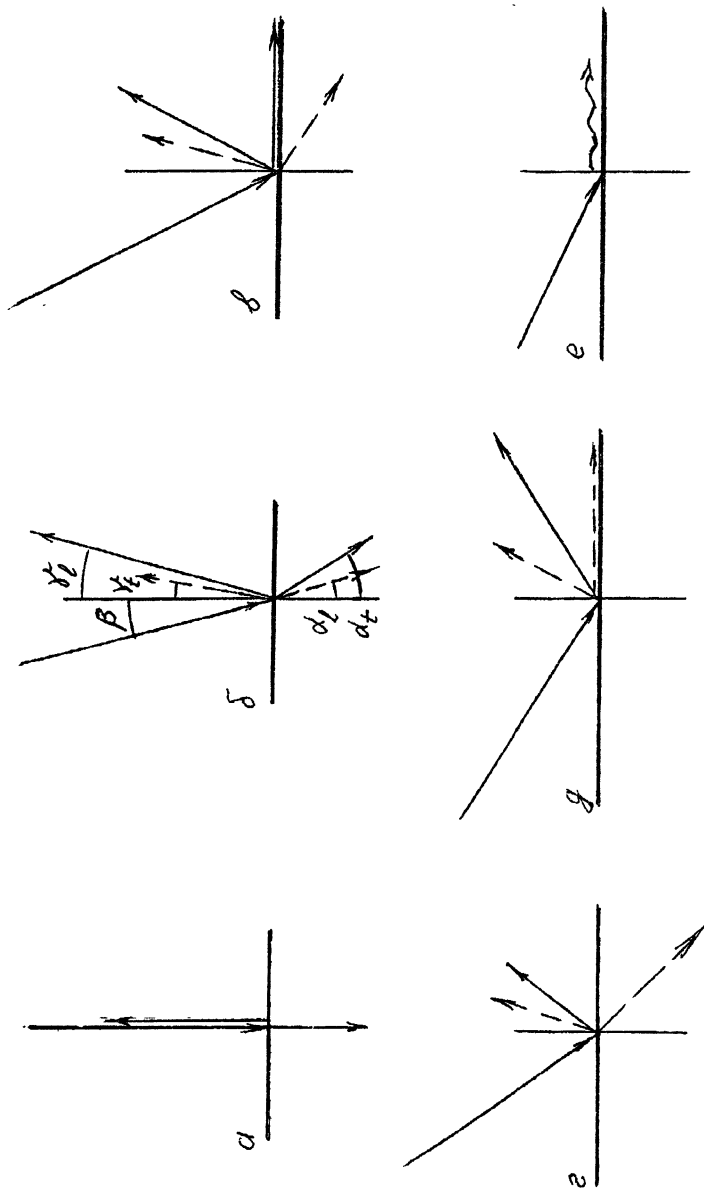


Рис. 2.3. Отражение, преломление и трансформация волн при падении продольной волны на границу оргстекло-сталь: сплошные линии - продольная волна; штриховые - поперечная волна, волнистая линия - поверхностная волна

и в продольной волне - в плоскости падения, т. е. в плоскости чертежа рис. 2.3. Такую поперечную волну называют волной с вертикальной поляризацией (также  $SV$  или  $TV$ -волной). В поперечной волне с горизонтальной поляризацией ( $SH$  или  $TH$ -волне) частицы колеблются в направлении, перпендикулярном плоскости падения на рис. 2.3. Такие волны можно возбудить только преобразователями специального типа.

2. При нормальном (т.е. перпендикулярном к границе) падении волны (рис. 2.3,*а*) коэффициенты отражения и прозрачности (для амплитуд колебаний) равны:

$$R = (z' - z)/(z' + z); \quad D = 2z/(z' + z),$$

где  $z$  и  $z'$  - волновые сопротивления первой и второй сред (см. п. 2.2), чаще всего - призмы и изделия.

В УЗ контроле мы передаем волны из призмы в изделие, а затем (при приеме) - из изделия в призму. В результате волна переходит границу призма - изделие дважды: в прямом и обратном направлениях. Коэффициент прозрачности в прямом и обратном направлениях равен

$$\tilde{D} = 4zz'/(z + z')^2.$$

Именно этот коэффициент прозрачности важен для УЗ контроля. Он же - коэффициент прозрачности по энергии. Заметим, что  $R^2$  - коэффициент отражения по энергии и в соответствии с законом сохранения энергии  $R^2 + \tilde{D} = 1$ .

Величины коэффициентов отражения и прозрачности при наклонном падении выражаются другими формулами, чем при нормальном. Для границы оргстекло - сталь и для других пар материалов, применяемых при УЗ контроле, графики коэффициентов приведены в [4], гл. 3. Отметим, что при первом критическом угле возбуждается головная волна, а при угле несколько большем второго критического (рис. 2.3,*е*) возникает поверхностная рэлеевская волна. Для границы оргстекло - сталь угол падения, при котором возбуждается эта волна, равен  $65^\circ$ .

Вблизи третьего критического угла  $\varphi'$  (несколько больше его) наблюдается явление незеркального отражения - происходит смещение отраженных лучей вдоль поверхности (рис. 2.4,*а*) вследствие переноса энергии головной волной. Точка отражения центрального луча не совпадает с точкой падения. Это явление тем заметнее, чем угол падения  $\varphi$  ближе к  $\varphi'$  и чем ниже частота. Например, для стали при угле падения  $35^\circ$  и частоте 2,5 МГц смещение составляет приблизительно 5 мм. На рис. 2.4,*б* показано, что лучи, которые по законам геометрического отражения не должны были отразиться от дефекта  $D$ , в результате явления незеркального отражения испытывают отражение от него.

Очень тонкий промежуточный слой слабо влияет на коэффициенты отражения и прозрачности. С увеличением толщины слоя  $h$  амплитуда прошедших и отраженных волн имеют максимумы и минимумы. Если

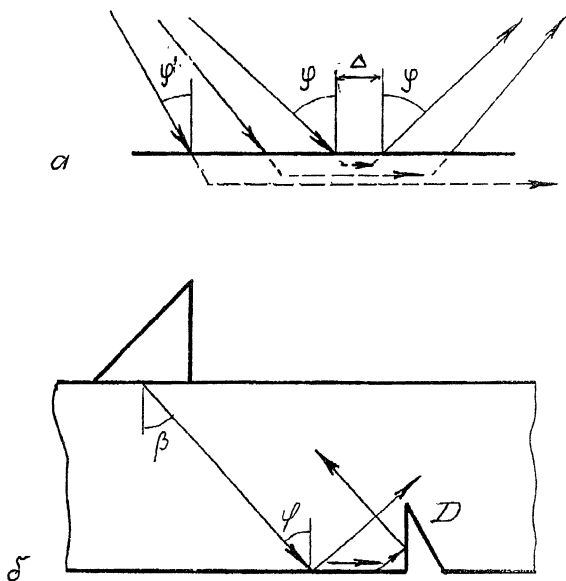


Рис. 2.4. Незеркальное отражение (а) и его влияние на отражение от поверхностного дефекта (б)

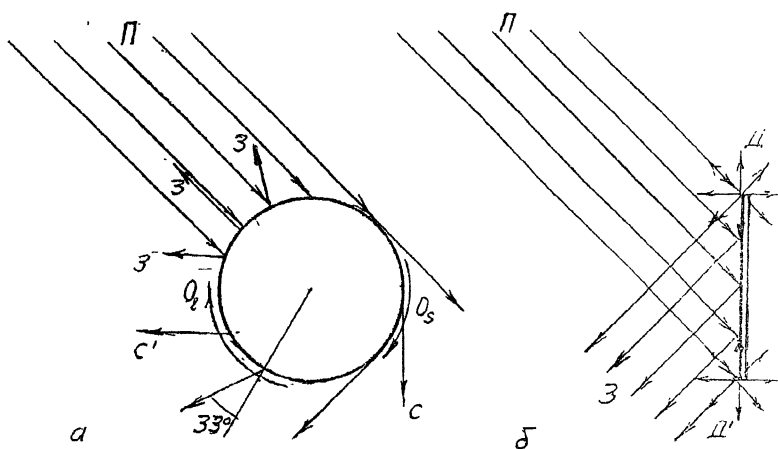


Рис. 2.5. Дифракция волн на объемном (а) и плоском (б) дефектах



волновое сопротивление слоя  $z'$  меньше ( или больше), чем обоих сред  $z$  и  $z''$ , то коэффициент отражения  $R$  больше или равен  $R$  в отсутствии слоя. Однако прохождение улучшается, если  $z'$  лежит в интервале между  $z$  и  $z''$ . Это явление называют просветлением границы. Максимальная прозрачность, т. е.  $D = 1$ , достигается при условиях:

$$h = \lambda' / 4, \quad z' = \sqrt{zz''},$$

где  $\lambda'$  - длина волны в слое.

## 2.4. Дифракция на препятствиях и рефракция

1. -

2. Понятие о дифракции и рефракции волн. Особенности дифракции на объемных и плоских дефектах.

2. Дифракция волн - это отклонения волн от геометрических законов распространения. Звуковые поля, созданные дифракцией исходной волны на препятствиях, называют дифракционными или рассеянными волнами.

При дифракции на объемных дефектах, которые удобно имитировать цилиндром (рис. 2.5,а), дифрагированные волны обтекают дефект и соскальзывают. Особенно хорошо волны обегания и соскальзывания наблюдаются при падении на дефект поперечной волны П с колебаниями в плоскости рисунка.

При диаметре цилиндра порядка длины волны основной тип волн обегания О, рэлеевская, волн соскальзывания С - поперечная, направленная по касательной к поверхности. При диаметре цилиндра значительно большем длины волны хорошо заметна также обтекающая головная волна О<sub>г</sub>. Волна соскальзывания С' при этом также поперечная, распространяющаяся под углом к поверхности, равном третьему критическому углу  $\phi'$ .

При дифракции на плоских (плоскостных) дефектах (рис. 2.5,б) дифракционные волны имеют вид расходящихся лучей от каждой точки края или ребра Д и Д' дефекта. Это и продольные и поперечные волны. Точки Д и Д' называют "блестящими" точками. Например, такие волны наблюдают от края трещины.

Дифрагированные волны складываются между собой и с волнами З, образовавшимися в соответствии с геометрическими законами. Происходит сложение волн с учетом их фаз - интерференция. В результате совпадения или несовпадения фаз этих волн возникают максимумы или минимумы суммарного сигнала (см. п. 6.1.5).

Рефракция - это преломление волн. Применительно к УЗ волнам под рефракцией понимают непрерывное изменение направления акустического луча в среде, скорость в которой изменяется. Рефракцию наблюдают, например, в аустенитном сварном шве и при распространении волн в поверхностно закаленном слое.

В последнем случае твердость  $HВ$  с глубиной увеличивается, а скорости звука уменьшается. В результате наклонные к поверхности УЗ лучи искривляются и даже выходят на поверхность ввода. Это явление используют для измерения глубины закаленного слоя.

## 2.5. Возбуждение и прием упругих волн электроакустическими преобразователями

1. Пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрические преобразователи. Понятие о рабочей частоте пьезопластины.

2. Лазерные и емкостные электроакустические преобразователи (ЭАП). Электромагнито-акустические (ЭМА) преобразователи для возбуждения и приема волн различных типов. Характеристики ПЭП: тип излучаемых волн, коэффициент преобразования при излучении, приеме и излучении-приеме (двойного преобразования), ширина полосы пропускания.

1. Возбуждение и прием упругих волн осуществляют путем преобразования электрических колебаний в акустические и затем обратно акустических в электрические с помощью небольшого устройства - преобразователя. Он подключается к дефектоскопу гибким коаксиальным кабелем, имеющим проводник в центре и экранирующую его оплетку.

Как правило, используют пьезоэлектрические преобразователи (пьезопреобразователи или ПЭП), в которых чувствительный элемент - пьезопластина. На нее подают электрические колебания от генератора дефектоскопа и под их действием она расширяется и сжимается по толщине (рис. 2.6,а). Прием происходит за счет обратного преобразования механических колебаний в электрические. Смещения граней пластины, показанные на рисунке, преувеличены. В действительности смещение не превосходит десятитысячной доли мм ( $10^{-4}$  мм). Преобразователь с такой пластиной прижимают к поверхности изделия через слой контактной жидкости. В результате в изделии возникают продольные волны, направленные под прямым углом к поверхности, поэтому такой преобразователь называют прямым.

Чтобы возбудить поперечные волны, можно заставить поверхности пьезопластины колебаться в направлениях, перпендикулярных ее толщине, т. е. совершать сдвиговые колебания (рис. 2.6,б), но такие колебания трудно передать в ОК: поверхность пластины будет проскальзывать относительно поверхности ОК и обычная контактная жидкость передать колебания не поможет. Преобразователь с такой пластиной приклеивают к поверхности ОК или используют очень вязкую контактную жидкость.

В УЗ дефектоскопии применяют более удобный способ возбуждения поперечных волн. Продольную волну возбуждают в промежуточной среде - призме (чаще всего из плексигласа или другой пластмассы) и направляют на поверхность ОК наклонно. Угол падения выбирают между первым и вторым критическими значениями (см. п. 2.3). В результате в изделии распространяется наклонная к поверхности поперечная волна. Такой преобразователь называют наклонным.

Если колебания в пластине возбудить коротким электрическим воздействием, а затем предоставить ей возможность колебаться свободно, то колебания будут происходить на собственной частоте  $f$ , которую часто не

вполне правильно называют резонансной. Она соответствует полутолщине пластины  $h$ , т. е. равной половине длины волны в ее материале

$$h = \lambda/2 = c/2f.$$

Из этого видно, что чем выше собственная частота, тем тоньше должна быть пластина. Под влиянием контактирующих с пластиной элементов эта частота немного изменяется. Частоту, которую возбуждает преобразователь, называют его рабочей частотой. Например, в пластине из цирконата титаната свинца (ЦТС) скорость  $c = 3,3$  мм/мкс, поэтому на частоте 2,5 МГц она должна иметь толщину  $h = 3,3/2,5 = 0,66$  мм, а на частоте 5 МГц - 0,33 мм.

Основные типы преобразователей (рис. 2.7): *a* - прямые, *b* - наклонные, *в* - раздельно-совмещенные (РС). Их основные конструктивные элементы:

- 1 - пьезопластина;
- 2 - демпфер, к которому приклеивается неизлучающая в ОК сторона пьезопластины и который способствует гашению (демпфированию) колебаний для получения короткого импульса;
- 3 - протектор, предохраняющий пьезопластину от повреждений;
- 4 - преломляющая призма;
- 5, 6 - призмы РС преобразователя. Более подробно назначение и конструкция преобразователей рассмотрены в п. 3.4.

2. В преобразователях для превращения электрической энергии в акустическую и обратно используют различные физические явления. Чаще всего используют пьезоэлектрический эффект, о котором сообщалось в подпункте 1. Прямой пьезоэффект состоит в появлении электрических зарядов при деформации пьезоэлемента, а обратный - в его деформации под действием электрического поля, т. е. пластина излучает благодаря обратному пьезоэффекту, а принимает - благодаря прямому.

Обычно при УЗ контроле применяют пьезоэлементы в форме пластин (пьезопластин) с токопроводящими (обычно серебряными) электродами на больших поверхностях. На электроды подают напряжение от генератора электрических колебаний и снимают сигналы, подаваемые на усилитель.

Свойства наиболее часто используемых пьезоматериалов приведены в [4], табл. 4.1. В настоящее время в России наиболее часто применяют ЦТС - синтетический пьезоматериал, который нужно поляризовать - выдерживать длительное время под большим постоянным напряжением, чтобы материал приобрел пьезосвойства. Если температура пьезопластины из ЦТС поднимется выше 290°C (точка Кюри) пластина располяризуется. Ранее применялся пьезоматериал титанат бария, у которого точка Кюри около 90°. Его часто приходилось поляризовать повторно.

Коэффициент преобразования при излучении - отношение амплитуд возбуждаемых акустических и возбуждающих электрических колебаний. Из пьезоэлектрических

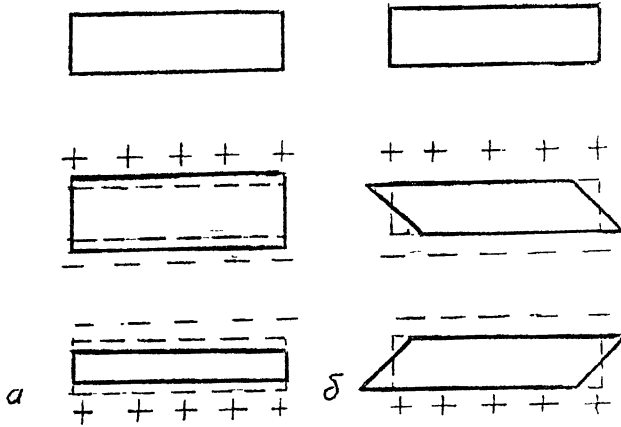
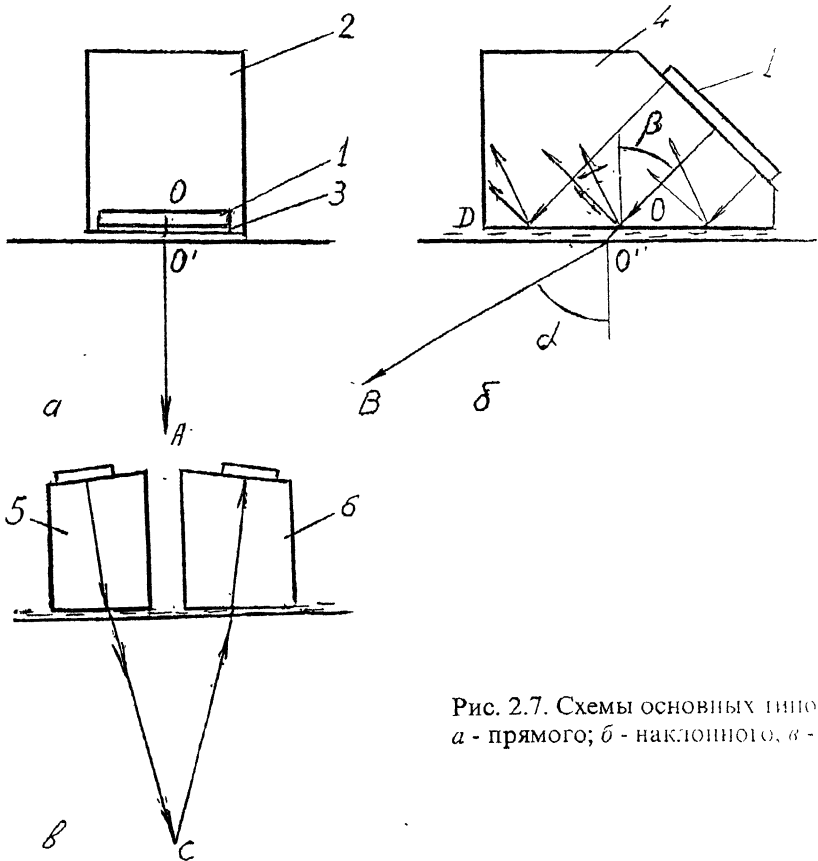


Рис. 2.6. Работа пьезопластины

Рис. 2.7. Схемы основных типов ПЭД:  
а - прямого; б - наклонного, в - РС

свойств материала его характеризует пьезоэлектрическая постоянная  $e$ , которая связывает электрическое напряжение генератора с механическим напряжением в пьезоматериале. Коэффициент преобразования при приеме - отношение амплитуд возбуждаемых на входе усилителя прибора электрических колебаний к акустическим колебаниям принимаемой волны. Его характеризует пьезоэлектрическая постоянная  $h = e/\epsilon$ , где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость пьезоматериала, от нее зависит электрическая емкость пьезопластины.

Для УЗ контроля наиболее важен коэффициент двойного преобразования  $K$  - отношение амплитуд электрических напряжений принятого и посланного сигналов без учета промежуточного ослабления УЗ. Именно эта величина определяет чувствительность пьезопреобразователя. Она пропорциональна квадрату коэффициента электромеханической связи  $\beta$ , который определяется произведением  $eh$ .

Недостаток синтетических пьезоматериалов - большое значение  $\epsilon$  и соответственно большая емкость пьезопластины. Если преобразователь раздельный, то пьезопластину приемника можно сделать из материала с малым  $\epsilon$  и увеличить чувствительность.

Характеризующий чувствительность преобразователя коэффициент двойного преобразования зависит не только от свойств материала пьезопластины, но также от соотношения волновых сопротивлений пьезопластины, демпфера и среды, в которую излучается УЗ, частоты и добротности электрического колебательного контура, соединенного с пьезопластинкой (чем выше добротность, тем медленнее затухают колебания). На рис. 2.8 в качестве примера показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) преобразователя из ЦТС для разных электрических добротностей  $Q_e$ . Рабочая частота  $f_0$  обычно соответствует максимуму коэффициента двойного преобразования. Она всегда близка к резонансной (точнее - собственной) частоте колебаний пьезопластины по толщине.

Ширина полосы пропускания частот определяется как  $\Delta f/f_0$ , где  $\Delta f = f_{max} - f_{min}$  - разница частот больших и меньших  $f_0$ , на которых коэффициент двойного преобразования уменьшается в два раза (см. рис. 2.8, внизу). Чем шире полоса пропускания, тем более короткие импульсы может излучать и принимать преобразователь. Искажение форм электрического зондирующего импульса и эхосигнала, показанное на рис. 2.1,г связано именно с недостаточной полосой пропускания ПЭП, примерно равной 0,2.

Широкополосность достигается согласованием параметров преобразователя и электрического колебательного контура, например, на рис. 2.8 максимальная широкополосность достигается при добротности электрического контура  $Q_e = 3,5$ . Ее также увеличивают путем подбора волнового сопротивления материала демпфера (он должен быть близким к волновому сопротивлению пьезопластины), применением просветляющего (см. п. 2.3) протектора и пьезопластины с низкой добротностью.

Особоширокополосные преобразователи (с отношением максимальной частоты к минимальной, равным 2 и более) имеют демпфер из материала с волновым сопротивлением таким же, как материал пьезопластины или пьезопластина имеет переменную толщину, т. е. размытое значение собственной частоты. В [4], п. 4.3 рассмотрены способы достижения максимальной чувствительности широкополосности преобразователей.

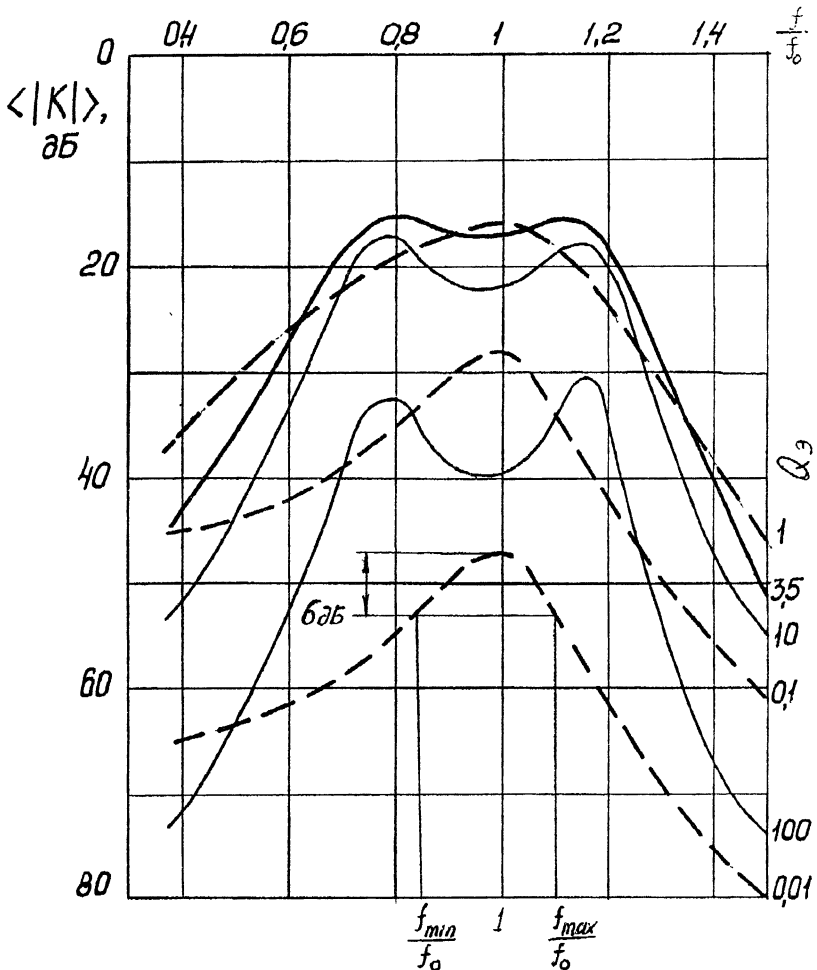


Рис. 2.8. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) для коэффициента двойного преобразования пластины из ЦТС, излучающей в призму из оргстекла. На нижней кривой пояснено определение полосы пропускания

Из других типов ЭАП наиболее перспективны ЭМА, лазерные и емкостные. Преимущество их перед ПЭП в бесконтактности, т. е. они не требуют контактной жидкости. В них преобразование электрической или тепловой энергии в упругие колебания поверхности изделия происходит в самом изделии. Важное достоинство ЭМА преобразователей - возможность излучения волн любых типов, как поясняется ниже.

В ЭМА преобразователях (рис. 2.9,а) основной используемый эффект - лоренцевское (электродинамическое) взаимодействие. Переменный ток  $I$  или  $I_1$  в катушках (в преобразователе делается только одна из этих катушек) индуцируют в электропроводящем ОК вихревые токи (токи Фуко). Они взаимодействуют с постоянным полем  $B$  магнита. От этого возбуждаются упругие колебания электронов в ОК, которые передаются кристаллической решетке. Направление упругих колебаний (направления смещения частиц ОК) показано стрелками. Оно перпендикулярно направлению тока и магнитного поля. В результате, если преобразователь имеет катушку с током  $I$ , которая размещена под полюсом магнита, где индуктивность магнитного поля  $B$  направлена перпендикулярно поверхности, то возбуждается поперечная Т-волна. Если катушка с током  $I_1$  размещена между полюсами магнита, где индуктивность направлена вдоль поверхности, то возбуждается продольная L-волна.

Наклонные к поверхности волны возбуждаются, если витки катушки с одинаковым направлением тока расположить на некотором расстоянии  $m$  друг друга (рис. 2.9,б). Угол ввода волны  $\alpha$  зависит от расстояния  $m$ :  $m \cdot \sin \alpha = \lambda$ . Электрический возбуждающий импульс подают так, чтобы раньше начал излучать первый виток слева, а последним - виток справа. В результате на поверхности ОК обеспечивается распределение фаз источников колебаний, требуемое для создания фронта наклонной волны (показан тонкой сплошной линией).

Рассматриваемые эффекты обратимы. Их используют также для приема УЗ. Коэффициент двойного преобразования ЭМА преобразователя в десятки тысяч раз меньше, чем ПЭП.

Схема лазерного преобразователя показана на рис. 2.10. Слева от ОК 2 показан лазерный излучатель 1. Его импульс нагревает локальный участок поверхности ОК. Быстрое тепловое расширение приводит к возникновению упругих колебаний. При большой интенсивности потока света от лазера происходит испарение частиц с поверхности ОК. Поверхность при этом движется в обратном направлении. Это еще усиливает колебания, амплитуда которых приближается к возбуждаемой ПЭП.

Лазерный интерференционный приемник показан справа от ОК на рис. 2.10. Луч от малоомощного лазера 5 раздваивается полупрозрачным зеркалом 4. Эти лучи отражаются от неподвижного зеркала 6 поверхности изделия 2, которая колеблется под действием падающей УЗ волны. Оба луча приходят на фотозлектронный умножитель 6, который показывают результат интерференции. Движение поверхности ОК изменяет соотношение фаз интерферирующих световых лучей, а, следовательно, амплитуду суммарного колебания. Таким же образом колеблется ток фотозлектронного умножителя. Чувствительность такого приемника в тысячи раз меньше, чем ПЭП.

Емкостной излучатель-приемник (рис. 2.11) использует электростатическое взаимодействие электрода-преобразователя П с изделием И. Постоянное напряжение  $U$  нужно для того, чтобы возбуждаемые смещения частиц были пропорциональны возбуждающему напряжению  $\sim U$ .

В [4], табл. 4.1, оценена чувствительность различных ЭАП. У всех бесконтактных преобразователей она в тысячи раз меньше, чем у ПЭП.

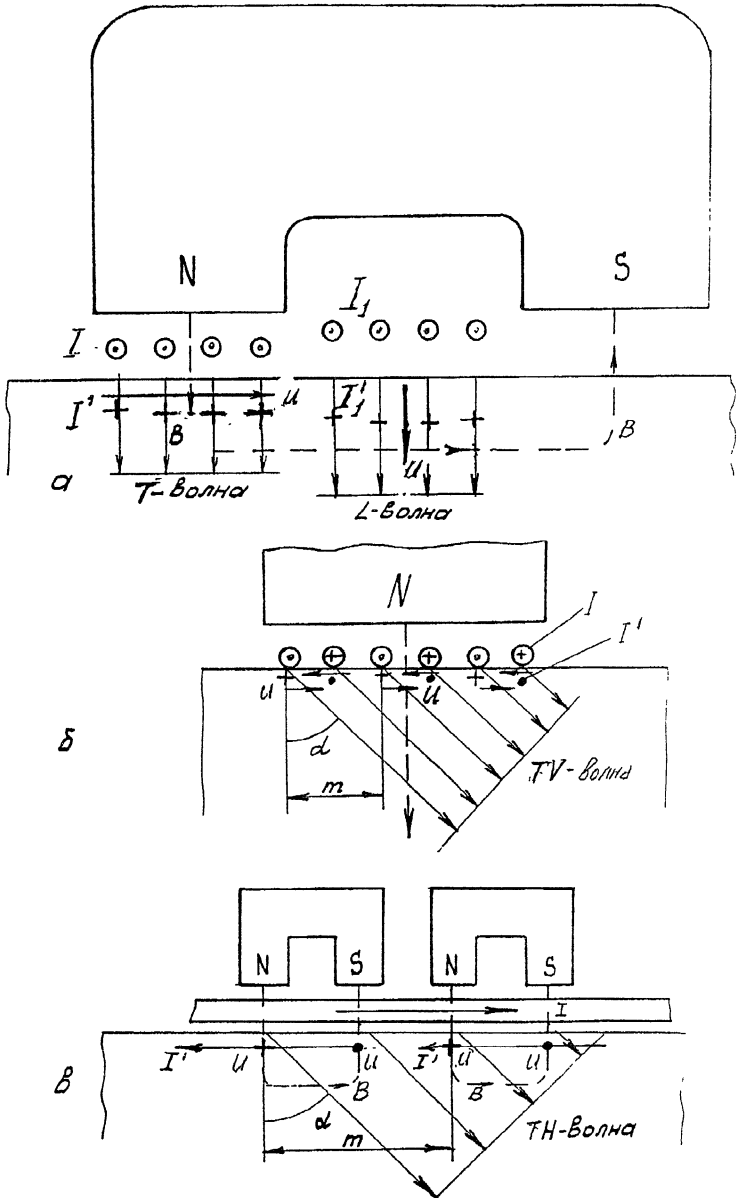


Рис. 2.9. Электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи. Токи  $I$  и  $I'$  и смещения направлены:  $\bullet$  - на читателя;  $+$  - от читателя



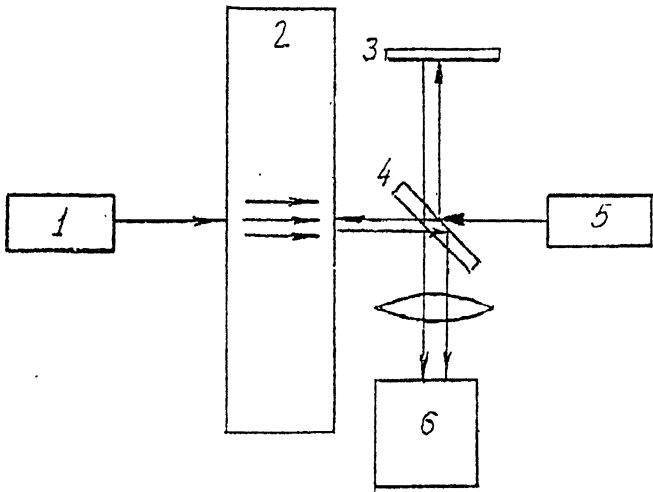


Рис. 2.10. Лазерный способ возбуждения и приема УЗ волн

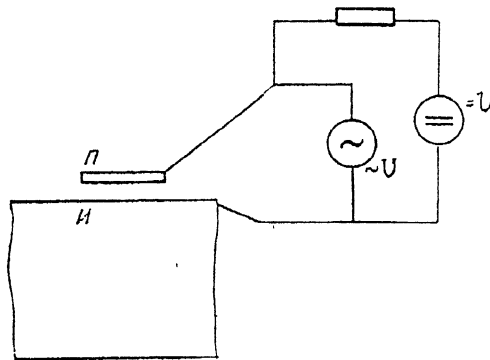


Рис. 2.11. Емкостный способ возбуждения и приема УЗ волн

Классификация преобразователей дана ниже по назначению и другим признакам.

а) **Способы соединения с электрической схемой.** Совмещенные преобразователи, в которых пьезоэлемент соединен одновременно с генератором и усилителем прибора и служат как для излучения, так и для приема УЗ. В отдельных преобразователях излучают и принимают ультразвук разные элементы, соединенные один с генератором, а другой с усилителем прибора. Они применяются совместно и предназначены для контроля теньвым или эхометодом с излучателем и приемником, расположенными на разных участках поверхности изделия. РС преобразователи состоят из излучающего и приемного элементов, объединенных в одном корпусе, но разделенных электрическим и акустическим экранами. Они обычно предназначены для выявления дефектов, близких к поверхности контроля тонких изделий.

б) **Направление излучения.** Прямые преобразователи излучают под прямым углом, а наклонные - наклонно к поверхности. Иногда угол наклона делают переменными.

в) **Тип излучаемых и принимаемых волн.** Прямые преобразователи излучают, как правило, продольные волны, наклонные - все типы волн в зависимости от угла наклона: поперечные, продольные (редко), рэлеевские, головные (для последних, как правило, применяют РС преобразователи), волны в пластинах и стержнях.

## 2.6. Акустическое поле преобразователя.

1. Понятия о ближней и дальней зонах поля преобразователя. Зависимость протяженности ближней зоны и направленности поля от размеров преобразователя, частоты и скорости звука в среде.

2. Диаграмма направленности. Расчет протяженности ближней зоны и угла раскрытия основного лепестка диаграммы направленности для круглого и прямоугольного преобразователей. Особенности поля наклонного преобразователя. Понятия акустических полей излучения, приема и излучения-приема.

1. Излучение преобразователя в среду описывается существенно различными закономерностями на близком и далеком расстояниях от преобразователя. В непосредственной близости от него ультразвук распространяется в виде параллельного пучка лучей, но чуть дальше картина резко изменяется. Энергия по-прежнему остается в пределах нерасходящегося пучка, но появляются максимумы и минимумы амплитуды (интенсивности). Вся эта область называется ближней зоной, ближним полем или зоной Френеля.

В дальней зоне (дальнем поле, зоне Фраунгофера) формируется расходящийся пучок лучей. Излучается как бы сферическая волна, но не во все стороны, а в пределах конуса. Максимум амплитуды соответствует оси преобразователя (акустическая ось или центральный луч). С увеличением угла между направлением какого-либо луча и осью амплитуда уменьшает-

ся. За пределами некоторого угла (угла раскрытия) излучение почти не чувствуются. Угол раскрытия определяет направленность излучения.

На рис 2.12,б схематически изображено поле излучения в ближней и дальней зонах, а на рис 2.12,а - изменение амплитуды излучения на оси. В ближней зоне амплитуда очень резко изменяется в зависимости от положения точки в пространстве, а в дальней зоне амплитуда плавно уменьшается с увеличением расстояния от преобразователя. Так же будет изменяться амплитуда сигнала, отраженного от небольшого дефекта. Чем крупнее дефект, тем больше сглаживаются изменения амплитуды эхосигнала в ближней зоне.

2. Поле излучения преобразователя - зависимость амплитуды излучения от положения исследуемой точки  $B$  в пространстве. Поле приема - зависимость амплитуды принятого преобразователем сигнала от положения в пространстве точечного источника. Поле излучения-приема - зависимость амплитуды принятого сигнала от положения в пространстве точечного отражателя, облучаемого тем же преобразователем. Обычно оно пропорционально квадрату поля излучения.

Возникновение максимумов и минимумов акустического поля в ближней зоне преобразователя объясняется следующим. Пьезопластину можно представить состоящей из большого количества маленьких излучателей. Расстояния от разных излучателей до некоторой точки  $B$  в ближней зоне могут сильно отличаться. Соответственно будут отличаться фазы приходящих сигналов. Если в точку  $B$  от двух одинаковых зон излучателя приходят сигналы, фазы которых противоположны (т. е. от одних излучателей поступают волны, требующие растяжения объема около точки  $B$ , а от других - его сжатия), то амплитуда в этой точке будет равна нулю.

Наиболее удаленный от преобразователя максимум определяет границу ближней зоны. Он расположен на оси преобразователя в точке  $x = N$  (рис. 2.12, а). В этом случае сигналы от всех точек преобразователя приходят в точку  $N$  не в противоположных фазах, т. е. волны будут приходить с различным опозданием, но не будет волн, требующих сжатия объема, когда волны от центральной точки преобразователя требуют его растяжения или наоборот. Для этого разность путей от краевой и центральной точки должна быть не больше  $\lambda/2$ , т. к. через  $\lambda/2$  фаза растяжения сменится фазой сжатия.

Если радиус  $a$  круглого преобразователя (точнее - его пьезопластины) значительно меньше расстояния  $N$  (что обычно выполняется), то разница путей легко вычисляется с достаточной точностью:

$$\sqrt{N^2 + a^2} - N \approx N + [a^2/(2N)] - N = \lambda/2.$$

Здесь использована формула для приближенного расчета корня.

Итак, для круглой пьезопластины радиусом  $a$  протяженность ближней зоны на оси преобразователя

$$N \approx a^2/\lambda.$$

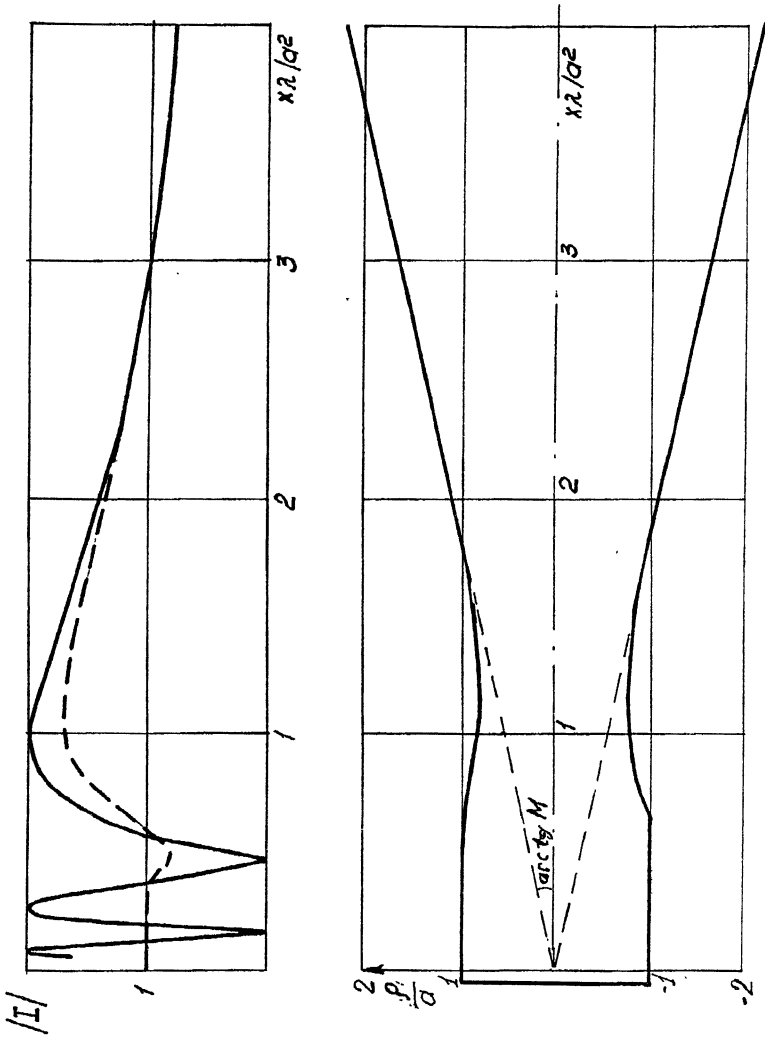


Рис. 2.12. Поле излучения на оси круглой пьезопластины (а) и схематическое изображение поля (б)

Для прямоугольного преобразователя с отношением сторон не более 2 протяженность ближней зоны приближенно равна

$$N \approx S/\pi\lambda,$$

где  $S$  - площадь пьезопластины.

Резкое изменения амплитуды эхосигнала в ближней зоне наблюдается лишь для небольших дефектов. Чем больше дефект, тем сильнее сглажены максимумы и минимумы эхосигналов от него. Донный сигнал от противоположной поверхности ОК остается в ближней зоне практически постоянным независимо от расстояния до отражающей поверхности. Это соответствует отмеченному ранее положению, что энергия излучения в ближней зоне практически концентрируется в пределах площади преобразователя. Сглаживание максимумов и минимумов присходит также при излучении коротких импульсов.

Выполнять оценку дефектов, находящихся в ближней зоне, трудно можно ошибиться в определении местоположения и количества дефектов. Например, на расстоянии  $N/2$  от преобразователя (в середине ближней зоны) поле имеет минимум на оси ПЭП, а в стороне - максимумы. При поиске и оценке дефектов по максимумам эхосигналов дефектоскопист, найдя в действительности один дефект, решит, что найдено два дефекта, расположенных по сторонам от истинного положения дефекта.

Исходя из изложенного, в России выпускают преобразователи с небольшой длиной ближней зоны. Например, прямой преобразователь на частоту  $f = 2,5$  МГц с диаметром  $2a = 12$  мм имеет длину ближней зоны  $N = a^2 f/c = 6^2 \times 2,5/5,9 \approx 15$  мм (5,9 мм/мкс - скорость продольных волн в стали). В других странах считают вполне возможным вести контроль в ближней зоне. Считают, что дефектоскопист должен знать особенности ближней зоны, учитывать их. Например, широко применяют преобразователь с  $f = 4$  МГц и  $2a = 24$  мм, для которого  $N \approx 100$  мм.

В дальней зоне появление максимумов и минимумов акустического поля под влиянием разности фаз проходящих волн происходит, только когда точка  $B$  находится в стороне от оси преобразователя. Основная часть поля имеет вид расходящихся конусом лучей. Амплитуда вдоль оси  $x$  уменьшается по закону  $S/(\lambda x)$ . Для некоторого расстояния  $x = r$  примем амплитуду излучения на оси равной 1. Для луча под углом  $\theta$  к оси амплитуда будет меньше и равна  $\Phi(\theta)$ . Зависимость амплитуды излучения от угла между лучом и осью называется диаграммой направленности. Графики для расчета диаграмм для круглого и прямоугольного преобразователей показаны в [4], рис. 5.3 и 5.4.

Угол  $\theta$ , при котором  $\Phi$  обращается в нуль, определяет угол раскрытия  $\theta_0$ . Его рассчитывают по формуле

$$\sin \theta_0 = n\lambda/a.$$

Здесь  $a$  - радиус круглого или полусторона прямоугольного преобразователя,  $n$  - численный коэффициент, равный для круглого преобразователя 0,61, а для прямоугольного - 0,5. Обычно считают, что когда амплитуда излучения-приема уменьшается в 10 раз (на 20 дБ), акустическое поле практически отсутствует. Для этого уровня угол раствора будем обозна-

чать  $\theta_{0,1}$  для него коэффициент  $n = 0,45$  и  $0,38$  для круглого и прямоугольного преобразователей соответственно. Для прямоугольного преобразователя направленность поля будет разной для каждой из сторон прямоугольника.

На рис. 2.13 показан пример диаграммы направленности в относительных единицах и децибелах. Сравнение графиков демонстрирует разницу масштабов в относительных единицах и дБ. Угол  $\theta_0$  ограничивает ее основной лепесток. За его пределами существует несколько боковых лепестков. В [4] табл. 5.1 приведены более полные данные о дальней зоне. Поля излучения, показанные на рис. 2.12,а и 2.13,б сплошными линиями, соответствуют импульсам очень большой длительности. Поля для реально применяемых коротких импульсов показаны штриховыми линиями. Видно, что максимумы и минимумы сглажены, нули и лепестки отсутствуют.

Ранее были приведены значения длины ближней зоны для двух преобразователей. Приведем для них же значения углов раскрытия. Для преобразователя, применяемого в России,  $\varphi_{0,1} = 11,3^\circ$ , а применяемого во многих других странах -  $\varphi_{0,1} = 3,5^\circ$  - расхождение лучей гораздо меньше, что удобно для контроля.

Поле наклонного преобразователя рассматривают в плоскостях параллельной и перпендикулярной акустической оси - преломленной геометрической оси пьезопластины. В ближней зоне максимумы и минимумы практически отсутствуют. В дальней зоне диаграмма направленности в параллельной плоскости (плоскости падения) тем шире, чем больше угол наклона. В перпендикулярной плоскости диаграмма направленности не зависит от угла наклона.

Приведем примеры для наклонных преобразователей на частоту 2,5 МГц с диаметром пьезопластины 12 мм (подобных рассмотренному выше прямому) и разными углами ввода. В дополнительной плоскости  $\theta_1 = 5,6^\circ$  независимо от угла ввода. По сравнению с прямым преобразователем угол уменьшился, поскольку уменьшились скорость волн и длина волны. Для преобразователя с углом ввода  $40^\circ$  угол раскрытия  $\theta_1 \approx 6^\circ$ ; с углом  $50^\circ$  -  $\theta_1 \approx 6,5^\circ$ ; с углом  $65^\circ$  -  $\theta_1 \approx 10^\circ$ .

## 2.7. Акустический тракт

1. Понятие об акустическом тракте. Качественные зависимости амплитуды эхосигнала от расстояния и диаметра плоскодонного отражателя (диска), амплитуды донного и сквозного сигнала от расстояния; ослабление донного и сквозного сигналов дефектами.

2. Расчет амплитуд эхосигналов от дефектов типа диска, сферы, протяженного цилиндра, плоскости с помощью формул и номограмм для прямого и наклонного совмещенных преобразователей. АРД диаграммы. Угловой эффект и расчет эхосигнала от углового отражателя и сегмента. Понятие об огибающей полезных сигналов при перемещении преобразователя для эхо, теневого и зеркально-теневого методов и их параметры. Понятие об индикатрисе рассеяния дефектов и ее влиянии на огибающие.

1. Акустическим трактом называют путь ультразвука от излучателя до дефекта и затем к приемнику. Формулы акустического тракта определяют ослабление ультразвукового сигнала на этом пути. В самом упрощенном виде можно сказать, что при контроле эхо-методом с увеличением

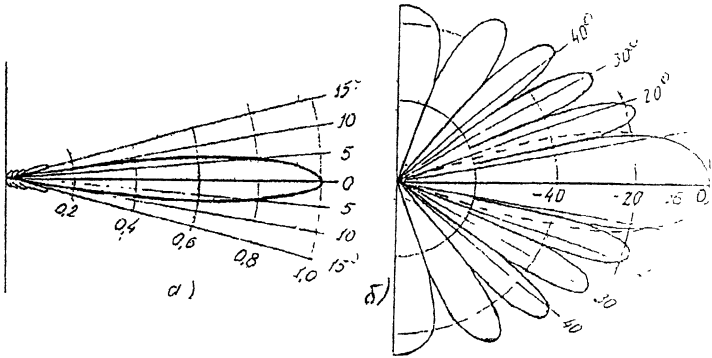


Рис. 2.13. Диаграмма направленности поля излучения круглой пьезопластины при отношении диаметра к длине волны равном 5  
*a* - в относительных единицах; *б* - в децибелах

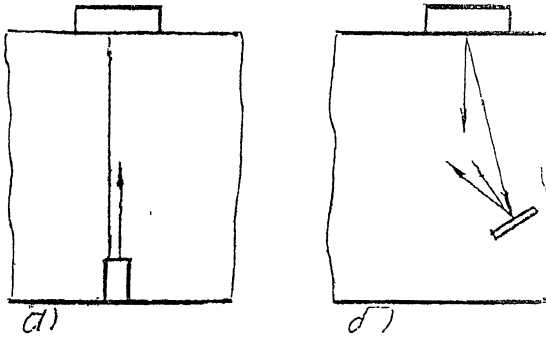


Рис. 2.14. Отражение от диска (плоскодонного отверстия) при перпендикулярном (*a*) и неперпендикулярном (*б*) падении УЗ во III

расстояния от дефекта и уменьшением его размеров амплитуда эхосигнала от него уменьшается. Это уменьшение с увеличением расстояния происходит особенно быстро для небольших отражателей и медленнее для протяженных, например, донного сигнала. Однако из этих общих правил имеет ряд исключений, о которых будет сказано позднее.

Амплитуда сквозного сигнала при контроле теньевым методом, так же, как донный сигнал, медленно уменьшается с увеличением расстояния между излучателем и приемником. Чем больше затеняющий дефект, тем сильнее ослабление амплитуд.

Отражатель плоской формы, например, диск (который при экспериментах заменяют искусственным дефектом в виде отверстия с плоским дном (рис. 2.14) такого же диаметра, как диск) даст больший эхосигнал, чем сфера того же диаметра, если он ориентирован так, что УЗ лучи отражаются к приемнику зеркально, т. е. при контроле совмещенным преобразователем лучи падают на отражатель перпендикулярно (*a*). В этом случае амплитуда растет пропорционально увеличению площади диска, конечно, до определенного предела. Но если такой отражатель наклонен (*b*), то зеркально отраженные лучи не попадают на совмещенный преобразователь. В результате амплитуда эхосигнала резко уменьшается. Это особенно заметно для большого диска, а для маленького влияние ориентации на амплитуду не так велико.

На амплитуду отражения влияет также то, чем заполнен дефект. Хорошо отражает ультразвук дефект, заполненный воздухом или другим газом, и гораздо хуже отражает дефект, заполненный окислом, плотным шлаком или другим твердым веществом. Плохо отражают ультразвук очень тонкие (раскрытием в сотую долю микрометра) воздушные промежутки, которые получаются при очень сильном сжатии металла. Тонкие окисные пленки практически не дают заметного отраженного сигнала.

2. Формулы для расчета амплитуд эхосигналов от некоторых отражателей (рис. 2.15), расположенных в дальней зоне, для прямого совмещенного преобразователя, имеют вид:

Для отражения от диска или отверстия с плоским дном площадью  $s$

$$\frac{A'}{A_0} = \frac{Ss}{r^2 \lambda^2} e^{-2\delta r}$$

Для отражения от сферы или отверстия со сферическим дном диаметром  $d$

$$\frac{A'}{A_0} = \frac{Sd}{4r^2 \lambda} e^{-2\delta r}$$

Для отражения от боковой поверхности цилиндрического отверстия диаметром  $d$

$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S}{\lambda} \sqrt{\frac{d}{8r^3}} e^{-2\delta r}$$

Для донного сигнала (плоскости)

$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S}{2r\lambda} e^{-2\delta r}$$



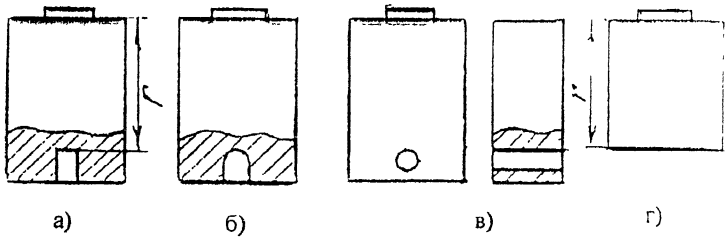


Рис. 2.15. Искусственные дефекты: а – плоскодонное отверстие; б – отверстие со сферическим дном; в – боковое цилиндрическое отверстие; г – плоскость (дно ОК)

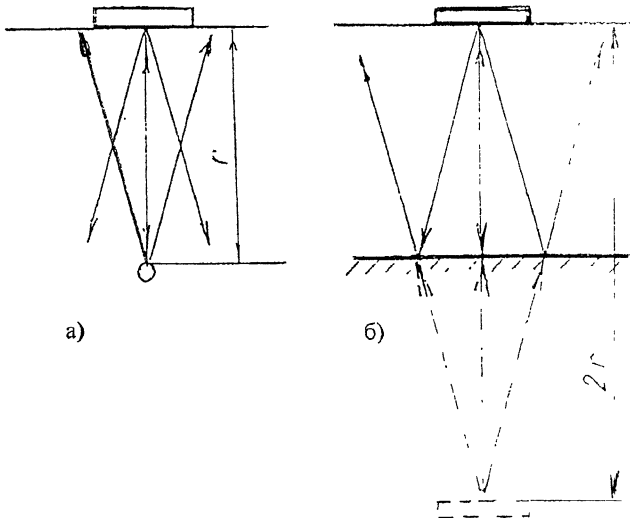


Рис. 2.16. К ослаблению амплитуды эхосигнала с расстоянием: для сферы (а); для плоскости (б)

Здесь  $A_0$  и  $A'$  - амплитуды излученного и принятого преобразователем сигналов;  $S$  - площадь пьезоэлемента преобразователя;  $r$  - расстояние от преобразователя до отражателя;  $\lambda$  - длина волны.

