

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Б.И. Капранов, М.М. Коротков

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

Часть 1

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 534.8+621.179.17(075.8)

ББК 32.87+22.32я73

К 20

Капранов Б.И.

К 20 Акустические методы контроля и диагностики. Часть 1: учебное пособие / Б.И. Капранов, М.М. Коротков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 186 с.

ISBN 5-98298-202-4

В первой части пособия изложены физические основы методов акустического контроля: общие понятия об акустических колебаниях и волнах; основы теории взаимодействия упругого механического поля со средой; закономерности распространения упругих колебаний в газах, жидкостях и твердых телах; явления преломления, затухания, рассеяния акустических волн. Рассмотрены основные способы излучения и приема акустических колебаний, основные принципы построения ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей, применяемых для ультразвуковой дефектоскопии материалов и изделий. Даны основы ультразвуковой интроскопии и методов ультразвуковой томографии.

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Неразрушающий контроль».

УДК 534.8+621.179.17(075.8)

ББК 32.87+22.32я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор ТГАСУ

О.И. Недавний

ISBN 5-98298-202-4

© Капранов Б.И., Коротков М.М., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА	5
ГЛАВА 1. АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ	7
§ 1.1. Понятие об акустических колебаниях и волнах	7
§ 1.2. Элементы линейной теории упругости	11
§ 1.3. Скорость звука в газах и жидкостях	31
§ 1.4. Акустические свойства сред	32
§ 1.5. Отражение и преломление акустических волн	36
§ 1.6. Другие типы волн	47
ГЛАВА 2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	53
§ 2.1. Излучатели и приемники акустических колебаний	53
§ 2.2. Основные уравнения прямого и обратного пьезоэффекта	57
§ 2.3. Расчет электроакустического тракта дефектоскопа	62
§ 2.4. Классификация преобразователей и основные требования предъявляемые к ним	80
§ 2.5. Акустическое поле преобразователя	89
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	103
§ 3.1. Общие сведения	103
§ 3.2. Акустический тракт эхо-метода	113
§ 3.3. Акустический тракт теневого метода	119
§ 3.4. Акустическая эмиссия	127
ГЛАВА 4. МЕТОДОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ	136
§ 4.1. Методика дефектоскопии изделий	136
§ 4.2. Контроль сварных соединений	141
§ 4.3. Ультразвуковая толщинометрия	146
§ 4.4. Образцы для ультразвукового контроля	157
ГЛАВА 5. УЗ ИНТРОСКОПИЯ	163
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	184

ПРЕДИСЛОВИЕ

Акустический контроль – один из основных физических методов (видов) диагностики состояния материалов, изделий, биологических объектов, окружающей среды. Высокая чувствительность, информативность, достоверность, оперативность диагностических операций привели к тому, что акустический контроль занимает ведущее место в ряду других методов контроля.

В пособии изложена сущность физических явлений, происходящих в контролируемой среде при распространении волн упругих напряжений. Рассмотрены явления излучения, приёма, распространения, отражения, преломления и дифракции акустических волн. Приведены методы ультразвукового контроля, их классификация.

В каждом разделе приведены вопросы и задачи, способствующие лучшему усвоению материала. Минимальный объем данных, необходимых для решения задач, приводятся по тексту. Дополнительную информацию можно получить в [1], либо в другой приведённой литературе [2, 3, 4, 5].

Охвачены разделы курса «Акустический контроль» по университетской программе бакалавров специальности 19.02. «Физические методы и приборы контроля качества и диагностики», а также частично программа квалифицированного специалиста (инженера) по этой же специальности в части изучения общих вопросов акустического контроля.

Учебное пособие предназначено для широкого круга инженеров, связанных с разработкой и применением средств неразрушающего контроля и диагностики в металлургии, машино- и приборостроении, на транспорте, в строительстве, энергетике и других отраслях народного хозяйства.

Может быть полезно для студентов вузов, обучающихся по специальности «Физические методы и приборы контроля качества и диагностики», а также для специалистов I, II, III уровней квалификации по акустическому виду контроля.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

ЗВУК давно применяется для испытания материалов: грубые внутренние дефекты в поковках и отливках можно легко выявить по измененному звучанию при ударе молотком. Любая домашняя хозяйка знает, что трещину в чашке или тарелке, если она есть, можно выявить по звуку. Врачи с древних времен анализируют состояние больного по шумам в лёгких или по звукам работающего сердца. Звуковой акустический контроль можно поэтому считать одним из старейших способов диагностирования состояния технических, биологических объектов и окружающей среды.

Хотя Спалланцани еще в 1779 г. предполагал, что летучие мыши ориентируются при помощи не слышимых для нас звуковых сигналов (обнаружить эти сигналы сумели только Пирс и Гриффин в 1938 г.), решающие факторы, приведшие к возникновению акустического контроля, как технического средства диагностирования, заключаются в том, что:

1. Жак и Пьер Кюри в 1880–81 гг. обнаружили обратимый пьезоэлектрический эффект [6, 7], что позволило использовать кварц как преобразователь электрических колебаний в звуковые и наоборот;
2. Лорд Рэлей уже в 1885–1890 гг. [8] разработал теорию распространения звука в твердых веществах;
3. Была известна идея эхо-импульсного способа (впервые ее применили Лэнгвэн и Шиловски с пьезоэлектрическими преобразователями в водной среде в 1915–1917 гг. [9]);
4. Разработка электронных конструктивных элементов быстро продвигалась вперед благодаря развитию радарной техники.

Первые дефектоскопы, работающие на непрерывном звуке, создали в 1929 г. С.Я. Соколов [10] и в 1931 г. Мюльхойзер. Эхо-импульсные дефектоскопы созданы в 1939–1942 гг. Файрстон в США, Спрулс в Великобритании и Крузе в Германии.

Примерно с 1950 г. преобладающим в технике ультразвукового контроля используется эхо-импульсный способ.

В настоящее время акустический контроль используется в следующих областях:

- на транспорте для контроля катящегося и летающего оборудования и самих дорожных средств (рельсов);

- в металлургическом производстве для контроля литых, кованных и катаных изделий;
- в судостроении и при производстве стальных конструкций для контроля заготовок и их соединений;
- в автомобилестроении и самолетостроении для контроля деталей привода, ходового механизма и рулевого управления, сварных, паяных и клеевых соединений;
- в машиностроении и в электрической промышленности для испытания заготовок, сварных, паяных, клеевых соединений, для контроля допусков на изготовление;
- на электро- и атомных станциях для приемо-сдаточного и текущего контроля сосудов и трубопроводов, работающих под давлением и при повышенной температуре, для наблюдения за работой турбин и генераторов;
- в химической промышленности для диагностики состояния деталей и агрегатов, подверженных коррозии;
- в медицине для диагностирования состояния различных органов человека;
- в научных исследованиях для определения свойств материи на макро- и микроуровнях.