Это формулы для максимальных экосигналов, которые достигаются, когда отражатель находится на оси преобразователя и ориентирован перпендикулярно направлению УЗ лучей. Более полная сводка формул для расчета амплитуд экосигналов от различных отражателей в ближней и дальней зонах имеется в [4], табл. 6.1. Поясним физический смысл этих формул. Площадь преобразователя входит в числитель всех формул, потому что лучи от преобразователя расходятся в виде диаграммы направленности и угол расхождения лучей тем меньше, чем больше площадь преобразователя. Дiskoобразный отражатель подобен излучающему преобразователю. От него лучи также расходятся в виде диаграммы направленности, поэтому площадь диска входит в числитель первой формулы.

Сравнение формул показывает, что ослабление донного сигнала с расстоянием происходит медленно (пропорционально  $1/r$ ), чем экосигнала от диска или сферы (пропорционально  $1/r^2$ ). Ослабление экосигнала от цилиндра - в промежутке между ними (по закону  $1/r^{3/2}$ ). Такие закономерности объясняются следующим. Лучи от излучателя расходятся, поэтому амплитуда убывает как  $1/r$ . Диск или сфера - как бы вторичные излучатели. Попавший на них сигнал переизлучается в обратном направлении (рис. 2.16,а), поэтому амплитуда опять убывает как  $1/r$ . В итоге ослабление пропорционально  $1/r^2$ .

Донная поверхность играет роль зеркала (рис. 2.16,б). Отраженные от него лучи можно рассматривать как излученные мнимым излучателем, показанным штриховыми линиями. Расстояние от него до приемника -  $2r$ . Именно по закону  $1/2r$  убывает донный сигнал. Цилиндр в плоскости, перпендикулярной оси, - маленький отражатель, лучи от которого расходятся как от сферы. В плоскости вдоль оси - отражение происходит как от зеркала. Отсюда закономерность  $1/r^{3/2}$ .

Ослабление сигнала  $A'/A_0$ , определяемое приведенными формулами, называют дифракционным ослаблением. Дополнительное ослабление отношения  $A'/A_0$  вносит затухание ультразвука (см. п. 2.2). Чтобы учесть его все формулы умножены на  $\exp(-2\delta r)$ , где  $\delta$  - коэффициент затухания. В показателе степени появилась цифра 2, поскольку ультразвук проходит путь до отражателя и обратно.

Приведенные формулы справедливы, только когда диаметры диска, сферы или цилиндра больше половины длины волны. Если они меньше половины длины волны, то амплитуда отражения с уменьшением диаметра убывает, как правило, быстрее (см. [4], п. 6.1) в результате дифракционного огибания дефекта волнами. С учетом этого говорят, что дефекты, меньшие длины волны, плохо выявляются. Для отражения от плоскодонного отверстия или отверстия со сферическим дном формулы остаются справедливыми, даже если их диаметры меньше длины волны, т. к. боковые стенки препятствуют огибанию.

Формула для отражения от диска (плоскодонного отверстия) справедлива, когда его диаметр значительно меньше диаметра преобразователя. Расчет отражения от диска любого диаметра (большого  $\lambda$ ) выполняют по диаграмме амплитуда - расстояние - диаметр - АРД диаграмме (рис. 2.17). На оси ординат отложена амплитуда сигнала  $A/A_0$  в дБ. На оси абсцисс - расстояние преобразователь - дефект, за 1 принята протяженность ближней зоны ПЭП. Параметр семейства кривых - отношение диаметров диска и преобразователя.

Показанная АРД диаграмма построена в безразмерных величинах. Для преобразователя, имеющего определенные диаметр и протяженность ближней зоны, строят размерную АРД диаграмму (см. п. п. 4.3, 6.1.1.) По ней удобно рассчитать амплитуду сигнала для диска заданного диаметра на заданном расстоянии или, наоборот, - диаметр по заданным амплитуде и расстоянию. В [4], п. 6.2 даны примеры построения и применения диаграмм.

Для наклонного преобразователя пригодны те же формулы и диаграмма, но размер пьезоэлемента в основной плоскости считают уменьшенным в  $\cos \alpha / \cos \beta$  раз, где  $\beta$  - угол призмы, а  $\alpha$  - угол ввода (рис. 2 18). Более точные формулы и примеры расчетов приведены в [4] п. 5.2.

При контроле наклонным преобразователем важное значение имеет угловой эффект. Он заключается в получении большой амплитуды эхосигнала от дефекта вблизи поверхности изделия благодаря двукратному отражению ультразвука от этой поверхности и дефекта. На рис. 2.19 показаны два таких отражателя: двугранный угол (а) и зарубка (б). При использовании поперечных волн амплитуда от первого из них равна амплитуде дочного сигнала, умноженной на коэффициент  $G'$  (кривая  $\infty$  на рис.2.20), а от второго - амплитуде эхосигнала от диска, площадь которого равна площади отражающей грани зарубки  $s'$ , умноженной на коэффициент  $G$ , т. е.  $s = Gs'$ . При этом глубина зарубки должна быть больше 1,2 длины поперечной волны.

Кривые изменения этих коэффициентов (рис. 2.20) зависят от угла падения на поверхность  $\varphi$ . Для ОК с плоскопараллельными поверхностями  $\varphi = \alpha$  - углу ввода преобразователя. Кривые построены экспериментально и учитывают эффекты трансформации волн и незеркального отражения (см. п. 2.3). Трансформация поперечной волны в продольную на вертикальной поверхности отражателя возникает, когда угол падения на нее  $90^\circ - \varphi$  больше, чем третий критический угол  $\varphi'$  (для стали  $\varphi' = 33^\circ$ ). Это вызывает резкое уменьшение  $G$  при углах  $\varphi \approx 60... 67^\circ$ . Незеркальное отражение увеличивает эхосигнал от неглубоких зарубок при углах  $\varphi = 35 - 50^\circ$ , несколько больших третьего критического значения  $33^\circ$ . В этой области кривая  $G$  зависит от глубины зарубки (указана на кривых в мм). Обычно зарубки как искусственные отражатели применяют при углах  $\varphi > 50^\circ$ , где зависимость  $G(\varphi)$  однозначна.

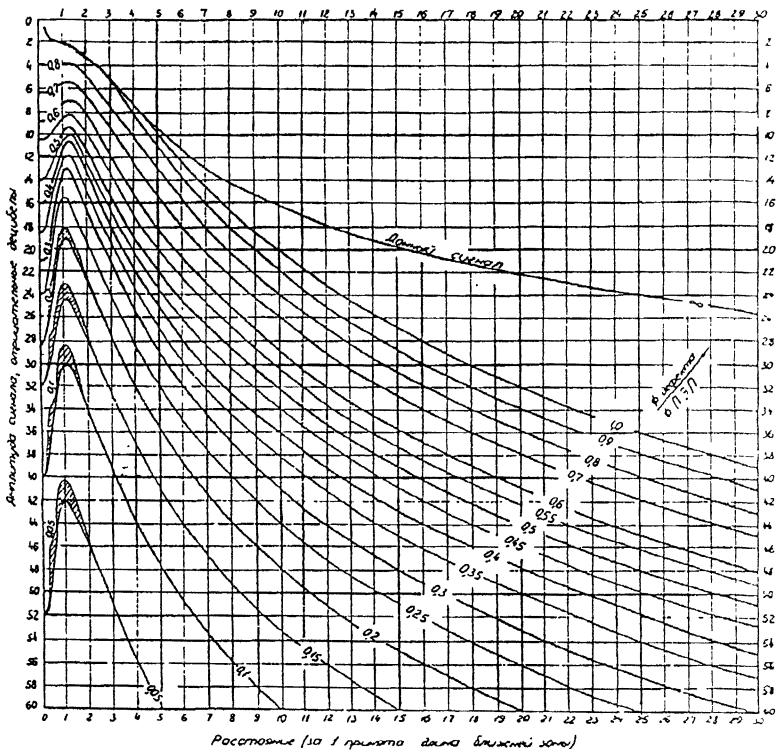


Рис. 2.17. Безразмерная АРД диаграмма

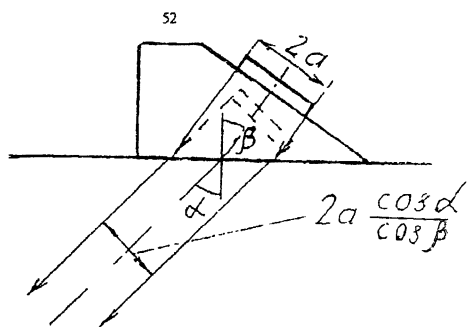


Рис. 2.18. Схема расчета акустического тракта наклонного ПЭП

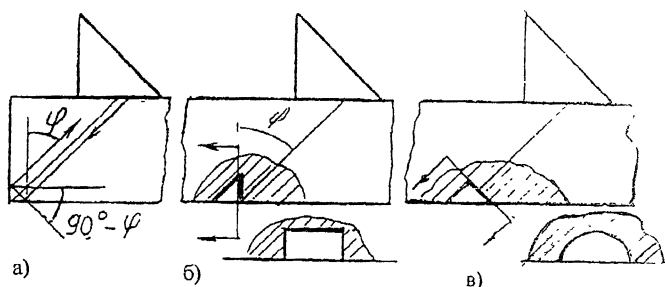


Рис. 2.19. Двугранный угол (а), зарубка (б), сегментный отражатель (в)

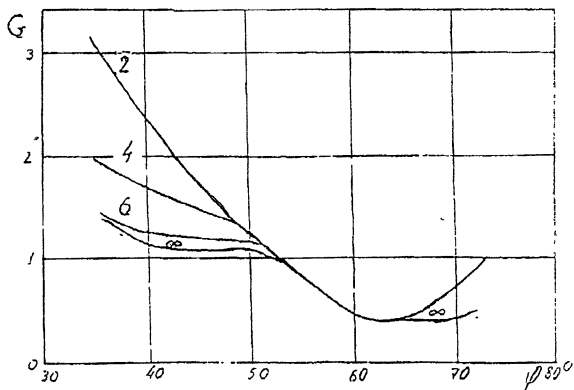


Рис. 2.20. Пересчетные коэффициенты  $G$  и  $G'$  для расчета эквивалента от угловых отражателей

Сегментный отражатель (рис. 2.19,б) имеет отражающую грань, перпендикулярную направлению акустической оси. Эхосигнал от него такой же, как от диска равной площади. Экспериментально это подтверждено только для поперечных волн и углов  $\alpha = 45 - 55^\circ$ .

При перемещении преобразователя над дефектом (рис. 2.21) амплитуда эхосигнала изменяется. Расстояние от преобразователя до отражателя и время пробега импульса  $t$  также будет изменяться. Соответственно перемещается эхосигнал на линии развертки. Линия, соединяющая вершины эхосигналов на экране дефектоскопа при перемещении преобразователя, называется временной огибающей. Изменение амплитуды эхосигнала в функции от перемещения преобразователя по поверхности изделия  $x$  называется огибающей по перемещению или пространственной огибающей. На рис. 2.21, а и б огибающие по времени  $t$  показаны сплошными линиями, а по перемещению  $x$  - пунктирными. Пространственная огибающая позволяет судить о протяженности дефекта.

Сравнение временной и пространственной огибающих дает важные сведения о дефекте особенно при контроле наклонным преобразователем (рис. 2.21,в). Если дефект развит по высоте (такие дефекты часто бывают трещинами, и они наиболее опасны), то при движении преобразователя расстояние от него до дефекта будет сильно изменяться и временная огибающая расширится. Если дефект горизонтальный (расслоение), то расстояние от преобразователя до него будет оставаться практически постоянным и временная огибающая будет узкой. Пространственные огибающие для обоих дефектов будут практически одинаковыми. Чтобы учесть ширину временной огибающей, возникающей вследствие раскрытия диаграммы направленности преобразователя, временную огибающую от дефекта сравнивают с временной огибающей от бокового цилиндрического отверстия, расположенного на той же глубине (рис. 2.21,г).

Аналогичным образом используют наблюдение за изменением амплитуды сквозного или донного сигналов при контроле теньевым или зеркально-теньевым методами. Временные огибающие в этих случаях отсутствуют, а по пространственным огибающим судят о протяженности дефекта.

## 2.8. Шумы и помехи при контроле методами отражения и прохождения.

1. Понятие об основных видах помех для эхо-, теневого и зеркально-теневого методов.

2. Количественные оценки уровня помех для методов, использование которых предусмотрено в деятельности аттестуемого. Способы выделения полезных сигналов на фоне помех и способы подавления и ослабления помех.

1. Помехами называют возмущения, накладывающиеся на принимаемый сигнал и мешающие его приему. Шумом называют помехи, случайные по времени прихода. Помехи для эхо-метода следующие:

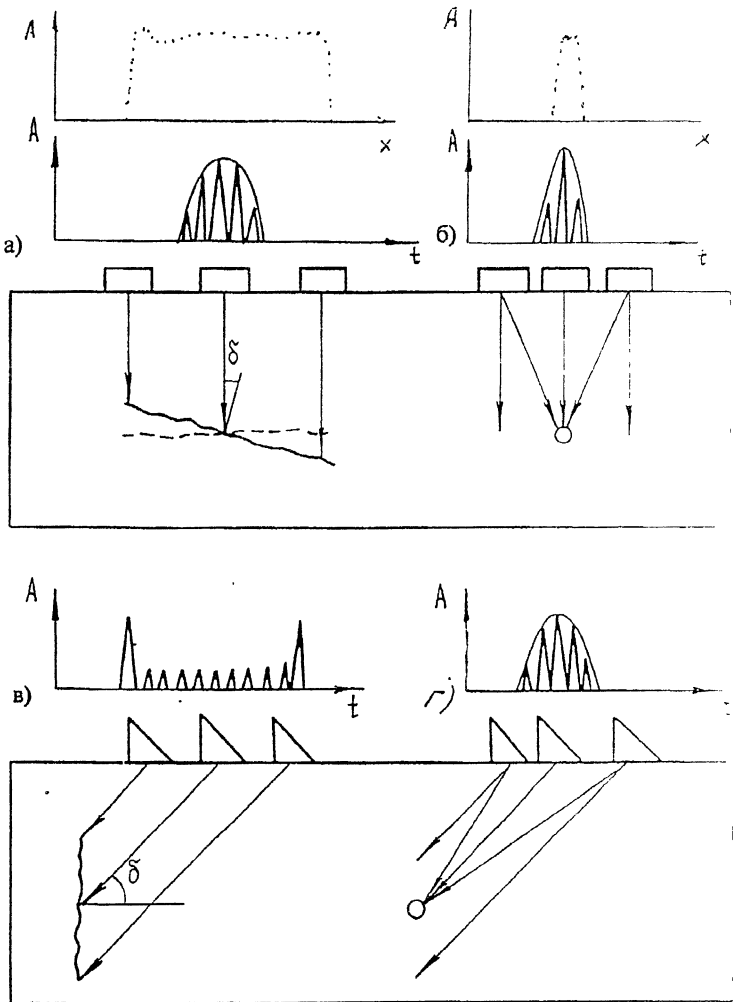


Рис. 2.21. Огибающие при перемещении ПЭП над разными видами дефектами

а. Внешние шумы электрические (от выключателей, сварочных аппаратов и т. п.) и акустические (удары по контролируемому изделию). Они видны на экране дефектоскопа как случайно появляющиеся импульсы только при большом их количестве, но всегда оказывают мешающее действие на сигнализатор дефектов при автоматическом контроле. Когда эти шумы появляются редко, их не замечают

б. Тепловые шумы электрических элементов (сопротивлений, транзисторов и т. п.) на входе приемника дефектоскопа. Видны на экране приемника при большом усилении как увеличение толщины или размытие линий развертки.

в. Помехи преобразователя - отражения в протекторе, демпфере, призме. Они видны как импульсы, следующие после зондирующего. При контроле по РС преобразователем это может быть сигнал от поверхностной волны между излучателем и приемником. При контакте преобразователя с каким-либо объектом (изделием, пальцем дефектоскописта) помехи ПЭП изменяют свою амплитуду, но сохраняют положение на линии развертки.

г. Ложные сигналы от выточек, выемок на поверхности изделия, например, от неровностей сварного шва. Эти сигналы перемещаются по линии развертки (как и сигналы от дефектов) при движении преобразователя. При нажатии пальцем, смоченным маслом, на участок поверхности, от которого отражается или по которому проходит волна (пальпировании), эти сигналы уменьшают свою амплитуду, так как часть энергии ультразвука переходит в палец. Если колебания в волне происходят вдоль поверхности, к которой прикасаются пальцем, то ложный сигнал при пальпировании не изменяют своей амплитуды, например, головная волна нечувствительна к прикосновению.

д. Структурные помехи связаны с рассеянием УЗ на структурных неоднородностях, зернах материала. Если помехи образуются в результате сложения отражений от большого количества мелких зерен, то на экране они изображаются в виде большого количества импульсов, беспорядочно изменяющихся по амплитуде и положению на линии развертки при движении преобразователя по поверхности изделия. Материалы, состоящие из крупных сильно отражающих ультразвук зерен (например, литая нержавеющая сталь) дают сигналы, похожие на сигналы от дефектов. Такие материалы контролировать эхометодом не удастся.

е. Ложные сигналы от предыдущей посылки зондирующего импульса. В материале с малым затуханием ранее посланный импульс не успеваает в достаточной мере ослабиться, и какое-то его отражение в ОК видно на экране во время излучения следующего зондирующего импульса и приема эхосигналов с ним связанных. Эти помехи устраняют, уменьшая частоту посылок.

При контроле теньвым методом существуют помехи, вызываемые факторами а, б, д и е, однако главными будут помехи, влияющие на изменение амплитуды сквозного сигнала (для амплитудного метода) или на



время его прихода (для временного метода). Изменение амплитуды происходит под влиянием нестабильности акустического контакта, поэтому этот метод применяют чаще всего в иммерсионном варианте. На изменение амплитуды влияет также непараллельность поверхностей изделия, поэтому амплитудным теневым методом контролируют изделия простой формы. Изменение времени прихода сквозного сигнала происходит в результате нестабильности скорости ультразвука.

Контроль зеркально-теневым методом затрудняют помехи, присущие как эхо-, так и теневому амплитудному методам. Очень мешает контролю изменение отражающих свойств донной поверхности, например, ее коррозия.

2. Оценим уровень перечисленных выше помех и дадим рекомендации по их распознаванию и подавлению в дополнение к указанным ранее. Уровень внешних шумов обычно значительно выше, чем полезных сигналов. Акустические шумы возникают довольно редко. Для уменьшения электрических шумов аппаратуру нужно экранизировать электропроводящим корпусом, а корпус заземлить. Автоматический сигнализатор дефектов настраивают так, чтобы он отмечал только регулярно повторяющиеся сигналы, приходящие на один и тот же участок линии развертки. Вероятность того, что внешние шумы при этом будут зафиксированы тем меньше, чем больше число импульсов, от которых срабатывает сигнализатор дефектов. Однако увеличение числа импульсов уменьшает производительность автоматического контроля.

Тепловые шумы обычно имеют малую величину - порядка  $10^{-5}$  В. Они ограничивают минимальный электрический сигнал, регистрируемый дефектоскопом. Для уменьшения их применяют корреляционные методы обработки сигналов в самых совершенных дефектоскопах.

Помехи преобразователя вблизи зондирующего импульса очень велики, но с увеличением расстояния от зондирующего импульса быстро уменьшаются до нуля. Полезный сигнал на фоне этих помех можно отличить, используя то, что он перемещается по линии развертки во время движения преобразователя. Эти помехи уменьшают, совершенствуя конструкцию преобразователя. Они минимальны для РС преобразователей.

Ложные сигналы могут быть соизмеримы с полезными. Их уменьшают, изменяя схему контроля. Например, сигнал от неровностей поверхности сварного шва обычно уменьшаются при увеличении угла ввода (см. п. 7.11). Их отличают от полезных сигналов, точно определяя координаты отражателя. Если от ложных сигналов не удастся избавиться таким образом, то выделяют участок линии развертки, где они появляются, и фиксируют полезные сигналы, только если они больше ложных на этом участке.

Структурные помехи в некоторых металлах (вольфрам, алюминий), отсутствует или очень малы, т. к. мала упругая анизотропия: скорость звука одинакова (вольфрам) или почти одинакова (алюминий) по всем направлениям в кристалле металла и отражения от границ зерен не происходит. Структурные помехи также малы в мелкозернистых металлах, когда

размеры зерен значительно меньше длины волны ультразвука. Измельчение структуры происходит при обработке давлением (ковке, прокатке), а для углеродистой стали - при термообработке типа закалки. В анизотропных крупнокристаллических металлах, например, меди, аустенитной (нержавеющей) стали структурные помехи могут превышать донный сигнал. Считают, что УЗ контроль возможен, если полезный сигнал, по крайней мере, вдвое выше структурных помех. Для снижения уровня структурных помех применяют продольные волны вместо поперечных, РС преобразователи, преобразователи большого диаметра (в дальней зоне) и фокусирующие (в ближней зоне), сокращают длительность импульса, вместо эхо применяют теневой (особенно временной теневой) метод на пониженных частотах (см. п. 7.4).

При контроле теневым и зеркально-теневым методами помехой является всякое изменение амплитуд сквозного или донного сигналов, не связанное с наличием дефектов. В частности, принимают меры для стабилизации акустического контакта преобразователя с поверхностью ввода изделия. Например, применяют иммерсионный способ контакта, бесконтактные преобразователи. Изделия с непараллельными поверхностями, угол между которыми изменяется (например, поверхности с грубыми неровностями послековки), контролируют преобразователями с большим углом расхождения. Тогда велика вероятность, что найдется луч из расходящегося пучка, для которого условия прохождения через поверхности изделия и отражения от его дна будут благоприятными, а это будет способствовать стабилизации амплитуд сквозного или донного сигналов. Для ЗТ метода непреодолимая помеха связана с неровностью (например, коррозией) донной поверхности.

## 2.9. Акустическая эмиссия (АЭ).

1. -

### 2. Основные параметры сигналов АЭ.

2. Как отмечалось в предисловии, по акустикоэмиссионному методу контроля составлена отдельная программа обучения. Цель данного раздела - повысить эрудированность специалистов второго уровня. Понятие об АЭ и о соответствующем методе даны в п. 1.7.

Основные параметры сигналов АЭ следующие:

- Число импульсов за время наблюдения;
- Активность, равная количеству импульсов за некоторый интервал наблюдения (обычно 1 с).

Фактически регистрируют не все сигналы АЭ, а лишь превышающие определенный порог  $U_n$  (рис. 2.22,б). Тогда параметры эмиссии называют: суммарный счет и скорость счета. Для характеристики процесса АЭ важно не только количество импульсов, но также их амплитуда. Параметром, учитывающим обе величины, является эффективное значение АЭ, равное произведению активности (или скорости счета) АЭ на среднее значение амплитуды сигналов за единицу времени. Определяют также координаты источника АЭ (см. п. 1.7). Наибольшие затруднения при контроле акустикоэмиссионным методом вызывает отстройка от помех, о которых говорилось в п. 1.7, и выработка критериев, когда сигналы АЭ являются предвестниками разрушения ОК.

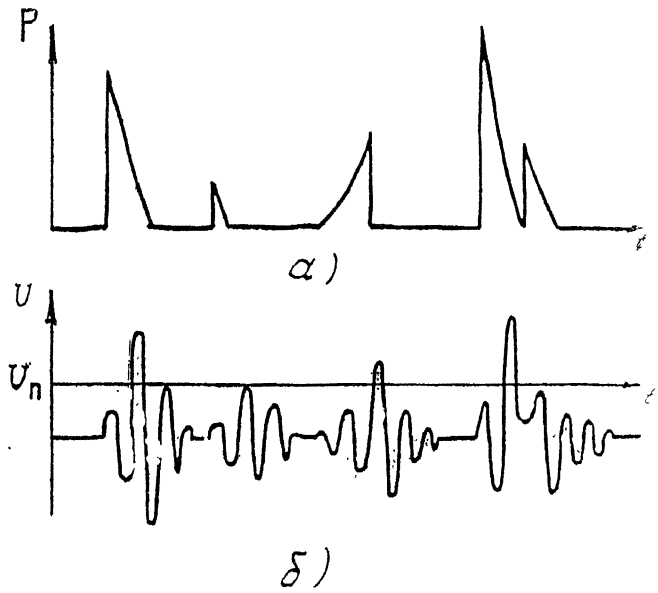


Рис. 2.22. Форма первичных импульсов акустической эмиссии ( $\alpha$ ) и сигналы на входе приемника ( $\delta$ )

### 3. АППАРАТУРА АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

#### 3.1. Классификация приборов.

1. Тип и назначение прибора, с которым предусмотрена работа аттестуемого.

2. Классификация приборов по назначению: дефектоскопы, структуроскопы, толщиномеры, анализаторы физико-механических характеристик материалов.

1. Тип и назначение прибора, а также область его применения следует выбрать в соответствии с указаниями подпункта 2. Например, импульсный ультразвуковой толщиномер для измерения толщин стенок изделий в диапазоне 0,6 - 1000 мм с точностью около 0,1 мм. Данные взять из технических характеристик прибора, с которым предусмотрена работа аттестуемого.

2. По назначению ультразвуковые приборы (как и другие приборы неразрушающего контроля) подразделяют на:

Дефектоскопы, предназначенные для обнаружения дефектов типа несплошностей;

Толщиномеры, предназначенные для измерения толщины стенок изделий при доступе с одной стороны или для контроля толщины слоев, покрытий на поверхности изделий;

Анализаторы физико-механических характеристик материалов, например, структуроскопы (для определения средних размеров зерен металла, формы графитовых включений в чугунах), твердомеры (для измерения твердости поверхности материалов акустическими способами), тензометры (для измерения напряжений и деформаций в изделии по изменению скорости ультразвука), измерителя упругих свойств и прочности (также по скорости ультразвука) и другие. Часто все приборы этого назначения объединяют названием структуроскопы.

#### 3.2. Импульсный эходефектоскоп.

1. Структурная схема, функции ее узлов. Работа с совмещенным, раздельным и РС преобразователями.

2. Основные узлы структурной схемы дефектоскопа. Вспомогательные узлы в схеме дефектоскопа.

1. Упрощенная структурная схема импульсного дефектоскопа УД2-12 и функции ее основных узлов рассмотрены в п. 1.2 (см. рис. 1.2). Более полная структурная схема дефектоскопа показана на рис. 3.1. На ней нумерация основных узлов схемы такая же, как на рис. 1.2. Введен ряд вспомогательных узлов, а именно:

10 и 11 - автоматический сигнализатор дефектов (АСД), предназначен для подачи звукового, светового сигналов или выполнения отметки на

изделии или ленте самописца при появлении сигнала от дефектов. Генератор стробирующих импульсов 10 формирует импульсы, которыми выделяют интервал линии развертки, где могут появиться импульсы от дефектов, а блок 11 - собственно сигнализатор. Три цветных лампы сигнализатора соответствуют трем уровням по высоте эхосигнала. Настройка АСД рассмотрена в п. 3.3. Некоторые типы приборов имеют несколько АСД для наблюдения за разными участками развертки.

12 - временная регулировка чувствительности (ВРЧ) предназначена для автоматической регулировки коэффициента усиления приемника таким образом, чтобы амплитуды эхосигналов от одинаковых дефектов при изменении расстояний от преобразователя до дефектов не изменяли своей амплитуды. Следует иметь в виду, что для разных типов искусственных дефектов амплитуды изменяются от расстояний по разным законам. Кроме того на зависимость амплитуды от расстояния влияет затухание ультразвука.

13 - глубиномер предназначен для измерения расстояния от преобразователя до отражателя путем измерения времени пробега импульса. Глубиномер предварительно настраивают на скорость распространения используемого типа волн в материале изделия и исключают время пробега в протекторе или призме преобразователя. При контроле наклонным преобразователем глубиномер позволяет измерять две координаты дефекта: глубину залегания его под поверхностью и расстояние от преобразователя до дефекта вдоль поверхности изделия (эпицентра). Для этого нужно предварительно настроить глубиномер на измерение указанных величин с учетом угла ввода преобразователя. Способы измерения координат дефектов с помощью глубиномера рассмотрены в п. 6.1.2.

Время, отсчитанное глубиномером, а также рассчитанные по времени координаты дефектов представляются в цифровом виде на табло блока цифровой обработки (БЦО) 14. На него поступает только первый эхосигнал, попавший в строб-импульс от блока 10 и превышающий порог срабатывания АСД.

1.2 - аттенюатор - калиброванный ослабитель эхосигнала, предназначенный для измерения амплитуд. Функции других узлов, входящих в усилитель 1 дефектоскопа, рассмотрены в подпункте 2.

При работе с совмещенным преобразователем два разъема его кабеля соединяют с генератором и усилителем дефектоскопа УД2-12. Внутри кабеля проводники от двух разъемов соединяются. Если у кабеля, предназначенного для контроля совмещенным ПЭП, разъем один, то гнезда генератора и усилителя соединяют отдельным кабелем и на нем монтируют разъем для подключения кабеля преобразователя. При работе с раздельным или РС преобразователем излучатель соединяют с генератором, а приемник - с усилителем дефектоскопа.

Очень хорошее руководство по работе с дефектоскопом УД2-12 [5] можно заказать по тел. (812) 251 04 30.

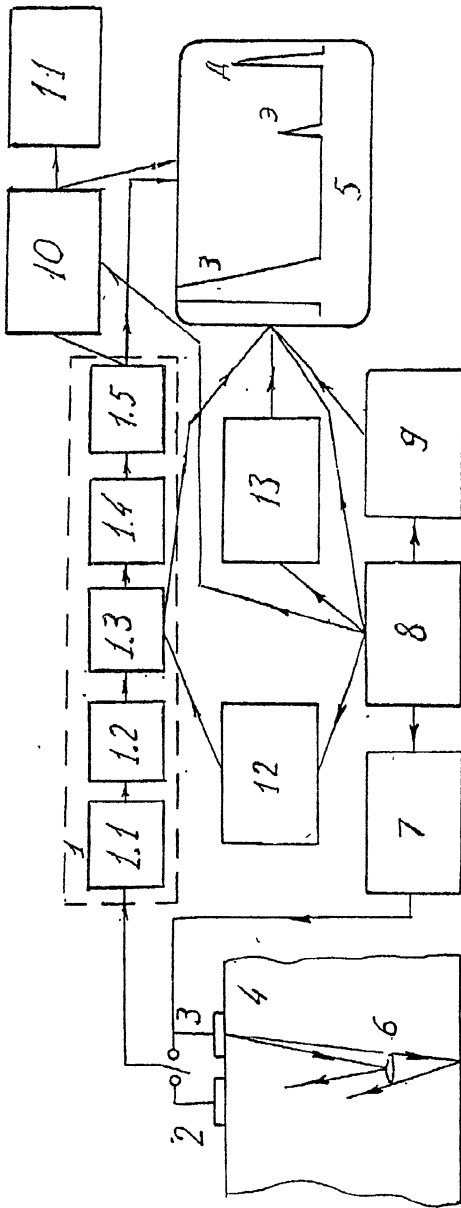


Рис. 3.1. Структурная схема эхodefектоскопа

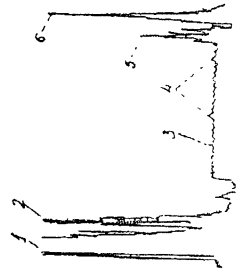


Рис. 3.2. Типичное изображение на экране дефектоскопа: 1 – зондирующий импульс; 2 – помехи преобразователя; 3 – строб-импульс АСД; 4 – структурные помехи; 5 – эхосигнал от дефекта; 6 – донный сигнал

2. Здесь сообщаются дополнительные сведения об усилителе дефектоскопа. Усилительный тракт дефектоскопа УД2-12 содержит: предусилитель 1.1 (обеспечивает согласование усилителя с приемным преобразователем), аттенуатор 1.2, усилитель высокой частоты (основной) 1.3, детектор (выпрямитель переменного напряжения сигнала и фильтрация высоких частот) 1.4, видеоусилитель (усиливает выпрямленный сигнал) 1.5. В некоторых типах приборов детектор можно выключить и наблюдать на экране импульсы с сохранением высокочастотных (т. е. ультразвуковых) колебаний в них.

Кроме кнопочного аттенуатора дефектоскоп имеет другие регуляторы чувствительности. К ним относят: регулятор амплитуды зондирующего импульса (ручка "АМПЛ" на верхней панели), некалиброванный регулятор усиления (ручка ">") и отсечку. Она ограничивает минимальную амплитуду сигналов, посылаемых на видеоусилитель. Сигналы, меньшие уровня отсечки (обычно это шумы) не будут видны на экране. При этом из всех сигналов вычитается некоторая одинаковая величина (пороговый уровень), в результате чего искажается истинное соотношение амплитуд сигналов. В УД2-12 применена компенсированная отсечка, которая обеспечивает восстановление амплитуд сигналов, оказавшихся выше порогового уровня. Это сохраняет правильное соотношение амплитуд сигналов при устранении помех отсечкой.

Важная характеристика приемно-усилительного тракта - его динамический диапазон, определяемый отношением амплитуд максимального и минимального сигналов, усиливаемых и воспроизводимых на экране без искажения. Приборы с большим динамическим диапазоном позволяют правильно оценивать соотношение амплитуд эхосигналов без аттенуатора. Динамический диапазон УД2-12 - около 20 дБ. Использование отсечки уменьшает динамический диапазон.

В некоторых дефектоскопах используют логарифмические усилители. В таких приборах амплитуды видимых на экране сигналов пропорциональны их значениям в децибелах. Благодаря этому прибор имеет очень большой динамический диапазон (до 60 дБ), но трудно заметить небольшие изменение амплитуд и отдельно зафиксировать два близко расположенных импульса.

Дефектоскоп УД2-12 - прибор аналогового типа. В нем усиливается и далее обрабатывается электрический импульс. Более современные дефектоскопы это цифровые приборы. В них принимаемый электрический сигнал превращается в цифровой код, обработку которого можно выполнять точнее, чем обработку электрического импульса и получать больше информации. Вместо электронно-лучевой трубки в них применяется жидкокристаллические или катодолюминесцентные экраны. Они значительно экономичнее, что позволяет применить автономное электропитание от аккумуляторной батареи и подзаряжать ее довольно редко. Структурная схема и потребительские возможности такого дефектоскопа значительно отличается от приведенной выше

В качестве примера далее приводятся сведения о цифровом дефектоскопе УДЦ-201П. Его разработал и реализует ЦНИИТМАШ ([3], тел. 275 87 50). Прибор обладает

всеми достоинствами современных импортных приборов, но имеет и целый ряд принципиальных отличий, улучшающих его потребительские качества.

### 3.3. Регистрация и представление информации в эходефектоскопе.

1. Развертка типа *A*. Амплитуда и ее измерение по экрану и аттенуатором. Автоматический сигнализатор дефектов (АСД) его регулировка.

2. Развертка типа *B, C, D*. Регистраторы, дефектоотметчики. Дефектоскопы с несколькими АСД.

1. Развертка типа *A* (рис. 3.3,*a*) подробно описана в п. 1.2. Как там отмечено, она соответствует отображению на экране УЗ дефектоскопа информации двух видов. Горизонтальная линия (линия развертки дефектоскопа) соответствует времени пробега импульса в изделии, а время пропорционально пути импульса. Высота пиков (импульсов) пропорциональна амплитудам эхосигналов. Таким образом, по горизонтальной шкале, совмещенной с линией развертки, определяют длину пути импульса в изделии от излучателя до отражателя и обратно к приемнику, а по вертикальной шкале оценивают отражательную способность дефекта или другого объекта. На рис. 3.2. показано реальное изображение на экране дефектоскопа и даны названия наблюдаемым импульсам, рекомендованные ГОСТом.

Часто применяют задержанную развертку, которая начинается не от зондирующего импульса, а позднее. Таким образом, исключают время пробега импульса в протекторе, призме преобразователя, части металла изделия, не подлежащей контролю. Иногда такую развертку называют лупой времени, потому что она позволяет растянуть во всю ширину экрана сравнительно небольшой интервал развертки, где близко расположено много импульсов. Если развертка включена без задержки, то такой режим называют "контролем от поверхности".

Если в усилителе отсутствует отсечка или отсечка сделана компенсированной (см. п. 3.2), то амплитуду в пределах динамического диапазона (не более 20 дБ) можно измерять прямо по экрану дефектоскопа, на котором иногда наносят соответствующую шкалу. Если некомпенсированная отсечка введена, то можно лишь сравнивать амплитуды сигналов по принципу "больше - меньше", но измерять их нельзя. Измерение амплитуды по экрану дефектоскопа обычно выполняется в относительных единицах, а не в децибелах за исключением случаев применения логарифмического усилителя или когда узкий интервал (обычно в пределах  $\pm 2$  дБ) вблизи стандартного уровня проградуирован в децибелах. Это сделано в некоторых дефектоскопах, у которых слишком большая цена деления аттенуатора (2 дБ или более).



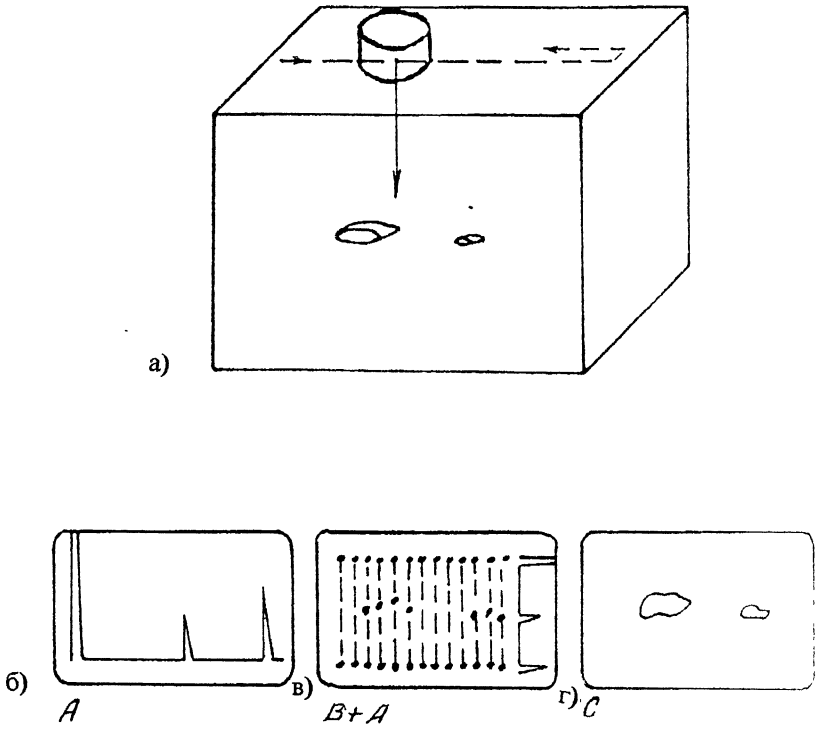


Рис. 3.3. Типы разверток эходефектоскопа: *а* - процесс сканирования, *б* - развертка типа *A*; *в* - развертка типа *B* (справа - развертка типа *A*), *г* - развертка типа *C*

Измерение амплитуд аттенуатором или по шкале БЦО более точно, чем по экрану и выполняется во всем диапазоне амплитуд сигналов независимо от наличия отсечки. Измерение практически во всех дефектоскопах состоит в том, что, регулируя усиление аттенуатором (в УД2-12 - кнопчным) и не меняя положение других ручек, влияющих на чувствительность, амплитуды всех измеряемых сигналов последовательно подводят к одной и той же линии на экране, называемой стандартным уровнем. Цифры на шкале аттенуатора (в УД2-12 - сумма дБ на отжатых кнопках) указывают, на сколько пришлось усилить сигнал, чтобы он достиг стандартного уровня или, что одно и то же, насколько был мал сигнал на входе усилителя (это будут уже отрицательные дБ).

Для УД2-12 в качестве стандартного уровня удобно выбрать верхний край экрана, тогда сумма дБ на отжатых кнопках аттенуатора и на табло БЦО показывает амплитуду сигнала. Однако в качестве стандартного уровня иногда используют среднюю линию на экране. Если импульс на экране достигает его верхнего края (но не превышает его), то на шкале БЦО будет 0 дБ. Если импульс на середине экрана - на шкале 6 дБ. Высота импульса в 1/4 экрана соответствует 12 дБ.

Если нужно сравнить амплитуды двух импульсов, видимых на экране УД2-12, то это удобно сделать с помощью БЦО, не пользуясь кнопчным аттенуатором. Установить строб-импульс под меньшим сигналом и записать показание в дБ. Затем установить строб-импульс под большим сигналом и опять записать показание. Разность укажет, на сколько дБ один сигнал больше другого.

Если нужно сравнить амплитуды двух импульсов, один из которых выше экрана, а другой - высотой в 1 - 2 клетки, то это можно сделать с помощью кнопчного аттенуатора, не пользуясь БЦО. Установить строб-импульс под меньшим сигналом, увеличить его амплитуду кнопчным аттенуатором, чтобы она достигла середины экрана и записать показание, соответствующее сумме отжатых (или нажатых) кнопок в дБ. Затем установить строб-импульс под большим сигналом уменьшить его амплитуду кнопчным аттенуатором, чтобы она достигла середины экрана и опять записать показание, соответствующее сумме отжатых (или нажатых) кнопок. Разность укажет, на сколько дБ один сигнал больше другого.

АСД имеет регулировку по времени и амплитуде. Регулировка по времени состоит в том, что зону линии развертки, на которой появившиеся импульсы могут быть сигналами от дефектов, выделяют с помощью стробирующего импульса, вырабатываемого специальным генератором 10 на рис. 3.1. На рис. 3.2 строб-импульс имеет растянутую П-образную форму. Задняя ступенька ее слилась с хвостом импульса от дефекта. С помощью строб-импульса отстраиваются от зондирующего импульса, донного сигнала, времени пробега импульса в призме наклонного преобразователя.

Регулировку строб-импульса АСД по времени выполняют двумя ручками: одной устанавливают положение всего строб-импульса на линии развертки, а другой регулируют длительность строб-импульса, т. е. положение его задней ступеньки.

Регулировка АСД по амплитуде состоит в выборе порогового значения амплитуды экосигнала, от которого срабатывает АСД. АСД дефектоскопа УД2-12 имеет три уровня световой регистрации. Обычно их регулируют таким образом, чтобы, когда амплитуда импульса превышает 1/4 часть экрана зажглась зеленая лампа, 1/2 часть - желтая, если амплитуда соответствует всей высоте экрана - красная. При такой регулировке разница амплитуд сигналов между соседними уровнями составляет 6 дБ.

Применение АСД позволяет контролировать изделия "по слоям". Например, при контроле очень толстых изделий с помощью строб-импульса выделяют слои толщиной 50 - 100 мм и контролируют их один за другим, повышая чувствительность усилителя по мере перехода к более глубокому слою, чтобы выявить одинаковые дефекты на всей толщине изделия.

Выше было рассмотрено использование АСД при контроле эхометодом. При контроле теньевым и ЗТ методами стробируют сквозной или донный сигналы. Пороговое значение АСД устанавливают так, чтобы анализатор сработал, когда амплитуды этих сигналов превышают заданный уровень и выключался, когда под действием дефекта амплитуды этих сигналов уменьшается.

2. Дефектоскоп УД2-12 описываемых ниже типов разверток не имеет. Развертка типа *B* представляет как бы поперечное сечение изделия поверхностью, определяемой лучом преобразователя при его перемещении. Например, если преобразователь перемещают по прямой линии, то луч от него образует секущую плоскость на рисунке 3.3,в, проходящую через штриховую линию.

Для получения этой развертки линию *A*-развертки на экране обычно направляют сверху вниз и подсвечивают в момент прихода экосигналов. По мере перемещения преобразователя линия *A*-развертки смещается в горизонтальном направлении. Подсвеченные точки сохраняются на экране и образуют линии, соответствующие поверхности ввода (зондирующие импульсы), отражающей поверхности дефекта и донному сигналу, прерывающемуся там, где его затеняет дефект.

Развертка типа *C* представляет план расположения дефектов по всей толщине ОК (рис. 3.3,з) или в его выделенном слое. Развертка типа *D* это разновидность развертки типа *B*. При контроле сварных соединений *B*-разверткой называют поперечное сечение шва, а *D*-разверткой его продольное сечение.

Чтобы получить все эти развертки нужно обеспечить связь положения преобразователя на поверхности ОК с изображением на экране. Для

этого обычно применяют автоматические устройства для механического перемещение преобразователя или используют бесконтактные типы связи. Все это усложняет аппаратуру.

Разверткой типа *M* «заморозкой» называют *A*-развертку с запоминанием изменения амплитуды эхосигнала в зависимости от времени пробега импульса. В результате получают на экране временную огибающую эхосигнала (см. п. 2.7). Применяют также комбинированные развертки. Например, на рис. 3.3, в справа показана *A*-развертка, соответствующая одной из линий *B*-развертки. По *A*-развертке можно судить об амплитудах эхосигналов.

Не следует ожидать, что изображения дефектов на развертках типов *B*, *C* и *D* точно соответствуют истинной форме дефектов. Очертания изображений зависят от ширины раскрытия пучка УЗ лучей. Дефекты, меньшие ширины раскрытия пучка изображаются одинаковыми точками.

Несколько АСД в дефектоскопе позволяет расширить число задач, решаемых при контроле. Например, строб-импульс одного АСД устанавливают так, чтобы сигнализатор следил за донным сигналом. Уменьшение этого сигнала свидетельствует либо о наличии дефекта, либо об ухудшении качества акустического контакта. Другие (или другой) АСД следят за появлением эхосигналов на различных участках линии развертки.

Рассмотрим как представляется информация в упомянутом ранее дефектоскопе УДЦ-201П. У него два строб-импульса, которые изображаются в виде полосок над линией развертки. Прибор позволяет отображать на экране непосредственно в цифровом виде следующую количественную информацию: максимальные амплитуды эхосигналов, попавших в один или оба строб-импульса; глубину залегания отражателя при прозвучивании прямым или наклонным ПЭП прямым лучом; глубину залегания отражателя от поверхности ввода при прозвучивании наклонным ПЭП изделий с параллельными поверхностями однократно-отраженным и двукратно отраженным лучами; расстояние от точки ввода до эпитцентра отражателя; время прохождения ультразвука в призме преобразователя; расстояние между импульсами на любом уровне от максимума (в мм или мкс); расстояние каждого строб-импульса относительно начала развертки (в мм и мкс) и ширину каждого строб-импульса (в мм и мкс); расстояние каких-либо сигналов относительно друг друга (в мм и мкс); амплитудный уровень каждого строб-импульса (высота их над уровнем развертки) в дБ или в процентах от высоты экрана; амплитудный уровень компенсированной отсечки в дБ или в процентах от высоты экрана; скорость любых волн в объекте контроля в м/с; толщину объектов контроля, цифровую и текстовую информацию русским или латинским шрифтами.

Дефектоскоп имеет: меню из набора основных параметров дефектоскопа и требований контроля, отображаемых в виде пиктограмм на экране; развертку типа *M*, звуковую и световую сигнализацию о превышении эхосигналом порогового уровня (линии строб-импульса); временную регулировку чувствительности, компенсирующую ослабление по законам  $1/r^2$  или  $1/r^{3/2}$  в диапазоне до 30 дБ ( $r$  - расстояние от преобразователя до дефекта); АРД графики на экране; энергонезависимую память емкостью 64 блока видеотекстовой информации по результатам контроля ("память кадра") и 127 блоков параметров настройки, блокировку настройки.

Дефектоскоп комплектуется датчиком типа ДШВ для измерения шероховатости поверхности и имеет программную поддержку корректировки чувствительности в зависимости от величины шероховатости, не имеющую аналогов в мировой практике

На линии развертки дефектоскопа имеются маркеры точки ввода луча при контроле наклонным преобразователем, маркеры 1, 2 и 3-го отражений от поверхностей для контроля с многократным отражением. Запомненные кадры осциллограмм дефектов с комментарием воспроизводятся на экране в любой последовательности и, в случае необходимости, архивируются на внешней ЭВМ..

### 3.4. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) к дефектоскопам.

1. Прямой, наклонный, раздельно-совмещенный (РС) ПЭП.  
Области их применения.

2. Конструкции ПЭП, функции элементов.

1. Основные типы преобразователей были кратко рассмотрены в п. 2.5. Они показаны на рис. 2.7.

а) Прямой контактный преобразователь (рис. 2.7,а) предназначен для излучения продольных волн, направленных нормально (т. е. под прямым углом) к поверхности ОК. (Поперечные волны, направленные нормально к поверхности, возбудить трудно, как пояснено в п. 2.5). В преобразователе пьезопластина 1 приклеена к демпферу 2 и защищена протектором 3.

б) Наклонный преобразователь (рис. 2.7,б) предназначен для излучения волн наклонно к поверхности ОК. В нем пьезопластина приклеена к призме 4. Чаще всего преобразователь излучает поперечные волны. Для этого угол призмы делают между первым и вторым критическими углами (см. п. 2.3). Иногда применяют наклонные преобразователи для излучения и приема продольных волн, тогда угол призмы делают меньше первого критического. Возбуждаемые одновременно поперечные волны в этом случае являются мешающими. Наклонными преобразователями с соответствующими углами призм возбуждают также поверхностные волны, волны в пластинах и стержнях.

в) Раздельно-совмещенный (РС) преобразователь состоит из излучателя и приемника. На рис. 2.7,в показан прямой РС преобразователь. В нем обычно применяют призмы с малыми углами, так что излучаются и принимаются продольные волны. Однако существуют также наклонные РС преобразователи. Например, головные волны возбуждают и принимают наклонными РС преобразователями с углами призм, равными первому критическому.

Применяют также наклонные РС преобразователи для поперечных и поверхностных волн. Наклонные РС преобразователи располагают либо один за другим (схема тандем), либо рядом (схема дуэт), как показано на рис. 3.4.

Основное преимущество РС преобразователей - низкий уровень помех, особенно помех самого преобразователя. Их применяют для контроля, когда необходима малая мертвая зона.

Определим некоторые понятия. Акустической осью совмещенного прямого преобразователя называют геометрическую ось пьезопластины  $OA$  (см. рис. 2.7,а). Для наклонного преобразователя таким же термином называют продолжение геометрической оси в призме  $O''O$  в изделии  $O'B$  после ее преломления на границе призма ОК (рис. 2.7,б).

Точка выхода  $O$  - точка пересечения геометрической оси  $O''O$  с контактной (контактирующей с ОК) поверхностью преобразователя. При малой толщине слоя контактной жидкости она практически совпадает с точкой ввода  $O'$ , где акустическая ось в изделии  $O'B$  пересекается с поверхностью ОК (поверхностью ввода).

Углом наклона акустической оси  $\alpha'$  называют угол между нею и перпендикуляром к поверхности ввода. Угол между перпендикуляром к контактной поверхности преобразователя и геометрической осью в призме называют углом призмы. Расстояние  $OD$  - стрела ПЭП.

Фокусом РС преобразователя  $C$  (рис. 2.7,в) называют точку пересечения акустических осей излучателя и приемника в ОК. Немного выше ее находится максимум чувствительности.

2. Основные конструктивные элементы преобразователей показаны на рис. 3.5. К ним относятся:

Пьезоэлемент или пьезопластина  $1$  - основной чувствительный элемент преобразователя.

Демпфер  $2$ , к которому приклеивается неизлучающая в ОК сторона пьезопластины. Он способствует гашению (демпфированию) колебаний для получения короткого импульса (при этом увеличивается широкополосность преобразователя). Он также повышает механическую прочность тонкой и хрупкой пьезопластины. Материал и форма демпфера подбираются такими, чтобы не возникали ложные сигналы от его поверхности, противоположной пьезопластине.

Протектор  $3$  предохраняет пьезопластину от повреждений и износа. При соответствующем выборе материала и толщины он способствует передаче колебаний в среду (особенно при иммерсионном способе контакта) и стабилизации акустического контакта (при контактном способе).

Преломляющая призма  $8$  обеспечивает требуемый угол наклона. Ее конструируют так, чтобы не возникали сигналы помех в результате отражений волн от поверхностей. Например, помеха может появиться в результате отражения излученной пьезоэлементом продольной волны от угла  $D$  призмы (рис. 2.7,б), если сделать слишком малой стрелу преобразователя - расстояние от точки выхода  $O$  до  $D$ . Если сделать малым путь в призме  $O''O$ , то помехи возникнут в результате отражения волн от контактной поверхности призмы и попадания их на пьезопластину.

Кроме перечисленных основных элементов конструкции в преобразователе имеются проводники  $5$  (рис. 3.5), соединяющие электроды на

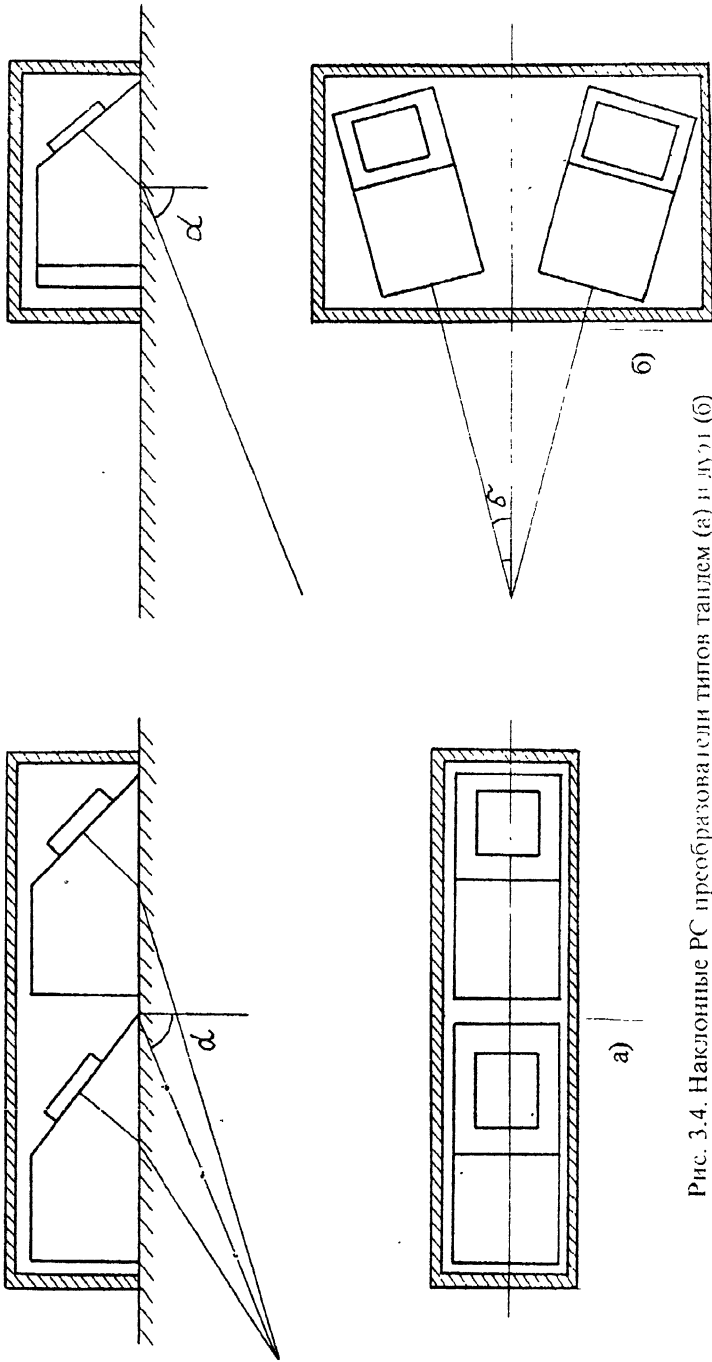


Рис. 3.4. Наклонные РС преобразователи типов тапшем (а) и дуги (б)

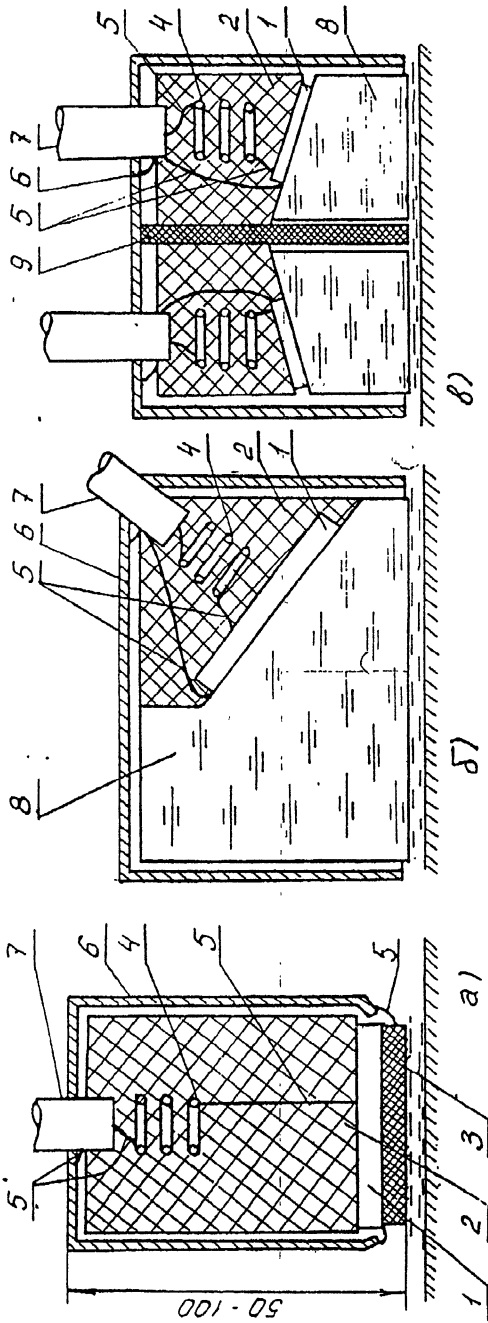


Рис. 3.5. Конструкции основных типов преобразователей



плоскостях пьезопластины с корпусом преобразователя 6 и с внутренним проводником кабеля 7; электроакустический экран 9 (в РС преобразователе), разделяющий излучатель и приемник.

### **3.5. Характеристики эходефектоскопа.**

1. Основные технические характеристики прибора, с которым аттестуемому предстоит работать. Назначение органов управления.

2. Порядок настройки и поверки работоспособности эходефектоскопа.

1. В дополнение к п. 3.1 нужно знать более полно технические характеристики прибора, с которым работает аттестуемый. Например, для импульсного дефектоскопа нужно знать диапазон рабочих частот, диапазон контролируемых толщин, минимальные размеры выявленных дефектов, величины, характеризующие чувствительность (например, резерв усиления - максимальное число децибел на шкалах аттенуатора), наличие блоков ВРЧ, АРД, способ измерения координат и амплитуды, их точность. Нужно уметь регулировать чувствительность, развертку и управлять работой всех других названных блоков всеми возможными способами. В п. 8.2 приведены технические характеристики серийного дефектоскопа УД2-12 и упомянутого ранее дефектоскопа УДЦ-201П.

2. Настройку дефектоскопа начинают с выбора диапазона развертки, обеспечивающего наблюдение за всей толщиной контролируемого объекта. Далее грубо регулируют усиление так, чтобы наблюдать какой-либо большой импульс, например, донный сигнал или отражение от двугранного угла. Затем эти настройки уточняют и регулируют другие блоки. Более подробно процесс настройки дефектоскопа рассмотрен в п. 7.3.

Простейшую проверку дефектоскопа выполняют с помощью стандартных образцов СО-1, СО-2 и СО-3 по ГОСТу 14782-86 или V-1 и V-2, рекомендованных Европейским стандартом. Поверку всех эксплуатационных характеристик выполняют с помощью комплекта устройств КУ, выпускаемых НПО ЦНИИТМАШ (тел. 275 89 43). Полную поверку всех узлов дефектоскопа выполняют с помощью стенов и электронных приборов, как правило, в специальных метрологических организациях. Описание стандартных образцов дано в п. 3.6, а перечень операций поверки и настройки дефектоскопа с их помощью - в п. 4.

### **3.6. Стандартные образцы (СО).**

1. Назначение СО.

2. Классификация СО. Государственные СО и СО предприятий (СОП). СО по ГОСТу 14782-86.

1. СО предназначены для проверки и настройки дефектоскопа, а именно: длительности разверток, точности работы глубиномера, настройки его на скорость звука, положения точки выхода и угла ввода преобразователя, чувствительности дефектоскопа с преобразователем, мертвой зоны, разрешающей способности.

2. Государственные СО (ГСО) предусмотрены стандартами, в которых указаны материал, из которого они изготовлены, и их конструкция. ГСО, как правило, применяют для проверки и настройки аппаратуры при контроле широкого ассортимента продукции. СОП рекомендованы ведомственными НТД или НТД предприятий. Они предназначены для проверки и настройки аппаратуры при контроле определенного вида продукции, где ГСО неприменимы (например, при контроле изделий с большой кривизной поверхности) или где применение СОП технически более удобно.

Комплект ГСО по ГОСТу 14782-86 показан на рис. 3.6.

а) СО-1 изготавливают из органического стекла с акустическими свойствами, оговоренными в ГОСТе. Он предназначен для определения условной чувствительности, проверки разрешающей способности и настройки глубиномера.

б) СО-2 изготавливают из малоуглеродистой стали с мелкозернистой структурой. Его применяют для определения условной чувствительности, проверки мертвой зоны, угла ввода, ширины диаграммы направленности и настройки глубиномера.

СО-2А по конструкции похож на СО-2, но его изготавливают из материала контролируемого изделия, если этот материал существенно отличается от СО-2 по акустическим свойствам. Назначение его то же, что СО-2.

в) СО-3, также как СО-2, изготавливают из мелкозернистой стали. Его применяют для определения точки выхода, стрелы преобразователя и отстройки от времени пробега ультразвука в призме преобразователя.

г) СО-4 также изготавливают из мелкозернистой стали. Он предназначен для определения длины волны в стали и частоты УЗ колебаний. По экспериментам авторов, он очень плохо удовлетворяет своему назначению. Значительно лучше эти функции выполняет жидкостной интерферометр, описанный в п. 5.2.1.

Описание операций проверки и настройки дефектоскопа с помощью ГСО даны в разделе 4. Рассмотренные ГСО применяют при контроле изделий с плоской поверхностью совмещенными преобразователями шириной до 20 мм на частоту 1,25 МГц и выше. В других случаях нужно использовать СОП, подобные или даже существенно отличающихся от этих ГСО.

### **3.7. Ультразвуковые приборы для контроля теньвым и комбинированным методами**

1. Структурная схема прибора, с которым предстоит работать аттестуемому. Его основные технические характеристики, органы управления.

2. Возможности использования импульсного эходефектоскопа при контроле теньвым и комбинированными методами, особенности его включения. Принципы устройства теньвых и комбинированных дефектоскопов. Их характеристики.

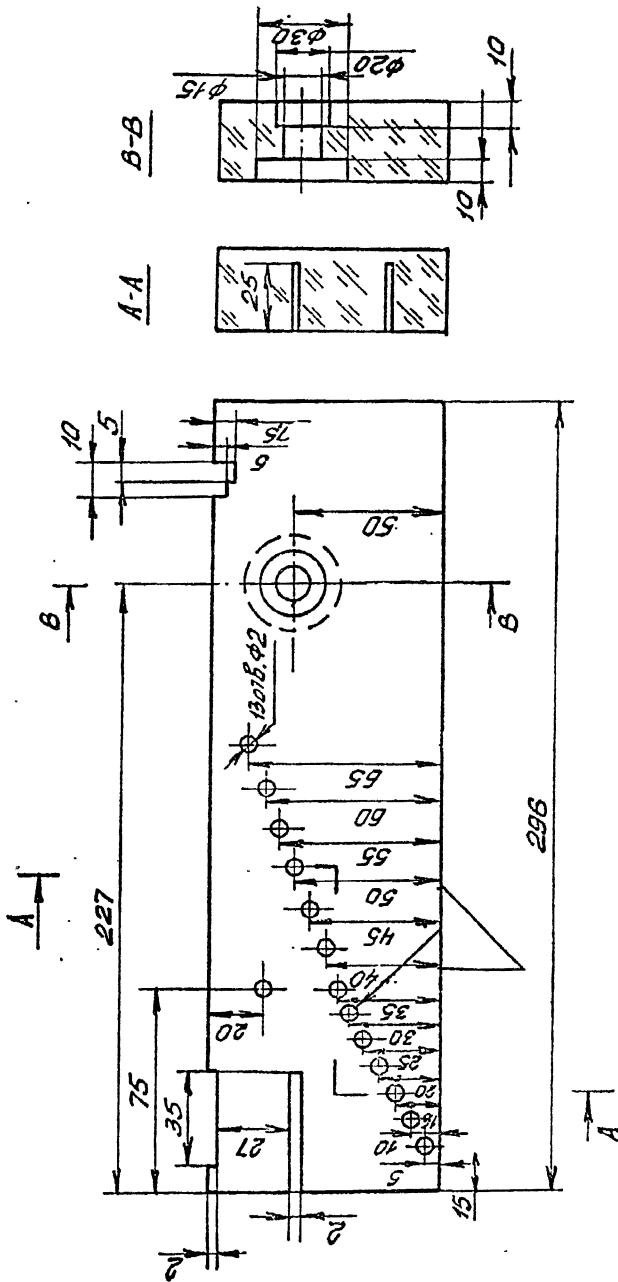
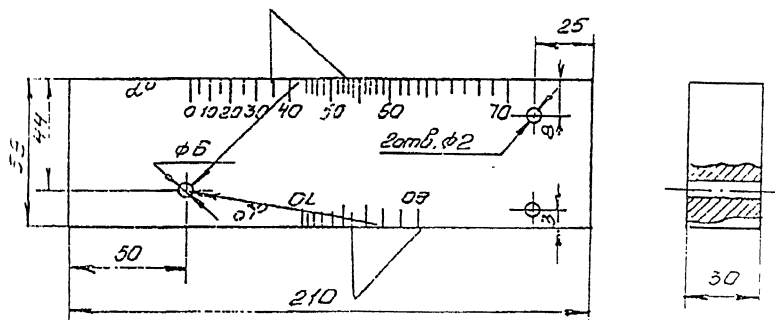
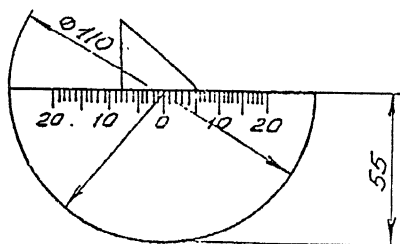


Рис 3.6 а - Стандартный образец № 1



b)



b1

Рис. 3.6,б,в. Стандартные образцы №2 и №3

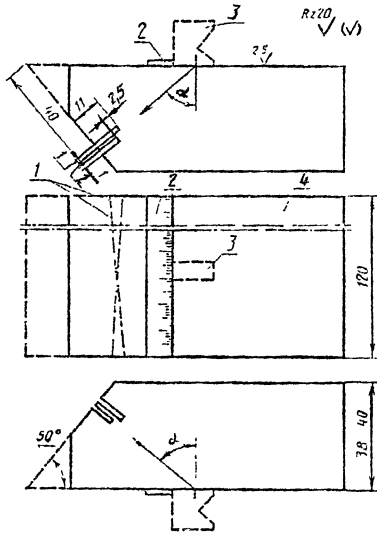


Рис. 3.6,г - Стандартный образец № 4

1. Ответ на этот вопрос строится по той же схеме, что и на вопрос 3.5. Структурную схему прибора изобразить, как показано на рис. 1.4 и 1.5. Из технических характеристик указать, какова рабочая частота прибора, на контроль каких изделий и какой толщины он рассчитан, как обеспечивается акустический контакт, какова степень стабильности сквозного или донного сигнала, какие их изменения учитываются как показатель дефектности, как настраивают чувствительность прибора, как отмечается наличие дефекта, сколько каналов имеет прибор. Основные органы управления - регулировка усиления приемного тракта, уровня срабатывания сигнализатора, скорости развертки, ширины и местоположения на развертке строб-импульса сигнализатора (в некоторых приборах три последних параметра не регулируются).

2. Любой импульсный ультразвуковой дефектоскоп можно использовать для контроля ЗТ методом, а дефектоскоп, имеющий отдельные гнезда для подключения к генератору и усилителю - для контроля теньевым методом. При контроле ЗТ методом по схеме с одним прямым преобразователем прибор нужно включить по совмещенной схеме, установить строб-импульс АСД на участок развертки, где наблюдается донный сигнал, настроить порог срабатывания АСД так, чтобы сигнализатор выключался, когда донный сигнал уменьшается до заданной величины, что соответствует фиксации дефекта.

При контроле амплитудным теньевым методом прибор нужно включить по раздельной схеме, установить строб-импульс АСД на участок развертки, где наблюдается сквозной сигнал, настроить порог срабатывания АСД так, чтобы сигнализатор выключался, когда сквозной сигнал уменьшается до заданной величины, что соответствует фиксации дефекта.

На рис. 3.7 показана структурная схема специализированного теневого дефектоскопа. Синхронизатор 1, генератор импульсов 2, излучатель 3, приемник 5, усилитель 8, временной селектор (генератор зондирующих импульсов) 7 и регистратор с регулировкой порога срабатывания 6 выполняют те же функции, что в эходефектоскопе (рис. 3.1). Объект контроля обозначен 4. Структурная схема зеркально-теневого дефектоскопа подобна приведенной, но она рассчитана на включение преобразователей либо по раздельной, либо по совмещенной схемам. Часто теньевые и ЗТ дефектоскопы делают многоканальными.

### **3.8. Ультразвуковые резонансные дефектоскопы-толщиномеры**

1. Структурная схема резонансных приборов, с которыми аттестуемому предстоит работать. Их технические характеристики.

2. Принцип устройства резонансных приборов. Основные ограничения в их применении.

В настоящее время резонансные приборы не выпускаются и здесь не описаны. Краткое изложение принципа действия резонансного прибора дано в п. 1.6.

### 3.9. Ультразвуковые толщиномеры

1. Принцип работы толщиномера, с которым аттестуемому предстоит работать. Принцип работы импульсного толщиномера.

2. Различные методы и способы измерения толщины ультразвуком. Принцип работы различных типов толщиномеров, области применения, погрешности измерения. Проверка работы толщиномера.

1. Ультразвуковые толщиномеры предназначены для измерения толщины изделий, доступ к которым только с одной стороны. Существуют толщиномеры двух типов: импульсные и резонансные, но последние в настоящее время не выпускаются.

Принципы работы импульсного толщиномера и дефектоскопа аналогичны и поясняются приведенной ранее схемой дефектоскопа (рис. 1.2) Специфика толщиномера по сравнению с дефектоскопом состоит в том, что он должен обеспечить возможно более точное измерение времени прихода донного сигнала  $t$ , вычесть из него время  $t'$ , соответствующее пробегу ультразвукового импульса в призмах или протекторе преобразователя, а также в слое контактной жидкости, и пересчитать время в толщину измеряемого изделия  $h$  с учетом скорости звука в изделии  $c$ :

$$h = c(t - t')/2$$

Цифра 2 введена в знаменатель, поскольку время пробега измеряется в прямом и обратном направлениях.

Настройка толщиномера обычно состоит во введении значения скорости в материале изделия  $c$  по образцу или по участку изделия, толщина которого известна. Кроме того, прибор требует настройки начала отсчета, чтобы исключить время  $t'$ .

В некоторых приборах предусмотрена настройка усилителя, чтобы подавить помехи преобразователя и обеспечить надежную регистрацию донного сигнала. Амплитуда его может сильно изменяться. Например, она уменьшится, если донная поверхность корродирована или непараллельна поверхности ввода. Дальнейшее измерение состоит в прижатии преобразователя к точкам поверхности изделия, где нужно выполнить контроль, считывании и записи показаний толщиномера. Правила настройки и измерения толщины серийным толщиномером подробно рассмотрены в п. 7.7

2. Различают три вида задач при измерении толщины, которым соответствуют три группы приборов:

а) Ручной контроль изделий с гладкими параллельными поверхностями, например, изделий после их изготовления.

б) Ручной контроль изделий с грубыми непараллельными поверхностями, например, изделий, внутренняя поверхность которых поражена коррозией.

в) Автоматический контроль в потоке (обычно труб).

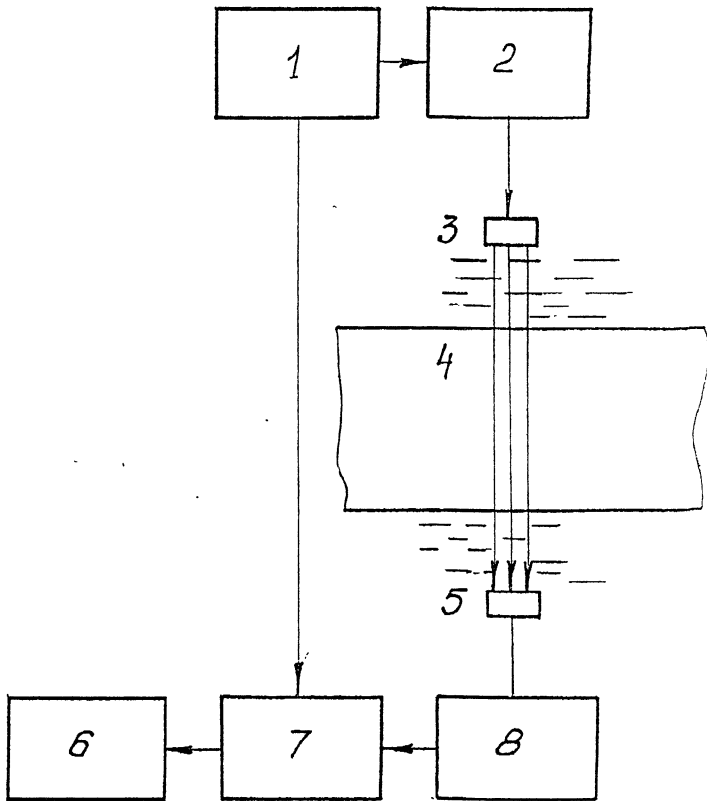


Рис. 3.7. Структурная схема теневого дефектоскопа



Для задач а) и в) необходима высокая точность измерения. При решении задачи б) требования к точности измерения снижены, но нужна высокая чувствительность, чтобы фиксировать рассеянное отражение от неровной противоположной поверхности, определять места наибольшего локального утонения стенок.

При ручном контроле нужно обеспечить широкий диапазон измерений, причем главная трудность - в снижении минимальной измеряемой толщины. Результаты измерений необходимо представить в наглядной форме, например, на цифровом табло. При автоматическом контроле нужно обеспечить высокую производительность измерений (выполнять возможно большее число измерений в секунду) и следить, чтобы толщина была не меньше и не больше заданного допуска.

Очень малые толщины измеряют резонансным методом. Однако в настоящее время основной способ измерения толщины - эхо-метод. Для решения задач а) и б) обычно применяют вариант, в котором измерение выполняют, используя многократные отражения импульса в изделии. Формула для расчета толщины в этом случае имеет вид

$$h = c(t_n - t_1)/2(n - 1),$$

где  $t_1$  и  $t_n$  - времена прихода первого и  $n$ -го донных сигналов. Это делает измерение тем более точными, чем больше число  $n$  используемых временных интервалов, соответствующих однократному пробегу импульса в изделии.

В приборах группы б) измерение ведут только по временному интервалу между зондирующим импульсом и первым донным сигналом (с исключением времени пробега в преобразователе). При этом достигается более высокая амплитуда донного сигнала даже для очень неровной поверхности ОК. Для сокращения мертвой зоны применяют РС преобразователь.

Современные ультразвуковые толщиномеры для ручного контроля - малогабаритные приборы с автономным питанием. Погрешность измерения толщиномера складывается из погрешности измерительного устройства (0,05 - 0,1% от измеряемой толщины), погрешности, связанной с конечной (ненулевой) длительностью УЗ импульса (определяется периодом колебаний  $T$ , умноженным на некоторый коэффициент  $k$ ) и погрешности акустического контакта, вызываемой случайным изменением времени прохождения импульса через слой контактной жидкости. Неровность донной поверхности приводит к тому, что измеряют не минимальную, а несколько большую толщину.

Возникновение погрешности, связанной с конечной длительностью УЗ импульса, поясняет рис. 3.8. Отсчет времени прихода импульса происходит, когда высота его достигает некоторого порогового уровня  $U_p$ . В случае а) погрешность определяет крутизна фронта первого периода колебаний, при этом обычно  $k \approx 0,1$ .

В случае б) время прихода иногда запаздывает на период колебаний, т. е.  $\kappa \approx 1$ . Это, в частности, довольно часто бывает при измерении толщины УЗ дефектоскопом, когда настройку прибора и измерение толщины выполняют по разным периодам колебаний импульсов (если не поддерживают постоянной амплитуды этих импульсов). В толщиномерах для уменьшения этой погрешности измерения выполняют по фронту первого периода колебаний, амплитуду его  $U_1$  (или амплитуду максимума импульса  $U_m$ ) поддерживают автоматически постоянной и порог измерения  $U_0$  делают возможно низким. Уменьшение этой погрешности в  $n$  раз достигают, используя способ многократных отражений импульса в изделии.

Погрешность акустического контакта уменьшают, повышая чистоту поверхности ввода изделия, стабилизируя прижатие преобразователя, выполняя настройку прибора и измерение на объектах с одинаковой шероховатостью поверхности. Эта погрешность исключается при использовании способа многократных отражений импульса, если начинать измерение не от зондирующего импульса, а от первого донного сигнала.

Перед началом измерения толщиномер настраивают обычно с помощью тех же операций, что и при измерении толщины. В результате все погрешности могут удвоиться. Оценим общую погрешность измерения толщины  $h$ . Будем считать, что погрешность измерительного устройства 0,05%, коэффициент  $\kappa = 0,1$ , погрешность от акустического контакта устранена. Тогда суммарная погрешность

$$\Delta h/h = 2(0,0005 + 0,1T/t) = 0,001 + 0,1\lambda/h.$$

Здесь введено  $t = 2h$ . При длине волны  $\lambda = 1$  мм для изделий малой толщины, например,  $h = 10$  мм погрешность

$$\Delta h/h = 0,001 + 0,1 \cdot 1/10 = 0,011 = 1,1\%$$

Для изделия большой толщины, например, 100 мм, погрешность 0,2%, т. е. она уменьшается, когда толщина значительно превосходит длину волны.

Минимальная толщина контролируемых изделий для импульсных толщиномеров определяется мертвой зоной, как для дефектоскопов. В приборах групп а) и в) она составляет 0,1 - 0,5 мм, а в толщиномерах группы б) - 0,5 - 1 мм. Для иммерсионных резонансных толщиномеров минимальная измеряемая толщина наименьшая - до 0,05 мм.

Когда толщина изделия меньше минимальной измеряемой толщины, импульсный толщиномер может зафиксировать не первый донный сигнал, который слился с помехами преобразователя, а второй. В результате измеренное значение толщины будет вдвое больше истинного. Чтобы избежать таких грубых ошибок многие современные толщиномеры снабжают небольшими экранами, на которых наблюдают многократные донные сигналы и помехи преобразователя.

Максимальная толщина контролируемых изделий физическими причинами не ограничивается, кроме большого затухания УЗ в некоторых материалах. Обычно в толщиномерах она составляет 200 - 1000 мм.

Ограничивающими факторами также являются большая неровность поверхностей ОК, их непараллельность и кривизна поверхности ввода. Об этом подробно сказано в п. 7.7.

Для настройки и проверки работы толщиномеров групп а) и б) применяют СО с гладкими параллельными поверхностями из материала с небольшим затуханием, например, из углеродистой стали. Существуют комплекты СО для проверки влияния отмеченных выше ограничивающих факторов, особенно для приборов группы б).

### **3.10. Ультразвуковые приборы для контроля физико-механических свойств.**

1. Структурная схема приборов, с которыми предстоит работать аттестуемому. Их основные технические характеристики, органы управления.

2. Особенности устройства структурных анализаторов, измерителей скорости распространения волн, твердости.

1. Ответ рекомендуется строить так же, как предложено в п.п. 3.1 и 3.5. Соответствующие структурные схемы приборов можно найти в п. 1.1 или в подпункте 2 данного пункта.

2. Ультразвуковые приборы для контроля физико-механических свойств основаны на измерении скорости, затухания УЗ в материале изделия или механического импеданса его поверхности. Эти величины связаны с физико-механическими свойствами материала, имеющими большое значение для эксплуатации изделия (см. п. 7.8). Далее приводятся примеры приборов, в которых измерение перечисленных величин используется для контроля физико-механических свойств.

Структурные анализаторы предназначены для измерения среднего размера кристаллитов (т. е. кристаллов неправильной внешней формы, зерен) металлов. Размер зерна оказывает очень большое влияние на коэффициент рассеяния УЗ волн (см. п. 2.2), поэтому структуру контролируют по затуханию УЗ. Отношение длины волны к среднему размеру зерна выбирают от 4 до 15.

Измерение абсолютного значения коэффициента затухания довольно сложно (см. [4], п. 2.4), поэтому применяют относительные способы сравнительной оценки затухания в образцах и изделии. Например, на двух частотах измеряют амплитуды донных сигналов в изделии и образцах с известной структурой и одинаковыми формой и шероховатостью поверхности. На низкой частоте (на которой затухание слабо зависит от структуры) приравнивают донные сигналы в изделии и образце, благодаря чему

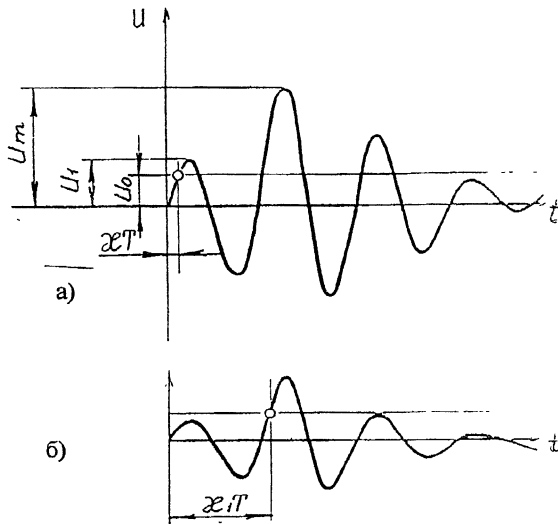


Рис. 3.8. Влияние длительности импульса на погрешность измерения толщины

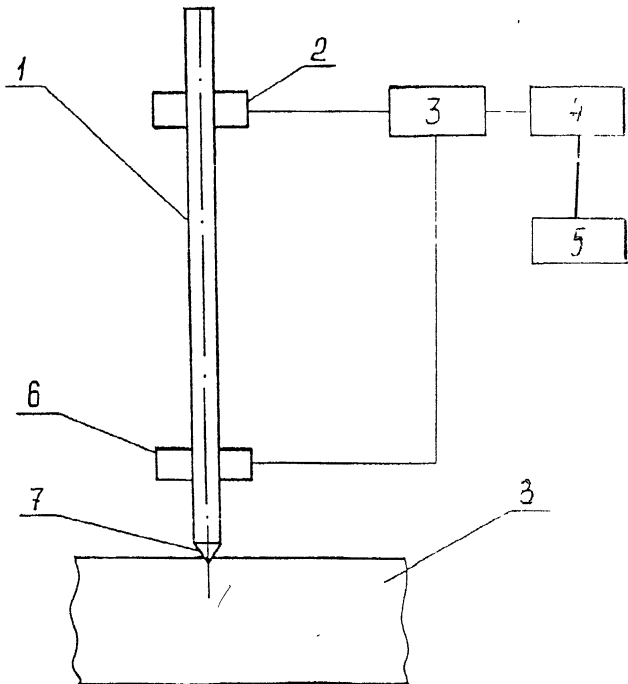


Рис. 3.9. Структурная схема УЗ твердомера

уменьшается влияние качества акустического контакта, а на высокой частоте сравнивают амплитуды этих донных сигналов. Чем больше отношение амплитуды донного сигнала на высокой частоте к амплитуде донного сигнала на низкой частоте (это отношение называется структурным коэффициентом), тем мельче зерно. Его средний размер определяют по образцу, имеющему структурный коэффициент такой же, как в изделии.

Измерение выполняют прибором, построенным по схеме рис. 3.1, имеющем широкополосные усилитель и преобразователь. Применяя частоты 0,5 - 20 МГц, оценивают среднюю величину зерна в аустенитной (нержавеющей) стали в диапазоне 15 - 250 мкм (от девятого до первого балла по ГОСТ 5639) с погрешностью 1 балл.

Измерение скорости распространения волн выполняется проще и с более высокой точностью, чем затухания. Скорость связана со многими физико-механическими свойствами материалов: модулями упругости, плотностью, прочностью, внутренними напряжениям и др.

Измерение импульсным методом во многом идентично измерению толщины (см. п. 3.9). В обоих случаях измеряют время распространения звука, равное отношению пути к скорости, но в толщиномере по времени измеряют путь, а здесь - скорость при известном пути. Часто для измерения скорости используют толщиномеры, например, серийный толщиномер УТ-93П позволяет измерять скорость с погрешностью не более 1%.

Твердость измеряют импедансным методом. Преобразователь УЗ твердомера (рис. 3.12) - стержень 1, совершающий продольные колебания под действием пьезоэлемента 2. Стержень прижимают к изделию 8 с постоянной силой. Алмазная пирамидка 7 на конце стержня внедряется в изделие тем глубже, чем меньше его твердость. При этом увеличивается нагрузка на стержень со стороны изделия (механический импеданс) и возрастает частота колебаний - информационный параметр о твердости.

Приемный пьезоэлемент 6 подает на вход усилителя 3 гармонический сигнал с частотой, приближенно соответствующей свободным колебаниям стержня. Усилитель, работая как автогенератор, раскачивает стержень на резонансной частоте, соответствующей частоте стержня, опертого на ОК. Частотомер 4 измеряет эту частоту и подает ее на цифровой индикатор 5, показания которого соответствуют единицам твердости. Предел измерения от 20 до 70 единиц шкалы твердости по Роквеллу с погрешностью 3 - 6%. Пирамидка оставляет на поверхности изделия отпечатки глубиной 5 - 25 мкм.

#### **4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕТОДА И АППАРАТУРЫ. СПОСОБЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭТАЛОНИРОВАНИЯ**

##### **4.1. Основные параметры методов отражения и прохождения**

1. Понятие основных параметров, определение параметров, используемых в деятельности аттестуемого.

2. Определение основных параметров метода и аппаратуры. Основные параметры эхо-, теневого и зеркально-теневого методов.

1. Основные параметры это основные физические величины, характеризующие процесс или явление. Основные параметры УЗ контроля определяют его достоверность. К их числу относятся такие величины, как частота, длина волны, чувствительность, угол ввода и т. д. Их нужно выбрать так, чтобы с минимальной ошибкой оценить качество изделия по результатам контроля.

Аттестуемый должен выбрать в подразделе 2 параметры, встречающиеся ему в работе, и знать, что они собой представляют. Различают основные параметры аппаратуры и метода контроля. Первые (например, частота, угол призмы) зависят только от дефектоскопа и преобразователя. Это параметры аппаратуры. Вторые (например, длина волны, угол ввода) - от аппаратуры и контролируемого материала.

2. Ниже приведены взаимосвязанные параметры аппаратуры и метода для эхо-метода. Их определения будут приведены далее.

#### Основные параметры:

аппаратуры	метода
Частота $f$ , МГц;	Длина волны $\lambda$ , мм;
Чувствительность:	Чувствительность:
условная $K$ , мм или дБ;	реальная,
	предельная $S_p$ , мм <sup>2</sup> ,
	уровень фиксации,
	эквивалентная;
Размеры преобразователя $2a$ , мм;	Направленность поля преобразователя $\varphi$ , град;
	Фронтальная разрешающая способность $\Delta l$ , мм;
Угол призмы $\beta$ , град;	Угол ввода $\alpha$ , град;
Погрешность глубиномера (системы селекции) $A\%$	Точность измерения координат (точность селектирования)
Длительность:	Мертвая зона $h'$ , мм
зондирующего импульса $\tau$ , мкс; помех преобразователя $\tau_n$ , мкс;	Лучевая разрешающая способность $\Delta r$ , мм;
Параметры сканирования:	Плотность сканирования (неравномерность чувствительности по поверхности изделия);
шаг сканирования $s$ , мм;	Стабильность акустического контакта.
скорость перемещения $v$ , мм/с;	
Дисперсия опорного сигнала.	

Для теневого и зеркально-теневого методов из приведенного перечня сохраняются следующие параметры методов (и соответствующие параметры аппаратуры): длина волны, чувствительность, направленность поля преобразователя, угол ввода, мертвая зона (только для зеркально-теневого метода), плотность сканирования, стабильность акустического контакта, фронтальная разрешающая способность.

#### 4.2 Длина волны и рабочая частота колебаний.

1. Определение понятий, их взаимосвязь.
2. Допуск на отклонение рабочей частоты. Причины, влияющие на вариацию частоты.

1. Понятия были определены в п.п. 2.1 и 2.5. Повторим эти определения и уточним их. Рабочая частота это частота колебаний  $f$ , возбуждаемых преобразователем вместе с дефектоскопом. Длина волны  $\lambda$  это расстояние, на которое колебания распространяются в среде за период  $T$ . Эти параметры связаны зависимостью:

$$\lambda = cT = c/f,$$

где  $c$  - скорость распространения звука в среде.

2. Допуск на отклонение рабочей частоты установлен ГОСТом 14782-86: "Частота ультразвуковых колебаний ... не должна отличаться от номинального значения более чем на 10% в диапазоне свыше 1,25 МГц и более чем на 20% в диапазоне до 1,25 МГц."

Вариация частоты может быть вызвана ошибками в изготовлении преобразователя (особенно ошибками выбора материала и толщины пьезоэлемента), неправильным согласованием преобразователя с электрическими цепями дефектоскопа (см. п. 2.5), изменением качества акустического контакта с объектом контроля. Последнее относится только к прямым преобразователям, поскольку в них пьезоэлемент отделен от ОК тонкими слоями. Изменение толщины одного из слоев (контактной жидкости) влияет на режим колебаний.

В наклонных преобразователях пьезоэлемент отделен от объекта контроля толстой призмой, поэтому качество акустического контакта призмы с ОК не влияет на режим колебаний пьезоэлемента и, в частности, на его частоту. Требования ГОСТ относится только к наклонным преобразователям.

Способы проверки рабочей частоты рассмотрены в п. 5.2.1.

#### 4.3. Чувствительность.

1. Предельная и условная чувствительности. Уровень фиксации (оценки). Способы настройки чувствительности при контроле эхо-методом.

2. Эквивалентная и реальная чувствительности. Способы настройки на заданную чувствительность с использованием стандартных образцов (СО) и диаграмм. Использование АРД (*SKH*) диаграмм и шкал для настройки предельной чувствительности. Настройка на заданную чувствительность при контроле теньвым и ЗТ методами.

1. Предельная чувствительность - площадь минимального диска или плоскодонного отражателя (рис. 2.15,*а*), обнаруживаемого дефектоскопом при заданной его настройке в контролируемом изделии на определенной глубине. Условная чувствительность определяется по некоторому искусственному отражателю в государственном СО. Это может быть отверстие диаметром 2 мм в СО-1 (рис. 3.6,*а*). Затухание УЗ в оргстекле велико, поэтому эхосигнал от боковых отверстий быстро ослабляется с увеличением глубины их расположения. Глубина залегания наиболее удаленного выявляемого отверстия в мм это и есть цифра, определяющая условную чувствительность дефектоскопа при некоторой его настройке.

Можно использовать также иные способы задания условной чувствительности. В качестве отражателя выбирают отверстие диаметром 6 мм в СО-2 или вогнутую поверхность СО-3. В этом случае условная чувствительность - число децибел, показывающее на сколько нужно изменить чувствительность от настройки по СО, чтобы получить заданную предельную чувствительность.

Понятие условной чувствительности нужно для того, чтобы запомнить и воспроизвести чувствительность дефектоскопа при замене преобразователя на другой того же типа или каких либо других изменениях в аппаратуре. Использование СО-2 имеет преимущества, т. к. в этом случае точнее учитывается индивидуальная диаграмма направленности преобразователя.

В практике контроля очень широко применяется понятие уровня фиксации (контрольного уровня или уровня оценки). Это предельная чувствительность для всего объема контролируемого изделия, т. е. площадь плоскодонного отражателя, который должен обнаруживаться дефектоскопом во всем изделии. Если сигнал от реального дефекта превосходит уровень фиксации, то такой дефект должен быть зафиксирован и должна быть выполнена оценка его допустимости.

Настройка чувствительности при контроле изделий обычно ставит целью обеспечение заданного уровня фиксации. Прямой путь достижения этой цели - изготовить в образцах из аналогичного металла плоскодонные отверстия заданного диаметра на различной глубине и выполнить по ним настройку. Но он очень трудоемок.

Реально используемый путь состоит в получении максимального эхосигнала от какого-либо искусственного отражателя (например, отверстия диаметром 6 мм в СО-2 или донного сигнала изделия) и последующего увеличения или уменьшения усиления дефектоскопа аттенуатором на



заданное число децибел, чтобы требуемый отражатель выявлялся на максимальной глубине. Это число децибел рассчитывают по формулам акустического тракта, по АРД диаграмме (см. п. 2.7) или определяют экспериментально.

Далее нужно обеспечить, чтобы заданное плоскодонное отверстие гарантировано выявлялось во всем изделии. Для этого обычно выполняют настройку чувствительности для максимальной глубины, а затем чувствительность на меньших глубинах уменьшают с помощью временной регулировки чувствительности (ВРЧ).

После того как соответствующая уровню фиксации чувствительность установлена, ее поднимают на некоторую величину (обычно на 6 дБ или более) и ведут контроль. Эту повышенную чувствительность называют поисковой. Когда обнаружен сигнал от дефекта, чувствительность возвращают к уровню фиксации. Если сигнал от дефекта превосходит этот уровень, выполняют оценку допустимости дефекта.

Кроме того используют понятие уровня браковки. Ему соответствует амплитуда эхосигнала от максимального допустимого плоскодонного отверстия. Обычно уровень браковки на 6 дБ выше уровня фиксации.

2. Настройка на заданную чувствительность с использованием образцов с искусственными дефектами наиболее удобна. Искусственные дефекты выбирают такими, чтобы их легко было изготовить с достаточной точностью, от них четко наблюдался максимум эхосигнала и, по возможности, искусственный дефект хорошо имитировал наиболее часто встречающиеся реальные дефекты. Получив максимум эхосигнала, чувствительность часто дополнительно регулируют attenuатором, чтобы установить заданный уровень фиксации. Величину изменения чувствительности определяют путем экспериментов или расчетов.

Точное изготовление плоскодонных отверстий, которые являются основной мерой чувствительности в России, довольно сложно, особенно если их нужно выполнить в образце на разной глубине под углом к поверхности. Вместо них используют такие отражатели, как дно ОК, боковое цилиндрическое отверстие (см. рис. 2.15, *в* и *г*), регулируя после настройки на них чувствительность attenuатором.

При контроле наклонным преобразователем используют отражатели (рис. 4.1) в виде бокового цилиндрического отверстия (*а*), сегмента (*б*), двугранного угла (*в*), зарубки (*г*), сквозного вертикального отверстия (*д*) или засверловки (*е*). В отражателях *в* - *е* большая амплитуда сигнала достигается за счет углового эффекта (см. п. 2.7), заключающегося в двукратном отражении УЗ от искусственного дефекта и расположенной рядом с ним поверхности ОК.

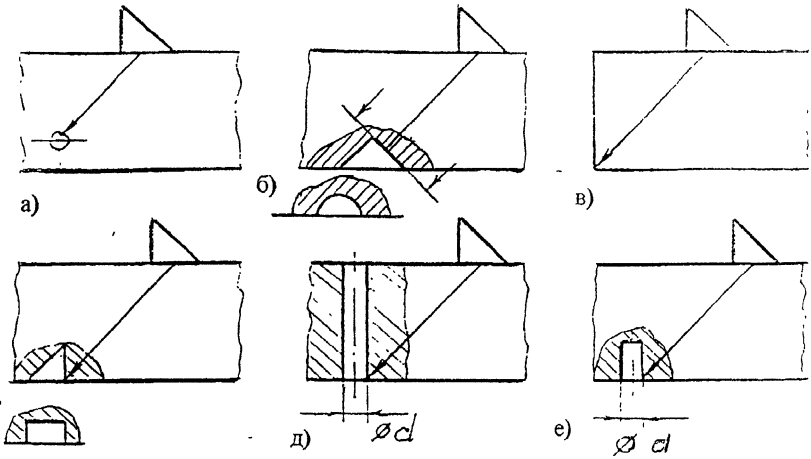


Рис. 4.1. Отражатели, применяемые при контроле наклонными преобразователями

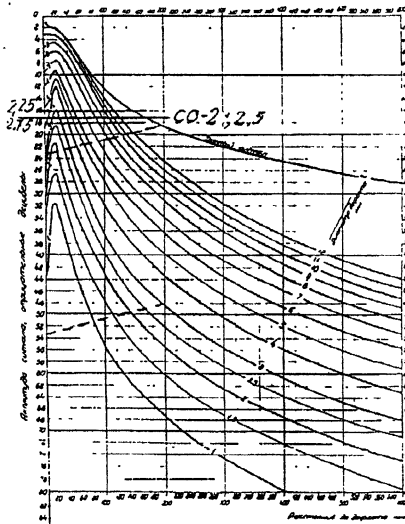


Рис. 4.2. АРД диаграмма для прямого преобразователя диаметром 12 мм на частоту 2,5 МГц

Сопоставить амплитуды эхосигналов от рассмотренных отражателей с сигналами от плоскодонных отверстий расчетным способом можно, используя формулы акустического тракта (п. 2.7), представленные в полном объеме в [4] табл. 6.1 и 6.2.

Исключение составляет сегментный отражатель. Для него экспериментально установлено, что при углах ввода  $40 - 55^\circ$  амплитуды эхосигналов от плоскодонного и сегментного отражателей совпадают, если их площади равны, а размеры превышают длину волны, но для других углов расчеты и эксперименты отсутствуют.

Для удобства расчетов эхосигналов от отражателей составляют номограммы. Безразмерная АРД диаграмма для плоскодонного отражателя рассмотрена в п. 2.7. На рис. 4.2 показана размерная АРД диаграмма для конкретного преобразователя. На оси ординат отложено ослабление эхосигнала по сравнению с зондирующим импульсом в ндБ (т. е. это нормализованные дБ); на оси абсцисс - расстояние от преобразователя до отражателя; параметр кривых - диаметр плоскодонного отверстия.

Заменяя сетку горизонтальных линий наклонными, учитывают затухание ультразвука в изделии. Например, штриховые наклонные линии на рис. 4.2 соответствуют коэффициенту затухания  $0,015 \text{ Нп/см}$ .

Покажем, как с помощью этой диаграммы настроить чувствительность. Предположим, что нужно, используя донный сигнал, обеспечить настройку на уровень фиксации  $7 \text{ мм}^2$ , что соответствует диаметру отверстия  $3 \text{ мм}$  (переводная шкала площадь - диаметр дана в [4], рис. 6.4) при толщине изделия  $200 \text{ мм}$ . Наибольшее ослабление эхосигнала соответствует этой толщине. На пересечении кривой  $3 \text{ мм}$  и ординаты  $200 \text{ мм}$  находим точку. Следуем от нее по штриховой линии до пересечения с осью ординат и находим ослабление  $54 \text{ дБ}$ . Для донного сигнала на глубине  $200 \text{ мм}$  ослабление  $24 \text{ дБ}$ . Установим на экране дефектоскопа амплитуду донного сигнала на стандартный уровень (линия на экране). Увеличиваем усиление аттенюатором на  $54 - 24 = 30 \text{ дБ}$ . Требуемый уровень фиксации установлен для максимальной толщины. Если не ввести ВРЧ, то для меньших толщин он будет завышен, т.е. будут выявляться более мелкие дефекты.

Если АРД диаграмму предполагается использовать не только для настройки чувствительности, но также для измерения эквивалентных размеров дефектов (см. п. 6.1.1), рекомендуется другой способ настройки. Найденное значение амплитуды донного сигнала ( $24 \text{ дБ}$ ) отложим на шкале аттенюатора (в УД2-12 отпустим кнопки  $16 + 6 + 2 = 24 \text{ дБ}$ , остальные кнопки нажаты). Некалиброванными регуляторами чувствительности установим амплитуду импульса, соответствующего донному сигналу, на стандартный уровень. После этого показания шкалы аттенюатора будут выражаться в ндБ, т. е. будут совпадать со значениями оси ординат АРД диаграммы. Для настройки на уровень фиксации  $7 \text{ мм}^2$  достаточно отложить на шкале аттенюатора  $54 \text{ дБ}$  (отпустить кнопки  $32 + 16 + 4 + 2 \text{ дБ}$ ).

Для завершения настройки нужно выровнять чувствительность по глубине изделия. Для этого нужно ввести ВРЧ, но можно использовать также накладные шкалы. На экран надевают прозрачный транспарант, на котором нанесены кривые АРД диаграммы для плоскодонных отверстий двух диаметров, соответствующих уровням фиксации и браковки. Часто наносят только одну кривую, например, для браковочного уровня, а вторую проводят на 6 дБ ниже, если уровень фиксации на 6 дБ ниже уровня браковки.

Поисковый уровень обычно представляют горизонтальной линией, которая на максимальном расстоянии от зондирующего импульса расположена на 6 дБ ниже уровня фиксации. На меньших расстояниях повышение чувствительности на поисковом уровне будет больше, чем на 6 дБ, отличаться от уровня фиксации, это следует учитывать. Накладные шкалы также, как размерные АРД диаграммы, строят для каждого типа преобразователей.

Настройку на заданную чувствительность по размерной АРД диаграмме можно выполнять, также используя в качестве опорного сигнала не донный, а сигнал от отверстия диаметром 6 мм в СО-2 или сигнал от вогнутой поверхности СО-3. (Последний вариант хуже: при нем не учитывается индивидуальная диаграмма направленности преобразователя, поскольку все лучи в плоскости падения возвращаются назад к излучателю-приемнику).

На рис. 4.2 отмечен уровень, соответствующий эхосигналу в СО-2. По нему и соответствующей кривой АРД диаграммы можно определить разность амплитуд в дБ и после настройки по СО-2 увеличить или уменьшить чувствительность. В ведомственных НТД (например, РД 34.17.302-97) разность эхосигналов между СО-2 и различными кривыми АРД диаграммы для серийных типов преобразователей приведена в виде АРД шкал.

Фактическая рабочая частота может отличаться от номинального значения. Если такое изменение частоты установлено, то настройка по СО-2 нуждается в корректировке, т. к. амплитуды эхосигналов от плоскодонного отверстия, дна изделия и бокового отверстия в СО-2 по-разному зависят от частоты. На рис. 4.2 рядом с линией для СО-2 проведены более тонкие линии. Ими следует пользоваться вместо основной линии, когда фактическая рабочая частота отличается от номинальной.

SKH диаграмма связывает площади плоскодонных отверстий  $S$  с условной чувствительностью для них  $K$  (определенной относительно бокового отверстия диаметром 6 мм в СО-2) и глубиной залегания дефекта  $H$ . Таким образом, в них используют гостированный стандартный образец. Однако они не учитывают затухания УЗ и не имеют преимуществ по сравнению с описанной выше настройкой по АРД диаграмме и СО-2. Практического распространения они не получили.

Дадим определение понятий чувствительности, требуемых по программе, хотя при реальном контроле эти термины употребляются редко. Реальная чувствительность характеризуется минимальными размерами дефектов конкретного типа, выявляемых в изделии на заданной глубине при определенной настройке аппаратуры. Она может быть определена в результате статистической обработки результатов контроля, разрезки и металлографических исследований большой партии однотипной продукции. Эквивалентная чувствительность это чувствительность, настроенная по любому заранее оговоренному искусственному или естественному отражателю в контролируемом материале. По другому определению это минимальный эквивалентный размер выявляемой несплошности на определенном расстоянии от точки ввода при заданных условиях контроля.

При контроле теньевым и ЗТ методами предельную чувствительность также, как для эхо-метода иногда определяют площадью минимального диска, обнаруживаемого дефектоскопом. При иммерсионном контроле диск имитируют непрозрачным экраном, который кладут на поверхность ОК. Однако гораздо чаще уровень фиксации задают в децибелах уменьшения сквозного или донного сигналов, подлежащих регистрации. Например, отмечают все зоны изделия, ослабляющие сквозной сигнал на 8 дБ.

Для ЗТ метода уровень фиксации иногда задают, указывая, что фиксируются все дефекты, ослабляющие донный сигнал до уровня фиксации эхо-метода, например, до амплитуды эхосигнала от плоскодонного отверстия площадью  $7 \text{ мм}^2$ . При этом ЗТ методом выявляются только очень крупные дефекты, но такая настройка дает возможность одновременно вести контроль эхо- и зеркально-теньевым методами.