Глава 1

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

§ 1.1. Понятие об акустических колебаниях и волнах

- **Акустическими волнами** называют распространяющиеся в упругой среде механические колебания частичек среды.
При движении волны частицы не перемещаются, а совершают колебания около своих положений равновесия.
- Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется **длиной волны** λ .
Длина волны связана со скоростью распространения C и частотой f (или периодом T) соотношением

$$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{f}, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны [м];
 C – скорость распространения [м/с];
 T – период [с]; f – частота [Гц].
Например, для воздуха: $C = 330$ м/с

$$\begin{aligned} f = 20 \text{ Гц} &\rightarrow \lambda = 16,5 \text{ м}; \\ f = 20000 \text{ Гц} &\rightarrow \lambda = 1,65 \text{ см}; \\ f = 20000000 \text{ Гц} &\rightarrow \lambda = 0,165 \text{ мм}; \end{aligned}$$

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны различают: **продольные, поперечные, поверхностные и нормальные волны (волны в пластинах)**.

В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Колебания могут распространяться в твердой, жидкой и газообразных средах.

Если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения, то такие колебания называются **поперечными (или сдвиговыми)**. Они могут распространяться только в среде, которая обладает упругостью формы.

Продольные и поперечные волны могут распространяться в чистом виде только в неограниченной среде (∞ или $\infty/2$) или в теле, размеры которого в направлениях, не совпадающих с направлением распростране-

ния волны, значительно превышают длину последней. Схематично продольные и поперечные волны представлены на рис. 1.1.

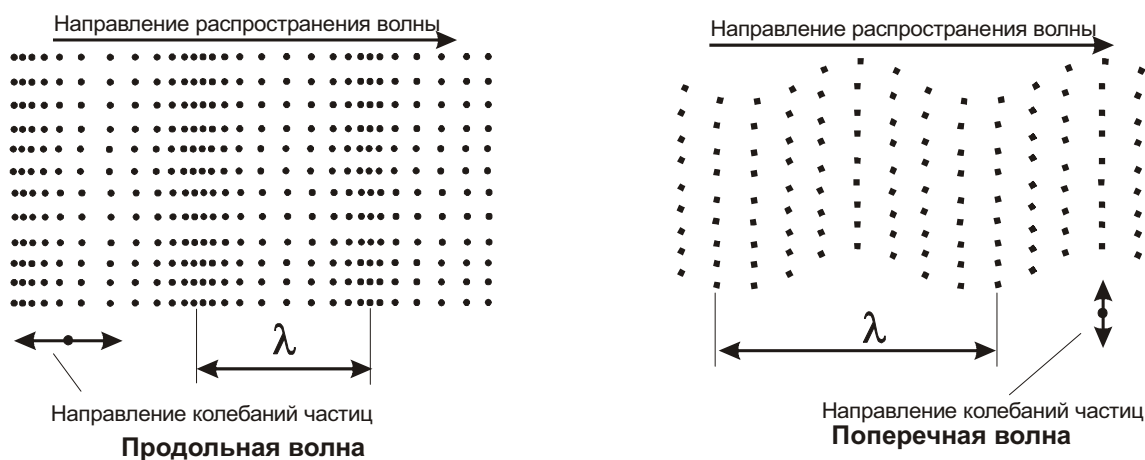


Рис. 1.1. Распространение продольных и поперечных волн

На свободной поверхности могут распространяться **поверхностные волны (волны Рэлея)**.

В поверхностной волне частицы одновременно совершают колебания в направлении распространения и перпендикулярно ему, описывая эллиптические или более сложные траектории. Амплитуда – колебание по мере удаления от поверхности вглубь убывает по экспоненте, поэтому волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной в одну – полторы длины волны и следует изгибам поверхности рис. 1.2.



Рис. 1.2. Распространение поверхностных волн

При распространении волны в плоских телах с постоянной толщиной (листах, тонких пластинках, проволоке) могут возникать нормальные волны или Волны Лэмба. При этом частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листа, пластины оболочки. Обычно возникают и распространяются независимо две нормальные волны: симметричная (волна сжатия или растяжения) и антисимметричная (волна изгиба) рис. 1.3.

Скорости распространения продольной, поперечной и поверхностной волн определяется упругими свойствами материала (модулями упругости и сдвига, коэффициентами Пуассона) и его плотностью.

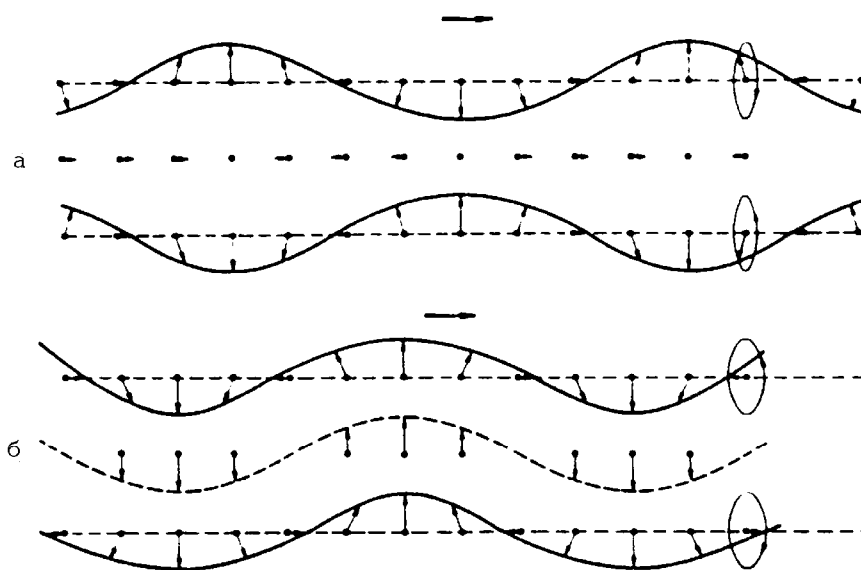


Рис. 1.3. Волны в пластинах
а – симметричная, б – ассиметричная

Скорость распространения нормальных волн в отличие от скорости распространения других типов волн зависит не только от свойств материала, но и от частоты звуковых колебаний и толщины изделия.

$$C_l > C_t > C_s; \quad C_t \sim 0,55 C_l C_s \sim 0,93 C_t.$$

Акустические волны различают также по форме фронта волны или волновой поверхности.

- **Фронт волны** – это геометрическое место точек среды, в которых в рассматриваемый момент времени фаза волны имеет одно и то же значение.

Если в среде распространяется кратковременное возмущение (импульс), то **фронтом волны** называется граница между возмущенной и невозмущенной областями среды.