#### 4.4. Угол ввода луча при контроле эхо-методом.

1. Понятие об угле ввода, способ измерения по СО.
2. Зависимость угла ввода от глубины залегания дефекта, затухания, температуры и материала ОК.

1. По определению, данному в ГОСТе 14782-86, угол ввода наклонного преобразователя  $\alpha$  - это угол между нормалью к поверхности, на которой установлен преобразователь, и линией, соединяющей центр цилиндрического отражателя с точкой выхода при установке преобразователя в положение, при котором амплитуда эхосигнала от отражателя наибольшая (рис. 4.3,а). Таким образом, в самом определении указан способ измерения. Обычно в качестве отражателя используют отверстие диаметром 6 мм в СО-2.

Точку выхода преобразователя  $O$  определяют по СО-3 (рис. 3.6,в и 4.3,б), находя максимум эхосигнала от вогнутой полуцилиндрической поверхности СО-3. Точка выхода при этом располагается над осевой линией полуцилиндра. Положение точки выхода отмечают рисками на боковых поверхностях преобразователя. Для прямого преобразователя точка выхода обычно довольно точно совпадает с геометрическим центром преобразователя, поэтому ее, как правило, не определяют.

Далее, перемещая наклонный преобразователь по СО-2, находят его положение, соответствующее максимуму эхосигнала от отверстия диаметром 6 мм. Преобразователи с углами ввода меньше  $70^\circ$  перемещают по верхней поверхности на рис. 3.6,б, от которой отверстие находится на расстоянии 44 мм, а преобразователи с углами ввода  $70^\circ$  и большими - по нижней поверхности, от которой отверстие находится на расстоянии 15 мм.

СО-2 имеет шкалы с обозначениями углов ввода. Нужно считывать значение угла под риской, соответствующей точке выхода. Если скорость звука в металле изделия сильно отличается от скорости в образце СО-2, то следует использовать вместо СО-2 образец СО-2А из материала контролируемого изделия. Конструкция этого образца аналогична СО-2.

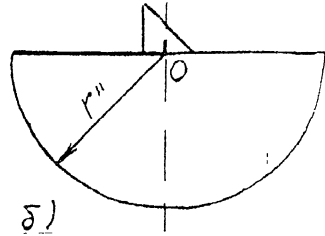
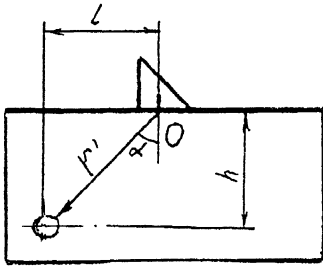
2. Уточним некоторые определения, рассмотренные выше. Найденная с помощью СО-3 точка выхода преобразователя фактически не точка, а линия (линия выхода), проведенная поперек контактной поверхности призмы преобразователя. Именно линия выхода располагается над осевой линией полуцилиндра, когда достигается максимум эхосигнала от вогнутой полуцилиндрической поверхности СО-3. Риски на боковых поверхностях ПЭП отмечают точки пересечения линии выхода с боковыми поверхностями призмы преобразователя.

Если преобразователь имеет пьезоэлемент большого размера, такого, что ширина преобразователя больше ширины СО-2 и СО-3 (30 мм) или протяженность его ближней зоны  $N$  ( $N \approx S/\pi\lambda$ , где  $S$  - площадь пьезоэлемента, а  $\lambda$  - длина волны в образце, см. п. 2.6), больше половины расстояния до отражателей  $r'$  или  $r''$  (рис. 4.3), то СО-2 и СО-3 использовать нельзя. В этом случае применяют образцы большего размера с такими же отражателями. Поскольку в образце, подобном СО-2, обычно нет шкалы углов, то, найдя максимум эхосигнала, измеряют расстояние  $l$  (рис. 4.3,а) и, зная глубину залегания дефекта  $h$ , рассчитывают угол  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctg(l/h)$$

Угол ввода наклонного преобразователя несколько уменьшается с увеличением глубины залегания отражателя (квазиискривление лучей). Это объясняется тем, что в расходящемся пучке лучей, идущем от преобразователя, луч с углом  $\alpha' < \alpha$  (рис. 4.4) проходит меньший путь до отражателя  $r' < r$  и, следовательно, сигнал меньше ослабляется. Определяя положение преобразователя, соответствующее максимуму эхосигнала от отверстия, мы выберем положение  $B$  на рис. 4.4. Т. о. максимум излучения смещается в сторону меньших углов ввода.

Чем больше коэффициент затухания УЗ в материале изделия, тем заметнее подрастание амплитуды сигнала, идущего по более короткому пути, тем заметнее отмеченное явление. Чем шире диаграмма направлен-



а) б)  
Рис. 4.3. Определение угла ввода наклонного преобразователя

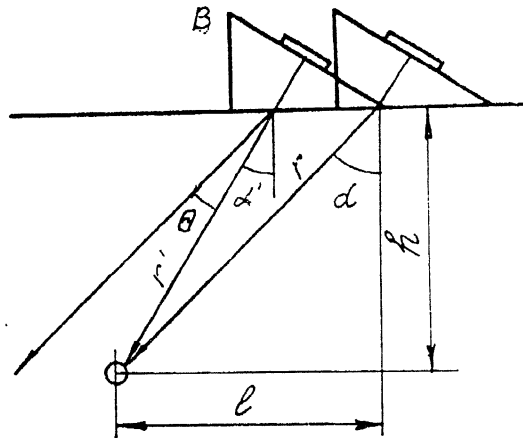


Рис. 4.4. К уменьшению угла ввода с увеличением глубины залегания отражателя

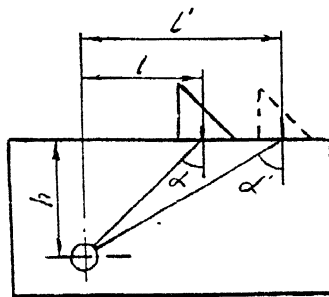


Рис. 4.5. Экспериментальное определение диаграммы направленности преобразователя

ности преобразователя (напомним, что она расширяется с увеличением угла ввода), тем в больших пределах изменяется угол.

Значение угла ввода для небольших глубин залегания отражателей, когда описанное явление малозаметно, практически совпадает с углом наклона акустической оси  $\alpha_0$  (см. п. 3.4). Угол наклона акустической оси всегда больше или равен углу ввода. Чтобы учесть явление квазиискривления и повысить точность измерения координат дефектов, ГОСТ 14782 рекомендует при толщине изделия 100 мм и более определять угол ввода и настраивать дефектоскоп на измерение координат  $l = X$  и  $h = Y$  дефекта не по СО-2, а по СОП с увеличенной глубиной залегания отражателя.

Увеличение температуры увеличивает угол ввода. Это связано с изменением скорости УЗ. Скорость уменьшается одновременно в металле ОК и призме преобразователя, но в пластмассе, из которой сделана призма, уменьшение скорости гораздо больше, поэтому согласно закону Снеллиуса  $\alpha = \arcsin[(c_u/c_n)\sin\beta]$  ( $c_u$  и  $c_n$  - скорости звука в изделии и призме) с увеличением температуры угол  $\alpha$  увеличивается.

Это явление особенно заметно, когда угол ввода приближается ко второму критическому, поэтому согласно ГОСТ 14782, если угол ввода больше  $70^\circ$ , то измерять его следует при температуре контроля. Следует рекомендовать поступать также при углах ввода больше  $50^\circ$

Изменение угла возникает также, если скорость звука в изделии отличается от образца, по которому измеряли угол ввода. Связанная с этим погрешность измерения угла должна быть не больше 2-3%. При нарушении этого условия следует использовать СО-2А вместо СО-2

#### 4.5. Направленность поля преобразователя

1. Числовые характеристики диаграмм направленности.
2. Способы экспериментального определения диаграмм направленности

1. Понятие диаграммы направленности рассмотрено в п. 2.6. Это изменение амплитуды излучения в зависимости от угла между акустической осью преобразователя и направлением луча  $\varphi$  (см. рис. 2.13). В практике контроля используют не диаграмму направленности по излучению  $\Phi(\varphi)$ , а диаграмму направленности по излучению-приему  $\Phi'(\varphi)$ , определяемую как изменение амплитуды эхосигнала от ненаправленного отражателя (т. е. одинаково отражающего при любом направлении падающей волны) в зависимости от угла между лучом, направленным на отражатель, и акустической осью преобразователя. При этом нужно обеспечить постоянное расстояние до отражателя или учесть изменение этого расстояния.

Для прямого преобразователя с дискообразным пьезоэлементом диаграмма направленности одинакова во всех плоскостях. Для наклонного преобразователя диаграммы направленности разные для плоскости паде-



ния (основной) и плоскости перпендикулярной плоскости падения, проходящей через преломленную ось симметрии пьезоэлемента (дополнительной).

В основной плоскости диаграмма направленности расширяется при увеличении угла призмы, а в дополнительной - не зависит от угла призмы (см. п. 2.6). Числовые характеристики диаграммы направленности это угол ввода и углы раскрытия диаграммы на каком-то определенном уровне. Чаще всего для диаграммы, измеренной по отражению от искусственного дефекта, угол раскрытия измеряют на уровнях 6 или 20 дБ от максимума

Чем больше отношение размера пьезоэлемента преобразователя к длине волны, тем меньше угол раскрытия и тем выше направленность преобразователя. При постоянной скорости звука в материале изделия диаграмму направленности характеризует произведение  $af$  половины размера пьезоэлемента  $a$  на частоту  $f$ .

2. Диаграммы направленности снимают экспериментально, измеряя изменение амплитуды эхосигнала от ненаправленного отражателя при перемещении преобразователя по поверхности образца. На рис. 4.5 показан пример измерения диаграммы направленности в основной плоскости наклонного преобразователя. Отражателем служит цилиндрическое отверстие, например, в СО-2. Этот образец удобен тем, что по его шкалам можно непосредственно считывать углы  $\alpha$ .

Расстояние от преобразователя до отражателя  $r$  должно быть в 2 - 3 раза больше протяженности ближней зоны  $N$  (см. п. 4.4). Этому требованию СО-2 часто не удовлетворяет, поэтому приходится использовать образец большего размера. Поскольку при этом используют образец без шкал углов, то расчет ведут по формуле, приведенной в п. 4.4.

Обычно проверку диаграмм направленности ограничивают измерением углов, при которых амплитуда эхосигнала уменьшается на 6 дБ от максимума. Изменение амплитуды вызывается не только диаграммой направленности, но также изменением расстояния от преобразователя до отражателя, происходящим при перемещении преобразователя. Однако это не мешает сравнивать диаграммы направленности однотипных преобразователей. Если для какого-либо преобразователя диаграмма направленности существенно шире, чем у других, то это означает, что у него не работает часть пьезопластины, например, может быть, она частично отклеилась от призмы.

#### 4.6. Мертвая зона

1. Понятие о мертвой зоне. Способы ее проверки при контроле конкретных изделий.

2. Факторы, определяющие величину мертвой зоны. Способы ее измерения.

1. Мертвая зона или минимальная глубина прозвучивания - минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта, надежно выявляемого при контроле. Возникновение мертвой зоны при контроле по совмещенной схеме связано с тем, что усилитель дефектоскопа не может принимать эхосигналы от дефектов во время излучения зондирующего импульса. После него следуют помехи преобразователя, т. е. многократные отражения импульса в элементах ПЭП: пьезопластине, протекторе, призме и т. д. Они имеют большую амплитуду, поэтому небольшой эхосигнал от дефекта на их фоне не обнаруживается.

Таким образом, мертвая зона  $h$  увеличивается с возрастанием длительности импульса  $\tau$  и длительности реверберационных помех  $\tau_n$  преобразователя. Обычно длительность импульса измеряется количеством периодов колебаний в нем. При том же числе периодов время каждого периода уменьшается с увеличением частоты, поэтому с ростом частоты мертвая зона уменьшается. При контроле прямым преобразователем она обычно составляет 5 ... 10 мм на частотах 5 - 2,5 МГц.

При контроле наклонным преобразователем расстояние  $h$  располагается в направлении луча, наклоненного к поверхности под углом ввода  $\alpha$  (рис. 4.6), поэтому мертвая зона в направлении, перпендикулярном поверхности  $h'$  уменьшается с увеличением угла ввода. Кроме того мертвая зона уменьшается, так как зондирующий импульс излучается в призму, а отражение от границы призма - ОК при правильной конструкции преобразователя невелико.

При контроле РС преобразователем мертвая зона возникает в результате прохождения зондирующего импульса от излучающего к приемному элементу. Такие преобразователи имеют мертвую зону 0,5 - 1 мм - значительно меньше совмещенных.

2. В соответствии с изложенным выше, для прямого преобразователя мертвая зона определяется формулой

$$h = c (\tau + \tau_n) / 2,$$

где  $c$  - скорость продольных волн в изделии. Для наклонного преобразователя  $c$  - скорость поперечных волн, а мертвая зона определяется формулой (рис. 4.6,б)

$$h' = h \cos \alpha.$$

С возрастанием амплитуды эхосигнала от отражателя улучшается возможность его обнаружения на фоне помех преобразователя, поэтому для более точного определения величины мертвой зоны нужно получить сигнал, соответствующий уровню фиксации. С учетом этого при контроле поковок прямым преобразователем ГОСТ предусматривает проверку мертвой зоны по плоскостному отверстию на уровне фиксации.

При контроле наклонным преобразователем рекомендуется проверять мертвую зону по боковым цилиндрическим отверстиям, просверленным на разных расстояниях от поверхности образца из материала изделия,

т. к. трудно изготовить наклонные плоскостные отверстия. При контроле стальных изделий для приближенной оценки мертвой зоны используют цилиндрические отверстия диаметром 2 мм на расстоянии 3 и 8 мм от поверхности в СО-2 (рис. 3.6,б). При необходимости изготавливают СОП с отверстиями на других расстояниях от поверхности. На практике по таким же отверстиям проверяют мертвую зону также для прямых преобразователей.

#### 4.7. Разрешающая способность

1. Понятие лучевой разрешающей способности эхометода.
2. Определение понятий лучевой разрешающей способности для эхо-метода, фронтальной разрешающей способности для эхо-, теневого и ЗТ методов. Факторы, влияющие на разрешающую способность.

1. Лучевая разрешающая способность или разрешающая способность по дальности определяет способность эхометода отдельно наблюдать эхосигналы от двух одинаковых отражателей, расположенных на разном расстоянии в направлении акустической оси преобразователя (отражатели *A* и *D* на рис. 4.7,а).

2. Определение понятия лучевой разрешающей способности дано в подпункте 1. Она существует только для эхометода. Фронтальная разрешающая способность для эхо-, теневого и ЗТ методов определяет их возможность отдельно фиксировать два одинаковых точечных отражателя, расположенных вдоль фронта волны, т. е. для прямого преобразователя - вдоль поверхности ввода ОК (отражатели *B* и *C* на рис. 4.7,а).

Лучевая разрешающая способность тем выше, чем меньше пространственная длительность УЗ импульса, равная  $c\tau/2$ , где  $c$  - скорость звука, а  $\tau$  - длительность импульса во времени. Ограничения, накладываемые электронной схемой, в частности, разрешающей способностью экрана, не вносят корректив - их разрешающая способность значительно выше. Считают, что два одинаковых импульса воспринимаются как отдельные, когда между ними сигнал уменьшается по крайней мере в два раза по сравнению с их максимальными значениями.

Как показывают измерения, длительность реальных УЗ импульсов равна трем периодам колебаний  $\tau = 3T$ . С учетом того, что УЗ проходит путь в прямом и обратном направлениях, условие разрешения отражателей *A* и *D* определяется неравенством

$$\Delta g \geq 3c\tau / 2 = 3\lambda / 2.$$

Понятия лучевой разрешающей способности и мертвой зоны сходны, только для мертвой зоны первый сигнал (зондирующий импульс) гораздо больше второго, поэтому ее протяженность больше. Подобная ситуация возникает при выявлении дефекта вблизи дна изделия. Там второй

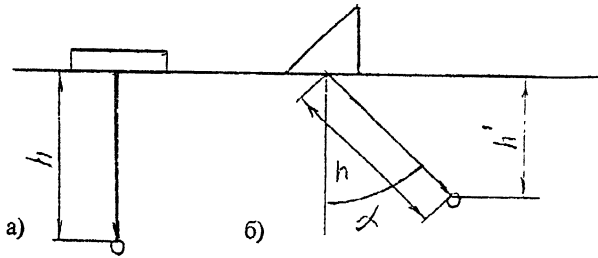


Рис. 4.6. Мертвая зона при контроле прямым (а) и наклонным (б) преобразователями

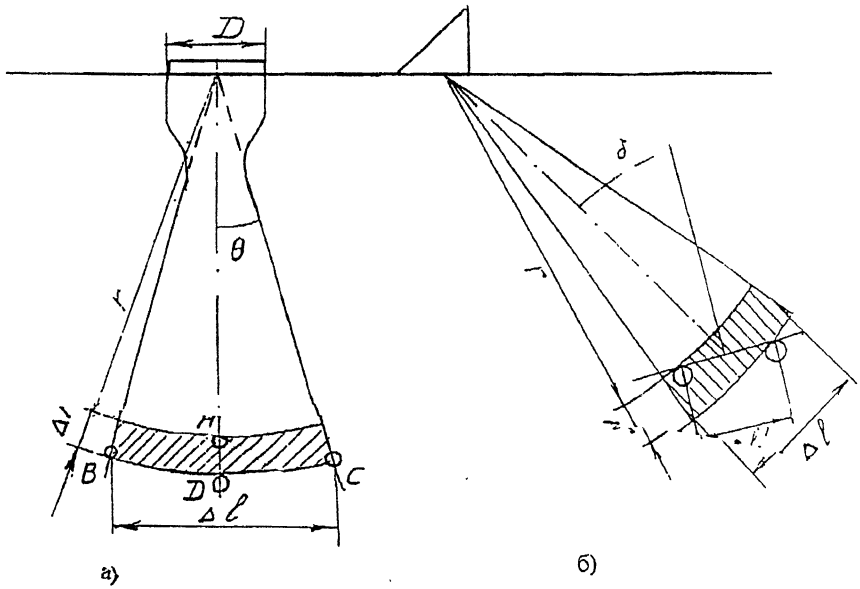


Рис. 4.7. Разрешающая способность эхо-метода

(донный) сигнал гораздо больше первого и выявление таких дефектов также затруднено по сравнению со случаем двух одинаковых сигналов, поэтому вблизи донной поверхности имеется неконтролируемая зона, меньшая, чем мертвая зона, но несколько большая, чем лучевая разрешающая способность.

Фронтальная разрешающая способность в дальней зоне зависит от ширины диаграммы направленности преобразователя. Она приближенно определяется формулой

$$\Delta l \geq 0.3\lambda/a,$$

где  $a$  - радиус или полуширина пьезопластины преобразователя. В ближней зоне разрешению мешают максимумы и минимумы в поле преобразователя. Условие разрешения

$$\Delta l \geq a.$$

Заштрихованная зона на рис. 4.7 - зона озвучивания. Эта область, занимаемая УЗ импульсом в некоторый момент его распространения. Если два отражателя одновременно не попадают в зону озвучивания (как бы мы ее ни располагали), то они разрешаются. Чем меньше зона озвучивания (например при фокусировке, использовании коротких импульсов), тем выше разрешающая способность.

При контроле теневым или ЗТ методами существует только фронтальная разрешающая способность. Два дефекта на одной глубине фиксируются раздельно, если расстояние между ними больше ширины акустического поля на этой глубине. Т. о. разрешающая способность для этих методов близка к фронтальной разрешающей способности эхо-метода.

#### 4.8. Погрешность глубиномера.

1. Понятие о погрешности глубиномера.
2. Способы измерения погрешности глубиномера по СО и на изделии.

1. Процедура измерения координат дефекта (подробнее см. п. 6.1.2) состоит в определении положения преобразователя, соответствующего максимуму эхосигнала от дефекта, измерения глубиномером времени пробега УЗ импульса от преобразователя до дефекта и расчете координат дефекта по результатам измерений. Глубиномер предварительно настраивают на скорость распространения используемого типа волн в материале изделия и исключают время пробега импульса в протекторе прямого или призмы наклонного преобразователя.

При контроле наклонным преобразователем глубиномер позволяет измерять две координаты дефекта: глубину залегания его под поверхностью и расстояние от преобразователя до дефекта вдоль поверхности ОК. Для этого нужно (предварительно исключив время пробега ультразвука в призме преобразователя) настроить глубиномер на измерение указанных величин с учетом угла ввода преобразователя. Эта настройка аналогична

настройке на скорость звука, но для каждой координаты ее нужно выполнять отдельно.

В соответствии с изложенным, погрешности глубиномера могут быть связаны с неточностями:

- а) измерения глубиномером времени пробега импульса;
- б) настройки глубиномера на скорость звука или на измерение координаты дефекта;
- в) настройки задержки начала отсчета глубиномера для исключения времени пробега в протекторе или призме преобразователя.

Погрешности б) и в) войдут во все измерения, выполняемые глубиномером, поэтому они - систематические погрешности (см. п. 6.1.2). Погрешность а), так же, как и погрешности, возникающие при выполнении других операций по измерению координат каждого дефекта (например, определение положения преобразователя, соответствующего максимуму эхосигнала), являются случайными погрешностями.

2. Погрешность а) проверяют по СО-2 или на изделии. Проверка заключается в измерении известных расстояний между поверхностями. При контроле прямым преобразователем удобно использовать многократные отражения между двумя параллельными поверхностями образца или изделия. Например, используют многократные отражения по толщине СО-2. При правильной работе глубиномера интервалы между первым и вторым, вторым и третьим и т. д. донными сигналами должны быть одинаковыми, а интервал между зондирующим импульсом и первым донным сигналом будет больше других интервалов на время пробега импульса в протекторе и слое контактной жидкости.

При контроле наклонным преобразователем для получения одинаковых интервалов удобно использовать многократные отражения между вогнутой цилиндрической поверхностью СО-3 и плоской поверхностью образца. На рис. 4.8,а показаны импульсы на развертки дефектоскопа: 1 - зондирующий, 2 - от границы преобразователь - образец (он часто не виден), 3 - эхосигнал, отраженный от вогнутой поверхности образца, 4 - эхосигнал отраженный от вогнутой поверхности образца, затем зеркально отраженный от плоской поверхности ввода, затем от вогнутой поверхности, но с другой стороны от преобразователя, опять от плоской поверхности и опять от вогнутой поверхности. Серия подобных сигналов (5 и т. д.) продолжается. На рис. 4.8,б одинаковые траектории импульсов показаны смещенными. При правильной работе глубиномера интервалы между третьим и четвертым, четвертым и пятым, а также дальнейшими импульсами должны быть одинаковыми.

Настройку на скорость звука и погрешность б) проверяют только на изделии или на образце, скорость звука в котором такая же, как в изделии. Проверку выполняют путем многократных измерении известных расстоя-

ний. Практически удобные способы настройки глубиномера рекомендованы в п. 6.1.2.

#### 4.9. Плотность сканирования

1. Понятие о сканировании, шаге и скорости сканирования.

2. Соотношение между превышением поисковой чувствительности над чувствительностью оценки (уровнем фиксации), шагом сканирования и акустическим полем преобразователя.

1. Сканирование - перемещение преобразователя по поверхности изделия (или изделия относительно преобразователя) с целью проверки ультразвуком всего металла ОК. Преобразователь перемещают с определенной скоростью (скоростью сканирования) вдоль траектории сканирования (рис. 4.9,а). При ручном сканировании скорость перемещения - не более 150 мм/с и ограничивается физиологическими возможностями среднего дефектоскописта. Ведомственные документы часто рекомендуют применять меньшие скорости сканирования (50 ... 100 мм/с) для повышения надежности контроля. Расстояние между линиями сканирования  $s$  называют шагом сканирования.

2. При сканировании необходимо обнаружить все дефекты, экосигналы от которых превышают уровень фиксации. Чувствительность к дефектам на линии сканирования максимальна, а между этими линиями меньше (рис. 2.4,б). Однако здесь она не должна упасть ниже уровня фиксации. Чтобы обеспечить это чувствительность на линии сканирования должна быть выше уровня фиксации.

Эта завышенная чувствительность соответствует поисковому уровню. Чем больше превышение уровня поиска над уровнем фиксации  $\Delta P$ , тем больше может быть шаг сканирования. Установлено, что если  $\Delta P = 6$  дБ, то шаг может быть равен половине размера пьезоэлемента преобразователя при толщине изделия до 30 мм. Такого значения обычно и придерживаются.

При контроле тонких сварных швов обычно применяют поперечно-продольное сканирование. При нем преобразователь перемещают в основном перпендикулярно шву, смещая его вдоль шва на шаг сканирования, указанный выше. При контроле толстых сварных швов (рис. 4.10) чаще применяют продольно-поперечное сканирование, при котором основное перемещение преобразователя - вдоль шва. Тогда шаг сканирования  $s$  (перпендикулярно шву) можно увеличивать по мере отодвигания преобразователя от шва, поскольку раскрытие пучка лучей увеличивается по мере увеличения пути УЗ.

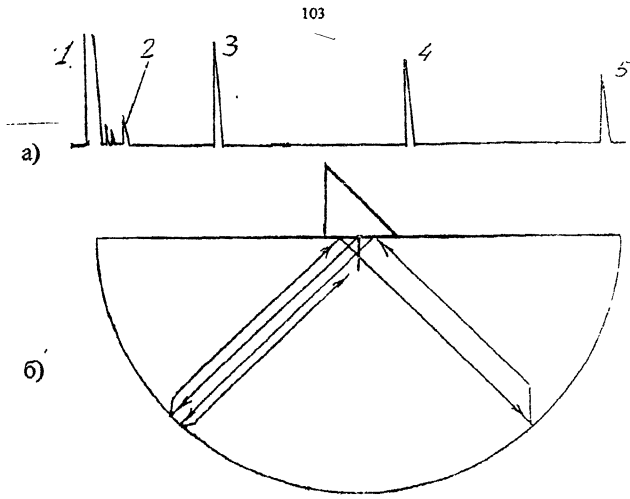


Рис. 4.8. Многократные отражения в полуцилиндрическом образце

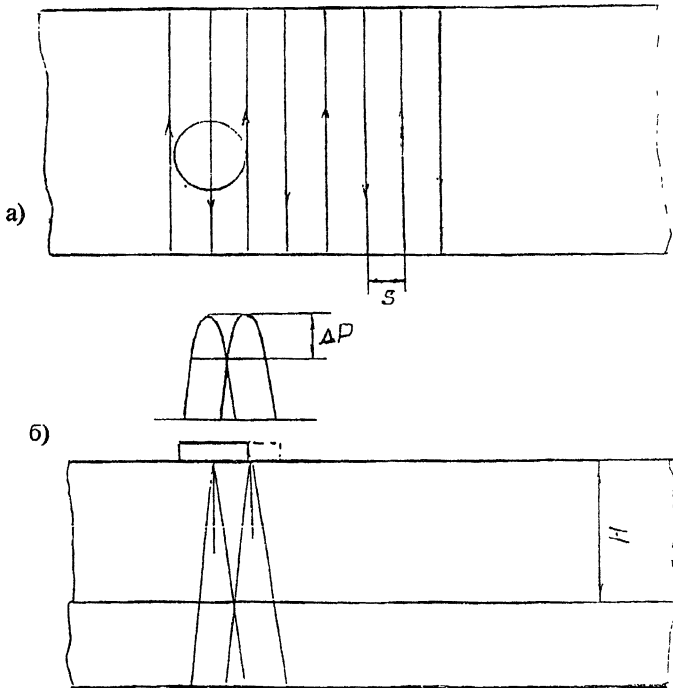


Рис. 4.9. Шаг сканирования и его зависимость от поисковой чувствительности



#### 4.10. Стабильность акустического контакта

1. Понятие об акустическом контакте, способы наблюдения за ним в процессе контроля.

2. Способы повышения стабильности акустического контакта. Способы оценки качества акустического контакта. Способ экспериментальной оценки и сравнение коэффициентов прозрачности границ преобразователя с контролируемым объектом и со стандартным образцом.

1. Акустический контакт обеспечивает передачу ультразвуковых колебаний от преобразователя к контролируемому объекту и обратно от объекта к преобразователю. В процессе контроля качество акустического контакта может изменяться под влиянием случайных факторов особенно при контроле контактным способом: на плохо смазанном участке поверхности слой контактной жидкости между преобразователем и изделием может отсутствовать или не полностью заполнять зазор; изменение толщины слоя контактной жидкости вызовет изменение коэффициента прозрачности границы преобразователя с контролируемым объектом; возможно возникновение клиновидного слоя и тогда изменится направление излучения преобразователя.

При контроле прямым преобразователем чистота поверхности должна быть  $R_z$  10 - 20 мкм. Волнистость поверхности (отношение глубины впадин к периоду неровности) должна быть не более 0,015. Качество акустического контакта проверяют по изменению амплитуды донного сигнала, однако при обычных условиях контроля амплитуда этого сигнала уходит за пределы экрана дефектоскопа и по этому признаку можно заметить лишь резкое ухудшение качества акустического контакта.

При контроле наклонным преобразователем чистота поверхности должна быть  $R_z$  20 - 40 мкм, а волнистость также не более 0,015. Донный сигнал отсутствует, поэтому для проверки качества акустического контакта можно использовать сигнал от какого либо естественного отражателя, например, от двугранного угла изделия, но он наблюдается лишь эпизодически.

2. С точки зрения стабильности, способы акустического контакта, рассмотренные в п. 1.8 (рис. 1.8), можно расположить в следующем порядке: бесконтактный, иммерсионный, щелевой, контактный. Для стабилизации акустического контакта при контактном способе следует принять меры к выравниванию поверхности ввода, удалению брызг металла, отслаивающейся или рыхлой окалины, загрязнений.

Существуют специальные преобразователи с повышенной стабильностью акустического контакта, например, протектор делают из звукогасящего материала с волновым сопротивлением, близким к контактной жидкости. Это уменьшает многократные отражения в жидком слое, устраняет интерференцию этих отражений между собой и стабилизирует контакт.

Сведения о приборном контроле качества акустического контакта в процессе сканирования приведены в п. 7.2.

При настройке чувствительности дефектоскопа по СО или СОП важно обеспечить одинаковое качество акустического контакта преобразователя с образцом и изделием. Для этого применяют одинаковые контактные жидкости, стремятся иметь одинаковую неровность поверхности изделия и образца и корректируют чувствительность, сравнивая амплитуды сигналов от одинаковых отражателей на одинаковой глубине в изделии и образце. Например, используют донные сигналы, сигналы от двугранных углов, зарубок, которые специально выполняют в изделии и потом удаляют полой вышліфовкой.

Очень удобен для этой цели выпускаемый ЦНИИТМАШ (тел. 275 87 50) датчик шероховатости и волнистости (ДШВ). Он похож на обычный преобразователь. Его прижимают к образцу и изделию, в результате чего определяют, насколько нужно скорректировать чувствительность.

#### **4.1.1. Минимальный условный размер фиксируемого дефекта**

1. -
2. Понятие о минимальном условном размере фиксируемого дефекта.

2. Этот параметр определяет минимальный размер дефекта, выявляемого при автоматическом контроле. Ограничение связано с тем, что при стопроцентном контроле скорость сканирования ограничивается условием: каждый элементарный объем ОК должен быть надежно проверен, то есть на него должно падать 2 - 3 излучаемых импульса. При увеличении условного размера дефекта, который должен фиксироваться, размер элементарного объема увеличивается.

## **5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ**

### **5.1. Общие положения.**

1. Понятие об акустическом средстве НК как измерительном или индикаторном приборе.

2. Сроки и организация поверки средств НК. Аттестация персонала и нормативно-технической документации (НТД) на контроль как составная часть метрологического обеспечения процесса НК.

1. Измерительный прибор определяет какую-либо физическую величину, а индикаторный - сравнивает контролируемый объект с образцом и дает заключение типа "да - нет", "больше - меньше".

На начальном этапе развития УЗ дефектоскопии дефектоскопы были индикаторными приборами. Они служили только для поиска дефектов, а позднее выполняли сравнение сигналов от дефектов и от отражателей в стандартных образцах. Индикаторные приборы не подлежат поверке. Когда в дефектоскопах появились глубиномер и аттенуатор, они стали измерительными приборами в целом. Поверке в них подлежат как глубиномер и аттенуатор, так и другие узлы прибора.

Толщиномер - измерительный прибор по определению. Некоторые приборы для контроля физико-механических свойств материалов остаются индикаторными, но большинство (измерители скорости звука, твердости) - измерительные приборы.

2. Поверка средств измерения это определение их погрешности и установление их пригодности к применению. Средства НК (в том числе УЗ дефектоскопы, толщиномеры, приборы для контроля физико-механических свойств) проходят поверку после выпуска, капитального ремонта и в плановом порядке (обычно, ежегодно). Поверку выполняют метрологические службы, имеющие соответствующие разрешения. Они же один раз в три года проверяют ГСО и СОП.

В связи с трудностью организации плановой поверки УЗ дефектоскопов по всем параметрам предусмотрена упрощенная проверка УЗ дефектоскопов метрологической службой предприятия, получившей на это разрешение. Эта упрощенная проверка основных эксплуатационных свойств дефектоскопа и его измерительных устройств проводится аттестованными специалистами на комплексе устройств (КУ), выпускаемым НПО ЦНИИТМАШ (тел. 275 89 22 и 275 89 43).

Перед началом контроля дефектоскоп вместе с преобразователем настраивают и проверяют на государственных стандартных образцах, как описано в разделе 4 и п. 5.2.1, толщиномеры - как рекомендовано в п.п. 3.9 и 5.2.2, приборы для контроля физико-механических свойств материалов - п. 5.2.3. Это текущая проверка прибора. В процессе контроля приборы проходят оперативную поверку. Если такая проверка дала отрицательные результаты, то необходимо повторно проверить все изделия, проконтролированные со времени последней удовлетворительной проверки. От того, насколько надежно работает прибор, зависит частота оперативных проверок.

Аттестация персонала по трехуровневой системе проводится в аттестационных центрах и пунктах, получивших сертификат Руководящего органа системы аттестации персонала Госстандарта или от подобного органа добровольной системы сертификации Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики. Проверяются: 1 - практическая подготовка, 2 - общетеоретические знания по программе, в соответствии с которой написан этот учебник, 3 - знание специфики произво-

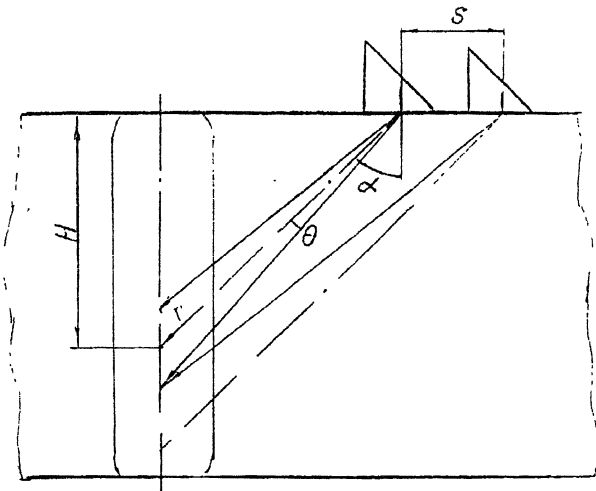


Рис. 4.10. Определение шага продольно-поперечного сканирования

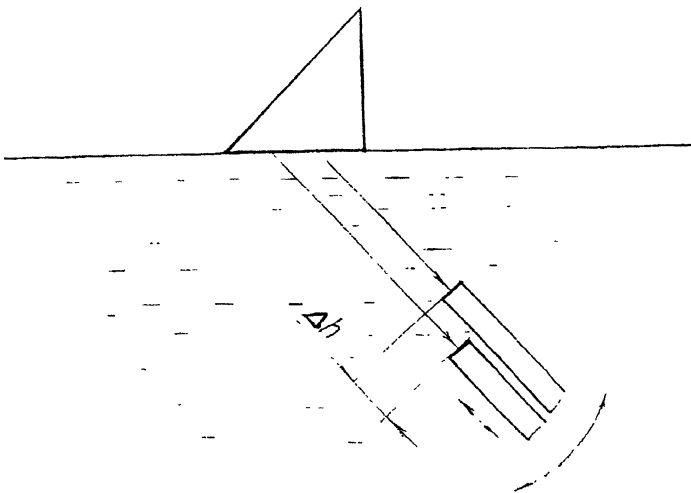


Рис. 5.1. Жидкостной интерферометр для измерения частоты

дства и особенностей контролируемых объектов (по специальной программе).

НТД на контроль проходит проверку в организациях, определенных надзорными органами: Госгортехнадзором, Атомнадзором, Морским регистром и т. д.

## **5.2. Метрологическое обеспечение приборов различного назначения.**

### **5.2.1. Импульсный дефектоскоп.**

1. Текущая проверка работоспособности дефектоскопа.
2. Измерительные и функциональные узлы импульсного дефектоскопа, способы их текущей проверки на СО.

1. Работоспособность дефектоскопа после включения проверяют по государственным стандартным образцам (ГСО) и по стандартным образцам предприятия (СОП). Минимальную проверку проводят по донному сигналу, сигналу от двугранного угла изделия или какому-либо отражателю в стандартном образце. Прибор работает в нормальном режиме, если установлено, что сигнал имеет заданную амплитуду и находится в заданном месте на линии развертки.

2. Импульсный дефектоскоп имеет два измерительных узла: аттенуатор и глубиномер. Остальные узлы дефектоскопа (см. п. 3.2) - функциональные. Способы текущей проверки глубиномера на СО описаны в п. 4.8.

Текущая проверка аттенуатора на СО ГОСТом 14782-86 и другими не предусмотрена. Можно однако рекомендовать проверить аттенуатор, измерив экосигналы от двух отражателей, отношение амплитуд экосигналов от которых рассчитывается по формулам акустического тракта. Например, разница в дБ амплитуд экосигналов от отверстия диаметром 6 мм и дна образца СО-2 приблизительно равна 9 дБ при контроле прямым преобразователем, если отражатели находятся в его дальней зоне. При контроле наклонным преобразователем с углом ввода  $50^\circ$  на частоту 2,5 МГц разница в дБ амплитуд экосигналов от отверстия и двугранного угла СО-2 составляет приблизительно 11 дБ.

Часто аттенуатор имеет две шкалы: грубую с ценой деления 10 или 20 дБ и плавную с ценой деления 1 или 2 дБ. Тогда аттенуатор проверяют, сравнивая показания шкал. Например, отметив амплитуду какого-либо экосигнала на экране, увеличивают чувствительность на 10 или 20 дБ по грубой шкале и на столько же снижают по плавной шкале. При правильной работе аттенуатора амплитуда отмеченного экосигнала должна остаться неизменной. Такую проверку проводят для всех диапазонов грубой шкалы аттенуатора.

В дефектоскопе УД2-12 проверку выполняют, сравнивая показания БЦО и кнопочный аттенуатор. С помощью некалиброванных регуляторов чувствительности амплитуду экосигнала от какого-либо отражателя устанавливают на полную высоту экрана. При этом показания БЦО должны быть близкими к нулю. Нажимают одну из кнопок аттенуатора, например, 16 дБ. Цифровой аттенуатор должен показать 16 дБ. Допустимая погрешность  $\pm 1$  дБ.

Отметим способы текущей проверки по ГСО (см. п. 3.6) важнейших функциональных узлов дефектоскопа. Диапазоны развертки проверяют с помощью предварительно проверенного глубиномера или (для дефектоскопа УД2-12) проверяют правильность попадания на соответствующие участки развертки соответствующих многократных донных сигналов в СО-2.

Чувствительность дефектоскопа УД2-12 проверяют при включении наклонного преобразователя с углом ввода  $50^\circ$  по сигналу от вогнутой полуцилиндрической поверхности СО-3. Удовлетворительная чувствительность преобразователя должна быть предварительно проверена на другом заведомо исправном дефектоскопе.

При нажатии всех кнопок аттенюатора сигнал от СО-3 должен достигать полной высоты экрана (0 дБ по БЦО) при произвольном (в том числе, соответствующем максимуму чувствительности) положении ручек "АМПЛ" и ">". При выполнении этого условия чувствительность дефектоскопа является вполне удовлетворительной. Если этот уровень чувствительности не достигается, то удовлетворительно работающим можно считать дефектоскоп, если отпущены кнопки аттенюатора 16 и 4 дБ. Таковую проверку производят на всех частотах.

Частота (точнее, длина волны) должна проверяться интерференционным методом по СО-4 (рис. 3.6,з), однако по измерениям авторов такая проверка очень сложна и неточна. Значительно удобнее и точнее способ, реализованный в "Комплексе устройств" НПО ЦНИИТМАШ (тел. 275-89-22 и 275-89-43). Используется ванна с жидкостью - жидкостной интерферометр. Оба отражателя (рис. 5.1) поворачивают вокруг точки ввода преобразователя, добываясь максимального экосигнала. Затем их взаимно перемещают микрометрическим винтом. Наблюдают появление максимумов экосигналов, когда расстояние до отражателей одинаково или когда расстояние  $\Delta h$  между ними равно целому числу полуволн. По шкале измеряющего микрометра определяют среднее  $\Delta h$  из двух значений: большего и меньшего нуля. Частоту  $f$  рассчитывают по формуле

$$f = c / (2\Delta h),$$

где  $c$  - известная скорость звука в жидкости интерферометра.

Лучевую разрешающую способность проверяют по СО-1 из оргстекла. В нем имеются отражатели в виде ступенчатого паза и фигурного отверстия с тремя разными диаметрами. Ступенчатый паз используют при контроле прямым, а фигурное отверстие - наклонным преобразователем. Определяют минимальное расстояние  $\Delta r_0$  между отражателями, при котором они фиксируются раздельно (из двух значений 2,5 и 5 мм, имеющихся в образце). Разрешающую способность  $\Delta r$  в стали или другом материале изделия определяют по формуле

$$\Delta r = c\Delta r_0 / c_0,$$

где  $c$  и  $c_0$  - скорости звука в изделии и образце.

### 5.2.2. Толщиномеры

#### 1. Текущая проверка работоспособности толщиномера.

2. Проверка точности толщиномера во всем диапазоне толщин, при различных условиях контроля (искривленные, шероховатые поверхности, непараллельность стенок объекта).

1. При текущей проверке толщиномер следует проверить по плоскостопараллельным СОП разной толщины, изготовленным из одного материала. Предварительно настраивают прибор, как указано в п. 3.9. Окончательную настройку на скорость звука перед началом контроля выполняют по СОП из контролируемого изделия с его реальной кривизной и шероховатостью поверхности. В процессе контроля толщиномер периодически проверяют по упомянутому образцу или изделию (например, торцу трубы). Это оперативная проверка и по результатам ее при необходимости повторяют измерения согласно п. 5.2.1.

2. Погрешность измерения толщиномера может изменяться в зависимости от измеряемой толщины, поэтому метрологическую проверку прибора выполняют в начале, в конце и внутри измеряемого прибором диапазона. Возможность и точность измерения толщины зависят от кривизны и шероховатости поверхностей изделия, непараллельности его стенок. Влияние этих факторов проверяют на специальных образцах при метрологической аттестации толщиномера. Если прибор предназначен для контроля изделий на степень коррозии внутренней поверхности, то проверяют способность толщиномера выявлять небольшие отражатели типа плоскостоподонных отверстий диаметром 1 - 2 мм. Тогда он сможет регистрировать отражения от коррозионных трещин.

В процессе контроля толщиномер периодически проверяют по изделию или упомянутому в подпункте 1 образцу, которые имеют кривизну, шероховатость и другие влияющие факторы, соответствующие проверяемому изделию.

### **5.2.3. Приборы для контроля физико-механических свойств материалов.**

1. Текущая проверка работоспособности прибора.
2. Проверка контрольного прибора во всем диапазоне изменений в соответствии с НТД.

1. Текущую проверку работоспособности и точности измерений прибора для контроля физико-механических свойств материалов осуществляют по образцам, для которых измеряемая величина известна с более высокой степенью точности, чем у проверяемого прибора. Чаще всего в качестве образца используют заранее проверенное другими способами изделие или его часть. Если погрешность по результатам оперативной проверки точности измерения превышает требования НТД, то повторяют измерения согласно рекомендациям п. 5.2.1.

2. Если контрольный прибор измерительный, то его проверку выполняют во всем диапазоне измерений в соответствии с методикой контроля или инструкцией по эксплуатации прибора. В этой НТД должны быть указания о проверке прибора в целом, а при необходимости - отдельных узлов; способы проверки (по стандартным образцам или с помощью электронной аппаратуры); критерии удовлетворительности результатов проверки. Проверку такого прибора выполняет метрологическая служба.

Если контрольный прибор индикаторный, то проверка его работоспособности состоит в оценке возможности прибора выполнять сравнительные операции, для которых он предназначен. Проверку такого прибора выполняет служба эксплуатации. Результаты проверки должны подтверждать соответствие прибора основным техническим требованиям. При неудовлетворительных результатах прибор подлежит ремонту.

### **5.3. Руководящие материалы по контролю.**

1. -

2. Основные положения стандартов на методы ультразвукового контроля. Знание стандартов, кодов, инструкций.

2. Существуют стандарты на приборы УЗ контроля (дефектоскопы, толщиномеры, преобразователи), на терминологию, на общие принципы контроля металлов, на стандартные образцы, на методы контроля основных типов продукции: листов, труб, рельсов, поковок, сварных соединений и т. д. Здесь рассмотрены только стандарты на методы УЗ контроля.

Согласно ГОСТу 20415-82 "Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения" в стандартах и другой НТД на контроль должны быть указаны область применения, перечень обнаруживаемых дефектов, требования к квалификации и аттестации специалистов, требования к аппаратуре (в том числе к СОП). Должны быть даны предписания по подготовке, проведению контроля, оценке и оформлению результатов. Оценка результатов должна быть сформулирована с использованием параметров, доступных измерению при УЗ контроле. Некоторые положения по контролю основных типов продукции приведены в разделах 6 и 7.

Один из наиболее сложных объектов УЗ контроля - сварные соединения. В частности, большим разнообразием отличаются сварные соединения теплоэнергетического оборудования. Они относятся к числу очень ответственных и в то же время ремонт их часто затруднителен и стоит дорого, поэтому нормы допустимости дефектов определяются из условий минимизации ущерба. Документ по УЗ контролю сварных соединений тепловых электростанций РД 34.17.302-97 отличается четкостью и законченностью. В нем реализовано стремление извлечь максимум информации из данных ультразвукового контроля, сформулировать четкие количественные критерии оценки качества.

Сравнивая этот документ с другими подобными методиками, следует отметить, что унифицированные методики по контролю сварных соединений в атомной энерге-



тике ориентируются, прежде всего, на достижение максимальной безопасности работы контролируемых объектов и, когда возникает дилемма пропустить или забраковать дефект (возможно, допустимый), принимается решение - лучше забраковать. Методики ультразвукового контроля сварных соединений химических установок, магистральных трубопроводов и др. отличаются упрощенностью, в них не используются все возможности измерения дефектов с помощью ультразвука. Распространяет ОП-501 предприятие "Норма", телефоны (095) 275-89-43, 274-40-34.

## **6. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИЗНАКИ ДЕФЕКТОВ**

### **6.1 Эхо метод**

#### **6.1.1. Амплитуда эхосигнала**

1. Измерение амплитуд эхосигналов от дефектов, измерение условного коэффициента выявляемости.

2. Способ проверки attenuатора по СО. Эквивалентная площадь (диаметр) дефекта. Способы определения.

1. Методика измерения амплитуд эхосигналов от дефектов изложена в п. 3.3. Напомним, что в узких пределах (обычно не более 20 дБ) измерения амплитуд можно выполнять по экрану дефектоскопа (на УД2-12 - с помощью БЦО). Измерения во всем диапазоне амплитуд сигналов выполняются с помощью attenuатора.

Измерение attenuатором состоит в том, что усиление регулируют этим органом, не изменяя положения других регуляторов чувствительности дефектоскопа. Амплитуды всех измеряемых сигналов последовательно подводят к одной и той же горизонтальной линии (стандартному уровню), проведенной на середине или в верхней половине экрана (жирная линия на рис. 6.1). Цифры на шкале attenuатора указывают амплитуду в децибелах. Если у attenuатора несколько шкал (например, грубая и плавная), то их показания складывают. В приборе УД2-12, выбрав стандартный уровень на полной высоте экрана (0 дБ по БЦО), амплитуду удобно измерять, складывая показания отжатых кнопок attenuатора и БЦО.

В некоторых дефектоскопах (не УД2-12) цена деления attenuатора довольно велика, например, 2 дБ. Тогда выше и ниже стандартного уровня проводят по две линии, соответствующие -2, -1, +1, и +2 дБ (рис. 6.1). Например, на стандартный уровень амплитуду импульса attenuатором установить не удастся. Тогда ее устанавливают на линию -1 дБ и это значение вычитают из показаний attenuатора. Таким образом добиваются точности измерения 1 дБ или даже 0,5 дБ. Однако такая точность практически не нужна, т. к. нестабильность акустического контакта вызывает вариации амплитуд импульсов в 1 - 2 дБ

Напомним (см. п. 2.1), что децибелы - относительные логарифмические единицы. Чаще всего амплитуды всех эхосигналов сравнивают с амплитудой максимального сигнала - зондирующего импульса. Все другие сигналы меньше этого импульса, поэтому они измеряются в отрицательных децибелах. Обычно об этом каждый раз не говорят, а лишь подразуме-

мевают. Амплитуда зондирующего импульса - ноль дБ. Децибелы, измеренные относительно этого импульса, будем называть нормализованными (ндБ).

По амплитуде эхосигнала определяют эквивалентную площадь (диаметр) дефекта. Эквивалентная площадь (диаметр) дефекта это площадь (диаметр) плоскодонного отверстия, расположенного в таком же материале на той же глубине, что и дефект, дающего такую же амплитуду эхосигнала. Отношение эквивалентной площади к реальной площади дефекта называют условным коэффициентом выявляемости или просто коэффициентом выявляемости дефекта при контроле эхометодом. Деля на него эквивалентную площадь, можно оценить реальную площадь компактного (непротяженного) дефекта.

Прямой способ определения эквивалентной площади - подбор соответствующего плоскодонного отверстия в СОП. Вместо плоскодонных отверстий можно использовать другие типы отражателей (например, при контроле наклонным преобразователем используют сегментные отражатели, зарубки) которые пересчитывают в плоскодонные отверстия с помощью формул акустического тракта.

Косвенный, но более удобный способ определения эквивалентной площади - с помощью АРД диаграмм (см. п. 2.7 и следующий подпункт). Если АРД диаграммы для используемого преобразователя нет или контролируется изделие малого диаметра, для которого АРД диаграммы также отсутствуют, приходится изготавливать стандартные образцы.

2. Понятия эквивалентной площади и коэффициента выявляемости сформулированы в п. 1. Заметим, что при измерении разными преобразователями (разного размера на разной частоте) эквивалентная площадь одного и того же дефекта может быть разной. Несмотря на это обстоятельство, по результатам статистических исследований для компактных (непротяженных) дефектов установлено, что коэффициент выявляемости равен 0,15 - 0,4 для поковок и проката и 0,01 - 0,1 для сварных швов.

Для измерения эквивалентной площади с помощью АРД диаграммы аттенуатор настраивают на измерение нормализованных дБ, как рекомендовано ниже, поскольку именно эта величина отложена на оси ординат АРД диаграммы. Применяют размерную АРД диаграмму для используемого преобразователя. Для исследуемого дефекта измеряют глубину залегания и амплитуду (в ндБ). Эквивалентную площадь (диаметр) определяют по кривой АРД диаграммы, ближайшей к точке с найденными координатами. При необходимости расстояние между кривыми интерполируют.

При контроле изделий с большим затуханием ультразвука пользуются наклонной сеткой координат вместо горизонтальных линий, как описано в п. 4.3. Угол наклона сетки определяется коэффициентом затухания.

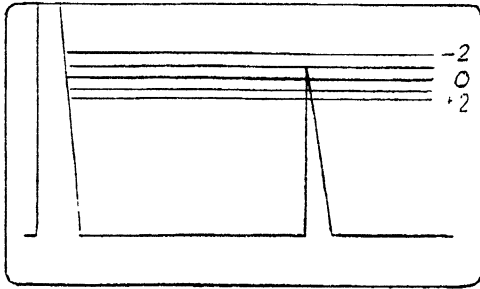


Рис. 6.1. Измерение амплитуды сигнала аттенуатором с дополнительной шкалой

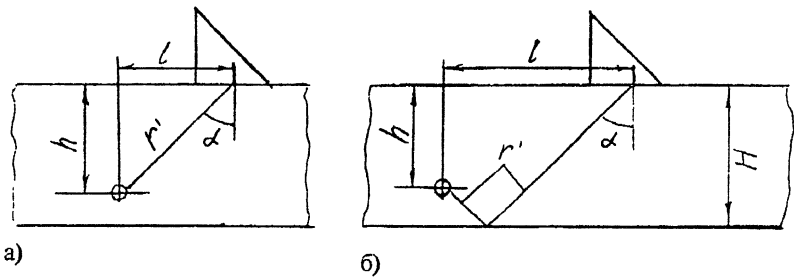


Рис. 6.2. Измерение координат дефектов при контроле прямым (а) и однажды отраженным (б) лучами

Для удобства работы АРД диаграмму помещают в планшет, закрытый поворачивающимся прозрачным диском. В литературе наряду с АРД диаграммой упоминается SKH диаграмма. Ее особенности и недостатки отмечены в п. 4.3.