Фронт или волновая поверхность непрерывно перемещается в среде и при этом деформируется. В неограниченной изотропной среде распространение упругих волн имеет пространственный характер, и, в зависимости от формы фронта, волны могут быть **плоскими, сферическими** и **цилиндрическими** рис 1.4.

- **Плоские волны** возбуждаются пластинкой, если ее поперечные размеры намного превосходят длину волны. Волновые поверхности плоской волны имеют вид параллельных плоскостей.
- **Сферические волны** возбуждаются точечным источником или колеблющимся шаровым телом, размеры которого малы. Волновые поверхности сферической волны имеют вид концентрических сфер.

- **Цилиндрические волны** возбуждаются цилиндрическим телом (стержень, цилиндр и т. д.), длина которого значительно больше его поперечных размеров. Волновые поверхности имеют вид концентрических цилиндров.

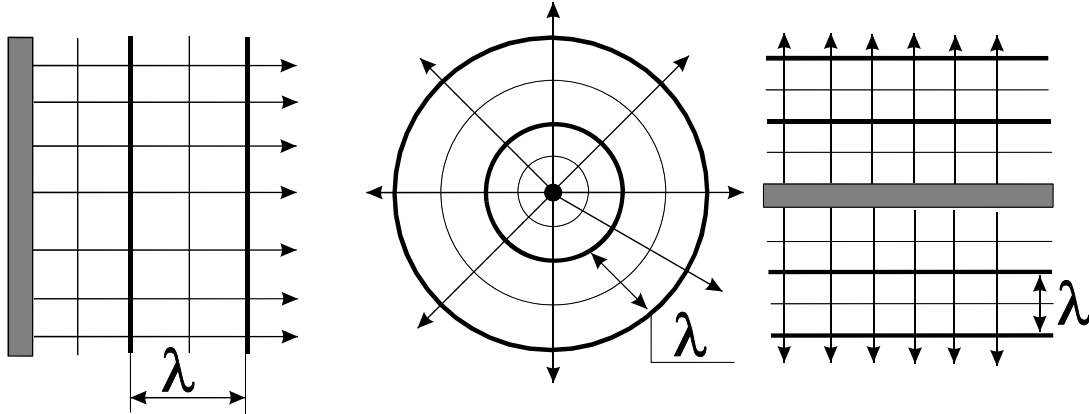


Рис. 1.4. Плоские, сферические, цилиндрические волны

На очень больших расстояниях сферические и цилиндрические волны переходят в плоские.

В зависимости от частот различают следующие волны:

- **Инфразвуковые** $f =$ до 16–20 Гц;
- **Звуковые** $f =$ 16–20000 Гц;
- **Ультразвуковые** $f =$ 20 кГц–1000 МГц;
- **Гиперзвуковые** $f >$ 1000 МГц.

Для целей дефектоскопии используются волны различных диапазонов:

Звуковой $f =$ 1–8 кГц;

Ультразвуковой $f =$ 20 кГц–50 МГц;

В настоящее время ведутся работы и удастся получать частоты до 1000 МГц.

Длина волны гиперзвуковых колебаний сравнима с длиной волны видимых световых волн. Это делает их похожими по своим свойствам со свойствами световых лучей, поэтому многие задачи рассматриваются с точки зрения геометрической акустики.

- **Геометрическая акустика** – упрощенная теория распространения звука, пренебрегающая дифракционными явлениями.

Геометрическая акустика основана на представлении о звуковых лучах, вдоль каждого из которых звуковая энергия распространяется независимо от соседних лучей. В однородной среде звуковые лучи – прямые линии.

С математической точки зрения геометрическая акустика – есть предельный случай волновой теории распространения звука при стремлении длины волны к 0 и в этом отношении аналогична геометрической оптике в теории распространения света.

Коротковолновые УЗ – колебания распространяются в виде направленных лучей. Как и световые лучи они могут отражаться, преломляться, фокусироваться, интерферировать, причем не только сами с собой, но и со светом, испытывать дифракцию и затухать по мере распространения.

Длина волны гиперзвуковых волн может стать сравнимой с размерами атомов. В этом случае начинается проявляться квантовый характер такой волны и, по аналогии со световым потоком, такой поток звуковой энергии оказывается возможно рассматривать в виде потока частиц (фононов), которые взаимодействуют уже не с конечными объемами вещества или кристаллами, а уже с электронами атома. При этом возникают различные эффекты такого взаимодействия, которые позволяют изучать более широкий круг физических характеристик материалов.

С другой стороны инфразвуковые волны обладают большими длинами, проходят на большие расстояния, что позволяет контролировать физические свойства больших массивов вещества (напр. в геологоразведке).

Акустические волны ультразвукового диапазона обладают свойствами очень сильно отражаться от границы твердое тело – воздух. Расчеты показывают, что если слой воздуха толщиной 10^{-5} мм и более при $f=5$ МГц, то отражает 100 % посланной энергии, при толщине слоя $<10^{-5}$ мм отражение составляет ~ 90 %, а слой толщиной 10^{-6} мм отражает ~ 80 % посланной энергии. Благодаря этому свойству УЗ – колебания эффективно отражаются от трещин, воздушных полостей и т. д., что позволяет их легко обнаружить.

Все вышесказанное привело к широкому распространению акустических методов контроля качества материалов и изделий.

§ 1.2. Элементы линейной теории упругости

Как мы уже говорили, акустические волны в телах связаны с перемещением частиц этого тела под действием внешних и внутренних сил. Закономерности поведения среды под действием этих сил описывает теория упругости. При малых перемещениях уравнения, описывающие поведение элементарного объема внутри среды, являются линейными. Поэтому основные закономерности распространения упругих перемещений описываются линейной теорией упругости.

Рассмотрим, что происходит с элементарным объемом ΔV внутри среды под действием сил (рис. 1.5).

Пусть M – произвольная точка тела. Её положение в пространстве задано радиус-вектором \vec{x} в ортогональной системе координат с единичными векторами (ортами) $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$. Элементарный объем ΔV включает в себя точку M и имеет площадь поверхности ΔS .

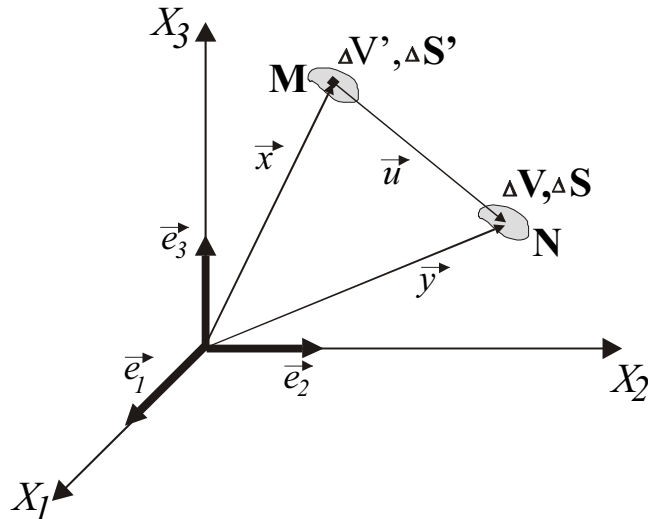


Рис. 1.5. Перемещение элементарного объема под действием напряжений

Под действием внешних и внутренних сил точка M сместится в точку N с радиус-вектором \vec{y} . Величину смещения обычно обозначают вектором \vec{U} . Величина и направление смещения будут определяться величиной и направлением действующих в точке M сил. Каждая точка объема ΔV перейдет в соответствующую точку окрестности точки N , т. е. объем ΔV перейдет в объем $\Delta V'$ с площадью поверхности $\Delta S'$.

Величина и форма объема $\Delta V'$, в общем случае, не будет совпадать с величиной и формой объема ΔV . Т. е. $\Delta V' \neq \Delta V$ и $\Delta S' \neq \Delta S$.

Величина и направление смещения будут определяться величиной и направлением действующих в точке M сил. Каждая точка объема ΔV перейдет в соответствующую точку окрестности точки N , т. е. объем ΔV перейдет в объем $\Delta V'$ с площадью поверхности $\Delta S'$.

Величина и форма объема $\Delta V'$, в общем случае, не будет совпадать с величиной и формой объема ΔV . Т. е. $\Delta V' \neq \Delta V$ и $\Delta S' \neq \Delta S$.

Разница в формах ΔV и $\Delta V'$, величинах ΔV , $\Delta V'$, ΔS и $\Delta S'$ характеризует **степень деформации** элементарного объема ΔV при его смещении на величину \vec{U} .

В линейной теории упругости рассматривают **идеально упругое изотропное** твердое тело.

Это такое тело, в котором:

- (идеальная упругость) – при снятии действующих сил каждая точка возвращается в исходное состояние (отсутствуют пластические деформации);
- (изотропность) – упругие свойства тела одинаковы во всех направлениях.

Силы, действующие на каждую точку тела, разделяют на два типа:

Объемные силы – это силы, величина которых пропорциональна объему элемента ΔV . К ним относятся: сила тяжести, сила притяжения, центробежная сила и др.

Силы напряжения – это силы, действующие на поверхность элемента ΔV со стороны окружающих частей тела. Величина этих сил пропорциональна площади поверхности элемента ΔS .

Напомним единицы измерения силы:

Ньютон (Н) – в системе СИ.

Дина (дин) – в системе CGSF.

КГС (кгс) – в системе МКГСС.

$$1\text{Н}=10^5 \text{дин}$$

1Н – сила, сообщающая массе 1 кг ускорение 1 м/с²

1дин – сила, сообщающая массе 1 г ускорение 1 см/с²

1кгс – сила, сообщающая массе 1 кг ускорение 9,80665 м/с²

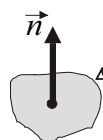
$$1\text{кгс}=9,81\text{Н}=9,81\cdot 10^5 \text{дин.}$$

Сила, действующая со стороны окружающих систем на единичную площадку, называется **напряжением**.

Обозначается буквой \vec{P} . $[\vec{P}]=\text{Н/м}^2$ или дин/см^2 .

Это то же самое, что и давление $1\text{Н/м}^2=10 \text{дин/см}^2$. Иногда давление измеряют в атмосферах $1 \text{атм.}=1,01325\cdot 10^5 \text{н/м}^2=1,01325\cdot 10^6 \text{дин/см}^2$.

В линейной теории упругости рассматривают **однородное напряжение**, т. е. напряжение, величина которого не зависит от положения элемента в теле.



С учетом приведенного определения, сила, действующая на элемент площадью ΔS , со стороны окружающих частей тела будет равна $\Delta \vec{P} = \vec{P} \cdot \Delta S$.

При однородном напряжении величина \vec{P} не зависит от координат точки M , а зависит только от ориентации площадки ΔS в пространстве, т. е. от единичного вектора \vec{n} , нормального к элементу площади ΔS .

Эта зависимость записывается в виде $\vec{P} = \vec{\sigma}(\vec{n})$,

где $\vec{\sigma}$ – векторная функция векторного аргумента \vec{n} .

Так как на противоположных сторонах площадки ΔS напряжение имеет одинаковую величину и противоположные знаки $\vec{P}(-\vec{n}) = -\vec{P}(\vec{n})$, то можно записать $\vec{\sigma}(-\vec{n}) = \vec{\sigma}(\vec{n})$.

Теория упругости, и в том числе линейная, устанавливает основные закономерности поведения тела под действием сил напряжения в зависимости от его упругих характеристик.

Эти же закономерности определяют возникновение и распространение в твердом теле акустических колебаний.

Тензор напряжения

Выясним, что представляет собой вектор-функция $\vec{\sigma}$, и ее основные характеристики.

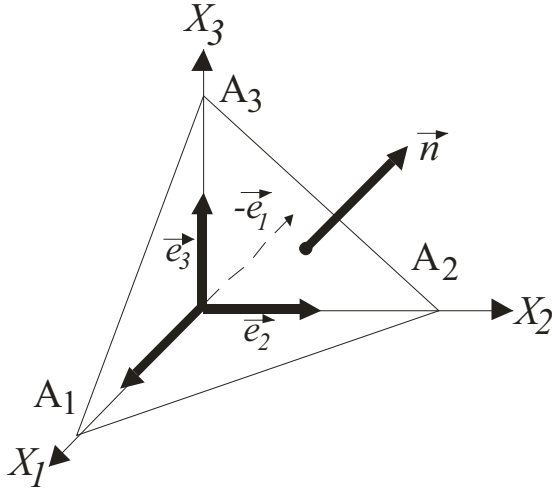


Рис. 1.6. Напряжение, действующее на элементарный тетраэдр

Пусть точка M – произвольная точка тела. Поместим ее для простоты в начало системы координат (рис. 1.6).

Проведем плоскость, отсекающую на координатных осях отрезки MA_1 , MA_2 , MA_3 . Тогда элементарный объем ΔV будет представлять собой тетраэдр, ограниченный тремя координатными плоскостями: MA_2A_3 , MA_3A_1 , MA_1A_2 и плоскостью $A_1A_2A_3$. Ориентация каждой из этих плоскостей определяется единичным внешним нормальным вектором.

Рассмотрим плоскость MA_2A_3 . Так как это координатная плоскость, то единичный внешний нормальный вектор к ней \vec{n}_1 будет равен $-\vec{e}_1$; $\vec{n}_1 = -\vec{e}_1$; аналогично для плоскостей MA_3A_1 ($\vec{n}_2 = -\vec{e}_2$) и MA_1A_2 ($\vec{n}_3 = -\vec{e}_3$).