Для настройки аттенюатора на измерение ндБ нужно рассчитать по АРД диаграмме или по формуле акустического тракта ослабление эхосигнала каким-либо отражателем. Чаще всего используют донный сигнал изделия или сигнал от отверстия диаметром 6 мм в СО-2. Найденное значение амплитуды сигнала нужно отложить на шкале аттенюатора. Получить максимальный эхосигнал от этого отражателя. Некалиброванными регуляторами чувствительности установить амплитуду этого сигнала на стандартный уровень. Для УД2-12 с помощью некалиброванных регуляторов ("АМПЛ" и ">") добиться, чтобы сумма показаний отжатых кнопок аттенюатора и БЦО равнялась найденному значению.

Разберем пример. Нужно подготовить аттенюатор дефектоскопа УД2-12 к работе с преобразователем П111-2,5-К12-002 (прямым на частоту 2,5 МГц с диаметром пьезопластины 12 мм) и АРД диаграммой к нему (рис. 4.2).

Ручки "АМПЛ" и ">" установить на максимум чувствительности. Можно пользоваться отсечкой шумов, поскольку отсечка компенсированная и измеряемых амплитуд не изменяет. Получить максимум эхосигнала от отверстия диаметром 6 мм в СО-2 и подвести под него строб-импульс АСД. По рис. 4.2 амплитуда этого сигнала должна быть равна 15 ндБ. Отпустить кнопки 8 и 4 дБ остальные кнопки должны быть нажатыми. Ручкой ">" отрегулировать чувствительность так, чтобы показания БЦО были 3 дБ ( $8 + 4 + 3 = 15$ ).

Настройка аттенюатора выполнена. Чтобы определить эквивалентную площадь выявленного дефекта нужно поместить эхосигнал от него на строб-импульс. Кнопочный аттенюатор отрегулировать так, чтобы вся амплитуда эхосигнала была видна на экране. Считать показания БЦО. Сложить показание отжатых кнопок аттенюатора и БЦО. Предположим, оно равно 54 дБ. Найти соответствующее значение на вертикальной шкале АРД диаграммы (рис. 4.2). На рисунке штриховые наклонные линии проведены с учетом коэффициента затухания УЗ (0,015 непер/см). Предположим, дефект расположен на глубине 200 мм. На пересечении вертикали "200" и наклонной линии, идущей от цифры "54", находим эквивалентный диаметр дефекта 3 мм, что соответствует площади  $7 \text{ мм}^2$ .

При контроле преобразователем (обычно наклонным) чувствительности прибора иногда недостаточно, чтобы при нажатых кнопках аттенюатора получить необходимую высоту эхосигнала на экране от выбранного отражателя. Тогда можно при настройке отпустить некоторые кнопки, но при дальнейших измерениях ими не пользоваться.

### 6.1.2. Координаты дефекта

1. Принцип измерения координат дефекта
2. Проверка погрешности толщиномера. Систематические и случайные погрешности измерения координат, промахи.

1. Измерение координат дефекта состоит из трех операций: определяют положение преобразователя, соответствующее максимуму эхосигнала от дефекта (рис. 6.2,а); с помощью дефектоскопа измеряют время про-

бега импульса от пьезопластины преобразователя до дефекта; пересчитывают измеренное время в координаты дефекта. Пересчет состоит в том, что по измеренному времени пробега импульса  $t$  находят расстояние  $r$  от преобразователя до дефекта

$$r = c(t - t')/2.$$

Здесь  $c$  - скорость звука в изделии;  $t'$  - время пробега импульса в протекторе или призме преобразователя и контактной жидкости, цифра 2 в знаменателе учитывает, что импульс пробегает путь в прямом и обратном направлениях. Направление акустической оси считают известным: для прямого преобразователя - перпендикулярно поверхности ввода ( $\alpha = 0$ ), для наклонного - определяется углом ввода  $\alpha$ . Таким образом находят координаты дефекта относительно точки выхода преобразователя: глубину залегания дефекта  $h$  и расстояние вдоль поверхности  $l$

$$h = r \cos \alpha; \quad l = r \sin \alpha.$$

Обычно на шкалах глубиномера указывают непосредственно значения координат дефекта  $h$  и  $l$  (или  $Y$  и  $X$ , как в дефектоскопе УД2-12) для преобразователя с данным углом ввода.

Многие дефектоскопы (например, большинство зарубежных) позволяют измерять только расстояние  $r$ . В этом случае пересчет расстояния в координаты выполняют с помощью координатной линейки. На ее шкалах отложены значения  $r$ ,  $h$  и  $l$  для преобразователя с заданным углом ввода  $\alpha$ .

Один из способов контроля наклонным преобразователем - однажды отраженным лучом (рис. 6.2,б). В этом случае координата вдоль поверхности  $l$  прямо определяется по шкале  $X$  дефектоскопа. Координата  $h$ , соответствующая глубине залегания дефекта от поверхности, определяется формулой  $h = 2H - Y$ , где  $H$  - толщина ОК, а  $Y$  - показание шкалы  $Y$  дефектоскопа.

В дефектоскопах, имеющих возможность прямого измерения координат, перед началом измерения глубиномер предварительно настраивают. Настройку дефектоскопа УД2-12 выполняют в следующем порядке. Вводят задержку начала отсчета времени так, чтобы исключить  $t'$ . Для прямого преобразователя это делают с помощью СО-2, высота которого равна  $H = 59$  мм. Время пробега импульсом продольной волны этого расстояния в стали равно  $t = 2H/c_l = 2 \cdot 59/5,9 = 20$  мкс. Подводят строб-импульс под соответствующий донный сигнал и переключают БЦО на измерение  $\mu s$  (микросекунд) с точностью до 0,1. Вращают ручку ">O<" на верхней панели (она регулирует задержку начала отсчета времени) до получения значения "20,0" мкс. Далее включают БЦО на измерение " $H$ " и вращают ручку-колесико " $H$ " до получения значения "59".

Для наклонного преобразователя настройку начала отсчета времени выполняют также, но используют СО-3. Время пробега импульсом поперечной волны расстояния, равного радиусу образца  $R = 55$  мм, составляет  $t = 2R/c_t = 2 \cdot 55/3,23 = 34,1$  мкс. Получают максимальный эхосигнал от СО-3.

С помощью ручки ">O<" добиваются получения значения "34,1" на шкале времени БЦО.

Настройку на измерение координат  $h = Y$  и  $l = X$  выполняют по максимуму эхосигнала от отверстия диаметром 6 мм в СО-2. БЦО переключают на "Y" и вращают ручку-колесико "Y" до получения значения "42" (глубина залегания отверстия 44 мм, радиус отверстия 3 мм, глубина залегания точки отражения приблизительно равна 42 мм). Далее переключают БЦО на "X", измеряют масштабной линейкой расстояние вдоль поверхности образца от точки ввода преобразователя до проекции центра отверстия диаметром 6 мм на поверхность (минус 2 мм поправка на радиус отверстия) и вращают ручку-колесико "X" до получения цифры этого расстояния на БЦО. Если контролируют изделие не из углеродистой стали, а из другого материала, настройку выполняют не по СО-2, а по СО-2А из материала изделия.

2. Способы проверки погрешности глубиномера и причины погрешностей рассмотрены в п.п. 4.8 и 5.2.1. Здесь изложим погрешности измерения координат дефекта в целом. Причины погрешностей следующие:

А. Неточность определения положения преобразователя, соответствующего максимуму эхосигнала от дефекта. Чем уже диаграмма направленности преобразователя, тем меньше эта погрешность.

Б. Погрешность измерения времени пробега глубиномером, которая состоит из:

Б' - собственно погрешности глубиномера как измерительного устройства;

Б" - погрешности, связанной с конечной длительностью импульса, рассмотренной в п. 3.9.

Б''' - неточности настройки задержки начала отсчета глубиномера для исключения времени пробега импульса в протекторе или призме преобразователя.

В. Погрешности настройки глубиномера на скорость звука.

Г. Неточности определения угла ввода преобразователя.

При настройке глубиномера дефектоскопа УД2-12 на измерение координат дефекта две последние погрешности сливаются, т. к. фактически учитывается величина  $c_t \cos \alpha$  при настройке на измерение  $Y$  и  $c_t \sin \alpha$  при настройке на измерение  $X$ .

Систематические погрешности измерения координат возникают в результате ошибок при настройке глубиномера, т. е. факторов Б'', В и Г. Они входят как погрешность во все дальнейшие измерения координат. Случайные погрешности возникают при каждом отдельном измерении под действием факторов А и Б''. Фактор Б' может вызывать как систематические, так и случайные погрешности. Промахи - это грубые ошибки обычно случайного характера.

### 6.1.3. Условные размеры дефекта

1. Понятие условных линейных размеров отражателей, способ измерения условных размеров, используемый аттестуемым при контроле конкретных объектов. Способы измерения расстояния между дефектами.

2. Линейные и угловые условные размеры отражателей. Способы измерения условных размеров и их сравнение.

1. Измерение размеров дефектов УЗ методами выполняют весьма приближенно. В п. 6.1.2. рассмотрен способ оценки площади компактных дефектов (различие между компактными и протяженными дефектами изложено в п. 6.4.1). Величину протяженных дефектов оценивают, измеряя их условные размеры.

Преобразователь перемещают над дефектом (рис. 6.3,а) и наблюдают за изменением амплитуды эхосигнала. Вблизи краев дефекта амплитуда быстро уменьшается. Расстояние между этими положениями преобразователя называют условными размерами. При измерении наклонным преобразователем его ориентацию поддерживают постоянной, например, при контроле сварных швов направление излучения перпендикулярно оси шва, остальная процедура измерения условной протяженности - та же, как на рис. 6.3,а.

Как по условному размеру найти истинный размер дефекта? Это зависит от того, по какому признаку определялись положения преобразователя, соответствующие краям дефекта. В подпункте 2 изложены способы измерения условных размеров, различающиеся именно по признакам определения крайних положений преобразователя. Аттестуемому нужно выбрать и изучить способ измерения, используемый при контроле конкретных объектов в соответствии с действующими инструкциями.

Расстояние между компактными дефектами считают равным промежутку между максимумами эхосигналов от этих дефектов, а между протяженными - равным промежутку между крайними положениями преобразователя, о которых говорилось выше. Расстояние между компактным и протяженным дефектами считают равным промежутку между максимумом эхосигнала от компактного дефекта и крайним положением преобразователя.

2. Понятие линейных условных размеров дефектов рассмотрено в подпункте 1. Угловые условные размеры дефектов определяют при повороте преобразователя относительно дефекта. За начало отсчета углов поворота принимают положение преобразователя, соответствующее максимуму эхосигнала, а углы, соответствующие крайним положениям, определяют по признакам указанным в НТД.

Используют два основных способа измерения линейных условных размеров: относительный и абсолютный. В относительном способе крайними считают положения преобразователя, при которых амплитуда эхо-

сигнала от дефекта уменьшилась в определенное число раз по отношению к максимуму эхосигнала. Применяют следующие относительные способы:

- 6 дБ - амплитуда эхосигнала уменьшилась на 6 дБ или в 2 раза;
- 10 дБ - амплитуда эхосигнала уменьшилась на 10 дБ или в 3,3 раза;
- 20 дБ - амплитуда эхосигнала уменьшилась на 20 дБ или в 10 раз.

В абсолютном способе крайними считают положения преобразователя, при которых амплитуда эхосигнала от дефекта уменьшилась до определенного уровня, задаваемого размером искусственного дефекта; обычно это уровень фиксации. ГОСТ 14782 рекомендует использовать на выбор либо абсолютный способ, либо способ 6 дБ. Большинство отечественных НГД применяют абсолютный способ. В европейских странах распространен способ 20 дБ, в США - абсолютный и 20 дБ.

Сравним результаты измерения линейных условных размеров (условной протяженности) на примере плоскодонных отражателей (рис. 6.4.б). Прямой преобразователь диаметром  $D = 12$  мм на частоту 2,5 МГц перемещали над плоскодонными отверстиями разного диаметра на глубине 100 мм и измеряли изменение амплитуды эхосигнала (рис. 6.4.а). Если размер отражателя значительно меньше размера преобразователя, то изменение амплитуды определяется диаграммой направленности преобразователя. В этом случае диаграмма направленности отражателя (как вторичного излучателя) будет значительно шире диаграммы направленности преобразователя и не будет влиять на изменение амплитуды эхосигнала при перемещении преобразователя. Будет, однако, наблюдаться рост максимальной амплитуды с увеличением площади отражателя. Например, кривые 1, 2 и 3 имеют одинаковую форму, но разную высоту

Когда размер отражателя приближается к размеру преобразователя (кривые 4, 5) на форму кривых влияет диаграмма направленности отражателя, который является как бы вторичным излучателем: кривые сужаются. Когда размер отражателя больше размера преобразователя (кривая 6), амплитуда эхосигнала может превзойти донный сигнал. Когда размер отражателя значительно больше размера преобразователя (кривая 7) на кривой изменения амплитуды появляется плато, а вблизи краев отражателя появляются максимумы. Это вклад "блестящих точек", которыми являются края отражателя.

На рис. 6.4.в показаны результаты измерений условной протяженности плоскодонных отражателей различными способами, полученные путем обработки кривых, показанных на рис. 6.4.а. Прямая  $L = d$  соответствует идеально точному измерению.

Кривая  $L_2$  построена способом 6 дБ. Условная протяженность постоянна для малых отражателей, когда форма кривых на рис. 6.4.б определяется диаграммой направленности преобразователя. При одинаковых диаметрах отражателя и преобразователя она имеет минимум: здесь наиболее велико влияние диаграммы направленности отражателя.

При больших размерах отражателя кривая приближается к прямой  $L = d$ . При этом положении преобразователя над краем дефекта ровно половина энергии проходит мимо дефекта и амплитуда эхосигнала уменьшается в 2 раза по сравнению с положением преобразователя над средней частью дефекта. Именно этот случай показан на рис 6.3, положения преобразователя 2 и 4.

Последняя часть кривой  $L_2$  (рис. 6.4.в) очень удобна для измерения истинных размеров дефекта, но наличие минимума при  $d = D$  мешает измерению этим способом. Отметим, что уменьшение в 2 раза, амплитуды на краю естественных дефектов наблюдается нечетко.

Кривая  $L_3$  построена способом 20 дБ. Минимум на ней слабо заметен. Условный размер искусственного дефекта всегда значительно больше истинного (особенно для



малых дефектов), но практика измерения естественных дефектов показывает, что превышение условного размера над истинным невелико.

Кривая  $L_1$  построена абсолютным способом при уровне фиксации, соответствующем эхосигналу от плоскодонного отверстия диаметром 2 мм. С увеличением размера дефекта условная протяженность очень быстро возрастает, а потом кривая идет подобно  $L_3$ , но минимум не наблюдается.

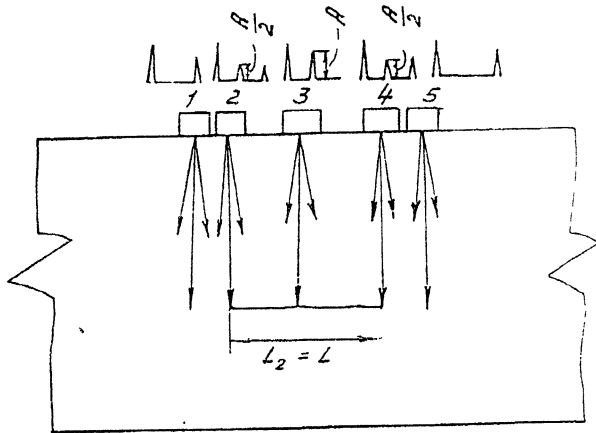
Приведенные результаты показывают, что не один из способов измерения условной протяженности не является вполне удовлетворительным. При измерении способом «6 дБ» условная протяженность, как правило, больше или равна истинному размеру, способом «20 дБ» и абсолютным - больше истинного.

Несмотря на отмеченные трудности в определении истинных размеров дефектов, условную протяженность широко используют для оценки допустимости дефектов, поскольку эта характеристика обладает удовлетворительной повторяемостью при измерениях и несет полезную информацию о протяженных дефектах.

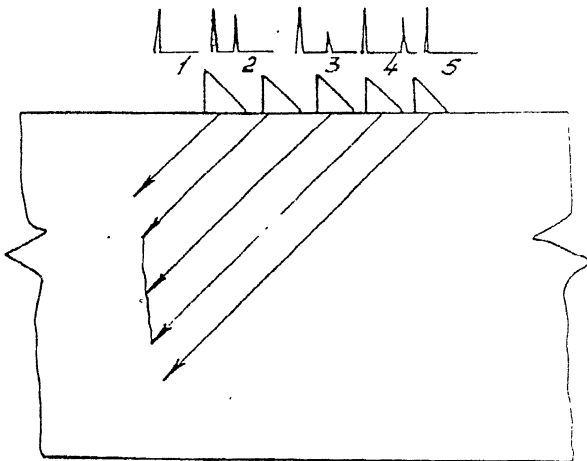
Для округлых дефектов, имитируемых боковыми цилиндрическими отражателями (рис. 6.5,б), измерение условных размеров не дает новой информации по сравнению с измерением амплитуды эхосигналов. Условные размеры, измеренные относительным способом (прямая  $L_2$  на рис. 6.5,в для способа «6 дБ»), не зависят от размера отражателя, а измеренные абсолютным способом (кривая  $L_1$ ) зависят только от диаграммы направленности преобразователя. По критериям, рассмотренным в п. 6.1.4, все округлые дефекты относятся к компактным.

Выше рассмотрено измерение условной протяженности при контроле прямым преобразователем. На рис. 6.3,б и 6.6 показано измерение условной высоты и условной ширины при контроле наклонным преобразователем. Условная протяженность при таком контроле измеряется при движении преобразователя в направлении, перпендикулярном плоскости падения (при контроле сварных соединений - движение вдоль шва). Условная ширина - при движении в плоскости падения (поперек шва, как на рис. 6.6,в). Условная высота - также при движении поперек шва (рис 6.3,б и 6.6,б), но измеряют не перемещение преобразователя по поверхности изделия (пространственную огибающую, см. п. 2.7), а время пробега импульса на линии развертки (временную огибающую).

Из сравнения рис. 6.6,б и 6.6,в видно, что пространственные огибающие на заданном уровне имеют приблизительно одинаковую протяженность  $\Delta x_6 \approx \Delta x_в$ , но перемещения эхосигнала по линии развертки  $\Delta l$  в случае б значительно больше. Для определения положений преобразователя, соответствующих крайним точкам, применяют те же критерии, что при измерении условной протяженности.



а)



б)

Рис. 6.3. Измерение условных размеров: а - условной протяженности; б - условной высоты

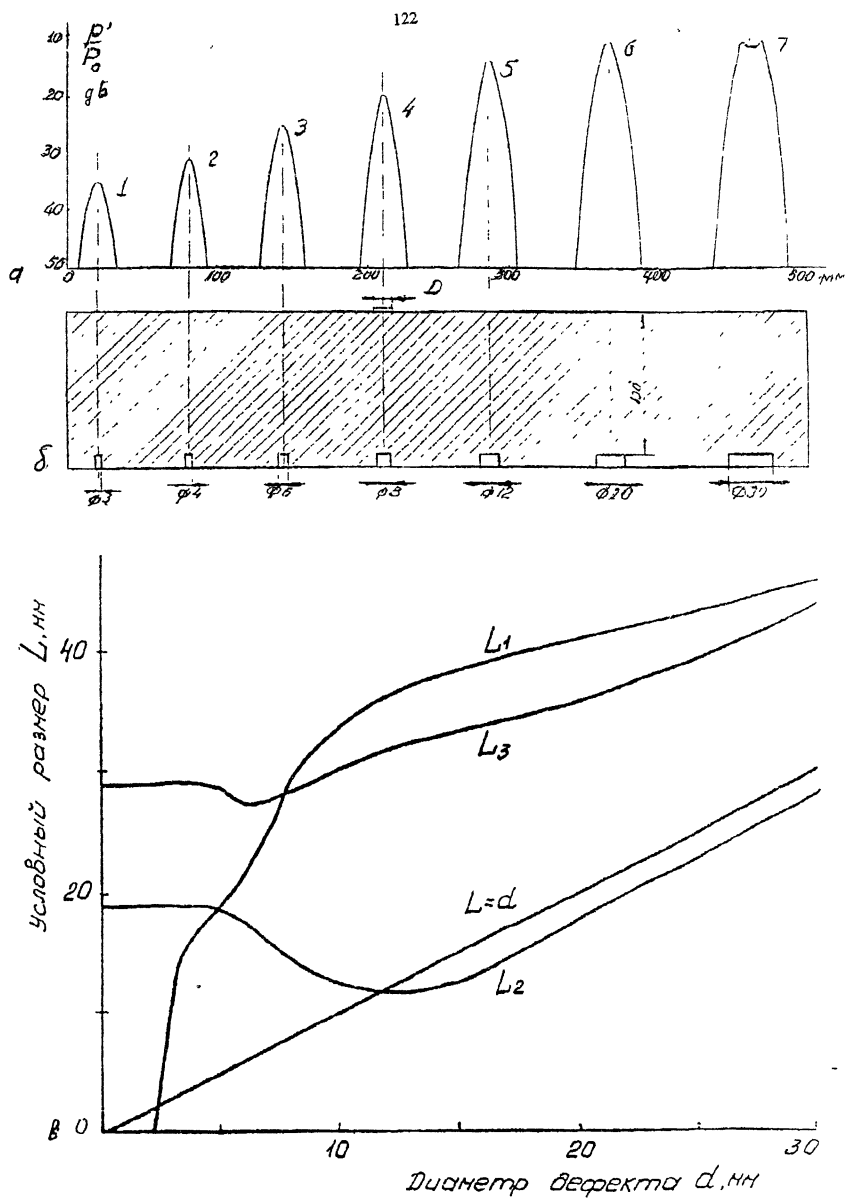


Рис. 6.4. Условные протяженности плоскодонных отверстий, измеренные различными способами

При выявлении вертикального дефекта по схеме рис. 6.3,б зеркально отраженный сигнал не попадает на излучающе-приемный преобразователь. На экране дефектоскопа будут наблюдаться сигналы, рассеянные на неровностях поверхности дефекта, и сигналы дифракционных волн, возникающих на краях дефекта ("блестящих точках" в п. 2.4). Практика контроля показала, что измеренная условная высота очень плохо связана с истинной высотой дефекта, между тем развитые по высоте дефекты наиболее опасны.

Рекомендуется не пытаться измерять условную высоту, а ограничиваться разделением дефектов на развитые и неразвитые по высоте по способу, описанному в п. 6.1.4.

#### **6.1.4. Признаки дефектов на основе их условных размеров**

1. Понятие компактного и протяженного дефектов.
2. Принципы идентификации дефектов на протяженные и компактные по соотношению условных размеров.

1. Дефект относят к компактным (непротяженным, точечным) или протяженным с точки зрения УЗ контроля в зависимости от того, меньше или больше его размер по сравнению с шириной УЗ пучка лучей от данного преобразователя на данном расстоянии от него. Определяют это на основании измерения условных размеров дефекта. Дефект считают компактным, если все его условные размеры не больше, чем у ненаправленного отражателя (например, бокового цилиндрического отверстия).

2. Наиболее удобный способ оценки компактности или протяженности дефекта - сравнение его условных размеров с условными размерами компактного ненаправленного отражателя. Так, для разделения дефектов на неразвитые и развитые (протяженные) по высоте относительным способом ("б дБ") сравнивают перемещения эхосигнала по линии развертки, соответствующие дефекту и боковому цилиндрическому отверстию (рис. 6.6,а), выполненному на той же глубине, что и дефект. Если это перемещение для дефекта больше, дефект считают развитым по высоте. Сравнение с отверстием нужно, чтобы учесть перемещение эхосигнала, связанное с раскрытием диаграммы направленности преобразователя.

Аналогичным способом оценивают компактность или протяженность по условной протяженности или ширине. В этом случае наряду со сравнением с боковым цилиндрическим отверстием по способу б дБ применяют сравнение с плоскодонным отверстием, эквивалентным дефекту. В последнем случае пригодны как способ б дБ, так и абсолютный способ, поскольку амплитуды максимальных эхосигналов одинаковы. Сравнение можно выполнять с помощью графиков, не используя искусственных отражателей.

### 6.1.5. Способы оценки размеров и конфигурации выявленных дефектов по соотношению временных интервалов и амплитуд сигналов.

1. -

2. Способы оценки конфигурации дефектов по соотношению амплитуд обратного и зеркального сигналов при включении преобразователей по схеме тандем. Понятие о дельта методе.

2. При контроле изделий, в частности, сварных соединений, очень важно различить объемные, близкие к округлым дефекты (например, поры, шлаковые включения) от плоских или плоскостных дефектов (трещин, непроваров). Это связано с тем, что небольшие округлые дефекты не очень ослабляют прочностные свойства изделия и часто допустимы, а плоскостные дефекты гораздо сильнее влияют на прочность, способны развиваться при эксплуатации и, как правило, недопустимы. Конечно, разделение дефектов на плоскостные и объемные очень условно, многообразие типов дефектов весьма велико, но точную форму и тип дефекта не удается определить методами ультразвуковой дефектоскопии, поэтому ограничиваются разделением дефектов на три класса: плоскостные, объемные и промежуточные, которые не удается отнести ни к плоскостным, ни к объемным.

При внешней нагрузке образца напряжения распределяются неравномерно. Вблизи дефектов возникают повышенные напряжения. Дефекты являются концентраторами напряжений. Концентрация напряжений особенно велика вблизи острых краев дефектов типа трещин и непроваров. В зоне концентрации напряжения могут превзойти предел прочности. В результате нескольких циклов нагрузки металлы в этом месте все более повреждаются и, наконец, растрескиваются. Образуется новая зона концентрации напряжений и весь процесс повторяется. Таким образом, скачками происходит подрастание трещины.

Ниже рассмотрены способы оценки формы дефектов применительно к контролю сварных соединений. Все эти способы применимы, когда размеры дефекта значительно больше длины волны УЗ.

**Способ коэффициента формы** - один из эффективных способов определения формы дефектов. Сопоставляют амплитуды сигналов, полученных обычным эхо- и эхо-зеркальным методами контроля. Напомним сущность эхо-зеркального метода (рис. 6.7), кратко рассмотренного в п. 1.2.

Импульс, излученный преобразователем  $A$ , отражается от дефекта  $D$ , дна изделия  $C$  и принимается преобразователем  $B$ . Если плоский дефект ориентирован вертикально, то на приемник придет зеркально отраженный сигнал, когда выполняется условие

$$l_A + l_B = 2H \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $H$  толщина ОК. Этот вариант эхо-зеркального метода называют "тандем". Для его реализации нужно поддерживать постоянной и вполне определенной суммой расстояний  $l_A + l_B$ . Самый простой способ выполнить это требование - связать излучатель и приемник нитью, перекинутой через

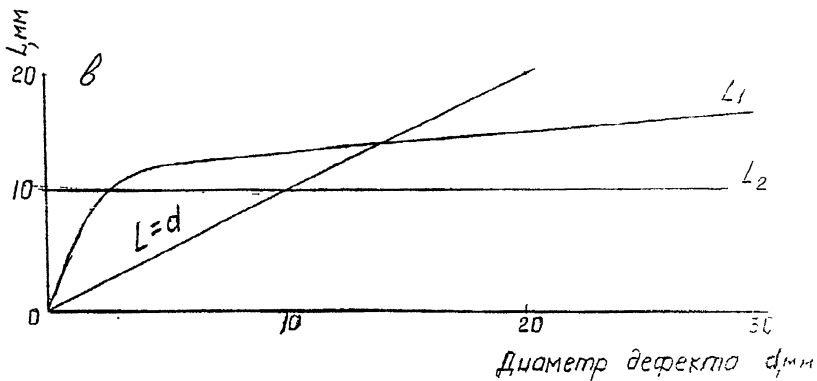
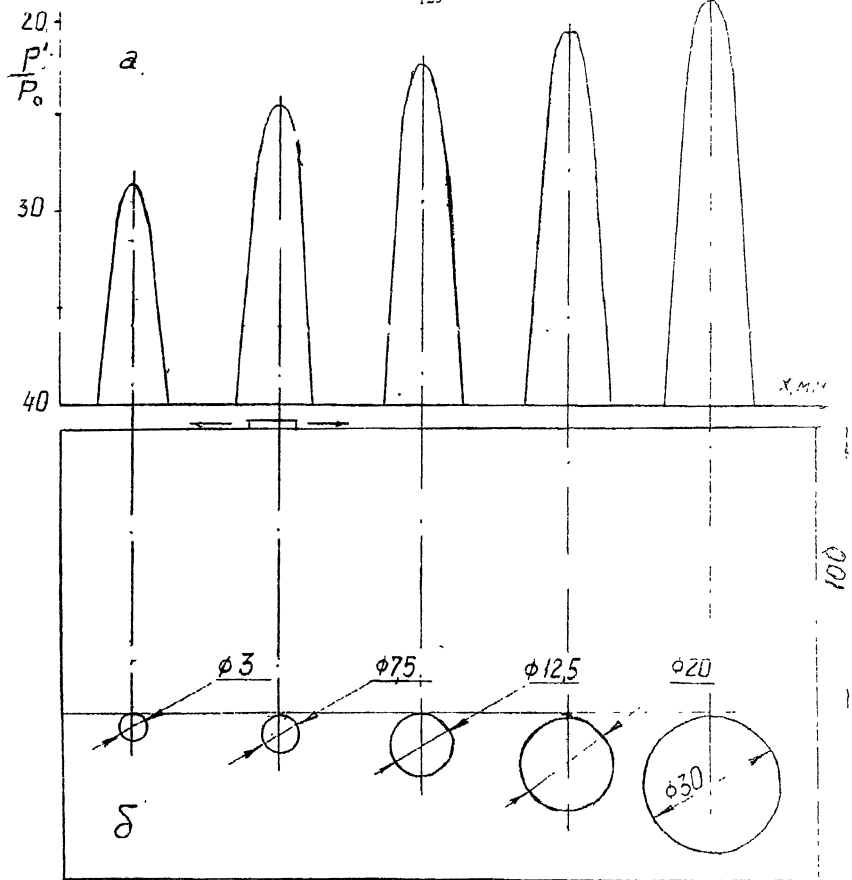


Рис. 6.5. Условные протеканности боковых цилиндрических отверстий, измеренные различными способами

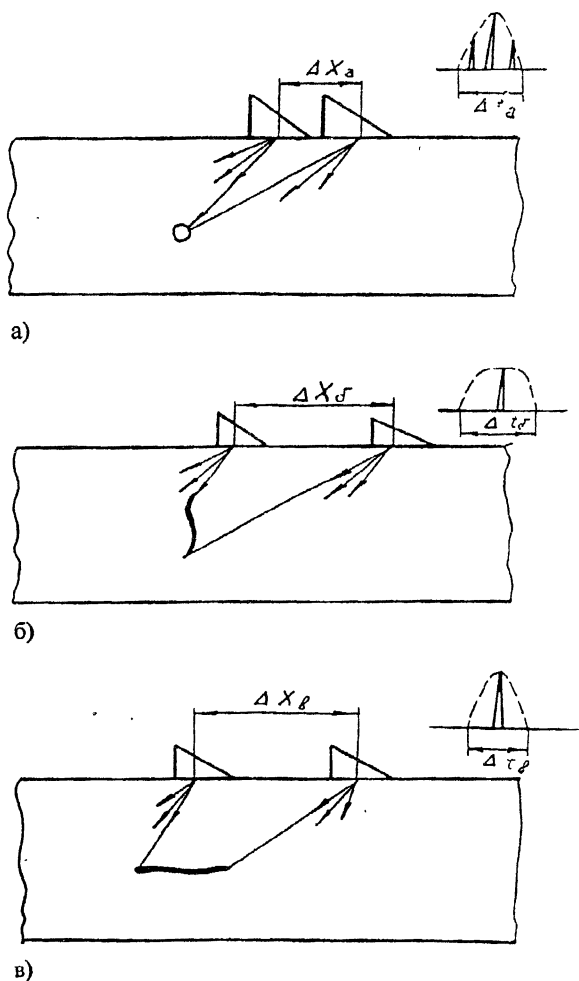


Рис. 6.6. Измерение условной высоты (б) и условной ширины (в) наклонным преобразователем в сравнении с боковым цилиндрическим отверстием (а);  $\Delta X_a < \Delta X_b \approx \Delta X_b$ ;  $\Delta \tau_b > \Delta \tau_b \approx \Delta \tau_b$ .

блок, расположенный на сварном шве, и поддерживать эту нить в натянутом состоянии в процессе взаимного перемещения преобразователей. Тогда точка  $D$  будет перемещаться по линии  $EF$  и на приемник будет поступать сигнал, зеркально отраженный от вертикально расположенных дефектов. Разработаны более удобные, чем нить, устройства для взаимосвязи преобразователей. Если плоский дефект ориентирован не вертикально, то зеркально отраженный сигнал придет на приемник при измененном значении  $I_A + I_B$ . Это будет более общий, чем тандем, вариант эхо-зеркального метода.

Исследования дефектов типа трещин и непроваров в сварных соединениях показали, что большинство из них ориентированы вертикально или почти вертикально. С другой стороны, при отклонении дефектов от вертикального положения на угол  $\pm 15^\circ$  амплитуда сигнала, полученного методом тандем, уменьшится немного. Поэтому для лучшего (по сравнению с обычным контролем наклонным преобразователем) обнаружения вертикальных дефектов сварного соединения повышенной толщины (15 - 40 мм и более) его часто проверяют, как совмещенным преобразователем так и методом тандем.

В этом пункте метод тандем рассматривается как способ отличить плоский (или плоскостной) дефект от объемного. Для этого преобразователь  $A$  включают как совмещенный. Измеряют коэффициент формы  $K_\phi$ , равный отношению максимальных амплитуд сигнала на преобразователе  $A$ , и сигнала на преобразователе  $B$ , полученного методом тандем:

$$K_\phi = A/B.$$

В случае объемного дефекта (для него все точки и амплитуды отмечены знаком ')  $A' > B'$ , т. к. путь  $2A'D'$  короче пути  $A'D'C'B'$ , а УЗ волны рассеиваются дефектом почти равномерно по всем направлениям, в результате  $K_\phi > 1$ . В случае плоскостного дефекта  $A \leq B$ , т. к. отражение от дефекта происходит преимущественно зеркально, в результате  $K_\phi \leq 1$ .

Для того, чтобы отличить плоскостной дефект от объемного, применяют также **дельта-метод** (рис. 6.8,а). Он также был кратко рассмотрен в п. 1.2. Преобразователь  $A$  излучает поперечную волну, а преобразователь  $B$  принимает две трансформированные на дефекте продольные волны:  $1$  - пришедшую непосредственно от дефекта и  $2$  - рассеянную на дефекте и отраженную от дна изделия.

В случае объемного дефекта (слева) сигнал  $1$  больше, так как он возникает из-за отражения, а не дифракции, а сигнал  $2$  меньше, так как он возникает в результате соскальзывания обтекающей дефект волны (см. п. 2.4). В случае плоскостного дефекта (справа) оба сигнала возникают в результате дифракции волн на краях дефекта и их амплитуды приблизительно равны.

Для оценки формы дефекта используют также **изменение угла озвучивания на поверхности ввода** или измерение углового условного размера, т. е. пространственной огибающей эхосигналов при повороте



наклонного преобразователя. На рис. 6.8,з показан вид сверху сварного соединения. Находят положение наклонного преобразователя, соответствующее максимуму эхосигнала, и измеряют угловой условный размер, т. е. поворачивая преобразователь, меняют угол озвучивания дефекта. В случае объемного в плане дефекта (слева) амплитуда эхосигнала мало изменяется. В случае плоскостного дефекта (справа) изменение амплитуды гораздо больше. Статистические исследования показали, что для плоскостного дефекта амплитуда уменьшается на 8 дБ или более при изменении угла на  $45^\circ$ .

В экзаменационных вопросах часто фигурирует еще три метода определения характера дефекта, хотя программой их знание не предусмотрено. Эти методы применяются на практике. Далее они рассмотрены.

**Дифракционно-временной метод**, кратко рассмотрен в п. 1.2. Его иногда называют **временнoлетным**. На рис. 6.8,б показан один из его вариантов. Обычно излучают и принимают наклонными преобразователями продольные волны, так как соответствующие импульсы приходят раньше, чем для поперечных волн. Разделение излучателя и приемника дает возможность со значительно более высокой чувствительностью регистрировать волны, рассеянных на концах дефекта типа трещины или непровара, чем в случае применения совмещенной схемы контроля.

Метод предусматривает измерение координат крайних точек дефекта и одновременное сравнение амплитуд сигналов от его верхней и нижней точек. В случае объемного дефекта (слева) сигнал от верхней точки дефекта больше, так как он возникает в результате отражения, а от нижней точки сигнал возникает в результате дифракции типа обегания и соскальзывания. Для плоскостного дефекта (справа) оба сигнала - сигналы от блестящих точек, они близки по амплитуде. Измерение координат этих точек позволяет оценить размер дефекта. Метод оказался очень эффективным, как для поиска так и исследования дефектов и широко применяется в международной практике ультразвукового контроля.

**Изменение угла озвучивания в плоскости падения** осуществляется двумя преобразователями с разными углами ввода. Это требует использования бокового цилиндрического отверстия для получения опорного сигнала. Более информативный вариант этого способа предусматривает использование системы ПАРУС, разработанной и поставляемой ЦНИИТМАШ (тел. 274 40 34). В ней используется один преобразователь, угол ввода которого изменяется и одновременно преобразователь перемещается по поверхности таким образом, что дефект, расположенный на определенной глубине, озвучивается под разными непрерывно изменяющимися углами.

За опорный уровень амплитуды принимают изменение амплитуды при озвучивании при тех же условиях бокового отверстия на той же глубине. Дефект считается плоскостным, если в каком-либо диапазоне углов эхосигнал от него возрастает на 6 дБ по сравнению с эхосигналом от отверстия при одинаковом опорном уровне. Европейским стандартом вариант метода (без системы ПАРУС) рекомендуется как основной способ различия плоскостных и объемных дефектов сварных соединений.

**Спектральный метод** (рис. 6.8,в) требует применения специального дефектоскопа-спектроскопа, в котором можно варьировать частоту ультразвука в 2 - 3 раза и наблюдать происходящие при этом изменения амплитуды эхосигнала. Для объемного дефекта (слева) характерно плавное изменение амплитуды в зависимости от частоты  $f$ . Для плоскостного дефекта, наклоненного к оси преобразователя (справа), характерно быстрое изменение амплитуды с частотой, возникновение максимумов и минимумов. Это объясняется интерференцией дифракционных волн, возникающих на краевых (бл

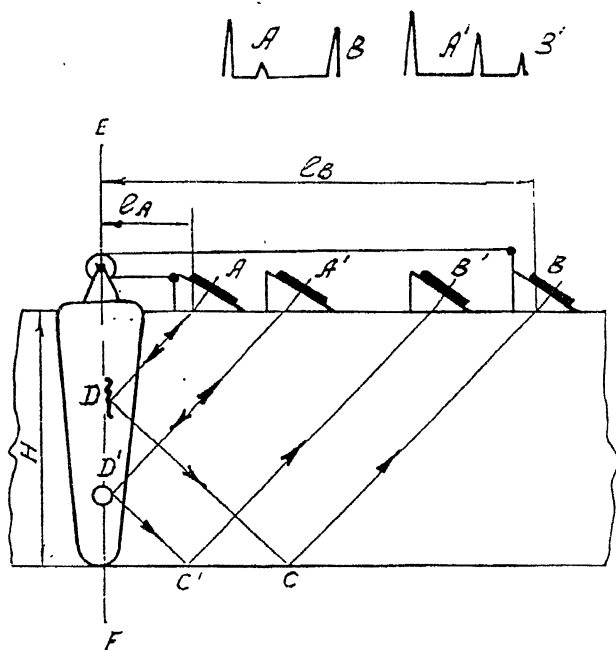


Рис. 6.7. Оценка формы дефекта по коэффициенту формы

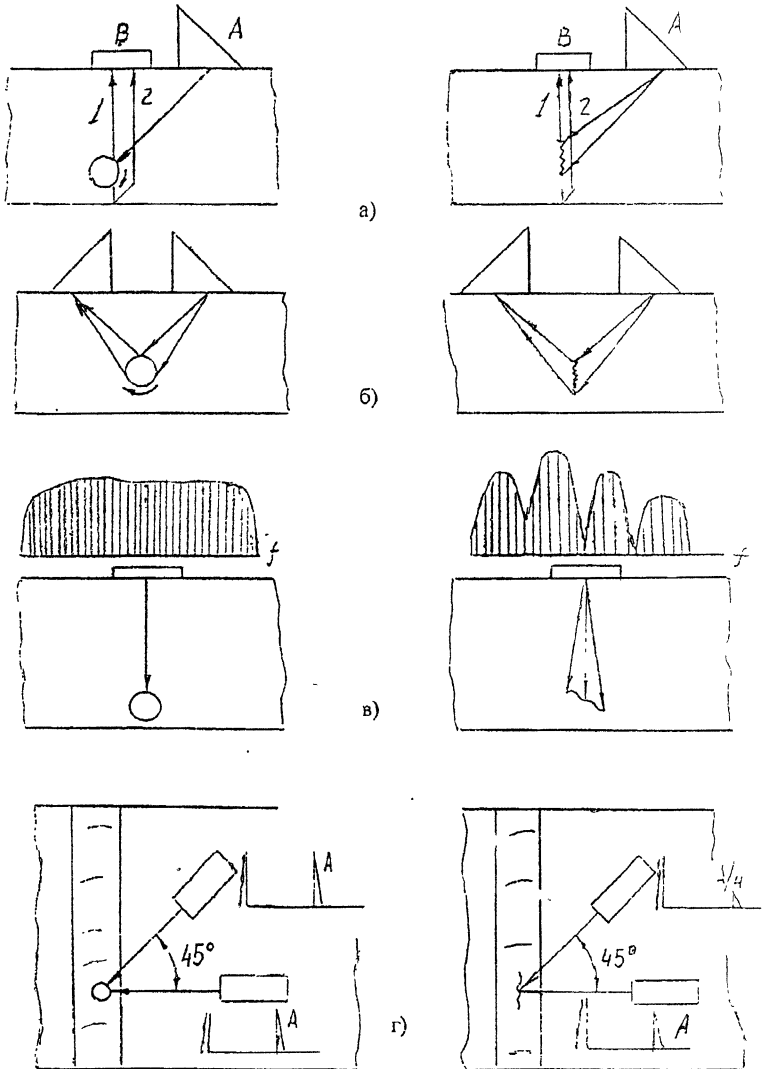


Рис. 6.8. Оценка формы дефекта при контроле: а - дельта-методом, б - дифракционно-временным методом, в - спектральным методом, г - по условному угловому размеру

сящих) точках дефекта (см. п. 2.4). Метод применяется редко из-за сложности и дорогостоящей дефектоскопа-спектрографа.

## 6.2. Зеркально-теневой метод

1. Понятие о коэффициенте выявляемости и условной протяженности дефекта.

2. Способы измерения коэффициента выявляемости и условной протяженности дефектов. Соотношение коэффициентов выявляемости при различных вариантах ЗТ метода.

1. Напомним, что ЗТ метод основан на регистрации уменьшения амплитуды донного сигнала под влиянием дефекта. Коэффициентом выявляемости  $K_z$  этого метода называют отношение амплитуды донного сигнала при наличии дефекта  $U_d$  к амплитуде донного сигнала при отсутствии дефекта  $U_0$ :  $K_z = U_d/U_0$ . Условной протяженностью называют длину пути преобразователя над дефектом, где коэффициент выявляемости меньше некоторого заданного значения, например  $K_z < 0,5$  (или 6 дБ). Такие же способы измерения применяют при контроле теньевым методом, но вместо донного используют сквозной сигнал.

2. Существует несколько вариантов ЗТ метода (рис. 6.9):

а) Ослабление первого донного сигнала при контроле прямым преобразователем, как рассматривалось ранее.

б) Ослабление второго донного сигнала при контроле прямым преобразователем.

в) Ослабление первого донного сигнала при контроле наклонными преобразователями поперечными волнами.

г) Ослабление первого донного сигнала при контроле наклонными преобразователями продольными волнами или РС преобразователем.

Коэффициентами выявляемости для всех этих вариантов называют отношение амплитуды донного сигнала при наличии дефекта к амплитуде донного сигнала при отсутствии дефекта. Условной протяженностью называют длину пути преобразователя над дефектом, где коэффициент выявляемости меньше некоторого заданного значения.

Ослабление дефектом первого донного сигнала при контроле прямым преобразователем больше, чем сквозного сигнала при контроле теньевым методом, т. к. при теньевом методе УЗ волны проходят через зону дефекта (и при этом ослабляются) один раз, а при ЗТ - два раза и ослабляются дважды. Коэффициент выявляемости для теньевым метода больше, т. е. выявляемость хуже, чем для ЗТ метода.

Дефекты, расположенные вблизи преобразователя при контроле прямым преобразователем по варианту а) выявляются, как правило, лучше, чем расположенные вблизи донной поверхности. Это объясняется тем, что

вблизи преобразователя наибольшая концентрация энергии акустического поля, поэтому наиболее велико затеняющее действие дефекта.

Ослабление дефектом второго донного сигнала при контроле прямым преобразователем больше, чем первого донного сигнала. Это объясняется тем, что УЗ волны проходят через зону дефекта 4 раза и ослабляются сильнее. Таким образом, коэффициент выявляемости при контроле по варианту б) меньше, чем по варианту а), но мешающее влияние посторонних факторов при контроле по варианту б) больше.

При контроле по варианту в) ослабление донного сигнала меньше, чем по варианту а), т. к. УЗ волны проходят через зону дефекта один раз (за исключением случая очень протяженного дефекта). При контроле по варианту г) ослабление донного сигнала больше, чем по варианту в), т. к. угол ввода преобразователей для излучения и приема продольных волн ( $5 - 10^\circ$ ) меньше, чем поперечных волн и продольные волны проходят через зону дефекта, как правило, два раза.

ЭТ методом можно обнаруживать не только дефекты, ориентированные горизонтально, как на рис. 6.9, но также ориентированные вертикально, как на рис. 6.10. При контроле по варианту в), показанному на рис. 6.10,а, такой дефект, чтобы быть выявленным, должен пересекать один из наклонно распространяющихся лучей. При контроле прямым преобразователем (рис. 6.10,б) вертикальный дефект также выявляется. Механизм ослабления донного сигнала в этом случае следующий. Продольная волна, распространяющаяся вдоль берегов (поверхностей) вертикальной трещины, это головная волна (п. 2.1). Она порождает поперечные волны, отходящие от берегов трещины под третьим критическим углом  $\varphi'$ . В результате продольная волна (а следовательно донный сигнал) ослабляется.

## **7. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ, ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНА ТРУДА**

### **7.1. Выбор схемы контроля и основных параметров**

1. Использование различных типов волн и частот упругих колебаний при контроле конкретных объектов.

2. Принципы выбора метода УЗ контроля, схемы контроля (поверхностей ввода, углов ввода), частоты колебаний и других параметров.

1. Продольные и поперечные волны применяют для выявления дефектов в толще и вблизи поверхности массивных изделий, толщина которых значительно превосходит длину УЗ волны. Продольные волны, как правило, используют, когда ультразвук необходимо ввести перпендикулярно или под небольшим углом к поверхности, поперечные - когда угол ввода должен быть значительным ( $35^\circ$  и более). Это обусловлено удобством возбуждения волны данного типа: продольных - прямым или наклонным преобразователем с небольшим углом ввода, поперечных - наклонным преобразователем с углом падения между первым и вторым критическими углами.

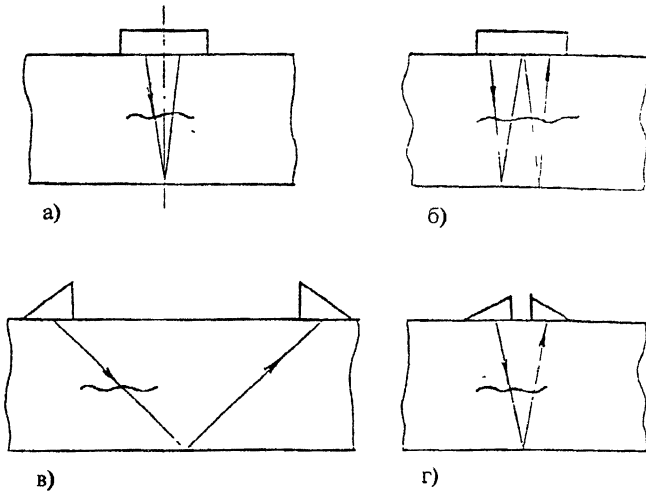


Рис. 6.9. Варианты зеркально-теневого метода

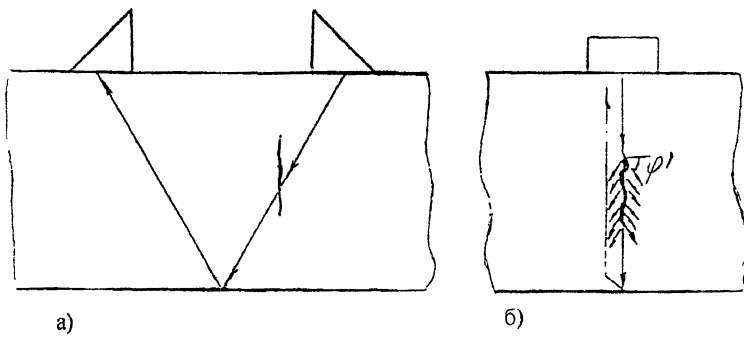


Рис. 6.10. Обнаружение вертикальных дефектов ЗТ методом

Когда имеется возможность выбора, применение поперечных волн предпочтительнее в связи с меньшей длиной волны (при постоянной частоте), что повышает чувствительность к небольшим дефектам. Там, где необходимо уменьшить затухание, например, при контроле изделий из крупнозернистых материалов, целесообразно применение продольных волн.

При выборе типа и направления волн необходимо иметь в виду, что при контроле по совмещенной схеме большие эхосигналы получают только от дефектов, перпендикулярных направлению волны. Например, дефекты, параллельные поверхности ввода (типа расслоения в плитах), хорошо обнаруживаются продольными волнами, излучаемыми и принимаемыми прямым преобразователем в направлении перпендикулярно поверхности (положение преобразователя *A* на рис. 7.1), и значительно хуже - наклонным преобразователем. При применении продольных волн возникает довольно большая мертвая зона (5 ... 10 мм). Для ее уменьшения применяют РС преобразователи, у которых мертвая зона 0,5 - 2 мм.

Поперечные волны применяют для выявления дефектов, близких к поверхности, за счет углового эффекта, т. е. двойного отражения от поверхности изделия и дефекта (см. п. 2.7). При этом, однако, не рекомендуются углы падения на поверхность изделия 60 ... 65°, так как при отражении от вертикального дефекта в этом случае происходит трансформация поперечных волн в продольные и амплитуда эхосигнала мала. В следующем подпункте рассматривается применение других типов волн для контроля изделий.

Частоту УЗ выбирают возможно более высокой, если этому не препятствуют большое затухание УЗ в изделии и большая неровность его поверхности. Общее правило таково: тонкие изделия из материала с небольшим затуханием УЗ с хорошим качеством поверхности ввода контролируют на повышенных частотах (2 - 10 МГц), толстые изделия из материала с большим затуханием - на более низких частотах (0,5 - 2 МГц).

2. Из рассмотренных в разделе 1 методов УЗ контроля наибольшее применение для проверки металлов находит эхо-метод. Им проверяется более 90% продукции, контролируемой ультразвуком. Другие методы УЗ контроля применяют для решения задач, где использование эхо-метода затруднено, либо в качестве дополнительных к эхо-методу для более полного обнаружения и исследования дефектов.

Теневой метод обычно применяют для автоматического контроля изделий типа листов, многослойных панелей, зеркально-теневой метод - для обнаружения дефектов, дающих слабое отражение, в дополнение к эхо-методу или самостоятельно, например, для контроля рельсов на вертикальные дефекты. В п. 6.1.5 даны примеры применения различных методов отражения для оценки характера дефектов.

При выборе схемы контроля для дефектоскопии эхометодом продольными или поперечными волнами учитывают следующие факторы:

Преобразователь должен перемещаться по ровной поверхности.