Площади этих граней обозначим ΔS_1 , ΔS_2 , ΔS_3 .

$$\left\{ \begin{array}{l} MA_2A_3 \rightarrow \Delta S_1 \rightarrow \vec{n}_1 = -\vec{e}_1 \\ MA_3A_1 \rightarrow \Delta S_2 \rightarrow \vec{n}_2 = -\vec{e}_2 \\ MA_1A_2 \rightarrow \Delta S_3 \rightarrow \vec{n}_3 = -\vec{e}_3 \\ A_1A_2A_3 \rightarrow \Delta S \rightarrow \vec{n} \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Нормаль к плоскости обозначим $A_1A_2A_3$ \vec{n} , а ее площадь – ΔS .

Рассмотрим силы, которые действуют на такой элементарный объем. Это следующие силы:

- объемная сила $\Delta \vec{f} = \Delta \vec{f} \cdot \Delta V$ (\vec{f} – объемное напряжение, т. е. сила, действующая на единицу объема);
- силы напряжения
 грань $MA_2A_3 \rightarrow \Delta \vec{P} = \vec{P}_1 \cdot \Delta S_1$;
 грань $MA_3A_1 \rightarrow \Delta \vec{P} = \vec{P}_2 \cdot \Delta S_2$;

грань $MA_1A_2 \rightarrow \Delta \vec{P} = \vec{P}_3 \cdot \Delta S_3$;

грань $A_1A_2A_3 \rightarrow \Delta \vec{P} = \vec{P} \cdot \Delta S$.

Здесь $\vec{P}, \vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ – напряжения, действующие на каждую грань тетраэдра. Они связаны с внешними нормальными этими граней вектор-функцией $\vec{\sigma}$. Т. е., разложив по осям $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$, запишем

$$\begin{cases} \vec{P}^1 = \vec{\sigma}^1(\vec{n}_1) = \sigma_1^1 \cdot \vec{e}_1 + \sigma_2^1 \cdot \vec{e}_2 + \sigma_3^1 \cdot \vec{e}_3; \\ \vec{P}^2 = \vec{\sigma}^2(\vec{n}_1) = \sigma_1^2 \cdot \vec{e}_1 + \sigma_2^2 \cdot \vec{e}_2 + \sigma_3^2 \cdot \vec{e}_3; \\ \vec{P}^3 = \vec{\sigma}^3(\vec{n}_1) = \sigma_1^3 \cdot \vec{e}_1 + \sigma_2^3 \cdot \vec{e}_2 + \sigma_3^3 \cdot \vec{e}_3; \\ \vec{P} = \vec{\sigma}(\vec{n}) = \sigma_1 \cdot \vec{e}_1 + \sigma_2 \cdot \vec{e}_2 + \sigma_3 \cdot \vec{e}_3. \end{cases} \quad (1.3)$$

Так как рассматриваемый объем находится в статическом равновесии, то сумма всех сил равна нулю. Т. е. имеет место равенство (мы рассматриваем изнутри объема ΔV):

$$\vec{f} \cdot \Delta V - \vec{P}_1 \Delta S_1 - \vec{P}_2 \Delta S_2 - \vec{P}_3 \Delta S_3 + \vec{P} \Delta S = 0. \quad (1.4)$$

Обычно объемные силы имеют второй порядок малости по сравнению с силами напряжения. Поэтому величиной $\vec{f} \Delta V$ можно пренебречь. Тогда условие равновесия можно записать в виде

$$\vec{P} \Delta S = \vec{P}_1 \Delta S_1 + \vec{P}_2 \Delta S_2 + \vec{P}_3 \Delta S_3 = \sum_{i=1}^3 \vec{P}_i^j \cdot \Delta S_i. \quad (1.5)$$

Здесь индексом i мы обозначили номер координатных граней, а вектора напряжения индексом j .

Отсюда можно выразить напряжение P , действующее на грань $A_1A_2A_3$

$$\vec{P} = \sum_{j=1}^3 \vec{P}_i^j \frac{\Delta S_i}{\Delta S}. \quad (1.6)$$

Или

$$\vec{P} = \sum_{j=1}^3 \sigma^j(\vec{e}_i) \frac{\Delta S_i}{\Delta S}. \quad (1.7)$$

В этом выражении $\frac{\Delta S_i}{\Delta S}$ – это направляющие косинусы нормали \vec{n} .

$\frac{\Delta S_1}{\Delta S} = \cos \alpha_1$; $\frac{\Delta S_2}{\Delta S} = \cos \alpha_2$; $\frac{\Delta S_3}{\Delta S} = \cos \alpha_3$, т. е. это координаты единичного вектора \vec{n} , обозначим $\vec{n}_1 = \cos \alpha_1 \cdot \vec{e}_1$; $\vec{n}_2 = \cos \alpha_2 \cdot \vec{e}_2$; $\vec{n}_3 = \cos \alpha_3 \cdot \vec{e}_3$.

Тогда:

$$\vec{n} = \cos \alpha_1 \cdot \vec{e}_1 + \cos \alpha_2 \cdot \vec{e}_2 + \cos \alpha_3 \cdot \vec{e}_3.$$

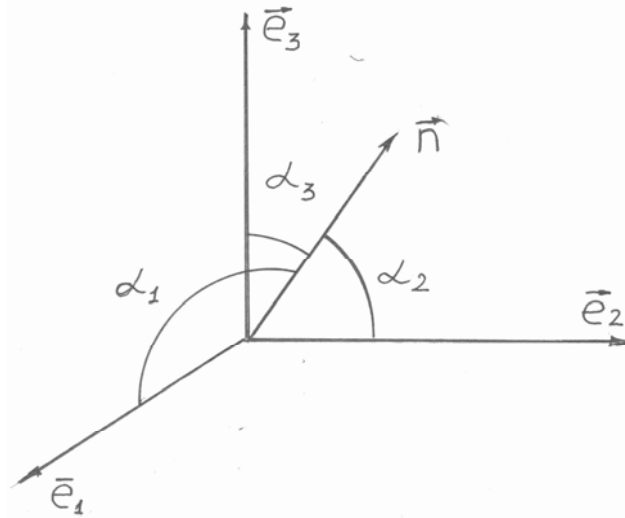


Рис. 1.7

Направляющие косинусы удовлетворяют условию $\cos \alpha_1^2 + \cos \alpha_2^2 + \cos \alpha_3^2 = 1$.

Тогда запишем

$$\vec{P} = \sum_{j=1}^3 \vec{\sigma}(\vec{e}_j) \cdot \vec{n}_j. \quad (1.8)$$

Если учесть что $\vec{\sigma}^j = \sum_{i=1}^3 \sigma_i^j \cdot \vec{e}_i$, то получим

$$\vec{P} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \sigma_i^j \cdot \vec{e}_i \cdot \vec{n}_j. \quad (1.9)$$

Вектор \vec{P} также раскладывается по базису $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$

$$\vec{P} = P_1 \cdot \vec{e}_1 + P_2 \cdot \vec{e}_2 + P_3 \cdot \vec{e}_3 = \sum_i P_i \vec{e}_i.$$

Окончательно мы можем записать

$$\sum_i P_i \vec{e}_i = \sum_i \sum_j \sigma_{ij} \cdot \vec{e}_i \cdot n_j. \quad (1.10)$$

Левая и правая части здесь представляют собой разложение по базису $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ равных векторов. А раз векторы равны, равны и их компоненты.

Отсюда следует, что

$$P_i = \sum_j \sigma_{ij} \cdot n_j. \quad (1.11)$$

Это фундаментальные формулы Коши. Они обозначают, что каждая компонента напряжения \vec{P} к поверхности $A_1 A_2 A_3$ линейно зависит от нормали \vec{n} к этой поверхности.

Следовательно, σ – это есть линейная вектор-функция с компонентами σ_{ij} .

Матрица коэффициентов этой функции образует тензор второго ранга, который называется **тензором напряжений**.

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (1.12)$$

Этот тензор является симметричным, т. е. $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Диагональные элементы $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$, **называются нормальными компонентами**, т. к. определяемые ими составляющие векторов \vec{P}_i действуют \perp координатным плоскостям.

Компоненты $\sigma_{12} = \sigma_{21}$, $\sigma_{23} = \sigma_{32}$, $\sigma_{13} = \sigma_{31}$ **называются сдвиговыми компонентами**, т. к. определяемые ими составляющие векторов \vec{P}_i действуют параллельно координатным плоскостям.

При всех преобразованиях системы координат имеются характеристики тензора, сохраняющие свои значения. Их называют **инвариантами**.

Таких характеристик три.

$J_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sum_i \sigma_{ii}$ – след матрицы (или тензора);

$$J_{11} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{13} \\ \sigma_{31} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix};$$

$$J_{111} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}.$$

Т. к. тензор напряжений σ_{ij} является симметричным, то он может быть приведен к диагональному виду:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}$$

при помощи ортогонального преобразования (т. е. выбором положения ортогональной системы координат). При этом сдвиговые компоненты σ_{ij} обращаются в нуль, а **вновь полученные нормальные компоненты называются собственными значениями** этого тензора. Их обозначают $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Направления координатных осей, при которых σ_{ij} становится диагональным, называются **главными направлениями тензора напряжений**.

Выделяют несколько частных форм тензора напряжений:

- **линейное напряженное состояние** (одноосное напряжение) – характеризуется тензором вида

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (1.13)$$

Такое строение тензор напряжения имеет, например, в длинном, однородном, вертикальном стержне, к концу которого подвешен груз.

- **плоское напряженное состояние** (двухосное напряжение) – характеризуется тензором вида

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (1.14)$$

Примером плоского напряжения является чистый сдвиг, при котором тензор напряжения имеет вид: $(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} -\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$.

- **объемное напряженное состояние** (трехосное напряжение) – наиболее общий случай, когда отличны от нуля все главные напряжения:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}. \quad (1.15)$$

Частным случаем является гидростатическое сжатие. В этом случае тензор напряжения является шаровым:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij},$$

где P – давление, постоянное в рассматриваемом объеме жидкости.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j \\ 0, & \text{при } i \neq j \end{cases} \text{ – символы Кронекера.}$$

Т. е.

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{vmatrix}.$$

Тензор деформации

Таким образом, напряжения, возникающие в твердом теле под действием внешних и внутренних сил, описываются тензором напряжений, компоненты которого задаются матрицей (σ_{ij}) .

Под действием сил напряжения каждая точка тела будет смещаться из своего равновесного положения.

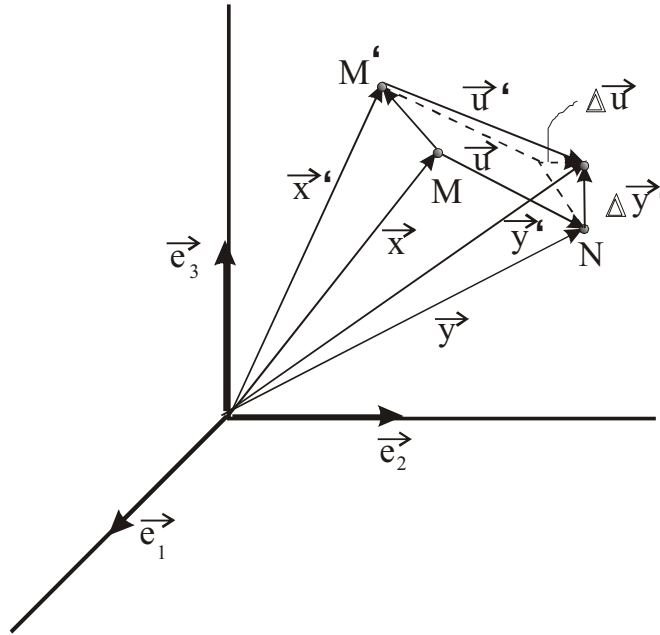


Рис. 1.8

Рассмотрим снова точку M с радиусом \vec{x} , как показано на рис. 1.8. В результате смещения она перейдет в точку N с радиус-вектором \vec{y} . Вектор смещения мы обозначим \vec{u} . Очевидно, что $\vec{y} = \vec{x} + \vec{u}$. В общем случае смещение каждой точки зависит от ее положения в теле. Т. е. $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x})$.

Каждая точка M' ближайшей окрестности точки M также переместится в новое положение N' . Но т. к. $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x})$, то перемещение точки M' с радиус-вектором $\vec{x}' = \vec{x} + \Delta\vec{x}$ будет равно

$$\vec{u}' = \vec{u}(\vec{x} + \Delta\vec{x}) = \vec{u}(\vec{x}) + \Delta\vec{u}.$$

Радиус-вектор т. N' равен

$$\vec{y}' = \vec{y} + \Delta\vec{y}.$$

Из рисунка видно, что

$$\Delta\vec{u} = \vec{u}' - \vec{u} = \vec{y}' - \vec{x}' - \vec{y} + \vec{x} = \Delta\vec{y} - \Delta\vec{x}.$$

Вектор $\Delta\vec{u}$ определяет разницу в смещениях ближайших точек (M и M'). Если $\Delta\vec{u} = 0$, то ближайшие точки сместятся также как M . Т. е. элементарный объем ΔV сместится без изменения величины и формы, т. е. он не будет деформироваться.

На самом же деле, из-за наличия зависимости $\vec{u}(\vec{x})$ $\Delta\vec{u} \neq 0$ и разные точки окрестности т. M будут смещаться по-разному. Т. е. в общем случае объем ΔV будет деформироваться.

Величина и направление этой деформации будет определяться вектором $\Delta\vec{u}$.