Должна быть прозвучена каждая точка объема изделия, подлежащего контролю.

Для повышения надежности обнаружения различно ориентированных дефектов каждую точку желательно прозвучивать в нескольких направлениях.

Большие эхосигналы от дефектов получают, когда излучатель и приемник УЗ волн располагаются так, чтобы получить зеркально отраженные сигналы.

Нежелательно распространение продольной волны вдоль свободной поверхности во избежание ее превращения в головную волну. Подробнее этот вопрос изложен в п. 7.4.

Основную схему контроля выбирают такой, чтобы обеспечить обнаружение наиболее часто встречающихся дефектов изделия. Дополнительная схема контроля должна обеспечить обнаружение различно ориентированных дефектов, особенно дефектов, сильно влияющих на безопасность эксплуатации изделий.

Например, в дисках турбин чаще всего встречаются дефекты, параллельные плоской поверхности, поэтому основная схема контроля - прямым преобразователем *A* с этой поверхности (рис. 7.1). Однако очень опасны трещины вблизи шпоночной канавки, поэтому эту зону дополнительно контролируют наклонным преобразователем *B*. Основная схема контроля вала (например, ротора турбины) - прямым преобразователем *A* по цилиндрической поверхности (рис. 7.2). Однако очень опасны радиальные дефекты вблизи внутреннего канала, поэтому эту зону дополнительно контролируют наклонным преобразователем *B*, направляя луч так, чтобы он прошел по касательной к поверхности канала.

Частоту УЗ колебаний выбирают в соответствии с рекомендациями, изложенными в подпункте 1. Чаще всего контроль ведут на частотах 1,8 ... 5 МГц. Чувствительность настраивают на уровень фиксации, а затем (при ручном контроле) повышают до поискового уровня, который обычно соответствует чувствительности на 6 дБ выше уровня фиксации. Браковочный уровень (сигналы от дефектов с большими, чем браковочный уровень, амплитудами недопускаются) соответствует амплитудам обычно на 6 дБ выше уровня фиксации.

Временной регулировкой чувствительности выравнивают чувствительность по всей толщине контролируемого изделия. При обнаружении дефектов их оценку выполняют на уровне фиксации.

При контроле изделий не очень большой толщины без применения ВРЧ уровни браковки и фиксации изображают в виде линий (изменение амплитуды в функции от расстояния) на прозрачном трафарете, наклеиваемом на экран. При этом поисковый уровень оставляют постоянным, но он



всегда (в частности, на максимальной глубине) должен быть на 6 дБ выше уровня фиксации). Иногда переход к поисковому уровню чувствительности осуществляют аттенюатором, путем общего повышения чувствительности.

Развертку дефектоскопа настраивают так, чтобы на экране наблюдать всю зону контроля, т. е. ту область, в которой предполагается появление импульсов от дефектов. При использовании автоматического сигнализатора дефектов эту зону выделяют стробирующим импульсом.

Отметим особенность измерения условной протяженности цилиндрических изделий (рис. 7.2). Поскольку акустическая ось преобразователей  $C$  и  $D$  направлена по радиусу ОК истинная условная протяженность  $L_{ист}$  дефекта на глубине  $Y$

будет меньше измеренной по поверхности  $L_{изм}$ :  $L_{ист} = L_{изм}(0,5D - Y)/0,5D$ . Эту поправку следует учитывать при контроле валов, толстостенных труб и поперечных сварных соединений таких труб.

Укажем области применения других типов волн, кроме продольных и поперечных, рассмотренных в подпункте 1. Поверхностные волны рэлеевского типа применяют для обнаружения дефектов, непосредственно выходящих на поверхность ввода или залегающих на глубине не более длины поверхностной волны. При этом следует иметь в виду, что такие дефекты хорошо выявляются магнитными, вихретоковыми и капиллярными методами. Контроль поверхностными волнами целесообразен, когда применение этих методов затруднено, например, контролируемая поверхность труднодоступна для осмотра.

Головные волны применяют для обнаружения подповерхностных дефектов. Эти волны распространяются прямолинейно, не следуя изгибам поверхности подобно поверхностным. Они быстро затухают с расстоянием благодаря тому, что в каждой точке поверхности трансформируются в поперечные волны. Последние мешают контролю тонких изделий. От неровностей на поверхности ввода головные волны не отражаются, такие неровности не мешают контролю. Отсюда область применения головных волн: выявление дефектов под валиком усиления сварного шва, мелкой резьбой, наплавкой.

Волны в пластинах применяют для контроля тонких листов, оболочек сосудов, тонкостенных труб. Волны в стержнях применяют для контроля тонких прутков, проволоки.

Изделия, контроль которых неразрушающими методами возможен, называют контроледоступными. С точки зрения УЗ контроля контроледоступность может нарушаться следующими основными факторами:

- не удастся прозвучать весь объем изделия из-за его сложной геометрии (изделие может быть ограниченно контролепригодным);
- высок уровень структурных шумов (больше половины уровня фиксации);
- не удастся отличить сигналы от дефектов и ложные;

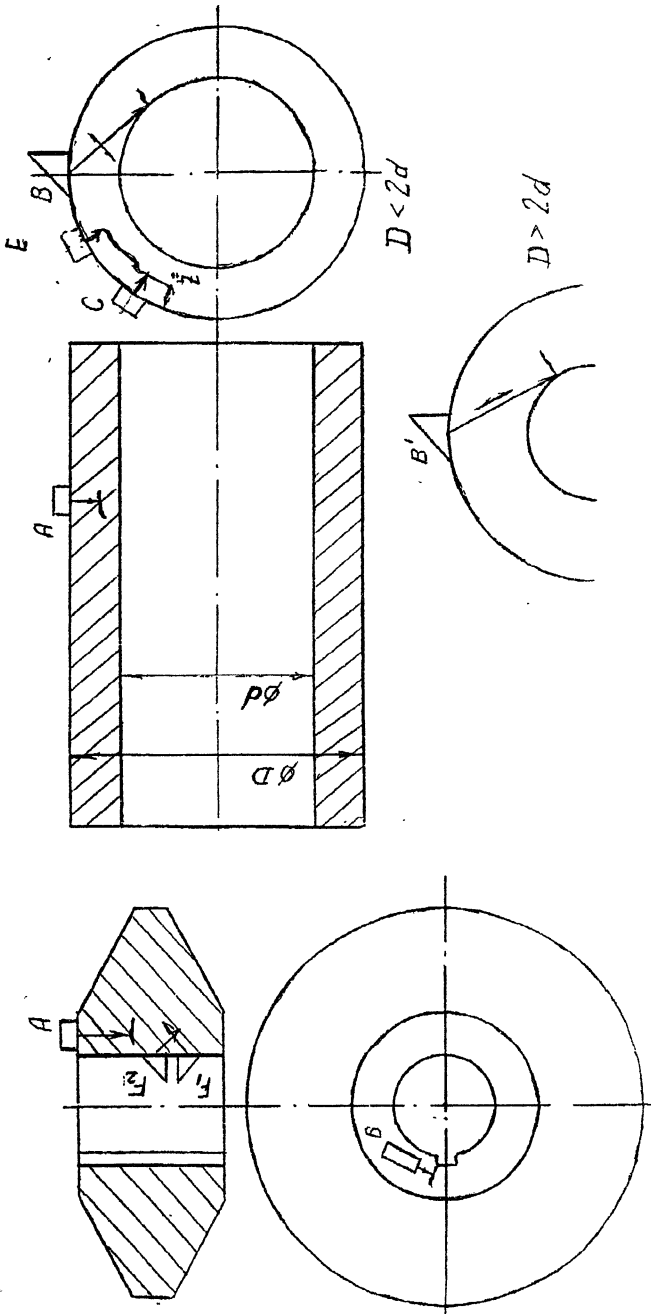


Рис 7.2. Схема контроля вала с внутренним кандалом

Рис 7.1. Схема контроля диска с борозной

- дефект не вызывает отражения ультразвука (например, некоторые типы несплошностей в сварных соединениях).

Вопросы контроля конкретных видов изделий должны рассматриваться в специальных программах, но здесь в качестве примера рассмотрим схемы контроля важнейших типов изделий. Во всех этих схемах соблюдаются изложенные ранее рекомендации.

**Поковки.** Дефекты в них, как правило, расплющены и ориентированы перпендикулярно направлению деформации, но возможны также дефекты другой ориентации. Согласно ГОСТ 24507-80 поковки контролируют эхо- и зеркально-теневым методами. Поковки наиболее ответственного назначения контролируют в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 7.3,а). В основном используют прямые преобразователи.

При контроле цилиндрических изделий (*г, ж, з*) применяют также наклонные преобразователи, вводя лучи по хорде. Чтобы при контроле тонких изделий (*б, в, д, е, з*) избежать распространения продольной волны вдоль свободной поверхности, вместо продольной применяют поперечную волну, вводимую наклонным преобразователем. Его перемещают в направлении, перпендикулярном малой толщине, с разворотом на  $180^\circ$ , чтобы надежнее обнаруживать различно ориентированные дефекты. В изделиях переменной толщины каждый участок контролируют раздельно (преобразователи *A* и *A'* на рис. 7.4), перестраивая длительность развертки и чувствительность.

В цилиндрических изделиях с каналом (рис. 7.3,ж,з) очень опасны дефекты вблизи внутреннего канала, поэтому эту зону контролируют наклонным преобразователем, направляя луч так, чтобы он прошел по касательной к поверхности канала. Для толстостенных валов (отношение наружного диаметра к внутреннему больше 2) поперечная волна с минимально возможным углом ввода  $35^\circ$  (в таком ПЭП угол призмы лишь немного больше первого критического) проходит, не касаясь поверхности канала. Тогда применяют наклонный преобразователь *B'* (рис. 7.2) с углом ввода, меньшим первого критического, чтобы по касательной к поверхности прошла продольная волна.

Для контроля поковок применяют частоты 2 - 5 МГц. Чувствительность настраивают по плоскодонным отражателям площадью 3 - 7 мм<sup>2</sup>. Настройку чувствительности и измерение эквивалентных размеров дефектов выполняют с помощью АРД диаграмм, но если радиус кривизны поверхности ввода меньше 250 мм (диаметр изделия меньше 500 мм), АРД диаграммы, рассчитанные на контроль изделий с плоской поверхностью, применять нельзя. Тогда используют образцы с искусственными дефектами с кривизной поверхности, близкой к поверхности изделия или используют специальные АРД диаграммы.

**Литье.** Дефекты литья не имеют преимущественной ориентации. Схема контроля такая же, как для поковок, но направление волн может отличаться от нормального к поверхности ввода. Отличие литья от поко-

вок в более крупнозернистой структуре и худшем качестве поверхности. С учетом этого применяют более низкие частоты (1 - 1,8 МГц).

Рельсы. Характерные дефекты рельсов - расслоения, флокены и другие дефекты проката, ориентированные, в основном, по толщине рельса. Согласно ГОСТ 18576-85 рельсы в пути (рис. 7.5) контролируют зеркально-теневым методом (преобразователем 6) на расслоения 4 в шейке 2 и эхометодом наклонным преобразователем 7 на трещины 5 в головке 1. При контроле на рельсопрокатном заводе широко применяют теневой метод, например, им контролируют шейку.

Трубы. Наиболее опасные и часто встречающиеся дефекты - риски, закаты, трещины, ориентированные вдоль оси трубы. Согласно ГОСТ 17410-78

основной способ контроля - эхометодом, поперечными волнами или волнами в пластинах, распространяющимися по окружности трубы (рис 7.6,а). Трубы наиболее ответственного назначения контролируют также в направлении оси трубы (рис. 7.6,б). Трубы с толщиной стенок 10 мм и более контролируют также на расслоения прямым или РС преобразователем. На рисунке показан контактный способ контроля труб, но чаще их контролируют на иммерсионных установках. Чувствительность настраивают по продольным и кольцевым рискам глубиной 5 - 10% от толщины стенки, а также (при контроле труб с толщиной стенок 10 мм и более) по плоскодонным отверстиям диаметром 3 - 8 мм. Искусственные дефекты выполняют на участке трубы без естественных дефектов.

Сварные соединения. Основной способ контроля - наклонным преобразователем с поверхности основного металла (рис. 7.7,а). Дефекты Д1 в нижней части шва выявляют прямым лучом, а в верхней части Д2 - однократно отраженным лучом. Преобразователь переменяют поперек и вдоль шва (рис. 7.7,б). Его направляют перпендикулярно оси шва, а затем контроль повторяют, поворачивая преобразователь на угол  $\pm 10...15^\circ$ .

Дополнительный способ контроля - на поперечные трещины Д4 - либо одним наклонным преобразователем по основному металлу, направляя луч наклонно к оси шва, либо по снятому валику усиления, либо двумя наклонными преобразователями. Дополнительный способ контроля также на вертикальные трещины Д3 и непровары - методом тандем (см. рис. 6.7). Его можно применять при контроле обычными ПЭП сварных соединений толщиной более 15 - 40 мм. Для контроля методом тандем более тонких соединений применяют специальные преобразователи.

Для контроля тонких (2 - 10 мм) сварных соединений применяют высокие частоты  $f = 10 \dots 5$  МГц и преобразователи с углами ввода  $65 - 70^\circ$ . Уровень фиксации обычно соответствует эквивалентной площади 2 - 3 мм<sup>2</sup>, а дефекты с эквивалентной площадью 7 - 10 мм<sup>2</sup> обычно не допускают. С увеличением толщины соединения частоты понижают, угол ввода уменьшают, а размеры настроечных дефектов увеличивают. Например при

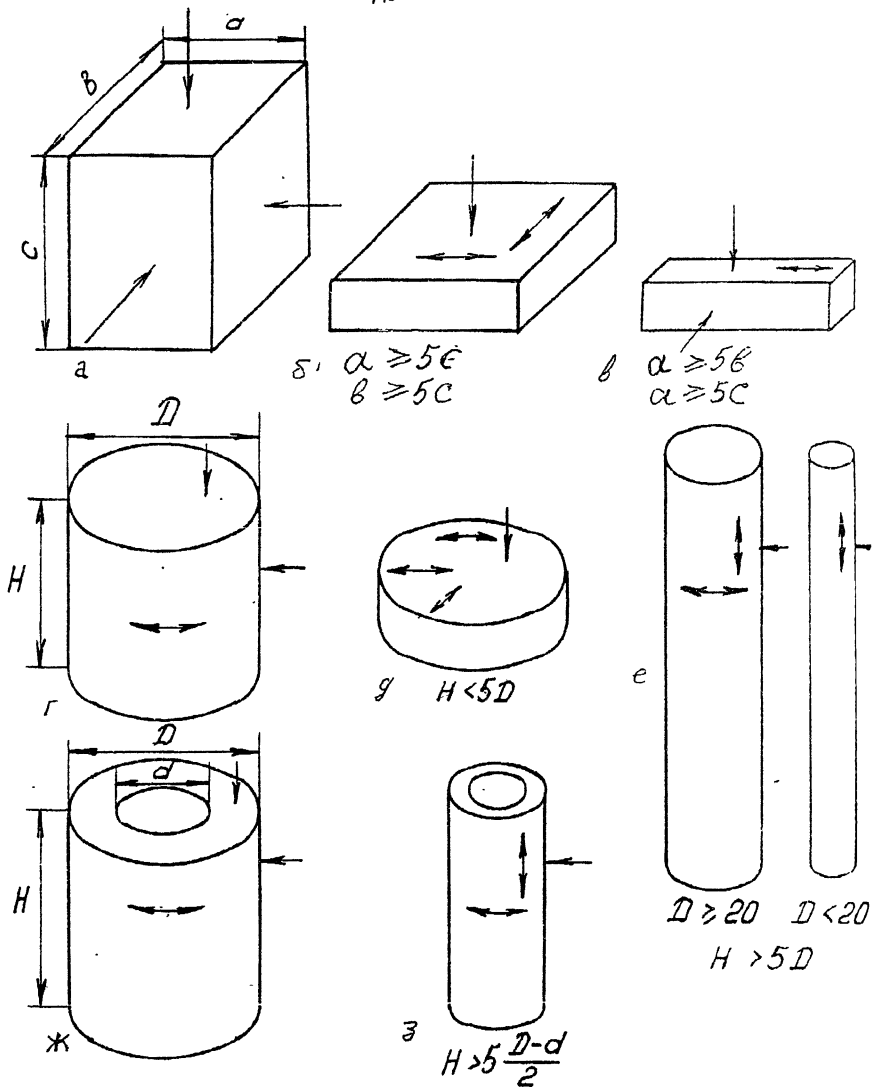


Рис. 7.3. Схема контроля поковок ответственного назначения:

↓ - направление ввода продольных волн; ↔ - направления перемещения наклонного преобразователя

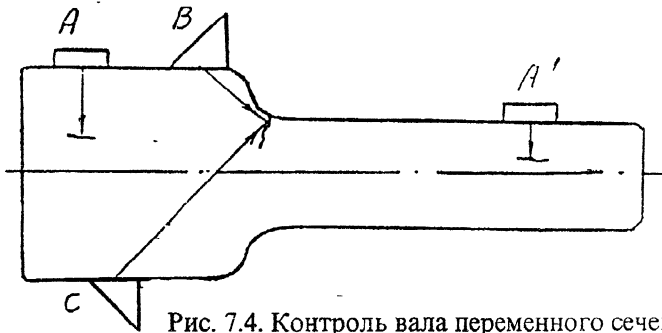


Рис. 7.4. Контроль вала переменного сечения

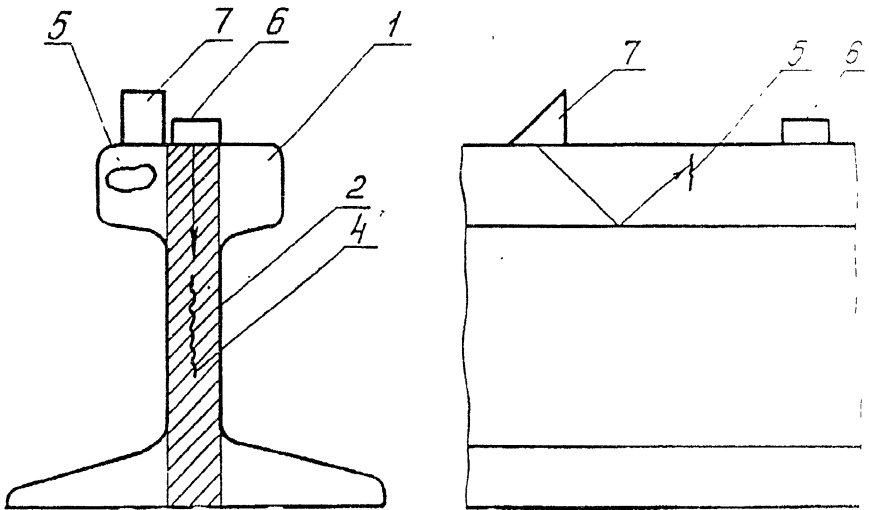


Рис. 7.5. Схема контроля рельса

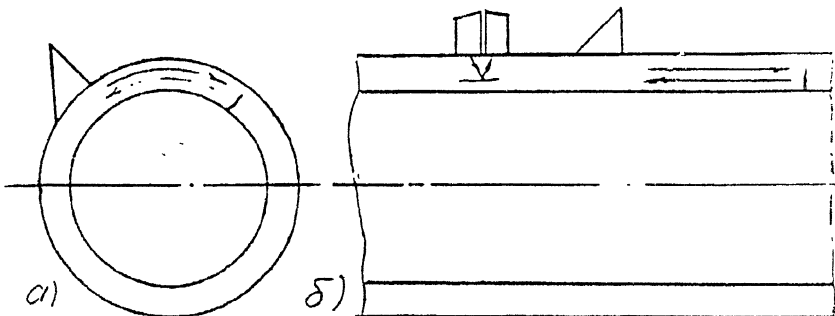


Рис. 7.6. Схема контроля труб

толщине шва 100 - 150 мм применяют  $f = 1,8 - 2$  МГц,  $\alpha = 45 - 50^\circ$ , уровень фиксации - 10 - 20 мм<sup>2</sup>

В России разработано несколько оригинальных схем контроля сварных соединений. Контроль соединений толщиной до 30 мм весьма эффективно выполнять системой "Скаруч" (тел. 267 99 77). Преобразовательный блок системы содержит несколько отдельных преобразователей, которые обеспечивают контроль всей толщины соединения с применением нескольких способов прозвучивания, включая зеркально-теневую, тандем, проверку на поперечные трещины. Выполняется контроль качества акустического контакта и соответствующая корректировка чувствительности. С учетом всех этих данных дается оценка размеров и характера дефектов. Процедура контроля очень проста и состоит в перемещении блока вдоль шва.

Контроль сварных соединений труб диаметром до 100 мм удобно выполнять способом хордового прозвучивания («Политест», тел 366 53 03). Излучатель и приемник, расположенные в одном блоке, реализуют схему дугт (рис. 3.4). Их акустические оси идут в теле трубы по хорде, наклонной к оси трубы, не касаясь ее поверхностей. Пересечение осей происходит в наплавленном металле шва. При толщине стенок трубы 2 - 10 мм контролируется вся толщина шва при движении преобразователей вдоль соединения.

Дефекты под валиком сварного шва можно выявлять, применяя головные волны (рис 7.8) Для их возбуждения и приема используют специальные преобразователи (ЦНИИТМАШ, тел. 275 87 50).

## 7.2. Выбор контактирующих сред

1. Типы контактирующих сред и области их применения.

2. Способы обеспечения акустического контакта в зависимости от конфигурации и пространственного расположения контролируемого объекта. Контроль качества контакта.

1. Контактные жидкости должны быть безвредными для дефектоскопистов, обеспечивать хорошее прохождение ультразвука (в частности, в них не должны возникать пузырьки), не вызывать коррозии поверхности изделия, не замерзать и не испаряться при температуре контроля, быть дешевыми и легкодоступными. При контроле контактным способом важно также, чтобы жидкость смачивала поверхность и не стекала с нее.

Чаще всего в этом случае применяют машинные масла различных марок. Для удешевления контроля вместо масел применяют растворы на основе крахмала или целлюлозы.

При контроле щелевым способом в качестве контактной жидкости применяют воду. Иногда в нее добавляют ингибиторы (вещества, замедляющие коррозию) и спирты, чтобы вода лучше смачивала поверхности изделия и преобразователя и не замерзала при небольшом морозе.

При контроле иммерсионным способом в качестве контактной жидкости используют воду, иногда с добавкой ингибитора. Воде дают отстояться, чтобы из нее вышли пузырьки воздуха.

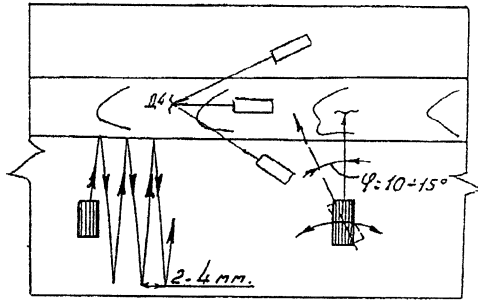
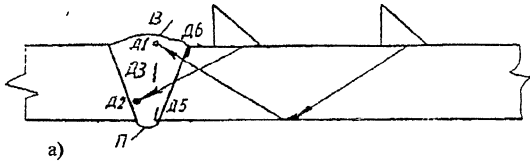


Рис. 7.7. Схема контроля сварных соединений

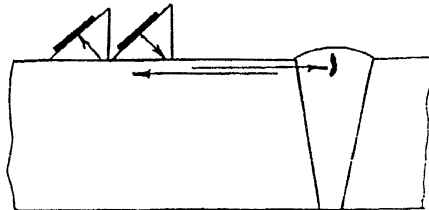


Рис. 7.8. Выявление головной волной трещины под валком сварного шва



2. При контроле контактным способом учитывают вязкость жидкости. Обычно применяют не очень вязкие жидкости, но если поверхность ввода изделия расположена вертикально или наклонно, приходится применять более вязкие масла или другие вязкие жидкости, чтобы они не стекали.

При контроле по грубой поверхности хорошо применять глицерин. У него большое волновое сопротивление, а это улучшает прохождение ультразвука через контактный слой. Однако глицерин дорог и дефицитен. Изделия с грубой поверхностью контролируют, используя вязкую контактную жидкость на пониженных частотах. Это также улучшает прозрачность.

При контроле изделий с криволинейной и неровной поверхностью чувствительность настраивают по стандартному образцу с такой же кривизной и неровностью поверхности, чтобы обеспечить идентичность качества акустического контакта. При контроле наклонным преобразователем поверхность призмы притирают к цилиндрической поверхности изделия, если его радиус менее 300 мм. Некоторые руководства рекомендуют не притирать призму, а ограничиться повышением чувствительности. Однако эта рекомендация сомнительна, поскольку в процессе контроля на контактной поверхности преобразователя быстро образуется желобок и в результате чувствительность при контроле повышается, а при настройке по плоскому образцу - понижается.

Иногда для контроля качества акустического контакта наклонный преобразователь снабжают дополнительным пьезоэлементом 1 (рис. 7.9,а), излучающим продольные волны. Они проходят через призму 2 и падают перпендикулярно на донную поверхность изделия 3, что обеспечивает возможность контроля качества акустического контакта по донному сигналу. Этот способ удобно применять при автоматическом контроле.

При ручном и автоматическом контроле, как прямым, так и наклонным преобразователем иногда применяют способ оценки акустического контакта по уровню низкочастотного (около 0,02 МГц) сигнала, возбуждаемого вибратором 4 (рис. 7.9,б) в изделии. Способ позволяет установить наличие или отсутствие жидкого слоя между преобразователем и изделием, но не позволяет определить прозрачность этого слоя для рабочей частоты, т. к. прозрачность разная для УЗ волн на этой частоте и для более низких частот.

### 7.3. Подготовка к контролю

1. Проверка чистоты поверхности изделия, наличие необходимых принадлежностей и приспособлений. Оперативная настройка и проверка аппаратуры перед началом контроля (развертки, чувствительности).

2. Оперативная проверка аппаратуры, разделение поверхности изделия на последовательно контролируемые зоны.

1. Вопросы подготовки поверхности изделия к контролю упомянуты в п. 4.10. Здесь отметим, что при контроле контактным способом волни-

стость поверхности ввода должна быть не более 0,015. Оптимальная шероховатость поверхности для контроля контактным способом прямым преобразователем -  $R_z = 10 \dots 20$  мкм, а для контроля наклонным -  $R_z = 20 \dots 40$  мкм. Более гладкая поверхность нежелательна, так как при движении преобразователь будет соскабливать контактную жидкость, предварительно нанесенную на поверхность изделия. Более грубая поверхность приведет к нестабильности акустического контакта. Изделия с грубой поверхностью лучше контролировать на пониженных частотах, применить в качестве контактной жидкости более густые масла или глицерин. При контроле щелевым и особенно иммерсионным способами шероховатость поверхности допускается значительно больше, чем при контактном способе.

Поверхность изделий после штамповки, термообработки бывает покрыта окалиной. Если она плотная и хорошо сцеплена с поверхностью, контроль можно проводить по окалине. Не мешает контролю также хорошо приставшая и высохшая краска. При зачистке поверхности абразивным кругом лучше пользоваться его торцевой, а не цилиндрической поверхностью, чтобы не возникали "рытвины", увеличивающие волнистость. Хорошо применять лепестковые шлифовальные круги.

Проверку достаточной чистоты поверхности изделия проводят, наблюдая за стабильностью донного сигнала при перемещении прямого преобразователя. Изменение амплитуды этого сигнала в пределах 2 дБ показывает, что чистота поверхности изделия вполне удовлетворительна. Очень хорошее средство проверки пригодности поверхности изделия для проведения УЗ контроля - датчик шероховатости и волнистости (ДШВ) ЦНИИТМАШ (тел. 275-87-50). Он позволяет учесть неодинаковое качество поверхностей изделия и стандартного образца, по которому настраивают чувствительность дефектоскопа (см. п. 4.10) и скомпенсировать чувствительность.

Если предусмотрен контроль однократно отраженным лучом, как на рис. 7.7,а, или ЗТ методом, то важно также состояние донной поверхности. Обычно требуют, чтобы ее шероховатость была не более  $R_z = 160$  мкм, а волнистость не более 0,025.

Для ручного контроля кроме дефектоскопа и преобразователей необходимо иметь образцы для настройки и проверки аппаратуры, контактную жидкость и приспособления для ее нанесения, ветошь для обтирки, масштабную линейку, карандаш и бумагу для записи результатов, мел, быстросохнущую краску или керн для разметки поверхности. Необходимо также иметь приспособления, предусмотренные методикой контроля. Например, если предусмотрено использование АРД диаграмм, иметь планшет с АРД диаграммой для используемого преобразователя, если предусмотрено применение линейки для определения координат дефектов - иметь такую линейку.

Самые важные параметры, подлежащие настройке и проверке - развертка и чувствительность прибора. Способы настройки и проверки

чувствительности рассмотрены в п. 4.3. Здесь рассмотрим настройку развертки дефектоскопа.

Развертка типа  $A$  должна быть настроена так, чтобы весь путь УЗ импульса, на котором могут возникнуть отражения от дефектов (зона контроля), был виден на экране дефектоскопа и занимал, возможно, большую часть линии развертки. Настройку выполняют двумя основными ручками: задержка начала развертки и скорости развертки.

При контроле прямым преобразователем от поверхности изделия у левого края линии развертки должен располагаться зондирующий импульс, а вблизи правого края - донный сигнал, как показано на рис. 3.2. При этом задержка начала развертки равна или близка к нулю. Скорость развертки настраивают по донному сигналу.

При контроле наклонным преобразователем от поверхности изделия у левого края линии развертки должна располагаться точка  $H$  (начальная), соответствующая вхождению импульса из призмы в изделие. Эхосигнал в этой точке трудно отличить от помех преобразователя. Удобный способ найти эту точку - с помощью двух идентичных преобразователей, расположенных, как показано на рис. 7.10, *а*. Если их включить по раздельной схеме (рис. 7.10, *б*), то максимальный сигнал на экране покажет положение точки  $H$ . Если один из преобразователей включить по совмещенной схеме, а второй использовать как отражатель, то импульс два раза пройдет через две идентичные призмы и максимальный эхосигнал на экране будет на расстоянии  $2H$  от начала развертки (рис. 7.10, *в*).

Настройку скорости развертки выполняют по эхосигналам от двугранных углов  $A$  и  $B$  (рис. 7.11, *а*) изделия или по стандартному образцу, в котором выполнены искусственные отражатели  $A'$  и  $B'$  (рис. 7.11, *б*). По последнему образцу очень удобно настраивать и проверять в процессе контроля как развертку, так и чувствительность дефектоскопа.

Если двугранного угла нет, а искусственные отражатели выполнить нельзя, то используют отражение от дна изделия (рис. 7.11, *в*). Если преобразователи включить по раздельной схеме, то максимальный донный сигнал будет соответствовать на линии развертки эхосигналам от отражателей  $A$  и  $A'$ . Если включить один преобразователь по совмещенной схеме, а второй использовать как отражатель, то сигнал будет соответствовать на линии развертки отражателям  $B$  и  $B'$ .

Развертку прибора можно установить также по глубиномеру, предварительно настроенному по рекомендациям п. 6.1.2. По показаниям глубиномера выделяют на линии развертки зону контроля, где могут появиться эхосигналы от дефектов в контролируемой части изделия.

Например, если задано контролировать только наплавленный металл сварного соединения, то при фиксированном расстоянии преобразователя от сварного шва по чертежу и показаниям глубиномера выделяют зону линии развертки, соответствующую пробегу импульса в наплавленном металле, но исключают часть развертки, соответствующую пробегу импульса в основном металле. Заметим, что глубиномер дефектоскопа УД2-12 не

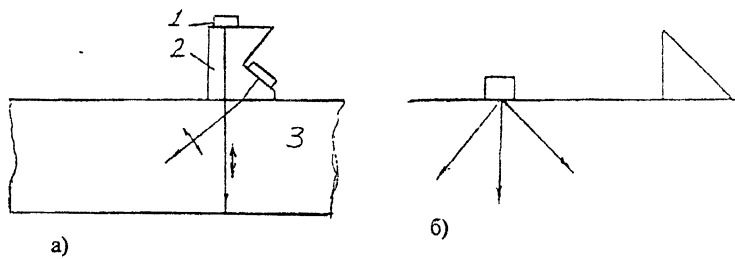


Рис. 7.9. Контроль качества акустического контакта

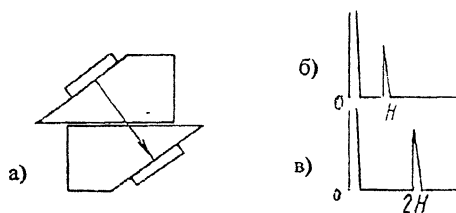


Рис. 7.10. Настройка начала развертки

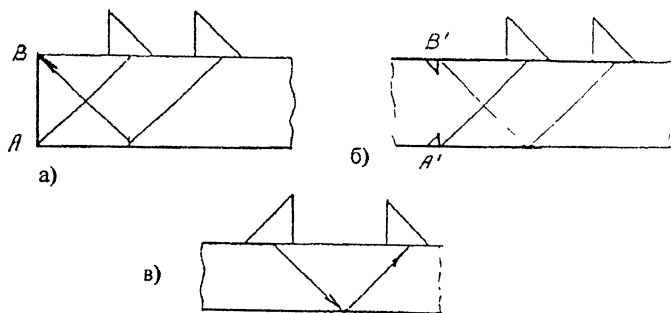


Рис. 7.11. Настройка скорости развертки

позволяет установить развертку прибора, так как БЦО указывает координаты только эхосигналов от отражателей.

В настройку прибора входят также настройка временной регулировки чувствительности и автоматического сигнализатора дефектов (см. п. 7.1). Выполняют или проверяют настройку глубиномера, аттенюатора, проверяют мертвую зону.

2. Оперативную проверку аппаратуры выполняют так же, как ее настройку (см. подпункт 1). Наиболее удобно использовать образцы из материала изделия, если их можно выполнить не очень большими. Желательно, чтобы искусственные дефекты в образцах имитировали наиболее часто встречающиеся естественные дефекты. Например, в сварных швах с V-образной разделкой кромок часто встречаются непровары в корне и верхней части шва (дефекты Д5 и Д6 на рис. 7.7,а), поэтому стандартные образцы предприятия изготавливают из части основного металла соединения, а в качестве искусственных дефектов используют зарубки или риски ( $A'$  и  $B'$  на рис. 7.11,б) на обеих его поверхностях. По ним удобно настроить и проверить как чувствительность, так и развертку.

В трубах часто встречаются риски, трещины, закаты, расположенные вдоль оси трубы. С учетом этого, как отмечалось в п. 7.1, настройку ведут по образцу в виде отрезка бездефектной трубы, а в качестве искусственных дефектов используют риски на внутренней и наружной поверхностях (рис. 7.12). Для настройки на выявление поперечных дефектов применяют искусственные дефекты в виде кольцевой проточки, а на расслоение - плоскостное отверстие.

Изделия большой протяженности или большой площади разбивают на участки, контролируемые последовательно. Это облегчает привязку результатов контроля к изделию. Например, длинный сварной шов разбивают на участки, длина которых 300 - 400 мм соответствует длине применяемых рентгеноплёнок. Таким образом, удобно сопоставлять результаты УЗ и радиографического контроля. При контроле листов и плит их поверхность разбивают на участки 200x200 мм или несколько большего размера.

Важный практический вопрос - определение ширины зон перемещения преобразователя при контроле сварных соединений. Это существенно, когда такие зоны подлежат подготовке (зачистке) перед контролем. При контроле совмещенным наклонным преобразователем сварного соединения с незачищенным валиком усиления шва зона перемещения начинается от самого валика (рис. 7.13). Если валик зачищен, то преобразователь перемещают также по поверхности наплавленного металла.

Зону перемещения отсчитывают от видимой границы валика усиления. При контроле нижней части шва прямым лучом ширина зоны перемещения  $l_1$  определяется формулой

$$l_1 = H \cdot \operatorname{tg} \alpha + a + b.$$

При контроле верхней части шва однократно отраженным лучом ширина зоны перемещения  $l_2$  определяется формулой

$$l_2 = 2H \cdot \operatorname{tg} \alpha + a + b.$$

Здесь  $H$  - толщина шва,  $\alpha$  - угол ввода,  $a$  - длина призмы преобразователя,  $b$  - ширина зоны термического влияния. Для швов, выполненных дуговой сваркой, с  $H \leq 5$  мм принимают  $b = 5$  мм; для швов с  $5 < H < 20$  мм принимают  $b = H$ , для швов с  $H \geq 20$  мм принимают  $b = 20$  мм. Для сварных соединений ответственного назначения зона термического влияния подлежит контролю по тем же нормам, что и наплавленный металл. Для менее ответственных соединений зону термического влияния не учитывают, считая  $b = 0$ .

#### 7.4. Проведение контроля

1. Поиск дефектов в конкретных изделиях. Признаки обнаружения дефектов.

2. Поиск дефектов в изделиях простой и сложной формы, в том числе с высоким уровнем структурных помех. Способы идентификации ложных сигналов.

1. Поиск дефектов ведут путем перемещения преобразователя по поверхности изделия (сканирования). Преобразователь перемещают так, чтобы обеспечить выявление дефектов во всем объеме контролируемого материала. Параметры сканирования указаны в п. 4.9. Напомним, что скорость ручного сканирования - не более 150 мм/с, а шаг - обычно не более полуширины пьезоэлемента преобразователя.

Ручное сканирование изделий с плоской поверхностью или цилиндрической поверхностью большого диаметра осуществляют возвратно-поступательным прямолинейным перемещением преобразователя. Прутки, трубы малого диаметра сканируют по образующей, поворачивая изделие на шаг. При автоматическом контроле изделий с цилиндрической поверхностью, как малого так и большого диаметра сканируют по винтовой линии.

Сварные соединения контролируют перемещением преобразователя по основному металлу (рис. 7.13, вид в плане), при этом применяют поперечно-продольное (показано сплошными линиями) или продольно-поперечное сканирование (показано штриховыми линиями). Последняя схема позволяет увеличивать шаг сканирования по мере отодвигания преобразователя от сварного шва (см. п. 4.10) и существенно повысить производительность контроля толстых сварных соединений.

Признаками обнаружения дефектов являются: при контроле эхометодом - появление эхосигнала в зоне контроля; при контроле зеркально-теневым методом - уменьшение донного сигнала; при контроле теневым методом - уменьшение сквозного сигнала. Амплитуда эхосигнала должна

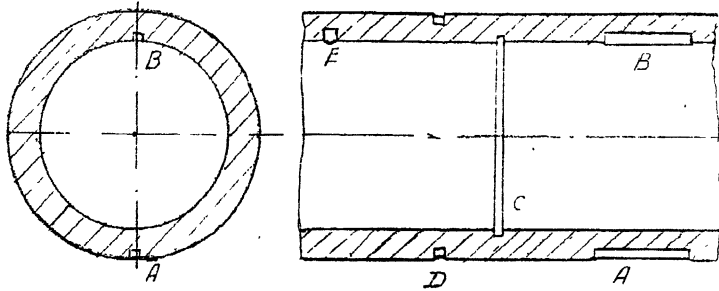


Рис. 7.12. Искусственные дефекты при контроле труб: А, В - продольные риски; С, D - кольцевые риски; Е - плоскостное отверстие

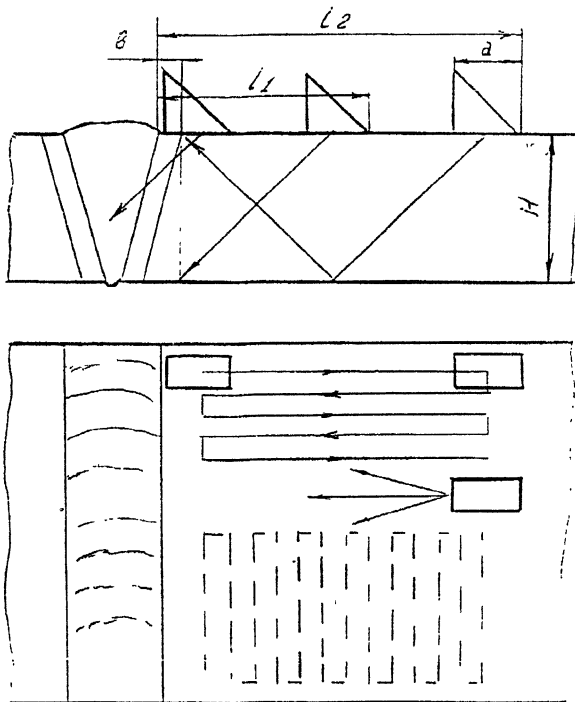


Рис. 7.13. Зона перемещения наклонного преобразователя и направления сканирования при контроле сварного соединения

быть больше, а донного или сквозного сигналов - меньше уровня фиксации.

2. Способ сканирования изделий сложной формы зависит от индивидуальных особенностей изделия. Например, участки изделия, имеющие разную толщину, контролируют раздельно (см. рис. 7.4). Применяют наклонные преобразователи, чтобы проверить зоны вблизи галтелей.

При контроле прямым преобразователем вблизи края изделий (положение преобразователя *A*) у боковой поверхности возникает зона неуверенного контроля вследствие распространения продольной (головной) волны вдоль этой поверхности. В этой зоне размеры и координаты дефекта могут быть определены с большими ошибками.

При контроле ответственных изделий, чтобы устранить зоны неуверенного контроля применяют поперечную волну, вводимую наклонным преобразователем. Его перемещают вдоль боковой поверхности, с последующим разворотом на  $180^\circ$ , чтобы надежнее обнаруживать различно ориентированные дефекты. Для уменьшения мертвой зоны (особенно при контроле изделий небольшой толщины) применяют РС преобразователи.

Изделия из материала с высоким уровнем структурных помех контролируют, как правило, продольными волнами, которые меньше рассеиваются структурными неоднородностями материала. Например, сварные соединения из аустенитных сталей преимущественно проверяют наклонными преобразователями, излучающими продольные волны. Угол призмы у них меньше первого критического, поэтому одновременно с продольной излучается поперечная волна, которая является источником помех.

Для повышения отношения полезного сигнала к уровню структурных помех применяют фокусирующие и РС преобразователи. В дальней зоне применяют преобразователи большого диаметра, чтобы уменьшить расхождение лучей. Толстые изделия контролируют по слоям, повышая чувствительность при переходе к более глубокому слою, или применяют ВРЧ.

Ложные сигналы от углублений или выпуклостей на поверхности изделия - один из видов помех. Иногда их удается устранить правильным выбором схемы контроля. Например, зону галтели на рис. 7.4 контролируют наклонным преобразователем из положения *B*, а не из положения *C*.

Идентифицировать ложные сигналы можно, нажимая на отражающий участок поверхности пальцем, смоченным маслом, то есть демпфируя отражающую поверхность (эту операцию называют пальпированием). Амплитуда ложного сигнала при этом меняется, что позволяет отличить его от полезных сигналов. Например, таким способом определяют ложные сигналы, отраженные от валика усиления или провисания сварного шва (*B* и *П* на рис. 7.7).

Если это сварной шов трубы, то провисание недоступно демпфированию. Сигнал от него можно уменьшить, увеличив угол ввода. Иденти-



фиксации ложных сигналов помогает точное измерение координат отражателя. Например, отражение от провисания сварного шва прямым лучом будет иметь координату по глубине больше толщины сварного шва.

## 7.5. Оценка качества

1. -

2. Общие принципы оценки качества. Способы оценки качества, предусмотренные для изделий, контролируемых аттестуемым.

2. Применяют одно- и двухуровневую системы оценки качества. Согласно одноуровневой системе проверяемые изделия по результатам контроля относят либо к годным, либо к бракованным. Согласно двухуровневой системе проверяемые изделия по результатам контроля оценивают баллами от первого до третьего. Третий балл - изделие безусловно годно; первый - безусловно негодно; второй - о дефектах требуется дополнительная информация.

Как отмечено в п. 5.3, оценка допустимости дефекта должна выполняться по их параметрам, измеряемым при УЗ контроле. Первый такой параметр - амплитуда, определяемая уровнем фиксации. При одноуровневой системе уровень фиксации это одновременно уровень браковки. Например, при автоматическом контроле труб малого диаметра эхометодом этот уровень задают по искусственному дефекту в виде риски определенной глубины. Если амплитуда эхосигнала от дефекта превышает амплитуду эхосигнала от риски - труба бракуется.

В качестве примера двухуровневой системы рассмотрим автоматический контроль листов теневым методом. Уровень фиксации задают по уменьшению амплитуды сквозного сигнала до определенного уровня, например, на 6 дБ. Если амплитуда сквозного сигнала уменьшилась на 6 дБ или еще сильнее, то считают, что данный участок листа содержит дефект. Однако допустимость этого дефекта оценивают по максимальной условной площади дефектного участка, суммарной площади всех дефектных участков, расстояниям между дефектными участками. Все эти характеристики измеряют по дефектограмме, автоматически записанной в процессе контроля, и с учетом их относят лист к годным или бракованным.

При контроле эхо-методом сварных соединений толщиной 30 мм и более уровень фиксации задают площадью дна плоскодонного отверстия, которое должно обнаруживаться по всей толщине сварного соединения. Применяют также другие отражатели. Если сварное соединение не содержит дефектов, эхосигналы от которых превышает уровень фиксации, то соединение оценивают баллом 3 (безусловно годное). Если сварное соединение содержит дефект, эхосигнал от которого превышает браковочный уровень, задаваемый также через эквивалентную площадь или по отношению к уровню фиксации (обычно на 6 дБ выше его), то соединение оценивают баллом 1 (бракованное). Если амплитуды

вают баллом 1 (бракованное). Если амплитуды эхосигналов от дефектов сварного соединения лежат между уровнями фиксации и браковки, то измеряют: эквивалентные и условные размеры дефектов, их координаты, количество, условное расстояние между ними, иногда также другие параметры и сравнивают их с нормативными значениями. Если дефекты признаны допустимыми, то сварное соединение оценивают баллом 2 и считают годным.

## 7.6. Оформление результатов контроля

1. Правила регистрации результатов контроля в журнале и в заключении по контролю.

2. Оформление дефектограмм и заключения по результатам контроля.

1. Результаты контроля изделия должны быть зафиксированы в журнале и в заключении (протоколе) по контролю. Содержание этих документов может быть не вполне идентичным, но итоговое решение - одинаковым. В журнале дефектоскопист может отразить особенности выявления дефектов, а заключение должно быть более лаконичным. Вывод о качестве должен быть записан в альтернативной форме: соответствует или нет изделие техническим условиям. Дефектные места в изделии должны быть отмечены до принятия окончательного решения.

По результатам контроля партии однотипных изделий (например, рельсов, труб) делается общая запись в журнале и составляется общее заключение. В них должны быть указаны номера или маркировка всех проверенных изделий. Бракованные изделия должны быть помечены и собраны в отдельном месте.

Все названные документы по результатам контроля подписывает специалист второго или третьего уровня, ответственный за контроль.

2. Дефектограмма - это эскиз изделия, на котором изображены обнаруженные дефекты. Она в случае необходимости должна прилагаться к записи в журнале и заключению по контролю.

В заключении по результатам контроля должны содержаться следующие сведения:

- о контролируемом изделии (название, тип, номер, материал);
- о средствах и способе контроля (тип и номер дефектоскопа, преобразователя, метод, частота, уровень фиксации и др.);
- о результатах контроля; если дефектность оценена баллом 1 или 2, то в журнале (а при необходимости - также в заключении) указывают характеристики дефектов;
- общее заключение о качестве;
- о лицах, выполнивших контроль и ответственном за контроль.

Если это оговорено условиями поставки, копии заключения по результатам контроля с описанием дефектов и дефектограммы передаются организации, эксплуатирующей изделие, для дальнейшего наблюдения за дефектами.

### 7.7. Измерение толщины

1. Правила подготовки и оперативной проверки толщиномера перед началом контроля. Правила проведения контроля конкретных изделий, проверку которых осуществляет аттестуемый; регистрация результатов.

2. Возможные погрешности при УЗ измерении толщины и способы их устранения или уменьшения. Правила контроля толщин механическими мерительными средствами, причины погрешностей.

1. Правила настройки и оперативной проверки толщиномера рассмотрены в п. 5.2.2. Изложим их более подробно применительно к серийному прибору УТ-93П.

Подготовка толщиномера к контролю начинается с выбора наиболее подходящего преобразователя. В комплект прибора входит 6 - 8 РС преобразователей для контроля изделий в различных диапазонах толщин (от 0,6 - 10 мм до 1 - 1000 мм), с различной шероховатостью и кривизной поверхности (минимальный радиус кривизны 3; 5 и 10 мм для различных преобразователей).

Блок ВРЧ настраивают так, чтобы обеспечить минимальный уровень помех для выбранного преобразователя.

Далее настраивают измерительный узел толщиномера двумя ручками: регулирующей начало отсчета "0" (при этом исключается время пробега УЗ импульсов в призмах преобразователя) и устанавливающей скорость звука. Наиболее точный способ настройки - по двум образцам, изготовленным из материала изделия, соответствующих минимальной и максимальной измеряемой толщине. Настройку на тонком образце выполняют первой, а на - толстом - второй ручкой. Настройку обеими ручками повторяют последовательно несколько раз, добиваясь, чтобы на цифровом индикаторе указывались точные значения толщины образцов.

Настраивать измерительный узел можно также по прилагаемым к прибору образцам, после чего выполняют настройку на скорость звука на участке изделия, доступном измерению механическими мерительными средствами, или на образце из материала изделия. Оперативную проверку толщиномера после настройки на скорость звука по двум образцам проводят путем измерения толщин набора образцов, прилагаемых к толщиномеру, или специально изготовленного и поверенного образца и фиксации их результатов. Они не должны отличаться от номинальной толщины образцов больше, чем указано в технической характеристике толщиномера.

Возможность и точность измерения толщин зависят от кривизны и шероховатости поверхностей изделия, непараллельности поверхностей его стенок. С учетом этого настроенный толщиномер перед началом и в процессе контроля проверяют по краю изделия или образцу, который имеет кривизну и шероховатость поверхностей соответствующие изделию.

Ручной контроль изделий выполняют, прижимая преобразователь последовательно к точкам изделия, указанным в методическом документе по контролю и считывая показания прибора. Предварительно эти точки зачищают (при необходимости) и смазывают контактной жидкостью. О том, что достигнут акустический контакт преобразователя с изделием указывает появление точки справа на индикаторе прибора.

При контроле сосуда или трубопровода, в котором уменьшение толщины стенок в процессе эксплуатации одинаково вероятно в любом месте, преобразователь прижимают к точкам поверхности изделия через заданные интервалы. Контроль толщины стенок прямых труб обычно выполняют по четырем образующим трубы с углом  $90^\circ$  между образующими. Обязательно следует измерять толщину на выпуклой поверхностигиба трубы или вблизи сварных швов, где утонение наиболее вероятно. При регистрации результатов указывают координаты или номер точки, где производилось измерение, и полученное значение толщины. Измерения, выходящие за пределы допусков, отмечают.

2. Источники погрешностей при измерении УЗ импульсным толщиномером рассмотрены в п. 3.9. Погрешность состоит из части, независимой от измеряемой толщины, и части пропорциональной толщине. Основная погрешность толщиномера УТ-93П согласно техническим данным составляет  $+0,1$  мм. Только в поддиапазоне  $100 - 1000$  мм погрешность увеличивается и составляет  $+(0,001h + 0,1)$  мм, где  $h$  - измеряемая толщина. На частоте  $5$  МГц прибора УТ-93П это соответствует формулам, приведенным в п. 3.9. По оценкам авторов, реальная погрешность этого толщиномера несколько больше.

Дополнительная погрешность измерения возникает в связи с неблагоприятными условиями контроля. Так, при контроле изделий с неровной поверхностью ввода увеличивается время прохождения УЗ импульса от преобразователя до донной поверхности. Измерения толщиномером УТ-93П рекомендуется вести при шероховатости поверхности ввода  $R_z$  не более  $40$  мкм, а при возрастании  $R_z$  до  $160$  мкм возникает дополнительная погрешность измерения в  $+0,2$  мм. Эту погрешность уменьшают, обеспечивая одинаковую шероховатость поверхности при настройке и измерении, зачищая поверхность ввода, стабилизируя прижатие преобразователя.

Дополнительная погрешность измерения в  $\pm 0,2$  мм возникает также при грубой ( $R_z$  до  $320$  мкм) внутренней поверхности или при измерении локального утонения, имитируемого плоскостонным отверстием диаметром  $1$  мм. Если изделие в месте измерения имеет непараллельные поверх-

ности (на участке длиной, равной размеру преобразователя 8 - 14 мм изменение толщины составляет 3 мм или более) также возникает дополнительная погрешность измерения приблизительно в  $\pm 0,3$  мм. При контроле труб диаметром 6 - 20 мм возникает дополнительная погрешность измерения приблизительно в  $\pm 0,1$  мм. Эту погрешность уменьшают, выполняя настройку прибора по образцу с такой же кривизной, как и изделие.