В линейной теории рассматривают **однородную деформацию**, т. е. вектор $\Delta \vec{u}$ считают независимым от положения точки M в теле, зависящем только от расстояния между соседними точками $\Delta \vec{x}$. Т. е.

$$\Delta \vec{u} = \vec{E}(\Delta \vec{x}).$$

Здесь \vec{E} также является линейной вектор-функцией, связывающей между собой два вектора $\Delta \vec{u}$ и $\Delta \vec{x}$. Следовательно, она должна иметь 9 компонент.

Если Δu_i и Δx_i – координаты векторов $\Delta \vec{u}$ и $\Delta \vec{x}$ в ортонормированном базисе $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$, то для i -й координаты вектора $\Delta \vec{u}$ мы должны записать

$$\Delta u_i = \sum_j E_{ij} \Delta x_j.$$

По аналогии с тензором напряжений $\vec{\sigma}_{ij}$ функцию \vec{E}_{ij} **называют тензором деформации**. Она имеет 9 компонент, задаваемых матрицей

$$(E_{ij}) = \begin{vmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{vmatrix}.$$

Тензор \vec{E}_{ij} описывает не только деформацию окрестности т. M , но и вращение объема ΔV . А т. к. вращение не сопровождается деформацией, то из \vec{E}_{ij} выделяют часть, соответствующую чистой деформации. Тогда

$$\vec{E}_{ij} = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij}.$$

Здесь часть ω_{ij} – тензор, описывающий чистое вращение. Поэтому обычно рассматривают только часть ε_{ij} , которая и называется собственно тензором деформации с компонентами

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix}.$$

Компонента ε_{11} определяет удлинение тела вдоль направления \vec{e}_1 , а компоненты $\varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$, соответственно, удлинение по направлениям \vec{e}_2, \vec{e}_3 .

Эти компоненты $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$ называются **нормальными компонентами**.

Компоненты ε_{ij} при $i \neq j$ называются **сдвиговыми компонентами**.

Тензор ε_{ij} также является симметричным, т. е. $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, поэтому может быть приведен к диагональному виду.

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix}.$$

В этом случае диагональные элементы называются **главными коэффициентами тензора деформации**, а направления осей системы координат, при которых тензор деформации становится диагональным, называются **главными направлениями деформации**.

Главные направления характеризуются тем, что они остаются взаимно-ортогональными при деформации.

Таким образом, мы увидели, что тензоры напряжения и деформации имеют по 9 компонент.

Однако вследствие их симметричности независимых компонентов оказывается всего 6.

$$(\varepsilon_{ij}) = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix};$$

$$(\sigma_{ij}) = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix}.$$

Поэтому матрицы σ и ε записывают еще в другом виде, вводя обозначения:

$\sigma_{11} = \sigma_1$, $\sigma_{22} = \sigma_2$, $\sigma_{33} = \sigma_3$, $\sigma_{23} = \sigma_{32} = \sigma_4$, $\sigma_{31} = \sigma_{13} = \sigma_5$, $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_6$.
Комбинацию индексов i, j обозначают индексом α . Где $\alpha = 1, \dots, 6$. Аналогично для тензора деформации:

$$(\varepsilon_\beta) = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_6 & \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 & \varepsilon_2 & \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 & \varepsilon_4 & \varepsilon_3 \end{vmatrix};$$

$$(\sigma_\alpha) = \begin{vmatrix} \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{vmatrix}.$$

Закон Гука

Очевидно, что деформация и напряжения в теле связаны между собой. Эта связь дается **обобщенным законом Гука**, который имеет вид

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}; \\ \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}. \end{cases}$$

где C_{ijkl} – называется тензором модулей упругости (4-го ранга);

S_{ijkl} – тензор упругой податливости (4-го ранга).

В общем случае тензоры C_{ijkl} и S_{ijkl} имеют по 81 компоненте (3^4).

Однако, т. к. ε_{ij} и σ_{ij} симметричны, то это перейдет и в C_{ijkl} и S_{ijkl} , в следующем виде

$$\begin{cases} C_{ijkl} = C_{jikl}; \\ C_{ijkl} = C_{ijlk}. \\ S_{ijkl} = S_{jikl}; \\ S_{ijkl} = S_{ijlk}. \end{cases}$$

Такая симметрия уменьшает количество независимых компонент до $36=6 \times 6$. Записать матрицу размерности 3^4 невозможно. Поэтому для инженерных расчетов используют двумерную матрицу с использованием индексов α и β .

Тогда получим, заменяя $C_{ijkl} = C_{\alpha\beta}$, $ij = \alpha$, $kl = \beta$

$$(E_{\alpha\beta}) = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix}$$

Однако тензоры C_{ijkl} и S_{ijkl} оказываются еще и симметричными по перестановке индексов, т. е. $C_{ijkl} = C_{klij}$ или $C_{\alpha\beta} = C_{\beta\alpha}$. С учетом этой симметрии количество независимых компонент уменьшается до 21.

При появлении в теле других симметрий количество независимых компонент еще будет уменьшаться.

Если мы возьмем изотропное тело, то такая среда обладает максимальной симметрией и количество независимых компонент уменьшается до 2-х. Эти две независимые компоненты называются **константами Ламе λ и μ** , которые называются **модулями упругости**. Они всегда >0 .

Все остальные компоненты тензора модулей упругости C_{ijkl} выражаются через λ и μ .

$$C_{ijkl} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk}),$$

где δ_{ij} – символы Кронекера $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ при } i = j \\ 0, \text{ при } i \neq j \end{cases}$

В матричном выражении

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{12}^{(1122)} = C_{13}^{(1133)} = C_{23}^{(2233)} = C_{31}^{(3311)} = C_{32}^{(3322)} = \lambda \\ C_{44}^{(2332)} = C_{55}^{(1331)} = C_{66}^{(1221)} = \mu \\ C_{11}^{(1111)} = C_{22}^{(2222)} = C_{33}^{(3333)} = \lambda + 2\mu \end{array} \right.$$

Остальные коэффициенты матрицы модулей упругости равны нулю.