Изменение температуры изделия и окружающей среды приводит к изменению скорости звука в изделии и призмах преобразователя. Для устранения возможной погрешности настройку прибора и измерение выполняют при одинаковой температуре. Тогда в интервале температур от -10 до +50°, в котором рекомендуется эксплуатировать толщиномер, дополнительная погрешность не возникает.

Возможна грубая погрешность при измерении толщин изделий, меньших мертвой зоны толщиномера (меньших 0,6 мм). Тогда прибор, настроенный на измерение по первому донному сигналу, может зафиксировать не первый, а второй донный сигнал. Более совершенные толщиномеры имеют небольшой экран, на котором изображается последовательность донных сигналов. Сравнивая интервалы между ними и интервал между зондирующим импульсом и сигналом, по которому выполняется измерение, можно обнаружить упомянутую грубую погрешность.

Механические измерительные средства, которые используют для сравнения с результатом измерения толщины с помощью УЗ, это микрометр и штангенциркуль. Общие правила измерения механическими средствами сводятся к следующим:

Вести измерения предварительно поверенным инструментом.

Вести измерения чисто обтертым инструментом по чисто обтертым поверхностям.

Избегать перекоса мерительного инструмента, его губки должны быть ориентированы параллельно поверхности измеряемого объекта.

При измерении изделий с искривленной поверхностью (например, труб) применять инструмент со скругленной или заостренной внутренней губкой, чтобы обеспечить плотный контакт губки с вогнутой поверхностью изделия.

Стабилизировать сжатие измеряемого изделия инструментом, например, при измерении микрометром пользоваться трешеткой.

Проводить измерения 2 - 3 раза, исключая промахи и усредняя результаты.

При выполнении этих правил погрешность измерения не будет больше значений, установленных для используемого инструмента.

Близкое совпадение измерений толщины, выполненных ультразвуковым толщиномером и мерительным инструментом, достигается только на ОК с гладкими поверхностями. На ОК с неровными поверхностями может возникнуть расхождение, поскольку ультразвуковой толщиномер и мерительный инструмент по-разному реагируют на неровности.

## 7.8. Контроль физико-механических свойств

1. Определение понятия конкретного свойства материала, контроль которого осуществляет аттестуемый.

2. Понятие об основных физико-механических свойствах материалов и способах их контроля. Основные акустические методы контроля физико-механических свойств. Возможные погрешности контроля методом, используемым на конкретном производстве, способы их минимизации.

1. Дадим определения некоторых физико-механических свойств металлов, измеряемых акустическими методами.

Модуль упругости - коэффициент пропорциональности между механическим напряжением, приложенным к образцу из этого материала, и его относительной деформацией. Предполагается, что напряжение и деформация малы и между ними имеется линейная зависимость.

Прочность - способность материала сопротивляться разрушению.

Твердость - свойство поверхности тела сопротивляться вдавлению или царапанью.

Размер зерна - среднее значение размеров кристаллитов в металле.

Коррозия - самопроизвольное разрушение поверхности тел, вызываемое химическими или электрохимическими процессами.

Межкристаллитная коррозия - химическое превращение веществ, расположенных на границах кристаллитов, вблизи поверхности изделия, где действуют агрессивные среды.

2. Некоторые ультразвуковые приборы для контроля физико-механических свойств материалов рассмотрены в п. 3.10. Модули упругости и прочность материалов контролируют по измерению скорости ультразвука. Твердость - по механическому импедансу поверхности. Размер зерна и межкристаллитную коррозию - по затуханию ультразвука. Коррозию - по измерению толщины изделия.

Приборы для измерения скорости ультразвука аналогичны по схеме измерения толщиномерам. Погрешности измерения скорости и способы борьбы с ними - те же, что при измерении толщины. Например, толщиномер УТ-93П позволяет измерять скорость звука в пределах 3 - 6,5 мм/мкс с погрешностью 1% при толщине ОК 20 - 300 мм.

Приборы, использующие изменение коэффициента затухания, основаны на сравнении ослабления амплитуд донных сигналов в изделии и образцах. Основные погрешности этих приборов вызываются нестабильностью акустического контакта. С целью уменьшения погрешности принимают меры к уменьшению неровности поверхностей и идентичности поверхностей изделий и образцов.

Поскольку дефектоскоп УД2-12 довольно точно измеряет время пробега импульса в ОК и амплитуду эхосигнала, его можно использовать для измерения скорости и затухания и для оценки физико-механических свойств по специальным методикам, изложенным в [1].

Погрешности твердомеров определяются точностью их калибровки по сравнению с механическими измерителями твердости и статистическим разбросом твердости различных участков поверхности. Их уменьшают статистической обработкой результатов измерений.

### **7.9. Факторы, определяющие надежность контроля**

1. Факторы, снижающие надежность обнаружения дефектов (измерения толщины, свойств) при контроле аттестуемым конкретными объектами.

2. Надежность УЗ контроля как надежность комплекса "дефектоскоп - оператор". Факторы, обуславливающие надежность оператора. Тренажеры, сервисные устройства как средства повышения надежности оператора

1. При неразрушающем (в том числе - ультразвуковом) контроле дефект может быть выявлен или пропущен. Вероятность обнаружения дефектов определяют через понятие надежности применяемого метода (или нескольких методов) контроля. Под дефектом здесь будем понимать не только несплошность в изделии, но также любое отклонение от нормы, проверяемое неразрушающим методом: изменение толщины, твердости или другого свойства материала. Надежность контроля зависит от:

- вида, размеров, расположение дефектов;
- применяемого метода (или методов) контроля;
- применяемой аппаратуры и ее настройки;
- оператора (дефектоскописта), выполняющего контроль.

На последний фактор следует обратить особое внимание, так как от дефектоскописта зависит правильность настройки аппаратуры и подготовки изделия к контролю, выполнение непосредственно контроля, оценка его результатов.

2. Из факторов, названных в подпункте 1, два первых определяют оптимальный выбор системы контроля - совокупности одного или различных методов, используемых по определенной программе для обеспечения проверки качества контролируемого объекта. Критерий выбора системы - обеспечение максимальной надежности выявления дефектов при минимальных затратах. В них входят затраты собственно на проверку качества, затраты на подготовку к контролю и затраты, связанные с ошибочным бракованием годных изделий и пропуском бракованных. Основные параметры контроля выбирают, исходя из максимальной достоверности ре-

зультатов контроля, т. е. правильной оценки дефектности или бездефектности изделий.

При правильном выборе системы и параметров контроля его надежность зависит от комплекса "дефектоскоп - оператор". Факторы эти взаимосвязаны: низкая надежность дефектоскописта (оператора) может привести к неправильной настройке дефектоскопа, низкая надежность дефектоскопа - к снижению надежности работы дефектоскописта. Последняя зависит от:

Квалификации и опытности дефектоскописта; отсюда следует важность вопросов аттестации специалистов.

Условий работы; деловой дискомфорт, недостаток времени, отпущенного на контроль, чрезмерное опасение пропустить дефект снижают надежность работы дефектоскописта.

Количества обнаруживаемых дефектов; если дефектов встречается много, дефектоскопист устает; если дефекты встречаются редко, возникают сомнения в целесообразности работы, внимание притупляется.

Повышению надежности дефектоскописта способствует отбор по тестам лиц на эту должность; систематическая переподготовка; применение тренажеров для проверки правильности выполнения всех функций (особенно процесса сканирования); создание удобных условий работы; правильный норматив времени, отпущенного на контроль; использование приспособлений, принадлежностей и других сервисных устройств, повышающих удобство и производительность; периодическое предложение экзemplаров изделий с дефектами для повышения внимательности; введение инспекционного контроля определенной части проверенных изделий другим дефектоскопистом.

Разработанные в НИИМостов Петербургского государственного университета путей сообщения (тел. (812) 122-65-46, 122-65-20) тренажеры помогают усвоить навыки правильного (без пропусков) сканирования, обнаружения и измерения параметров дефектов. Электронный тренажер объективно оценит все ошибки дефектоскописта, позволит повторно выполнить операции поиска и исследования дефекта, причем даст возможность изменить условия контроля, наличие и распределение дефектов.

Вопросы достоверности контроля и вероятностные аспекты подробно рассмотрены в [3].

## **7.10. Техника безопасности и охрана труда**

1. Правила техники безопасности и охраны труда при контроле конкретного объекта на предприятии.

2. Правила пожарной безопасности, электробезопасности и работы с оборудованием, создающим ультразвук, передаваемый контактным способом на руки работающих.



1. Правила техники безопасности при контроле конкретного объекта должны быть сформулированы в документах, действующих на предприятии. Следует учитывать, в частности, следующие положения:

При напряжении питания свыше 40 В необходимо применять заземление.

При контроле объектов изнутри, например, внутри сосудов, напряжение питания должно быть не выше 12 В.

УЗ контроль желательно выполнять при температурах не ниже +5°C и не выше 45°C. Эти пределы могут быть расширены ведомственными постановлениями при обеспечении технических и физиологических возможностей контроля.

Работа на высоте допускается только при использовании предохранительных поясов.

Общая освещенность должна быть в пределах 100 - 200 люксов.

Экран дефектоскопа следует защитить от яркого света.

2. Специфические требования противопожарной безопасности относятся к контактной жидкости, если она обладает повышенной возгораемостью (например, некоторые типы масел, спиртов). Их следует предохранять от воздействия огня, искрящих электроконтактов. Важнейшие требования электробезопасности сформулированы в подпункте 1.

Прямого воздействия ультразвука с параметрами, используемыми при контроле металлов, на здоровье дефектоскопистов не обнаружено. Интенсивность используемого излучения в сотни раз меньше, чем предусмотрено требованиями ГОСТа на оборудование, создающее УЗ. Тем не менее в качестве средства профилактики следует избегать прямой контактной передачи УЗ на руки работающих.

Рекомендовано конструировать преобразователи с корпусом, отделенным от пьезоизлучателя воздушным промежутком, что учитывается подавляющим большинством изготовителей. Если конструкцией преобразователя это не предусмотрено, работать следует в нитяных перчатках.

## **8. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

1. Значимость УЗ контроля для обеспечения качества и надежности выпускаемой предприятием продукции. Понятие о других (неакустических) методах контроля.

2. Основные типы УЗ дефектоскопической аппаратуры, эксплуатируемой и выпускаемой в СНГ. Перспективные направления разработки новых моделей дефектоскопов. Значимость и эффективные области использования механизированного УЗ контроля. Основные представления о принципах и областях применения методов: радиационного, вихретокового, магнитопорошкового, капиллярного, оптического.

1. Основные методы (их часто называют виды) неразрушающего контроля (НК) металлов:

Магнитный вид НК основан на анализе взаимодействия магнитного поля с ОК. Его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов. Наиболее широко используют магнитопорошковый метод. Изделие намагничивают, либо помещая его между магнитными полюсами (рис. 8.1,а), либо пропуская через него очень сильный электроток (рис. 8.1,б). Для надежного выявления дефект должен пересекать линии магнитного поля. Тогда над дефектами магнитное поле как бы "выпучивается". Эти места отмечают по оседанию магнитного порошка. Есть также способы отмечать такие места с помощью электромагнитных датчиков.

Электрический вид НК основан на анализе взаимодействия электрического поля с ОК. Для измерения глубины поверхностных трещин в металлах применяют метод электрического потенциала. Исследуемый дефект помещают между двум электрическими контактами (рис. 8.2). Ток огибает дефект и вызывает падение электрического потенциала тем большее, чем глубже дефект.

Вихрековый вид НК основан на том, что дефект как бы мешает возникновению токов Фуко в изделии, что служит его признаком. Некоторые типы вихрековых преобразователей показаны на рис. 8.3. Важное достоинство метода - не требуется непосредственного контакта преобразователей с изделием.

Оптический вид НК основан на визуальном обнаружении дефекта. При необходимости применяют лупу, перископ и более сложные устройства. Более общий вид НК - визуально-измерительный. Кроме визуального обнаружения дефектов он включает также измерительные операции.

Радиационный вид НК основан на регистрации и анализе рентгеновского или гамма-излучение от источника 4 после его взаимодействия с ОК 1 (рис. 8.4). Излучение меньше ослабляется дефектом 3, чем металлом изделия (сварного соединения). Это регистрируют по более сильному потемнению рентген пленки 2 (методы рентгенографии или гаммаграфии).

НК проникающими веществами делят на капиллярный вид контроля и течеискание. Первый основан на проникновении в полость поверхностного дефекта смачивающих жидкостей на основе керосина, скипидара и т. п. (рис. 8.5,б). Излишки жидкости удаляют с поверхности (рис. 8.5,в), а оставшуюся в дефекте жидкость извлекают проявляющим порошком или краской (рис. 8.5,г). След жидкости виден на поверхности как темные пятна (метод керосиновой пробы), цветные пятна (цветной метод) или пятна, светящиеся в ультрафиолетовых лучах (люминесцентный метод). Капиллярный вид контроля позволяет выявлять те же дефекты, что при тщательном визуальном осмотре, но производительность проверки повышается в десятки раз.

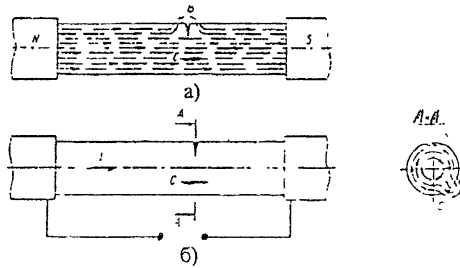


Рис. 8.1. Способы намагничивания при выявлении несплошностей  
а - полюсной, б - циркулярный

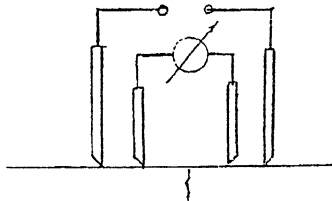


Рис. 8.2. Электропотенциальный метод НК

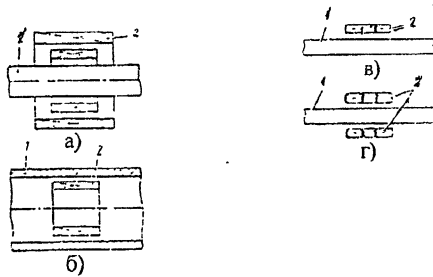


Рис. 8.3. Некоторые типы вихрековых преобразователей:  
а, б - проходные наружный и внутренний, в - накладной,  
г - экранированный 1 - объект контроля, 2 - преобразователи

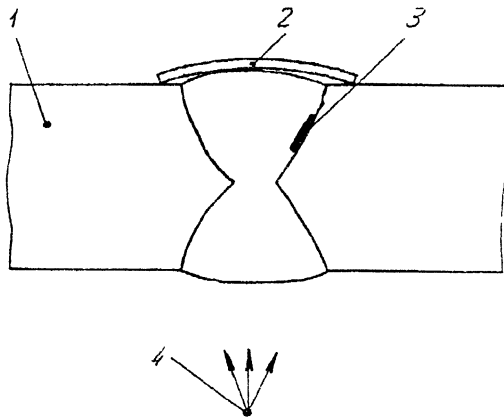


Рис. 8.4. Контроль сварного соединения радиографическим методом

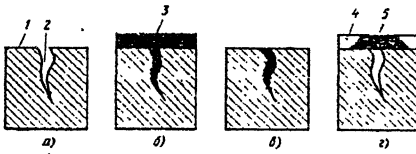


Рис. 8.5. Основные операции при капиллярной дефектоскопии

Течеискание основано на проникновении газов или жидкостей через сквозные дефекты в стенках изделий и обнаружении проникших веществ с противоположной стороны стенки.

Отметим основные преимущества ультразвукового контроля перед другими методами.

УЗ контроль позволяет выявлять дефекты как на поверхности изделий, так и внутренние дефекты. Все другие методы (кроме радиационного) выявляют только поверхностные и подповерхностные дефекты.

УЗ позволяют выявлять очень тонкие даже заполненные другим веществом дефекты. Это объясняется тем, что само распространение УЗ волн основано на явлении упругости, а при появлении дефекта элемент объема изделия теряет упругость.

УЗ контроль безопасен для исполнителей и окружающих.

Затраты на УЗ невелики.

УЗ метод сравнительно легко поддается автоматизации, уступая в этом отношении только вихретоковому методу и магнитному методу с электромагнитными датчиками.

Отметим и недостатки УЗ метода.

Трудно или невозможно контролировать неоднородные, крупнозернистые металлы.

Поверхность ввода изделия должна быть ровной, гладкой.

При ручном контроле нет объективного документа о результатах, подобного рентгеноплёнке.

Трудно или невозможно определить характер дефекта и его реальные размеры.

Отмеченные недостатки УЗ контроля в значительной степени преодолеваются достижениями последнего времени, о чем сказано далее.

2. Дефектоскоп УД2-12, на базе которого построено изложение аппаратурной части данного учебника, длительное время выпускался заводом "Электроточприбор" (теперь – ИНТРОСКОП) в г. Кишиневе (Молдавия). Он обладает всеми вспомогательными узлами, рассмотренными в п. 3.2: автоматическими цифровыми глубиномером (с измерителем времени) и аттенюатором, АСД, ВРЧ, компенсированной отсечкой. Диапазон частот прибора - 1,25 - 10 МГц, но в комплект входят преобразователи только на частоты 1,8; 2,5 и 5 МГц. Преобразователи на 10 МГц можно приобрести в ЦНИИТМАШ (тел. 275-89-30).

Мертвая зона - 1 мм (с РС преобразователем на 5 МГц), абсолютная чувствительность (отношение минимального регистрируемого сигнала к максимальному значению зондирующего импульса) - более 100 дБ, вес - около 8 кг. По перечисленным техническим характеристикам прибор соответствует своему назначению и обеспечивает возможность дефектоскопии очень широкого класса изделий, однако он был разработан около 15

лет назад, и в нем отсутствуют многие современные достижения электронной техники.

Лучшие современные импортные дефектоскопы, такие как EPOCH IV фирмы Panametrics (США), USN-52 фирмы Krautkrämer (ФРГ), построены на использовании цифровой техники. Благодаря этому они обладают значительно меньшим весом (1,5 и 2,7 кг), имеют кнопочное управление, два строб-импульса, *B*-развертку и *M*-развертку, автономное питание с большим интервалом подзарядки. Приборы более удобны в работе, позволяют запоминать изображение на экране (140 и 70 изображений) и результаты контроля.

Как упоминалось, ЦНИИТМАШ (тел. 275 87 50) разработал дефектоскоп УДЦ-201П, обладающий всеми достоинствами современных импортных приборов плюс автоматической корректировкой чувствительности с учетом шероховатости поверхности. О нем в этой книге сообщалось ранее.

Приведем основные характеристики дефектоскопа УДЦ-201П. Частотный диапазон 1,0 ... 10,0 МГц; глубина прозвучивания – 0,5 ... 1200 мм по стали; абсолютная чувствительность 100 дБ; погрешность измерения амплитуды  $\pm 0,1$  дБ; погрешность измерения координат  $\pm 1$  мм; размер экрана 96x78 мм; питание – сетевое и автономное; габариты прибора – 255x156x220 мм; вес – 4,9 кг с шестью аккумуляторами.

Базовый толщиномер, рассмотренный в этом учебнике, – УТ-93П – также выпускался заводом "Электроточприбор". Его основные характеристики приведены в п. 7.7.

Импортные толщиномеры фирм Panametrics типа 36DL PLUS и Krautkrämer типа DMS при том же весе (0,5 - 1 кг) имеют экраны, позволяющие избежать грубых ошибок измерений, запоминают несколько тысяч результатов измерений, очень удобны в настройке. Очень высококачественные ультразвуковые толщиномеры выпускает МНПО «Спектр» (тел. 245 58 96)

Механизированный и автоматизированный УЗ контроль резко повышает надежность и производительность проверки. Эффективная область использования таких установок – контроль в условиях вредных для здоровья (например, на атомных станциях) и поточная проверка однотипной продукции: труб, рельсов, листов, протяженных сварных швов. Дефектоскопию изделий индивидуального производства автоматизировать трудно. Главная причина – длительная подготовка к автоматизированному или механизированному контролю из-за необходимости монтажа и настройки сканирующего устройства.

При контроле сварных соединений проявляется еще один недостаток автоматизированных установок: заданность алгоритма сканирования. В процессе поиска дефектов опытный дефектоскопист меняет направление прозвучивания и траекторию сканирования. Особенно разнообразны действия дефектоскописта при оценке характера и размеров найденных дефектов. Предусмотреть и запрограммировать его действия практически невозможно. Видимо по указанным причинам многочисленные разработки установок для автоматического контроля непротяженных сварных соединений в производственных и монтажных условиях не получили распространения.

В настоящее время в Израиле фирмой Sonotron (Московский дилер - тел. 362- 56-38) разработана система ISONIC, которая является развитием идей, заложенных в установке Поиск 19, разработанной ранее в России. На преобразователе дефектоскопа имеются два излучателя ультразвука в воздухе В околошовной зоне сварного соединения устанавливают два съемных приемника этого излучения. По времени прихода УЗ импульсов, распространяющихся в воздухе, определяется местоположение преобразователя и угол разворота преобразователя относительно оси сварного шва.

Точность определения местоположение преобразователя - 0,5 мм, а угла разворота - 1°. Преобразователь перемещают вручную, поэтому траектория перемещения и направления прозвучивания дефектоскопист выбирает произвольно. По данным о позиции преобразователя и показаниям глубиномера дефектоскопа автоматически определяются координаты и условные размеры дефектов на развертках типа А, В, С и D.

Для монтажа и наладки системы требуется меньше пяти минут. Система выполнена на современной приборной базе с использованием серийного компьютера, обладающего большой памятью и быстродействием. Система ISONIC оснащена средствами наблюдения за качеством акустического контакта описанными в заключительной части п. 7.2. Основное назначение системы - объективное представление результатов контроля сварных соединений и устранение фактора зависимости результатов контроля от добросовестности дефектоскописта.

Другое очень перспективное направление развития УЗ дефектоскопии - компьютерная акустическая голография. Сущность ее состоит в сборе данных о времени прихода эхосигналов от всех дефектов (даже дающих слабые эхосигналы) в процессе перемещения преобразователя по большому участку поверхности изделия - 50 ... 200 мм - и последующей их совместной обработке по алгоритму голографии. Сигналы должны быть точно привязаны к положению преобразователя, при котором они получены, поэтому в промышленных установках применяют автоматическое сканирование.

Результат получается таким, как будто весь объем металла изделия контролируется преобразователем с очень острой фокусировкой. Метод повышает до 1 мм (на частоте 2,5 МГц) разрешающую способность ультразвукового контроля и дает трехмерное изображение дефектов, причем с погрешностью  $\pm 1$  мм представляет их реальные размеры. Системы акустической голографии с электромеханическим приводом между преобразователем и прибором под названием АВГУР 4.2 в настоящее время выпускает фирма ЭХО+ (тел. 196-71-19).

Эта система является оптимальной при контроле аустенитных сварных соединений с крупнозернистой структурой. Сохраняются важнейшие преимущества ультразвука перед другими методами дефектоскопии: его мобильность, дешевизна, исключительно высокая чувствительность к наиболее опасным несплошностям типа трещин.

Принципы и области применения радиационного, вихретокового, магнитопорошкового, капиллярного и оптического методов достаточно подробно рассмотрены в подпункте 1.

## ПРОВЕРОЧНЫЕ ВОПРОСЫ

Проверочные вопросы к учебнику помогают закрепить знание материала, несколько расширяют объем сведений, даваемых учебником, а также помогают найти правильные ответы на некоторые сложные вопросы экзаменационных сборников. Однако проверочные вопросы не повторяют экзаменационные. Цифра в скобках в конце вопроса указывает уровень квалификации, для которого предназначен вопрос. Далее приведены ответы на проверочные вопросы.

### К 1.1

1. Что является источником акустических сигналов в активных и пассивных методах? (1)

2. Как располагают преобразователи при контроле методами отражения и прохождения? (1)

3. Какие типы полей применяют при контроле оптическим, радиационным, радиоволновым, вихретоковым методами? А при контроле акустическими методами? (2)

4. По какому основному признаку выполнена классификация внутри активных и пассивных методов? (2)

### К 1.2

5. Можно ли контролировать эхометодом, если регистрировать только наличие эхосигнала и не измерять время его пробега в изделии? (1)

6. Может ли быть амплитуда эхо-сигнала от дефекта больше зондирующего импульса? А больше донного сигнала? (1)

7. Для чего нужно поддерживать постоянным значение  $I_A + I_D$  в эхозеркальном методе (рис. 1.3,а)? (2)

8. В дельта-методе (рис. 1.3,б) наклонным преобразователем излучается поперечная волна, а принимается продольная волна преобразователем над дефектом. Пьезоэлементы в преобразователях одинаковы. Как изменится изображение на экране дефектоскопа, если излучатель подключить к усилителю, а приемник - к генератору импульсов дефектоскопа? (2)

### К 1.3

9. При контроле теневым методом нужно двигать изделие относительно преобразователя или преобразователи относительно изделия? Каким устройством должны быть снабжены преобразователи в последнем случае для обеспечения их соосности? (1)

10. Какие лучше применять преобразователи при контроле временным теневым методом для обеспечения выявления возможно более мелких дефектов: малого или большого размера? (2)

### К 1.4

11. Каким методом лучше выявлять прогяженный наклонный к поверхности дефект со стороны одной поверхности? (2)

### К 1.5



12. Преобразователь импедансного дефектоскопа (рис. 1.6) имеет эластичный наконечник. б. Как это повлияет на чувствительность контроля? (2)

К 1.6

13. Резонансным иммерсионным методом контролируют трубу, погруженную в воду. Будут ли резонансные частоты отличаться от собственных? (2)

К 1.7

14. Двухканальным акустико-эмиссионным дефектоскопом контролируют образец в виде стержня в процессе испытаний на разрывной машине Два преобразователя приклеены к торцам образца. Как отстроится от помех, связанных с трением в зажимах разрывной машины? (2)

К 1.8.

15. Можно ли в качестве контактной жидкости применять слюну? (1)

16. Сравните способы акустического контакта, показанные на рис. 1.8 *е* и *ж*. Какой из них ближе к контактному, а какой - к иммерсионному способам? (2)

К 2.1

17. Амплитуда уменьшилась на 6, 10, 20, 26, 40 дБ. Во сколько раз уменьшилась амплитуда? (1)

18. Скорость звука в стали 5,9 мм/с, в воде - 1,5 мм/с, частота 2,5 МГц. Какова длина волны в стали и воде? (1)

19. Можно ли сказать, что частицы в продольной волне колеблются по синусоиде? (1)

20. Может ли поперечная волна пройти через тонкий слой жидкости? (1)

21. Почему при распространении в идеальной безграничной среде наиболее быстро ослабляется амплитуда сферической волны по сравнению с плоской и цилиндрической? (1)

22. Может ли поперечная волна распространяться в ртути? (2)

23. Как зависят скорости продольной, поперечной и поверхностной волн от частоты? (2)

24. Какие типы волн имеют дисперсию скорости? (2)

К 2.2

25. Перечислите акустические свойства тел. (1)

26. Какие факторы вызывают ослабление волны при распространении? (1)

27. Скорость продольной волны в меди 4,72 мм/с. Каково приблизительно значение скорости поперечной волны? (1)

28. Модуль сдвига и плотность среды увеличились на 10%. Как изменится скорость поперечной волны? (2)

29. При контроле очень мелкозернистой стали частоту увеличили с 0,5 до 1 МГц. Как изменится коэффициент затухания? (2)

К 2.3

30. Известно, что поперечные волны, идущие через земной шар, полностью отражаются от сферы вблизи центра Земли. Какое заключение о строении Земли из этого следует? (1)

31. Продольная волна падает на границу оргстекло-сталь. Угол падения изменяется от первого до второго критического. Как ведут себя преломленные волны в стали? (1)

32. Поперечная волна распространяется в стальном изделии и падает на его свободную границу под углом  $40^\circ$ . Какого типа будут отраженные волны? Оцените коэффициент отражения по модулю. (2).

33. Продольная волна распространяется в стальном изделии и падает на его свободную границу под углом  $5^\circ$ . Какого типа будут отраженные волны. Оцените углы отражения. (2)

34. Преобразователем с призмой из пластмассы (скорость продольных волн  $2 \text{ мм/с}$ ) контролируют изделие со скоростями продольных и поперечных волн  $8$  и  $4 \text{ мм/с}$ . Угол призмы  $23^\circ$  ( $\sin 23^\circ = 0,4$ ). Какие типы волн возбуждаются в изделии? (2)

35. Продольная волна падает на границу стали с воздухом, машинным маслом и алюминием. В каком случае доля прошедшей энергии будет максимальна? (2)

К 2.4

36. Почему при изменении частоты в 2-3 раза эхосигнал от наклонной к оси пучка трещины несколько раз меняет свою амплитуду от минимума до максимума (осциллирует)? (2)

37. Упругая волна распространяется под углом  $45^\circ$  к поверхности в среде, скорость звука в которой уменьшается с глубиной. Как изменяется направление волны? (2)

К 2.5

38. Какой из основных конструктивных элементов наклонного и РС преобразователей отсутствует в прямом преобразователе? (1)

39. Рассчитайте, какой толщины должен быть пьезопластина из материала со скоростью звука  $3 \text{ мм/с}$  с рабочей частотой  $10 \text{ МГц}$ . (1)

40. Какая из ниже перечисленных толщин пьезопластины соответствует наиболее высокой частоте:  $0,1$ ;  $0,5$ ;  $1 \text{ мм}$ ? (1)

41. Что случится с пьезопластиной, если она работает при высокой температуре - выше точки Кюри пьезоматериала? (2)

42. Пьезопластина на высокую частоту очень тонкая и хрупкая. Как повысить ее прочность? (2)

43. Какие достоинства и недостатки у ЭМА преобразователя по сравнению с пьезопреобразователем? (2)

К 2.6

44. Радиус прямого преобразователя увеличился в два раза. Как изменятся протяженность ближней зоны преобразователя и направленность излучения? (1)

45. Частота УЗ увеличилась в два раза. Как изменятся протяженность ближней зоны преобразователя и направленность излучения? (1)

46. Рассчитайте длину ближней зоны преобразователя радиусом  $a = 6$  мм и частотой 2,5 МГц в среде со скоростью звука 6 мм/с. (2)

47. Радиус и толщина пьезопластины увеличились в два раза. Как изменятся протяженность ближней зоны преобразователя и направленность излучения? (2)

48. Два прямых преобразователя одного и того же диаметра излучают один - в сталь (скорость звука  $c = 6$  мм/с), другой - в воду ( $c' = 1,5$  мм/с). При этом протяженность ближних зон одинакова. Как соотносятся частоты преобразователей  $f$  и  $f'$ ? (2)

К 2.7

49. Какой отражатель даст большую амплитуду эхосигнала диск или сфера одинакового диаметра расположенные на одной глубине? (2)

50. А как эти же отражатели повлияют на амплитуду донного сигнала при контроле прямым преобразователем, если диск ориентирован перпендикулярно направлению ультразвука? (2)

51. Какие факторы влияют на амплитуду эхосигнала от несплошности? (1)

52. Известно, что обнаруженные дефекты подобны дискам разного размера и ориентации. Эхосигнал от них увеличился. Чем это может быть вызвано? (1)

53. Какой эхосигнал будет больше: донный от листа толщиной 100 мм или донный от торца стержня такой же длины? (1)

54. Почему амплитуда эхосигналов от диска и цилиндра больше, чем от сферы, если все отражатели одинакового диаметра и расположены на одинаковой глубине, а ультразвук подает на них перпендикулярно? А как соотносятся эхосигналы от диска и цилиндра? (2)

55. Можно ли снимать диаграмму направленности излучения-приема преобразователя, используя в качестве отражателя сферу, диск или цилиндр? Какие должны быть диаметры отражателей? (2)

56. Преобразователь перемещают над цилиндрическим отражателем, расположенным в дальней зоне преобразователя, и измеряют амплитуду эхосигнала. Как изменится результат, если частота увеличится в два раза, а радиус пьезопластины в два раза уменьшится? (2)

57. Преобразователем с углом ввода  $45^\circ$  измеряют глубину залегания двух дефектов: округлого (сферы) и плоского (диска), плоскость которого ориентирована под углом  $60^\circ$  к поверхности ввода. Как соотносятся измеренные значения  $H$  и  $H'$  с истиной глубиной? (2)

К 2.8

58. По каким признакам отличают структурные помехи от других видов помех? (1)

59. Каковы признаки помех преобразователя? (1)

60. Какие виды помех ограничивают чувствительность дефектоскопа при контроле любых изделий? (2)

61. Как отличить ложные сигналы от полезных? Как уменьшить влияние ложных сигналов? (2)

62. Как выявить крупные дефекты в чугунной плите, если структурные помехи выше донного сигнала? (2)

К 2.9

63. В стали происходит превращение гамма-железа а мартенсит. Будет ли сопровождаться мартенситное превращение появлением сигналов АЭ? (2)

64. На рис. 2.22 показаны первичные сигналы АЭ и импульсы после усилителя прибора. Почему происходит изменение формы импульсов? (2)

К 3.1

65. Может ли быть использован эхо-дефектоскоп в качестве толщиномера? А наоборот толщиномер в качестве дефектоскопа? (2)

66. К какому типу приборов относится структуроскоп? (2)

К 3.2

67. Какие измерительные узлы имеет стандартный эхо-дефектоскоп? (1)

68. Чем отличается подключение совмещенного и отдельно совмещенного преобразователя к эхо-дефектоскопу? (1)

69. Для чего предназначены генератор зондирующих импульсов, генератор синхроимпульсов (синхронизатор), генератор развертки, генератор строб-импульсов? (1)

70. В чем преимущества и недостатки дефектоскопа с логарифмическим усилителем? (2)

71. Может ли иметь регулировка чувствительности для ВРЧ больше, чем общая регулировка чувствительности? (2)

72. В чем преимущество компенсированной отсечки шумов перед не компенсированной отсечкой? (2)

73. Какие имеются регуляторы чувствительности в стандартном эхо-дефектоскопе? (2)

К 3.3

74. Как отрегулировать настройки развертки дефектоскопа и строб-импульса АСД, если нужно контролировать слой толщиной 50 мм на глубине 40 мм прямым преобразователем? (1)

75. В дефектоскопе с автоматическим измерением координат отражателя и амплитуд эхосигналов в строб-импульс попало сразу несколько эхосигналов. Для какого из них блок цифрового отсчета укажет амплитуду и координаты отражателей? (1)

76. В изделии имеется несколько дефектов, залегающих на разной глубине. Как они будут выглядеть на стандартной С-развертке? (2)

77. В чем отличие в настройке АСД при контроле эхо- и зеркально-теневым методами? (2)

## К 3.4

78. Каким преобразователем возбуждают рэлеевскую волну? А продольную волну наклонную к поверхности? (1)

79. Назовите три разновидности РС преобразователей (1)

80. Что такое точка выхода преобразователя? К какому преобразователю относится это понятие? (1)

81. Что такое стрела преобразователя? К какому преобразователю относится это понятие? (2)

82. Назовите основные элементы прямого и наклонного преобразователей. (2)

83. Можно ли допускать возникновение многократных отражений в призмах РС преобразователя? (2)

## К 3.5

84. Укажите функции регулирующих ручек прибора, с которым Вам предстоит работать. (1)

85. Почему сначала нужно регулировать развертку, а потом чувствительность дефектоскопа? (2)

## К 3.6

86. Проверка какого измерительного узла импульсного дефектоскопа не предусмотрена ГОСТ 14782 с помощью комплекта СО? (2)

## К 3.7

87. Какие ручки управления имеет прибор, с которым предстоит работать аттестуемому? Каковы их функции? (1)

88. В чем различие в подготовке импульсного дефектоскопа для контроля теньвым и зеркально-теньвым методами? (2)

## К 3.9

89. Импульсный толщиномер настроен на скорость звука более высокую, чем в изделии. Какова будет ошибка в измерении толщины? (1)

90. Почему толщиномер с использованием многократных отражений импульса между поверхностями ввода и донной нельзя применять при контроле изделий с корродированными поверхностями? (2)

91. Почему падает точность измерения толщины (в процентах) импульсным толщиномером с уменьшением этой толщины? (2)

92. Почему иммерсионный импульсный толщиномер точнее контактного? (2)

## К 3.10

93. Измерение структуры труб из аустенитной стали (скорость звука  $c = 5,6$  мм/с) выполняют импульсным дефектоскопом по измерению амплитуды первого донного сигнала. Какие меры следует принять для стабилизации акустического контакта? Можно ли использовать частоту 14 МГц, если средняя величина зерна изменяется в пределах 40 ... 80 мкм? (2)

94. Какие из перечисленных ниже физико-механических величин можно контролировать по изменению скорости продольных волн: прочность,

величину зерна, модуль нормальной упругости, модуль сдвига, внутренние напряжения. (2)

95. Можно ли с помощью ультразвукового твердомера контролировать вал с обработкой поверхности  $R_z = 40$  мкм? А шлифованную плиту? (2)

К 4.1

96. В чем различие между основными параметрами метода и основными параметрами аппаратуры для контроля? (1)

97. В чем различие между основными параметрами аппаратуры для контроля и ее техническими характеристиками? (1)

98. Диаграмма направленности излучателя является основным параметром метода или аппаратуры? (2)

99. Почему угол призмы относят к основным параметрам аппаратуры, а угол ввода - к основными параметрами метода? (2)

100. В чем основная трудность изготовления преобразователя на очень высокие (15 МГц и более) частоты? (2)

К 4.2

101. Объясните, что означает: «Пьезопластина колеблется на частоте 2,5 МГц»? (1)

102. На каких частотах чаще всего контролируют изделия из перлитной стали? (1)

103. Почему частота колебаний прямого преобразователя зависит от качества акустического контакта? (2)

104. Прямой и наклонный преобразователи излучают на одинаковой частоте. В каком случае длина волны больше? (2)

К 4.3

105. Как Вы назовете чувствительность, определенную в виде числа дБ относительно образца СО-2? (1)

106. В чем разница между условной чувствительностью и уровнем фиксации? (1)

107. Укажите, какие из введенных понятий чувствительности характеризуют параметры аппаратуры, а какие - метода контроля. (2)

108. Означает ли понятие «предельная» по отношению к чувствительности, что дефектоскоп не способен выявлять дефекты меньшего размера? (2)

109. Опишите процедуру совмещения шкал аттенюатора и АРД диаграммы с помощью СО-3 для наклонного преобразователя. (2)

110. В чем недостаток настройки чувствительности по СО-3 по сравнению с настройкой по СО-2? (2)

К 4.4

111. Объясните, в чем различие между углом ввода и углом падения в призме. (1)

112. Из какого материала изготавливают СО-2, СО-3, СО-2А и почему? (1)

113. Какие из перечисленных ниже параметров влияют на угол ввода: длительность импульса, частота, скорость звука в изделии, затухание в нем, размер пьезопластины, амплитуда зондирующего импульса? (2)

114. Как соотносятся угол ввода и угол рассчитанный по закону Снеллиуса? (2)

115. Может ли быть угол ввода больше угла наклона акустической оси? (2)

К 4.5

116. Диаграмма направленности какого преобразователя будет наиболее широкой:  $af=10$ ,  $af=15$ ,  $af=25$  мм·МГц ( $a$  - радиус пьезопластины,  $f$  - частота)? (1)

117. Угол ввода наклонного преобразователя увеличивается. Как будет изменяться диаграмма направленности преобразователя в основной и дополнительной плоскостях? (1)

118. Какого типа отражатели используют при экспериментальном измерении угла ввода и диаграммы направленности преобразователя? (2)

119. Как компенсируют изменение расстояния от преобразователя до отражателя при экспериментальном снятии диаграммы направленности преобразователя по боковому цилиндрическому отверстию? (2)

К 4.6

120. В чем разница между мертвой зоной и ближней зоной с точки зрения выявления дефектов? Какая из них больше? (1)

121. Какие параметры дефектоскопа влияют на мертвую зону? (1)

122. Почему мертвая зона уменьшается с увеличением угла ввода преобразователя? (2)

123. По каким отражателям проверяют мертвую зону? (2)

К 4.7

124. Длительность каких импульсов определяет лучевую разрешающую способность и мертвую зону? (1)

125. Какое волновое явление способствует ухудшению как лучевой так и фронтальной разрешающей способности? (2)

126. Можно ли, заменив прямой преобразователь на наклонный, улучшить разрешающую способность? (2)

К 4.8

127. Глубиномер настроен и им выполняют измерения координат. Войдут ли погрешности, допущенные при настройке глубиномера, в общую погрешность как случайные или как систематические составляющие? (1)

128. Почему случайные погрешности измерения координат отражателей возрастают с увеличением угла ввода наклонного преобразователя? (1)

129. Укажите наиболее удобный способ проверки правильности измерения времени глубиномером. (2)

130. Глубиномером измерена высота СО-2, равная  $h = 59$  мм. Какому времени пробега импульса это соответствует (скорость звука 5,9 мм/с)? (2)

## К 4.9

131. Дайте определение шага и скорости сканирования (1)

132. Прямым преобразователем с пьезопластиной диаметром 20 мм контролируют плиту толщиной 100 мм. Какой должен быть шаг сканирования? (2)

133. Преобразователем с углом ввода  $45^\circ$ , размером пьезопластины  $2ax2a$ , частотой  $f$ , контролируют сварной шов на глубине  $H$ , перемещая преобразователь вдоль шва (рис. 4.10), превышение поискового уровня над уровнем фиксации  $AP = 6$  дБ. Какой величиной определяется шаг сканирования, т. е. насколько можно отодвинуть преобразователь от сварного шва, чтобы проконтролировать более глубокий слой? (2)

134. Чем ограничивается скорость сканирования при ручном контроле? А при автоматическом? (2)

## К 4.10

135. Какие неблагоприятные последствия для результатов контроля эхо- и зеркально-теневым методами имеет нестабильность акустического контакта? (1)

136. Какие причины вызывают нестабильность акустического контакта? (1)

137. Какие способы акустического контакта из рассмотренных на рис. 1.8 отличаются наибольшей стабильностью? (2)

138. Какие требования предъявляют к протектору преобразователя для контроля изделий с неровной поверхностью? (2)

139. Как экспериментально проверить постоянство акустического контакта для контролируемого изделия и образца? (2)

## К 4.11

140. Минимальный условный размер фиксируемого дефекта  $L = 10$  мм, число посылок импульсов в секунду  $F = 300$ , для надежной фиксации дефекта необходимо поступление трех ( $N = 3$ ) импульсов. Оцените максимально допустимую скорость автоматического сканирования  $v$ .

## К 5.1

141. В чем разница между измерительным и индикаторным прибором? (1)

142. Почему необходима проверка дефектоскопа и толщиномера перед началом контроля? (2)

## К 5.2.1

143. Какие параметры дефектоскопа проверяют перед началом контроля прежде всего? (1)

144. Какие измерительные узлы имеются в импульсном дефектоскопе? (2)

145. Сформулируйте условие достижения первого интерференционного минимума эхосигнала при проверке частоты по СО-4 и с помощью жидкостного интерферометра. (2)



146. Почему при оценке лучевой разрешающей способности в стали путь в СО-1 умножается на отношение скоростей с стали и оргстекле? (2)

К 5.2.2

147. Почему нужно настраивать толщиномер последовательно несколько раз по образцам малой и большой толщины? (1)

148. Как влияет непараллельность поверхностей ввода и донной изде-  
лия на возможность и точность измерения толщины? (2)

К 5.2.3

149. Какова периодичность проверки работоспособности прибора? (1)

150. Какие основные проверочные операции должны быть преду-  
смотрены для измерителя скорости ультразвука? (2)

К 5.3

151. Допустимы ли в НТД на ультразвуковой контроль формулировки типа «Недопустимы трещины, непровары, цепочки пор»? (2)

К 6.1.1

152. Как настроить аттенюатор на измерение нормализованных деци-  
бел по СО-3 при контроле прямым преобразователем? (1)

153. Как настроить аттенюатор на измерение нормализованных деци-  
бел по СО-2 при контроле наклонным преобразователем? (1)

154. Амплитуда первого эхосигнала 5 ндБ, а второго 11 ндБ. Какой  
сигнал больше и во сколько раз? (1)

155. Какие параметры дефекта связывает АРД диаграмма? (1)

156. Как перевести децибелы в относительные величины? (2)

157. Рассчитать по АРД диаграмме (рис. 4.3) эквивалентный диаметр  
дефекта с  $A/A_0 = 54$  дБ, на глубине 200 мм. Параметры преобразователя -  
как на размерной АРД диаграмме. Коэффициент затухания 0,015 непер/см.  
(2)

158. Как будут соотноситься эквивалентные площади дефектов с их  
реальной площадью в случаях, если один дефект имеет зеркальную, а дру-  
гой – диффузно отражающую (шероховатую) поверхность? (2)

К 6.1.2

159. По каким формулам рассчитывают координаты дефекта  $h$  и  $l$   
(рис. 6.2,а) относительно точки ввода, если известны расстояние от точки  
ввода до дефекта  $r$  и угол ввода  $\alpha$ ? (1)

160. По каким формулам рассчитывают координаты дефекта  $h$  и  $l$   
(рис. 6.2,б) относительно точки ввода, если дефект выявлен однажды от-  
раженным лучом в изделии толщиной  $H$  и известны измеренные по шка-  
лам глубиномера значения  $h'$  и  $l'$ ? (1)

161. Как уменьшить систематические погрешности измерения  
координат? (2)

162. Как следует измерять координаты, если от дефекта, находящегося  
в дальней зоне, наблюдается несколько максимумов эхосигналов? (2)

К 6.1.3

163. Чем принципиально отличаются способы измерения эквивалентной площади и условной протяженности дефекта? (1)

164. Как определяются расстояния между компактными и протяженными дефектами? (1)

165. Как связаны условные протяженности дефектов с истинной протяженностью для протяженных плоских дефектов? (2)

166. Как связаны условные протяженности дефектов, измеренные относительным способом «6 дБ», с диаметрами округлых дефектов? (2)

167. Как точнее измерить истинную высоту дефектов при контроле наклонным преобразователем? (2)

К 6.1.4

168. Будет ли дискообразный дефект диаметром 10 мм компактным или протяженным? (1)

169. Чем отличается оценка компактности или протяженности дефекта при контроле прямым и наклонным преобразователями? (1)

170. Будет ли округлый дефект диаметром 5 мм квалифицироваться как компактный или протяженный? А если диаметр дефекта 10 мм? (2)

171. Диаметр пьезопластины преобразователя увеличился в два раза, а частота уменьшилась в два раза. Остальные параметры контроля не изменились. Изменится ли условная протяженность компактного дефекта, расположенного в дальней зоне? А протяженного? (2)

К 6.1.5

172. Как измеряют коэффициент формы дефекта? Как по этой величине определить форму дефекта? (2)

173. Можно ли определить форму дефекта равного или меньшего длины волны? (2)

К 6.2

174. В каких пределах может изменяться коэффициент выявляемости зеркально-теневого метода? (1)

175. Почему зеркально-теневого метод реализуют при контроле прямым преобразователем по совмещенной схеме (одним преобразователем), а при контроле наклонным преобразователем - по раздельной схеме (двумя преобразователями)? (2)

176. Каков механизм выявления вертикальных дефектов при контроле прямым преобразователем зеркально-теневого методом, как показано на рис. 6.11, а и б? Каким вариантам зеркально-теневого метода, из показанных на рис. 6.10 эти способы соответствуют?

7.1

177. Какими волнами лучше выявлять дефекты, параллельные плоской поверхности ввода? (1)

178. Лопатка турбины недоступна осмотру. Виден лишь ее конец длиной 20 мм. Как проверить кромку лопатки на поверхностные дефекты? (1)

179. Назовите диапазон частот обычно применяемых для УЗ дефектоскопии мелкозернистых металлов. (1)

180. Почему поперечные волны, как правило, лучше выявляют мелкие дефекты, чем продольные при неизменной частоте? (2)

181. Почему для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно оси стержня (рис. 7.3, *e*), предусмотрен контроль наклонным преобразователем по боковой поверхности, а не прямым преобразователем с торцевой поверхности? (2)

182. Какими волнами лучше выявлять трещины, перпендикулярные внутренней поверхности трубы (рис. 7.6). (2)

183. Обоснуйте, почему способ контроля сварных соединений на продольные дефекты, показанный на рис. 7.7, *a*, является оптимальным. (2)

184. Вали переменного сечения обычно контролируют прямыми преобразователями *A* и *A'* (рис. 7.4) по цилиндрической поверхности. Однако опасны трещины вблизи галтельного перехода. Предложите схему дополнительного контроля. (2)

185. Приведите хотя бы три примера ограничения контролепригодности сварных соединений. (2)

К 7.2

186. Сравните воду и машинное масло с точки зрения общих требований к контактным жидкостям. (1)

187. Какую контактную жидкость применяют при контроле изделий по вертикальным поверхностям? (2)

188. Какие из рассмотренных способов контроля качества акустического контакта пригодны при дефектоскопии изделий с непараллельными поверхностями? (2)

К 7.3

189. Перечислите принадлежности и приспособления, необходимые для УЗ контроля. (1)

190. Какая шероховатость поверхности ввода оптимальна для контроля контактным способом? (1)

191. Перечислите все действия, необходимые при подготовке к ручному контролю. (2)

192. Какой целесообразно изготовить образец с искусственными дефектами при контроле отслоений от поверхности основного металла антикоррозионной наплавки? (2)

193. Почему изделия на рис. 7.3 контролируют в разных направлениях? (2)

К 7.4

194. Почему при контроле сварных соединений продольно-поперечным сканированием шаг сканирования можно увеличивать по мере отодвигания преобразователя от сварного шва? (1)

195. Какими преобразователями лучше контролировать толстые изделия с высоким уровнем структурных помех? (2)

196. Перечислите способы отстройки от ложного сигнала, связанного с отражением от провисания сварного шва? (2)

К 7.5

197. В каких случаях целесообразно применять одноуровневую систему оценки качества? (2)

198. Какой из названных в книге измеряемых параметров дефектов наиболее важен в отношении влияния на прочность сварного соединения? (2)

К 7.6

199. Почему по результатам контроля необходимо заполнять два документа: запись в журнале и заключение? (1)

200. Имеет ли право специалист первого уровня подписывать документы по результатам контроля? (1)

201. Почему составлению дефектограммы и заключения по УЗ контролю уделяется большое внимание? (2)

202. Что изображается на дефектограмме? (2)

К 7.7

203. Почему предпочтительнее оперативную проверку толщиномером выполнять не по участку контролируемого изделия, а по образцу? (1)

204. Почему необходимо настраивать толщиномер на образцах малой и большой толщины? (1)

205. Перечислите причины возникновения дополнительных погрешностей при измерении толщины. (2)

206. Что надлежит делать, если обнаружено, что толщиномер был неправильно настроен?

К 7.8

207. Как устанавливается связь между физико-механическими свойствами и акустическими свойствами материала? (1)

208. Средний размер зерна оценивают не только по ослаблению амплитуд донных сигналов, но также по уровню структурных помех на экране дефектоскопа. Как качественно изменяется уровень структурных помех с ростом величины зерна? (2)

К 7.9

209. Перечислите факторы, снижающие надежность обнаружения дефектов. (1)

210. Назовите третий фактор, влияющий на надежность обнаружения дефектов, кроме влияния надежности работы дефектоскопа и дефектоскописта. (2)

К 7.10

211. Можно ли использовать дефектоскоп или толщиномер с автономным источником питания при контроле внутри сосуда? (1)

212. Как следует предохранить руки дефектоскописта от прямой контактной передачи ультразвука? (2)

К 8

213. Каким методом можно подтвердить результаты ультразвукового контроля при выявлении внутренних дефектов сварного соединения? (1)

214. Какие методы лучше, чем ультразвуковой контроль, выявляют поверхностные дефекты?

215. Какое наиболее перспективное направление развития ультразвуковой дефектоскопии?

### ОТВЕТЫ НА ПРОВЕРОЧНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Источник акустических сигналов в активных методах контроля - излучатель сигналов, а в пассивных методах - процессы, происходящие в контролируемом объекте.

2. При контроле методами отражения излучатель и приемник располагают на одной поверхности изделия, а методами прохождения - как правило, на разных поверхностях.

3. При контроле всеми перечисленными методами используются электромагнитные поля разных частотных диапазонов. При контроле акустическими методами - упругие поля.

4. Основной признак, по которому выполнена классификация внутри активных и пассивных методов - по первичному информационному параметру.

5. Контролировать эхометодом, если регистрировать только наличие эхосигнала и не измерять время его пробега в изделии, нельзя, т. к. невозможно отличить эхо-сигналы от дефектов и донный сигнал.

6. Амплитуда любого эхо-сигнала всегда меньше зондирующего импульса. Амплитуда эхо-сигнала от дефекта может быть больше донного сигнала, например, эхо-сигнал от крупного дефекта может быть больше донного сигнала для изделия большой толщины.

7. Поддерживая постоянным значение  $l_A + l_D$ , получают зеркальное отражение от вертикальных дефектов, расположенных в некоторой заданной плоскости.

8. При контроле дельта-методом при изменении функций излучателя и приемника изображение на экране дефектоскопа не изменится. Здесь действует принцип взаимности, согласно которому излучатель и приемник взаимозаменяемы.

9. При контроле теньевым методом можно двигать как изделие, так и преобразователи, но в последнем случае преобразователи должны быть соединены скобой или другим приспособлением для обеспечения их соосности.

10. При контроле временным теневым методом для обеспечения выявления возможно более мелких дефектов размеры преобразователя должны быть меньше размеров выявляемых дефектов (рис. От.1,*а*), иначе найдутся лучи, проходящие от излучателя к приемнику минуя дефект (рис. От.1,*б*).

11. Протяженный наклонный к поверхности дефект со стороны одной поверхности лучше выявлять зеркально-теневым методом. Эхотметод не годится, так как эхосигнал отразится зеркально и не будет приниматься тем же преобразователем. Для его приема преобразователь нужно расположить в неизвестной точке поверхности. Теневой метод не применим, т. к. доступна только одна поверхность.

12. Если преобразователь импедансного дефектоскопа имеет эластичный наконечник, то контроль станет невозможным, т. к. на колебания преобразователя не будет влиять наличие дефекта под поверхностью изделия и твердость поверхности. Применяют наконечники из очень твердого материала.

13. Резонансные частоты при иммерсионным способе контроля практически не отличаются от собственных, т. к. волновое сопротивление (см. п. 2.2) окружающей среды (воды) значительно меньше, чем изделия (стали).

14. Чтобы отстроится от помех, связанных с трением в зажимах разрывной машины, нужно фиксировать только сигналы, приходящие к преобразователям одновременно, т. к. сигналы акустической эмиссии возникают в центре образца. Мешающие сигналы от трения образца в зажимах машины сначала приходят к ближайшему преобразователю и, только пройдя по образцу - к удаленному преобразователю.

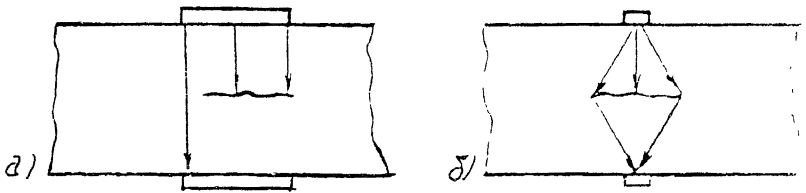
15. В крайнем случае, применять слюну как контактную жидкость можно, хотя мешают пузырьки воздуха в слюне. Не забудьте потом вытереть слюну, чтобы не было коррозии!

16. К контактному способу контроля ближе щелевой способ акустического контакта (рис. 1.7,*ж*). В способе рис. 1.7,*е* преобразователь излучает в жидкость. Это вариант иммерсионного способа.

17. Амплитуда уменьшилась соответственно в 2; 3,3; 10, 20 и 100 раз. Эти соотношения децибел и относительных величин полезно запомнить.

18. Длина волны в стали  $\lambda = c/f = 5,9/2,5 = 2,36$  мм. В воде -  $\lambda = 0,6$  мм.

19. Частица в продольной волне перемещается по прямой линии около положения равновесия. Зависимость амплитуды смещения от времени - синусоидальная.



От. 1. К выбору размеров преобразователей при контроле теньвым методом

20. В жидкости поперечная волна распространяется за счет вязкости и быстро затухает, однако через тонкий слой вязкой жидкости волна пройти может.

21. Амплитуда сферической волны ослабляется наиболее быстро, потому что расхождение лучей происходит в двух плоскостях, например горизонтальной и вертикальной.

22. Поперечная волна распространяться в ртути не может, т. к. ртуть жидкость.

23. Скорости распространения продольной, поперечной и поверхностной волн от частоты не зависят.

24. Дисперсию скорости имеют упругие волны в ограниченных средах: пластинах и стержнях.

25. Акустические свойства сред: скорость, коэффициент затухания, волновое сопротивление. В твердых телах эти свойства различны для продольных и поперечных волн.

26. Ослабление волны при распространении вызывают дифракционное расхождение и затухание.

27. Приблизительное значение скорости поперечной волны в меди  $c_t = c_l/2 \approx 4,72/2 = 2,36$  мм/мкс. Точное значение - 2,40 мм/мкс.

28. Скорость поперечной волны не изменится, так как  $c_t = \sqrt{1,1G/1,1\rho} = \sqrt{G/\rho}$ , где  $G$  - модуль упругости,  $\rho$  - плотность среды

29. Коэффициент затухания увеличится в 2 раза, т. к. при условиях задачи (мелкозернистость) главный фактор - поглощение, пропорциональное частоте.

30. Из этого следует, что в центре Земли имеется жидкая сфера.

31. В интервале от первого до второго критического угла в стали будет существовать одна поперечная волна, угол преломления которой увеличивается от 33 до 90°.

32. Поскольку угол падения больше третьего критического (для стали 33°), отразится только одна поперечная волна. Коэффициент отражения по модулю для нее будет равен 1.

33. При отражении продольной волны под небольшим углом от свободной границы возникнут продольная и поперечная волны, их углы отражения  $\gamma = 5^\circ$  и  $\gamma \approx 10^\circ$ . Синус малого угла приблизительно равен самому



углу (в радианах), поэтому для малых углов отраженной поперечная волны угол отражения удваивается.

34. При условиях задачи в изделии возбуждается поперечная волна. потому что синус первого критического угла  $\sin \beta' = c_t/c = 0,25$ , синус второго критического угла  $\sin \beta' = c_t/c = 0,5$ . Значение  $\sin 23^\circ = 0,24$  больше, чем для первого критического, но меньше, чем для второго критического угла (рис. 2.1,з), а это - условие возникновения одной поперечной волны.

35. Прошедшая энергия будет максимальна для границы сталь-алюминий, потому что волновые сопротивления алюминия и стали наиболее близки из всех указанных пар сред.

36. Эхо-сигнал, соответствующий геометрическому отражению, не падает на преобразователь, т. к. трещина наклонная. На преобразователь приходят волны дифракции от краев трещины. При изменении частоты фазы этих сигналов либо совпадают, либо не совпадают. В зависимости от этого будет наблюдаться либо максимум, либо минимум суммарного сигнала. Возникает осцилляция амплитуды при изменении частоты.

37. Угол наклона упругой волны постепенно уменьшается, т. к. изменение скорости обратно показанному на рис. 2.5.

38. Этот конструктивный элемент - призма. Она обязательно есть в наклонном преобразователе. В РС преобразователе обычно две призмы. у излучателя и приемника.

39. Толщина пьезопластины  $h$  должна быть  $h = c/2f = 3/(2 \cdot 10) = 0,15$  мм

40. Наиболее высокой частоте соответствует наиболее тонкая пьезопластина 0,1 мм.

41. Материал под действием нагревания теряет пьезосвойства (располяризуется) и преобразователь перестанет работать.

42. Чтобы повысить ее прочность пьезопластины следует приклеить ее к демпферу, тогда механическая прочность конструкции увеличится. Если преобразователь рассчитан на работу без демпфера, то следует применить пьезоматериал с максимально большой скоростью ультразвука. Тогда толщина пьезопластины на резонансной частоте возрастет.

43. Достоинства ЭМА преобразователей - бесконтактность и возможность возбуждать волны любого типа. Недостаток - низкая чувствительность.

44. Протяженность ближней зоны пропорциональна квадрату радиуса, поэтому она увеличивается в четыре раза. Направленность излучения улучшается: угол расхождения лучей уменьшится в два раза.

45. Протяженность ближней зоны увеличивается в два раза, а направленность излучения улучшается: угол расхождения лучей уменьшится в два раза.

46. Протяженность ближней зоны равна

$$N = a^2/\lambda = a^2 f/c = 6^2 \cdot 2,5/6 = 15 \text{ мм.}$$

47. Собственная частота  $f$  обратно пропорциональна толщине  $h$ , поэтому частота уменьшилась в 2 раза. Длина ближней зоны равна  $N = a^2/\lambda = a^2 f/c$ , угол раскрытия диаграммы направленности пропорционален  $af$ , поэтому длина ближней зоны увеличится 8 раз, а угол раскрытия диаграммы направленности не изменится.

48. Составим уравнение и подставим в него условия задачи. Равенство ближних зон  $a^2 f/c = a'^2 f'/c'$ ; подставляем значения скоростей  $f/6 = f'/1,5$ ; Отсюда соотношение частот  $f = 0,25 f'$ .

49. Большая амплитуда эхо-сигнала будет получена от диска, если он ориентирован перпендикулярно направлению ультразвука. Если диск ориентирован не перпендикулярно направлению ультразвука, то, как правило, эхосигнал от сферы будет больше.

50. Ослабление амплитуды донного сигнала под влиянием обоих отражателей будет приблизительно одинаковым.

51. На амплитуду эхо-сигнала влияют величина, форма, ориентация несплошности, а также среда, которой несплошность заполнена.

52. Об отражателе можно сказать, что либо он увеличился, либо ориентация его изменилась на более благоприятную для отражения ультразвука.

53. Больше будет донный сигнал от торца стержня, так как его стенки будут препятствовать расхождению УЗ лучей.

54. Сфера - ненаправленный отражатель, диск при ориентации перпендикулярно акустической оси преобразователя имеет диаграмму направленности, концентрирующую энергию отражения в сторону излучателя-приемника, поэтому эхосигнал от диска больше, чем от сферы. Цилиндр в плоскости, перпендикулярной его оси - ненаправленный отражатель, а в плоскости, параллельной оси, подобен отражающей плоскости, поэтому

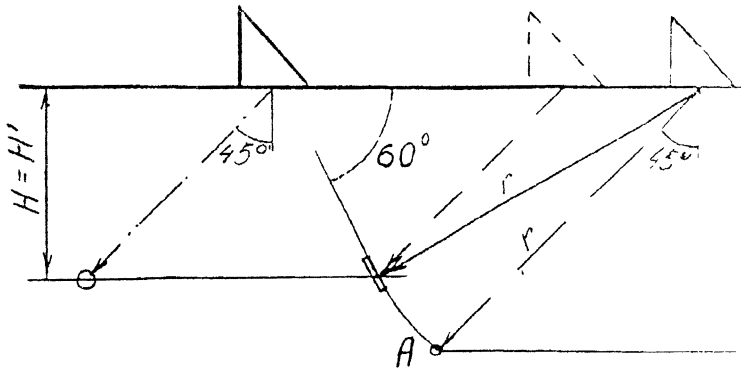
амплитуда эхо-сигнала от него будет больше, чем от сферы. Амплитуда эхосигнала от диска быстрее уменьшается с расстоянием, чем от цилиндра. При небольших расстояниях от преобразователя до отражателя амплитуда от диска может быть больше, чем от диска, а при больших - меньше. Таким образом, правильный ответ: амплитуда эхосигнала от диска больше, чем от сферы; амплитуда эхосигнала от цилиндрического отражателя больше, чем от сферы. Для сравнения эхосигналов от диска и цилиндра приведенных данных недостаточно.

55. Чтобы снимать диаграмму направленности излучения-приема преобразователя можно использовать в качестве отражателя сферу и цилиндр как малого, так и большего диаметров, т. к. они - ненаправленные отражатели. Диск можно использовать, только если его диаметр значительно меньше диаметра преобразователя, т. к. в этом случае его диаграмма направленности значительно шире, чем диаграмма направленности преобразователя.

56. Результат не изменится: фактически снимается диаграмма направленности преобразователя, а она зависит от произведения диаметра преобразователя на частоту, которое не изменилось.

57.  $H'$  будет равно  $H$ , а  $H''$  будет больше этих значений. Округлый дефект (рис. От. 2) одинаково отражает падающие на него лучи независимо от их направления, поэтому максимум эхосигнала достигается, когда на него падает луч, идущий по акустической оси преобразователя (показана штрих пунктирной линией), где излучение максимально. Координаты дефекта будут измеряться правильно, т. е.  $H' = H$ . При выявлении плоскостного дефекта с углом  $60^\circ$  максимум эхо-сигнала будет достигаться не тогда, когда отражатель находится на акустической оси преобразователя, потому что соответствующий луч, отражаясь от такого дефекта, уходит в сторону. Положение преобразователя для этого случая показано штриховой линией. Максимум достигается, когда на отражатель падает боковой луч с меньшей амплитудой, но с углом, близким к  $60^\circ$ . Он зеркально (или почти зеркально) отразится обратно к преобразователю. Дефектоскопист, не зная об этом, измеряет глубиномером расстояние  $r$  преобразователь-отражатель и ведет расчет координат для луча с углом ввода  $45^\circ$ , т. е. он считает, что дефект расположен в точке  $A$ . В результате измеренная глубина залегания  $H''$  будет больше по сравнению с  $H$ .

58. Структурные помехи изображаются на экране в виде большого количества импульсов, беспорядочно изменяющихся по амплитуде и положению на линии развертки при движении преобразователя по поверхности изделия.



От. 2. К определению координат круглого и плоского дефектов

59. При контакте преобразователя с каким-либо объектом (изделием, пальцем дефектоскописта), движения преобразователя по поверхности изделия помехи преобразователя изменяют свою амплитуду, но сохраняют положение на линии развертки.

60. Чувствительность эхо-дефектоскопа при контроле любых изделий ограничивают тепловые электрические шумы его приемника.

61. Чтобы отличить ложные сигналы от полезных изменяют схему контроля таким образом, чтобы уменьшить ложные сигналы. Выделяют участок линии развертки, где они появляются, и фиксируют полезные сигналы только, если они больше ложных.

62. Чтобы выявить крупные дефекты в чугунной плите, если структурные помехи выше донного сигнала, следует применить временной теневой метод контроля.

63. Мартенситное превращение, также как аллотропические превращения в других металлах, будет сопровождаться появлением сигналов АЭ.

64. Изменение формы импульсов АЭ происходят в результате их прохождения через приемный тракт с ограниченной полосой пропускания.

65. Эхо-дефектоскоп может быть использован в качестве толщиномера, однако он как правило будет обладать меньшей точностью измерения и не так удобен в работе. Наоборот, использовать толщиномер в качестве дефектоскопа обычно нельзя, т. к. даваемая им информация очень ограничена.

66. Структуроскоп относится к анализаторам физико-механических характеристик материалов.

67. Измерительные узлы дефектоскопа это глубиномер для измерения координат дефектов и аттенюатор для измерения амплитуд сигналов.

68. Совмещенный преобразователь подключают к выходу и входу дефектоскопа одновременно, раздельно-совмещенный - излучающий элемент - к выходу, а приемный - ко входу дефектоскопа.

69. Генератор зондирующих импульсов предназначен для возбуждения преобразователя; генератор синхроимпульсов - для синхронизации работы узлов дефектоскопа; генератор развертки - для формирования развертки, позволяющей различать эхо-сигналы по времени их прихода; генератор стоб-импульсов - для выделения интервала времени, когда могут придти импульсы, от которых должен сработать АСД.

70. Усилительный тракт с логарифмической амплитудной характеристикой обладает большим динамическим диапазоном. Это позволяет наблюдать изменение амплитуд и измерять амплитуды импульсов прямо по экрану дефектоскопа в широком диапазоне амплитуд. Недостаток - небольшие изменения амплитуд импульсов малозаметны на экране дефектоскопа. Например, если динамический диапазон экрана 60 дБ, то изменение импульса на 6 дБ составит лишь 10% высоты экрана. С этим связано ухудшение лучевой разрешающей способности.

71. Регулировка чувствительности с помощью ВРЧ не может быть больше, чем регулировка коэффициента усиления дефектоскопа.

72. Преимущество компенсированной отсечки - в сохранении правильного соотношения амплитуд полезных сигналов при удалении небольших мешающих сигналов.

73. Регулировку чувствительности можно выполнять с помощью аттенюатора, некалиброванного регулятора усиления, отсечки, ВРЧ и изменением амплитуды зондирующего импульса.

74. Отрегулировать настройки развертки дефектоскопа и строб-импульса АСД нужно следующим образом. Включить развертку на режим работы "от поверхности" на глубину не менее 100 мм. Настроить глубину-номер на скорость звука в изделии. Выделить строб-импульсом на линии развертки интервал от 40 до 90 мм. Установить задержку развертки и ее длительность так, чтобы строб-импульс занимал всю длину развертки.

75. Если в строб-импульс попало сразу несколько эхосигналов, блок цифрового отсчета будет выполнять измерение для первого эхосигнала, превышающего пороговый уровень (в УД 2-12 это уровень срабатывания АСД).

76. Вид в плане не дает информации о глубине залегания дефектов. На С-развертке (без стробирования некоторого слоя по глубине) будут видны очертания в плане всех дефектов, расположенных по всей толщине ОК.

77. Строб-импульс АСД для эхометода должен быть установлен между зондирующим импульсом и донным сигналом, а для зеркально-теневого метода он должен выделять донный сигнал. Порог срабатывания АСД для эхо-метода должен быть гораздо ниже, чем для зеркально-теневого метода.

78. Обе волны возбуждают наклонными преобразователями, но рэлеевскую волну возбуждают преобразователем, с углом наклона немного больше второго критического, а продольную наклонную волну - с углом наклона меньше первого критического.

79. Три разновидности РС преобразователей: прямой, наклонный типа тандем и наклонный типа дуэт.

80. Точка выхода преобразователя это точка пересечения акустической (а точнее - геометрической) оси с рабочей (контактной) поверхностью преобразователя. Это понятие относится к наклонным и прямым преобразователям, но на прямых преобразователях ее обычно не отмечают.

81. Стрела преобразователя - расстояние от точки выхода до передней грани преобразователя. Это понятие относится только к наклонному преобразователю.

82. Основные элементы преобразователей: пьезоэлемент преобразовывает электрические колебания в акустические и обратно; демпфер способствует гашению колебаний пьезоэлемента для получения короткого импульса и повышает механическую прочность пьезопластины; протектор защищает пьезопластину от механических повреждений (в прямом преобразователе) или от воздействия иммерсионной жидкости (в иммерсионном преобразователе), способствует передаче волн в иммерсионную жидкость (в иммерсионном преобразователе) и стабилизации акустического контакта (в прямом преобразователе); призма обеспечивает преломление лучей под требуемым углом ввода.

83. Возникновение многократных отражений в призмах РС преобразователя допускать можно, т. к. ложные отражения в излучателе не попадают на приемник, а в приемнике они обычно гораздо меньше полезных сигналов.

84. Функции ручек регулировки дефектоскопа следует изучить по инструкции к прибору.

85. Регулировка развертки необходима, чтобы установить, какой импульс на экране какому отражателю соответствует. Только после этого можно настраивать чувствительность по этим импульсам.

86. ГОСТом 14782-86 не предусмотрена проверка аттенюатора, хотя в этой книге в пп. 5.2.1 и 6.1.1 даны рекомендации, как выполнить такую проверку с помощью комплекта ГСО.

87. Ручки управления и их функции описаны в инструкции к прибору, с которым предстоит работать аттестуемому.

88. Для контроля теневым методом эхо-дефектоскоп включают по отдельной схеме, а для контроля зеркально-теневым методом с одним преобразователем - по совмещенной схеме.

89. Измеряемые толщины будут завышены. Толщиномер фактически измеряет время распространения ультразвука  $t$ , оно пропорционально отношению измеряемой толщины  $h$  к скорости ультразвука  $c$ :  $t = h/c$ . Увеличилась скорость - увеличится (ошибочно) толщина.

90. Толщиномер с использованием многократных отражений импульса между поверхностями ввода и донной нельзя применять при контроле изделий с корродированными поверхностями, потому что от корродированной поверхности ультразвук отражается незеркально, амплитуда донного сигнала сильно уменьшается, многократные отражения не возникают или импульсы будут нечеткими.

91. Точность измерения толщины (в процентах) при малой толщине изделия падает, потому что превалирующее значение приобретают составляющие погрешности, не зависящие от толщины.

92. Иммерсионный импульсный толщиномер точнее контактного, потому что отсчет времени начинается от импульса, отраженного от поверхности изделия. В результате время пробега импульса в контактной жидкости не входит в измеряемый интервал времени.

93. Для стабилизации акустического контакта следует применить иммерсионный способ. Для оценки пригодности частоты 14 МГц нужно определить, обеспечивает ли соответствующая длина волны  $\lambda$  попадание в оптимальный для измерения величины зерна  $\bar{D}$  диапазон:  $\lambda/\bar{D} = 4 \dots 15$ .

Длина волны  $\lambda = c/f = 5,6/14 = 0,4$  мм. Соотношение  $\lambda/\bar{D}$  при  $\bar{D} = (0,04 \dots 0,08)$  мм равно  $\lambda/D = 0,4/(0,08 \dots 0,4) = 5 \dots 10$ . Отношение  $\lambda/\bar{D}$  в пре-

делах оптимального диапазона. Выход  $\bar{D}$  за пределы установленных допустимых значений сильно скажется на изменении затухания, а следовательно - на изменении донного сигнала. Частоту 14 МГц можно использовать.

94. Из перечисленных величин по скорости продольных волн нельзя контролировать модуль сдвига и величину зерна. Остальные перечисленные величины - можно.

95. Максимальная глубина отпечатка от твердомера - 25 мкм, т. е. меньше неровностей от обработки, поэтому контролировать вал можно. На шлифованной плите будут оставаться недопустимые отпечатки. Либо их нужно удалять, либо контролировать нельзя.



96. Основные параметры аппаратуры зависят только от дефектоскопа и преобразователя, а основные параметры метода - также от свойств ОК.

97. Технические характеристики аппаратуры определяют область ее применения, а основные параметры УЗ аппаратуры - некоторые важные для контроля параметры и конкретную настройку аппаратуры.

98. Диаграмма направленности преобразователя - параметр метода, потому что она кроме частоты и диаметра преобразователя - параметров аппаратуры - зависит также от скорости звука в материале ОК.

99. Угол призмы относят к основным параметрам аппаратуры, так как он зависит только от изготовления призмы преобразователя (части прибора), а угол ввода относят к основными параметрами метода, так как он зависит от свойств материала ОК (прежде всего - от скорости УЗ волн в нем).

100. Основная трудность изготовления преобразователя на высокие частоты - малая толщина и хрупкость пьезопластины; ее трудно изготовить и смонтировать в преобразователь.

101. Фраза «Пьезопластина колеблется на частоте 2,5 МГц» означает, что пластина совершает 2,5 миллионов колебаний в секунду.

102. Изделия из перлитной стали чаще всего контролируют на частотах 2 ... 5 МГц.

103. На частоту колебаний пьезопластины влияют свойства сред, в которые пластина излучает. В прямом преобразователе пластина через тонкие слои излучает в ОК. Свойства (толщина) одного из тонких слоев - контактного слоя - оказывают влияние на частоту.

104. Длина волны будет больше у прямого преобразователя, который излучает продольные волны. Наклонный преобразователь обычно излучает поперечные волны, скорость которых меньше, чем продольных. Если наклонный преобразователь излучает продольные волны, то длина волны будет одинаковой.

105. Чувствительность, определенная относительно любого стандартного образца (в том числе СО-3) - условная чувствительность.

106. Уровень фиксации это заданная предельная чувствительность, которая должна обеспечиваться в любой точке ОК.

107. Параметры аппаратуры характеризует условная чувствительность. Все другие указанные в книге понятия чувствительности характеризуют параметры метода.

108. Понятие «предельная» по отношению к чувствительности не означает, что дефектоскоп не способен выявлять дефекты меньшего размера. Дефекты меньшего размера не будут обнаруживаться только при заданной настройке прибора, но его чувствительность можно увеличить поворотом ручек регуляторов и выявлять дефекты меньшего размера.

109. При контроле наклонным преобразователем ослабление эхосигнала от вогнутой поверхности СО-3 приблизительно равно 2 дБ. Для совмещения со шкалой децибел АРД диаграммы нужно отложить на шкале аттенюатора 2 дБ и некалиброванной ручкой совместить эхосигнал со стандартным уровнем.

110. Настройка по СО-2 точнее, чем по СО-3, т. к. СО-3 отражает в сторону преобразователя все лучи в плоскости падения, а отверстие в СО-2 - только центральные лучи пучка, те же, которыми выявляется дефект.

111. Угол падения в призме обеспечивает наклонный ввод ультразвука, а угол ввода равен или близок к углу преломления в ОК.

112. СО-2 и СО-3 изготовлены из малоуглеродистой стали - материала, наиболее часто контролируемого ультразвуком. СО-2А изготавливают из материала ОК, что позволяет учесть его свойства при настройке аппаратуры.

113. Угол ввода непосредственно зависит от скорости ультразвука в ОК. От затухания в нем ультразвука, размера пьезоэлемента и частоты зависит вариация угла ввода с увеличением глубины залегания отражателя. Длительность импульса и его амплитуда не влияют на угол ввода.

114. Угол ввода близок к углу, рассчитанному по закону Снеллиуса, однако может отличаться от него. Так для углов падения вблизи (немного больше) первого критического, максимум коэффициента прозрачности будет достигаться при несколько больших углах падения. Из-за этого максимальное значение амплитуды прошедшей волны смещается в сторону углов, для которых амплитуда больше в результате угол ввода (и угол наклона акустической оси) достигается при углах несколько больших рассчитанных по закону Снеллиуса. При углах ввода больших упомянутого максимума коэффициента прозрачности, наоборот, угол ввода и угол наклона акустической оси достигаются при углах несколько меньших рассчитанных по закону Снеллиуса. Кроме того на угол ввода оказывает влияние квазиискривление лучей, приводящее к его уменьшению.

115. Угол ввода всегда меньше или равен углу наклона акустической оси, так как имеются факторы, вызывающие его уменьшение, но нет противоположно действующих факторов.

116. Наиболее широкой будет диаграмма направленности преобразователя, для которого  $af$  будет меньше, то есть  $af = 10$ .

117. С увеличением угла ввода ширина диаграммы направленности в основной плоскости будет увеличиваться, так как уменьшается размер мнимого пьезоэлемента. В дополнительной плоскости ширина диаграммы направленности не изменится.

118. При экспериментальном измерении угла ввода и диаграммы направленности используют ненаправленные отражатели, например, боковое цилиндрическое отверстие.

119. Чтобы компенсировать изменение амплитуды эхосигнала под действием дифракционного расхождения лучей при изменении расстояния  $r'$  преобразователь - отражатель нужно ввести множитель  $(r'/r)^{3/2}$  обратный этому изменению, где  $r$  расстояние, при котором амплитуда максимальна. Чтобы компенсировать изменение амплитуды эхосигнала под действием затухания нужно ввести множитель  $e^{\delta(r-r')}$ , где  $\delta$  - коэффициент затухания. Однако обычно применяют образцы, в которых затухание мало. Тогда компенсировать затухание не требуется.

120. Ближняя зона - область быстрого изменения амплитуды эхосигнала от небольшого отражателя в зависимости от его положения относительно преобразователя. При контроле, если дефект находится в ближней зоне, можно допустить ошибку в измерении его координат и эквивалентной площади. Мертвая зона - область вблизи поверхности ввода, где дефекты не выявляются из-за действия зондирующего импульса. Эти зоны между собою не связаны.

121. Протяженность мертвой зоны увеличивается с увеличением длительности зондирующего импульса и помех преобразователя.

122. Протяженность мертвой зоны уменьшается с увеличением угла ввода, потому что протяженность мертвой зоны в направлении акустической оси умножают на косинус угла ввода, чтобы определить расстояние от поверхности ввода, где дефекты не выявляются.

123. Мертвую зону обычно проверяют по боковым цилиндрическим отверстиям, расположенным на разной глубине. Более правильно ее проверять по отражателям на разной глубине, по которым настраивают чувствительность. Например, при контроле поковок рекомендуется ее проверять по отражателям в виде плоскодонных отверстий.

124. Мертвую зону определяет длительность зондирующего импульса, а лучевую разрешающую способность определяет длительность импульса, отраженного от дефекта

125. Ухудшению лучевой и фронтальной разрешающей способностей способствует интерференция импульсов.

126. Улучшить разрешающую способность можно. Во-первых, наклонный преобразователь излучает поперечные волны, длина которых меньше, чем продольных, а во-вторых, можно разрешать дефекты за счет лучевой разрешающей способности, которая выше фронтальной, как показано на рис. 4.7,б.

127. Погрешности, допущенные при настройке глубиномера, войдут во все последующие измерения, так как являются систематическими.

128. С увеличением угла ввода наклонного преобразователя ширина диаграммы направленности в основной плоскости будет увеличиваться, поэтому погрешность, возникающая при поиске максимума эхосигнала от дефекта, возрастет.

129. Наиболее удобный способ проверки правильности измерения времени глубиномером - по многократным отражениям в образце, поскольку в этом случае точно известны интервалы времени между сигналами.

130. Время пробега импульса в прямом и обратном направлениях в СО-2 равно  $t = 2h/c = 2 \cdot 59/5,9 = 20$  мм.

131. Шаг сканирования - расстояние между траекториями перемещения преобразователя, скорость сканирования - скорость перемещения преобразователя по этому пути.

132. Шаг сканирования должен быть не меньше половины диаметра преобразователя, то есть 10 мм.

133. Шаг сканирования  $s$  на большом расстоянии от преобразователя определяется углом раскрытия  $\theta'$  диаграммы направленности на уровне 6 дБ и связанной с ней шириной раскрытия пучка  $\rho$ . Из рис. 4.10 находим

$$s = \Delta H = 2\rho/\operatorname{tg}45^\circ = 2H\operatorname{tg}\theta'/\operatorname{tg}45^\circ.$$

Это определяет допустимую величину смещения преобразователя от сварного шва, чтобы проконтролировать более глубокий слой на достаточно высокой чувствительности.

134. Скорость сканирования  $v$  при ручном контроле ограничивается физиологическими возможностями дефектоскописта; она обычно не превышает 150 мм/с, а часто ограничивается меньшими значениями. При автоматическом стопроцентном контроле скорость сканирования ограничивается условием: каждый элементарный объем ОК должен быть надежно проверен. Выполнение этого условия рассмотрено в вопросе 140.

135. Вследствие нестабильности акустического контакта зеркально-теневым методом отдельные участки изделия будут проверены с завышенной или заниженной чувствительностью, а некоторые - совсем не проверены. Это вызовет перебраковку и недобраковку изделий.

136. Нестабильность акустического контакта вызывается неполным заполнением зазора между преобразователем и поверхностью ввода контактной жидкостью, изменением толщины слоя контактной жидкости (приводит к изменению коэффициента прозрачности границы преобразователя с изделием). Кроме того может возникать клиновидность слоя контактной жидкости, а это вызовет изменение направления излучения преобразователя.

137. Наибольшей стабильностью акустического контакта отличаются бесконтактные способы (рис. 1.8,в), а наибольшей нестабильностью - контактный способ (рис. 1.8,а).

138. Протектор преобразователя для контроля изделий с неровной поверхностью изготавливают из эластичного материала с большим коэффициентом затухания и волновым сопротивлением, близким к контактной жидкости.

139. Экспериментально постоянство акустического контакта с контролируемым объектом и стандартным образцом проверяют по экосигналам от одинаковых отражателей, расположенных на одной и той же глубине в изделии и образце. Чаще всего используют донные сигналы. Современный способ - использование датчика шероховатости и волнистости.

140. Скорость автоматического сканирования равна  $v = L/t$ , где  $L = 10$  мм (таков же обычный размер элементарного объема), а  $t$  - время, необходимое для регистрации дефекта. Оно равно  $N/F$ . Тогда  $v = LF/N = 10 \cdot 300/3 = 1000$  мм/с.

141. Измерительный прибор измеряет какую-либо физическую величину, а индикаторный - сравнивает контролируемый объект с образцовым и дает заключение типа «да - нет», «больше - меньше».

142. Дефектоскопы и толщиномеры перед началом контроля проходят настройку, в них имеются сменные быстроизнашивающиеся детали (преобразователи), поэтому предэксплуатационная проверка необходима.

143. Перед началом контроля, прежде всего проверяют настройку развертки и чувствительности.

144. Импульсный дефектоскоп имеет два измерительных узла: глубиномер и аттенуатор.

145. Первый интерференционный минимума эхосигнала при проверке частоты достигается, когда расстояние между отражателями в направлении луча (пазами в СО-4 или отражателями в жидкости) будет равно  $\lambda/4$ . Тогда разница времен пробега импульсов в прямом и обратном направлениях будет составлять половину периода колебаний, то есть сигналы будут в противофазе.

146. Исходная величина, определяющая лучевую разрешающую способность - интервал времени между приходом двух эхосигналов. Умножение на скорость переводит время в расстояние между отражателями. Чтобы перевести расстояние в одном материале к расстоянию в другом, нужно умножить первое расстояние на отношение скоростей.

147. Обычно в толщиномере регулируются отдельно начало отсчета (определяется временем пробега в протекторе, призмах) и настройка на скорость звука. Первую настраивают по образцам малой, а вторую - большой толщины. Эти регулировки оказывают взаимное влияние, поэтому приходится повторять настройку, используя способ последовательных приближений.

148. В изделиях с непараллельными поверхностями ввода и донной зеркально отраженный сигнал отклоняется в сторону и плохо регистрируется излучающе-приемным преобразователем. Кроме того значение измеряемой толщины «размывается». Обычно импульсный толщиномер измеряет минимальную толщину, что соответствует лучшему обеспечению безопасности эксплуатации изделия.

149. Периодичность проверки работоспособности и точности прибора зависит от степени его надежности и определяется НТД. Обязательна проверка в начале и конце смены.

150. Измеритель скорости ультразвука должен быть проверен на точность измерения скорости или времени пробега импульса, диапазон, в котором изменяется измеряемая скорость, работоспособность при выполнении условий измерений, для которых предназначен прибор (кривизна, шероховатость поверхности и т. д.).

151. Формулировки, подобные приведенной, крайне нежелательны. В НТД должны быть указаны эквивалентные размеры, условные протяженности и т. п. параметры дефектов, доступные измерению при УЗ контроле.

152. Чтобы настроить аттенуатор на измерение нормализованных децибел по СО-3 при контроле прямым преобразователем следует использовать донный сигнал по толщине СО-3. Толщина образца (30 мм) обычно не превышает 1,5 протяженности ближних зон стандартных преобразователей. Этому соответствует ослабление донного сигнала на 2 дБ. Это значе-

ние амплитуды следует отложить на шкале аттенюатора. Получить донный сигнал от СО-3. Некалиброванными регуляторами чувствительности установить амплитуду этого сигнала на стандартный уровень.

153. Чтобы настроить аттенюатор на измерение нормализованных децибел по СО-2 при контроле наклонным преобразователем следует использовать эхосигнал от отверстия диаметром 6 мм в СО-2. Рассчитать по формуле акустического тракта амплитуду эхосигнала от этого отражателя для используемого преобразователя, далее действовать по рекомендациям предыдущего ответа.

154. Указаны отрицательные децибелы, поэтому больше тот сигнал, у которого децибел меньше, то есть первый. Разница амплитуд сигналов - 6 дБ, что соответствует двум. Итак, первый сигнал больше второго в два раза.

155. АРД диаграмма связывает амплитуду эхосигнала, расстояние от преобразователя до отражателя и эквивалентный диаметр (площадь) отражателя.

156. Формула перевода отношений амплитуд в децибелы (см. 2.1)  $\langle A/A_0 \rangle = 20 \lg(A/A_0)$ . В угловые скобки взяты величины в отрицательных децибелах. Формула обратного перевода децибел в относительные величины  $A/A_0 = 10^{\langle A/A_0 \rangle / 20}$ . Для перевода удобнее пользоваться шкалой рис. 1.1 в [4].

157. Чтобы рассчитать по АРД диаграмме эквивалентный диаметр дефекта проведем вертикальную линию от деления 200 мм и наклонную штриховую линию от деления 54 дБ. На их пересечении найдем кривую "3 мм". Это и есть эквивалентный диаметр дефекта.

158. При перпендикулярном падении эквивалентная площадь дефекта с зеркально отражающей поверхностью будет равна  $s$ , а дефекта с диффузно-отражающей поверхностью - меньше  $s$ . При неперпендикулярном падении эквивалентная площадь обоих дефектов будет меньше  $s$ , но эквивалентная площадь дефекта с диффузно-отражающей поверхностью будет больше.

159. Формулы для расчета координат дефекта прямым лучом имеют вид:  $h = r \cos \alpha$ ;  $l = r \sin \alpha$ .

160. Формулы для расчета координат дефекта однажды отраженным лучом имеют вид:  $h = 2H - h'$ ;  $l = l'$ .

161. Систематические погрешности измерения уменьшают, повторяя настройку несколько раз и принимая средние значения.

162. Если от дефекта наблюдаются несколько максимумов эхосигналов, следует измерять координаты, соответствующие каждому из них.

163. Эквивалентную площадь измеряют по максимальной амплитуде эхосигнала от дефекта, а условный размер - по изменению амплитуды эхосигнала при перемещении преобразователя.

164. Расстояние между компактным и протяженным дефектами считают равным промежутку между максимумом эхосигнала от компактного дефекта и крайним положением преобразователя для протяженного дефекта.

165. Для протяженных плоских дефектов условные протяженности, измеренные способом «6 дБ», больше истинных или равны им.

166. Условные протяженности дефектов, измеренные относительным способом «6 дБ», не зависят от диаметров округлых дефектов.

167. Чтобы измерить истинную высоту дефектов при контроле наклонным преобразователем следует определить пробег импульса по линии развертки дефектоскопа при перемещении преобразователя или координаты краевых точек дефекта по максимумам эхосигналов от них.

168. Отнесение дефекта к компактному или протяженному зависит не от его истинного размера, а от возможности измерения этого размера УЗ способами. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

169. Оценка компактности или протяженности дефекта при контроле прямым и наклонным преобразователями принципиально не отличается, только нужно сравнивать условный размер дефекта, измеренный абсолютным способом, с условным размером плоскодонного отверстия, перпендикулярного акустической оси используемого преобразователя. Для наклонного преобразователя такой искусственный дефект сделать трудно, поэтому удобно сравнивать условный размер реального дефекта, измеренный относительным способом, с условным размером бокового цилиндрического отверстия.

170. Округлый дефект практически любого диаметра будет квалифицирован как компактный, так как условный размер его постоянен и равен условному размеру бокового цилиндрического отверстия, расположенного на той же глубине.

171 Условная протяженность компактного дефекта, расположенного в дальней зоне, не изменится, так как не изменится ширина диаграммы направленности преобразователя. Условная протяженность протяженного дефекта может измениться. Он сохранится, если протяженный дефект плоский и измерение выполнят способом «6 дБ».



172. Коэффициент формы дефекта это отношение амплитуд эхосигналов, полученного прямым отражением от дефекта (эхометодом, совмещенным преобразователем) и отражением от дефекта и дна ОК (методом тандем). Для объемного дефекта он больше 1, а для плоскостного - меньше 1.

173. Определить форму дефекта равного или меньшего длины волны нельзя. Все рассмотренные способы применимы только к дефектам большим длины волны. Дефекты меньшие длины волны все рассмотренные способы будут квалифицировать как округлые.

174. Коэффициент выявляемости зеркально-теневого метода может изменяться от 0 (полное пропадание донного сигнала) до 1 (донный сигнал не изменился).

175. Зеркально-теневого метод основан на получении в отсутствии дефекта максимального (то есть зеркально отраженного) донного сигнала. Это достигается при контроле прямым преобразователем с помощью одного преобразователя, а при контроле наклонным преобразователем - с помощью двух преобразователей.

176. Вертикальный дефектов при контроле прямым преобразователем зеркально-теневого методом по способу рис. 6.10,б будет выявляться благодаря образованию на поверхности дефекта головных волн, порождающих поперечные волны. Последние уносят энергию, что вызывает ослабление донного сигнала. При контроле по способу рис. 6.10,б дефект будет выявляться благодаря препятствию прохождению продольных или поперечных наклонных волн. Способ рис. 6.10,а соответствует вариантам рис. 6.9,в или г, способ рис. 6.10,б; соответствует варианту рис. 6.9,а

177. Дефекты, параллельные плоской поверхности ввода, лучше всего выявлять прямым преобразователем, перемещаемым по этой поверхности и излучающим продольные волны.

178. Кромку лопатки на поверхностные дефекты следует проверять эхометодом с использованием рэлеевских волн. Преобразователь устанавливать на видимый конец лопатки.

179. Применяют диапазон частот 0,5 ... 10 МГц.

180. Поперечные волны, как правило, лучше выявляют мелкие дефекты, чем продольные волны благодаря меньшей длины волны.

181. Для выявления дефектов, ориентированных перпендикулярно оси стержня (рис. 7.3, е), предусмотрен контроль наклонным преобразователем по боковой поверхности, а не прямым преобразователем с торцевой поверхности потому, что при контроле прямым преобразователем возник-

нут головные волны вдоль поверхности стержня. В результате продольная волна сильно ослабнет, породит поперечные волны, которые пройдут поперек стержня, рассеются и трансформируются на противоположной поверхности и дадут помехи.

182. Трещины, перпендикулярные внутренней поверхности трубы (рис. 7.6), выявляют поперечными волнами, а в тонкостенных трубах - волнами Лэмба. Они отражаются от дефектов, как на внутренней так и на наружной поверхностях.

183. Способ контроля сварных соединений на продольные дефекты, показанный на рис. 7.7,а, является оптимальным, потому что наклонный преобразователь перемещается по относительно ровной околошовной поверхности, а поперечная ультразвуковая волна падает на поверхность сплавления и на наиболее опасные дефекты наплавленного металла (вертикальные трещины) перпендикулярно или почти перпендикулярно. Угло-вой эффект помогает обнаруживать дефекты вблизи поверхностей сварного соединения.

184. Схема дополнительного контроля валов переменного сечения (рис. 7.4) на трещины вблизи галтельного перехода - наклонным преобразователем со стороны участка поверхности *B*.

185. Примеры ограничения контролепригодности сварных соединений: аустенитный сварной шов с высоким уровнем структурных помех; нижняя часть наплавленного металла стыкового сварного шва, где контролю мешает провисание; сварной шов, около которого нет достаточно протяженных ровных участков для перемещения преобразователя; сварные соединения, выполненные сваркой давлением, дефекты которых плохо отражают ультразвуковые волны.

186. Через воду и машинное масло хорошо проходит ультразвук, обе жидкости нетоксичны. Вода дешевле, но в отличие от машинного масла плохо смачивает поверхность и вызывает ржавление.

187. При контроле изделий по вертикальным поверхностям применяют вязкую контактную жидкость, например, солидол, нигрол.

188. Из рассмотренных способов контроля качества акустического контакта при дефектоскопии изделий с непараллельными поверхностями из числа рассмотренных пригоден только способ по уровню низкочастотного сигнала, возбуждаемого вибратором.

189. Принадлежности и приспособления, необходимые для УЗ контроля, перечислены в тексте п. 7.3.

190. Шероховатость поверхности ввода, оптимальная для контроля контактным способом прямым преобразователем -  $Rz = 10 \dots 20$  мкм, а для контроля наклонным преобразователем -  $Rz = 20 \dots 40$  мкм.

191. Действия, необходимые при подготовке к ручному контролю: выбор параметров контроля; размещение и настройка аппаратуры; проверка наличия необходимых принадлежностей и приспособлений; подготовка поверхности ввода, нанесение контактной жидкости.

192. Для контроля отслоений от поверхности основного металла антикоррозионной наплавки целесообразно изготовить образец с плоскодоными отверстиями, в которых дно расположено на границе наплавки с основным металлом.

193. Изделия, показанные на рис. 7.3 - поковки ответственного назначения. Их сканируют по разным поверхностям с разным направлением лучей, чтобы обеспечить надежное обнаружение различно ориентированных дефектов.

194. При контроле сварных соединений продольно-поперечным сканированием шаг сканирования можно увеличивать по мере отодвигания преобразователя от сварного шва, поскольку с увеличением расстояния от преобразователя до шва увеличивается ширина раскрытия ультразвукового пучка лучей.

195. Толстые изделия с высоким уровнем структурных помех лучше контролировать преобразователем большого диаметра или РС преобразователем.

196. Способы отстройки от ложного сигнала, связанного с отражением от провисания сварного шва: увеличить угол ввода; точно измерить глубину залегания отражателя с учетом положения преобразователя относительно шва; сравнить амплитуды эхосигналов при контроле с двух сторон шва (сигнал от несимметричного по форме провисания при этом изменяет амплитуду) пальпировать провисание (при его доступности); установить наличие провисания измерением толщины прямым преобразователем с наружной поверхности.

197. Одноуровневую систему оценки качества целесообразно применять при контроле недорогих изделий доступных ремонту, например, тонких сварных соединениях, или когда трудно измерить дополнительные параметры дефектов, например, при высокоскоростном автоматическом контроле.

198. Из названных в книге измеряемых параметров дефектов наиболее важна в отношении влияния на прочность сварного соединения форма дефекта (см. п. 6.1.5), определение которой нормами на УЗ контроль часто, к сожалению, не предусмотрено.

199. По результатам контроля заполнение двух документов необходимо потому, что заключение передается заказчику (например, начальнику цеха-изготовителя продукции), а журнал остается у исполнителя контроля.

200. Специалист первого уровня не имеет права подписывать документы по результатам контроля.

201. Если отсутствует автоматическая запись результатов контроля, то дефектограмма и заключение - единственные документы по результатам УЗ контроля.

202. На дефектограмме изображается эскиз изделия, на котором отмечены обнаруженные дефекты.

203. Оперативную проверку толщиномером предпочтительнее выполнять не по участку контролируемого изделия, а по образцу, поскольку в контролируемом изделии участок, доступный измерению механическими средствами, может отсутствовать или находиться далеко от места контроля.

204. Толщиномер настраивают двумя ручками, чтобы обеспечить правильность начала отсчета времени и правильный перевод измерения интервала времени в значение толщины через скорость звука. Эти параметры настраивают соответственно на образцах малой и большой толщины.

205. Причины возникновения дополнительных погрешностей при измерении толщины: грубые поверхности изделия; непараллельные поверхности изделия; малая кривизна поверхности ввода изделия.

206. Если обнаружено, что толщиномер был неправильно настроен, надлежит повторить исправным прибором все измерения, выполненные после предыдущей проверки, давшей удовлетворительные результаты.

207. Связь между физико-механическими свойствами и акустическими свойствами материала устанавливают экспериментально. Исключение составляет аналитическая (расчетная) связь между модулями упругости и скоростями продольных и поперечных волн.

206. Уровень структурных помех возрастает с ростом величины зерна.

209. Основные факторы, снижающие надежность обнаружения дефектов: неправильно выбран метод или схема контроля; неправильно выбрана или настроена аппаратура; неправильно подготовлена поверхность ввода; недостаточна квалификация или недобросовестность дефектоскописта.

210. Третий фактор, влияющий на надежность обнаружения дефектов, кроме влияния надежности работы дефектоскопа и дефектоскописта - окружающая среда. Под этим понимается окружающая температура, освещенность, удобство работы.

211. Дефектоскоп или толщиномер с автономным источником питания при контроле внутри сосуда использовать можно и даже безопаснее, чем приборы с сетевым питанием.

212. Чтобы предохранить руки дефектоскописта от прямой контактной передачи ультразвука следует отделять корпус преобразователя от пьезопластины воздушным промежутком. Если это не выполнено, то работать следует в нитяных перчатках.

213. Подтвердить результаты ультразвукового контроля при выявлении внутренних дефектов сварного соединения можно рентгено- или гаммаграфированием.

214. Лучше, чем ультразвуковой контроль, поверхностные дефекты выявляют магнитопорошковый, вихретоковый и капиллярный методы дефектоскопии. Они позволяют получить визуальное изображение дефектов.

215. Наиболее перспективное направление развития ультразвуковой дефектоскопии - компьютерная акустическая голография.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Неразрушающий контроль. /Под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 2. Акустические методы контроля. Высшая школа, 1991, 288 с.
2. Неразрушающий контроль. /Справочник в 7 томах под ред. чл. корр. РАН В.В. Клюева. Том 3. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге Ультразвуковой контроль. М. Машиностроение, 2003.
3. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. М. 2003, 326 с.
4. Ермолов И. Н., Вopilкин А. Х., Бадалян В. Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). М.: «ЭХО+» 2000, 108 с.
5. Молотков С.Л. Ультразвуковой дефектоскоп УД2-12 в вопросах и ответах. УЗ сервис при ПВ и КЦ. С. Петербург, 1993.
6. Ланге Ю.В., Воронков В.А. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. Справочник. Москва, 2003, 120 с.
7. Воронков В.А. (составитель). Общие вопросы неразрушающего контроля. Терминологический справочник. Москва, 2003, 22 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Предисловие.....	3
Список сокращений и аббревиатур.....	5
1. Методы акустического контроля (АК).....	6
1.1. Классификация методов.....	6
1.2. Методы отражения.....	8
1.3. Методы прохождения.....	10
1.4. Комбинированные методы.....	12
1.5. Импедансный метод.....	15
1.6. Методы собственных частот (колебаний).....	15
1.7. Акустикоэмиссионный метод.....	17
1.8. Способы акустического контакта.....	17
2. Физические основы акустических методов контроля.....	19
2.1. Колебания и волны.....	19
2.2. Акустические свойства сред.....	25
2.3. Отражение и прохождение волн на границах сред.....	27
2.4. Дифракция на препятствиях и рефракция.....	32
2.5. Возбуждение и прием упругих волн электроакустическими преобразователями.....	33
2.6. Акустическое поле преобразователя.....	41
2.7. Акустический тракт.....	45
2.8. Шумы и помехи при контроле методами отражения и прохождения.....	53
2.9. Акустическая эмиссия (АЭ).....	57
3. Аппаратура акустического контроля.....	59
3.1. Классификация приборов.....	59
3.2. Импульсный эхо-дефектоскоп.....	59
3.3. Регистрация и представление информации в эхо-дефектоскопе....	63
3.4. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) к дефектоскопам....	68
3.5. Характеристики эхо-дефектоскопа.....	72
3.6. Стандартные образцы (СО).....	72
3.7. Ультразвуковые приборы для контроля теневым и комбинированными методами.....	73
3.8. Ультразвуковой резонансный дефектоскоп-толщиномер.....	74
3.9. Ультразвуковые толщиномеры.....	78
3.10. Ультразвуковые приборы для контроля физико-механически свойств.....	82
4. Основные параметры методов и аппаратуры, способы их измерения и эталонирования.....	84
4.1. Основные параметры методов отражения и прохождения.....	84
4.2. Длина волны и рабочая частота колебаний.....	86
4.3. Чувствительность.....	86
4.4. Угол ввода луча при контроле эхометодом.....	92

4.5. Направленность поля преобразователя.....	95
4.6. Мертвая зона.....	96
4.7. Разрешающая способность.....	98
4.8. Погрешность глубиномера.....	100
4.9. Плотность сканирования.....	102
4.10. Стабильность акустического контакта.....	104
4.11. Минимальный условный размер фиксируемого дефекта.....	105
5. Метрологическое обеспечение и стандартизация.....	105
5.1. Общие положения .....	105
5.2. Метрологическое обеспечение приборов различного назначения...	108
5.2.1. Импульсный дефектоскоп.....	108
5.2.2. Толщиномеры.....	109
5.2.3. Приборы для контроля физико-механических свойств материалов.....	110
5.3. Руководящие материалы по контролю.....	111
6. Измеряемые характеристики и признаки дефектов.....	112
6.1. Эхометод.....	112
6.1.1. Амплитуда эхосигнала.....	112
6.1.2. Координаты дефекта.....	115
6.1.3. Условные размеры дефекта.....	118
6.1.4. Признаки дефектов на основе из условных размеров.....	123
6.1.5. Способы оценки размеров и конфигурации дефектов по соотношению временных интервалов и амплитуд сигналов.....	124
6.2. Зеркально-теневой метод.....	131
7. Общие положения технологии контроля, техника безопасности и охрана труда.....	132
7.1. Выбор схемы контроля и основных параметров.....	132
7.2. Выбор контактирующих сред.....	142
7.3. Подготовка к контролю.....	144
7.4. Проведение контроля.....	149
7.5. Оценка качества.....	152
7.6. Оформление результатов контроля.....	153
7.7. Измерение толщины.....	157
7.8. Контроль физико-механических свойств.....	157
7.9. Факторы, определяющие надежность контроля.....	158
7.10. Техника безопасности и охрана труда.....	159
8. Современное состояние и направления развития неразрушающего контроля.....	160
Проверочные вопросы.....	167
Ответы.....	180
Литература.....	205



И.Н. Ермолов, М.И. Ермолов

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

Учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации

Издание пятое, стереотипное

Корректурa авторская

---

Подписано в печать 24.03.06 г.  
Бумага офсетная. Формат 60х90 1/16.  
Тираж 500 экз.

---

Отпечатано в ООО «Издательский дом «Азимут»  
127427 Москва, Дмитровское ш., 72