Иногда закон Гука записывают в другом виде, выражая ε и σ через индексы α и β . Получается система уравнений

$$\begin{aligned} \sigma_1 = C_{1\beta} \cdot \varepsilon_\beta &= \sum_{\beta=1}^6 C_{1\beta} \cdot \varepsilon_\beta = C_{11} \cdot \varepsilon_1 + C_{12} \cdot \varepsilon_2 + C_{13} \cdot \varepsilon_3 + C_{14} \cdot \varepsilon_4 + \\ &+ C_{15} \cdot \varepsilon_5 + C_{16} \cdot \varepsilon_6 = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_1 + \lambda \cdot \varepsilon_2 + \lambda \cdot \varepsilon_3. \end{aligned}$$

То есть имеем

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = (\lambda + 2\mu) \cdot \varepsilon_1 + \lambda \cdot \varepsilon_2 + \lambda \cdot \varepsilon_3; \\ \sigma_2 = \lambda \cdot \varepsilon_1 + (\lambda + 2\mu) \cdot \varepsilon_2 + \lambda \cdot \varepsilon_3; \\ \sigma_3 = \lambda \cdot \varepsilon_1 + \lambda \cdot \varepsilon_2 + (\lambda + 2\mu) \cdot \varepsilon_3; \\ \sigma_4 = \mu \cdot \varepsilon_4; \\ \sigma_5 = \mu \cdot \varepsilon_5; \\ \sigma_6 = \mu \cdot \varepsilon_6. \end{array} \right. \quad (1.16)$$

λ и μ это модули упругости, которые приводятся в справочниках для различных материалов. Они полностью определяют упругие свойства изотропного тела.

Однако часто используют другие упругие постоянные:

Модуль продольной упругости (или модуль Юнга).

E – это нагрузка, которую необходимо приложить к образцу с площадью поперечного сечения 1 м^2 , 1 см^2 , 1 мм^2 для того, чтобы его длина удвоилась.

$$[E] = \frac{\text{н}}{\text{м}^2}; \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}. \text{ } E \text{ может быть выражен через } \lambda \text{ и } \mu$$

$$E = \mu \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}. \quad (1.17)$$

Коэффициент Пуассона.

σ – отношение относительного удлинения упругого стержня, при приложении к нему растягивающего усилия, к его относительному поперечному сжатию, которое при этом происходит.

$[\sigma]$ – безразмерная величина.

$$\sigma \text{ может быть выражен через } \lambda \text{ и } \mu \rightarrow \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}.$$

Модуль объемного сжатия.

$K_{сж.}$ – сила, которую необходимо приложить к образцу с площадью поперечного сечения $1 \text{ м}^2, 1 \text{ см}^2$ для того, чтобы уменьшить его объем в 2 раза

$$K_{сж.} = \lambda + \frac{2}{3}\mu.$$

Модуль сдвига.

$[G]=\text{Н/м}^2; \text{дин/см}^2.$

G – это есть собственно коэффициент μ ($G = \mu$).

Так как тело описывается двумя коэффициентами, то используют пары: λ и μ , E и σ , K и μ .

Значительно чаще в справочниках упругие свойства материалов описываются величинами E и σ . Поэтому коэффициенты тензора модулей упругости также могут быть выражены через E и σ , но для этого от E и σ надо перейти к λ и μ . Этот переход описывается формулами

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1-2\sigma)(1+\sigma)}; \quad (1.18)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}. \quad (1.19)$$

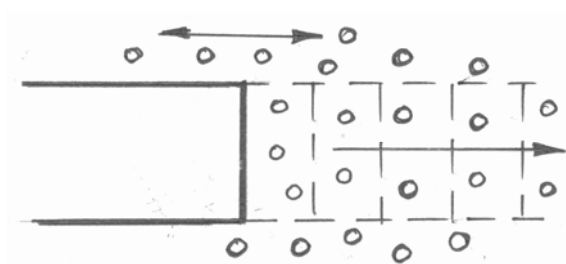
Все эти модули упругости являются положительными величинами. Это обуславливает определенные закономерности в поведении твердого тела. Так, например, $\sigma > 0$ означает, что продольное растяжение всегда сопровождается поперечным сжатием.

Связь между напряжениями и деформациями можно считать линейной только при бесконечно малых деформациях ε_{ij} . При больших напряжениях возникают большие деформации, и связь $\Delta\vec{u} = \vec{\varepsilon}(\Delta\vec{x})$ уже не будет линейной. Такие вопросы рассматривает нелинейная теория упругости.

Продольные и поперечные волны в изотропном твердом теле

Наличие упругих свойств у среды обеспечивает появление в ней упругих волн.

Рассмотрим жидкость или газ. Эти среды принимают форму сосуда, в который их помещают, т. е. они не обладают упругостью формы.



Возьмем в такой среде поршень и будем его перемещать.

При этом смещается только объем около поршня. Слои за пределами поршня не смещаются. Следовательно, в газе и жидкости

могут возникать только продольные волны. В твердом теле смещения в слое вызовут напряжения в соседних слоях. Эти напряжения вызовут смещения в соседних слоях, направление которых не будет совпадать с направлением движения поршня, т. е. появятся перпендикулярные составляющие смещения, т. е. поперечные волны.

Математически движение тела под действием силы описывают вторым законом Ньютона.

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (1.20)$$

При анализе непрерывной среды все величины относят к единичному объему. Т. к. масса единичного объема – это плотность, то вместо m будет ρ . Сила F определяется в нашем случае напряжением, которое описывается тензором напряжения σ . Но σ связана с единицей поверхности. Чтобы получить силу на единицу объема, необходимо σ отнести к x (σ/x) или в элементарных величинах роль силы будет играть $\frac{d\sigma}{dx}$.

Перемещение мы описываем вектором \vec{u} . Следовательно, второй закон Ньютона для единичного объема запишется в виде

$$\rho \frac{d^2u_i}{dt^2} = \frac{d\sigma_{ij}}{dx_j}$$

это для i -й компоненты вектора \vec{u}

В свою очередь

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}.$$

Следовательно,

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dx_j} = C_{ijkl} \frac{d\varepsilon_{kl}}{dx_j}.$$

По определению, тензор деформации ε_{kl} связывает смещение Δ_u с изменением положения точки в пространстве Δ_x , т. е.

$$\varepsilon_{kl} = \frac{\Delta u_k}{\Delta x_l} = \frac{du_k}{dx_l}.$$

Тогда получим

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dx_j} = C_{ijkl} \frac{d^2u_k}{dx_j dx_l}.$$

Тогда второй закон Ньютона будет иметь вид

$$\rho \frac{d^2u_i}{dt^2} = C_{ijkl} \frac{d^2u_k}{dx_j dx_l}. \quad (1.21)$$

Компоненты тензора модулей упругости C_{ijkl} определяются модулями упругости λ и μ . Подставив эту связь, получим:

$$\begin{aligned}\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} &= \left[\lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} + \mu \cdot (\delta_{ik} \cdot \delta_{jl} + \delta_{il} \cdot \delta_{jk}) \right] \cdot \frac{d^2 u_k}{dx_j dx_l} = \\ &= \lambda \delta_{ij} \cdot \delta_{kl} \cdot \frac{d^2 u_k}{dx_j dx_l} + \mu \cdot \delta_{il} \cdot \delta_{jk} \cdot \frac{d^2 u_k}{dx_j \cdot dx_l} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} \cdot \frac{d^2 u_k}{dx_j dx_l} \cdot i.\end{aligned}$$

Рассмотрим эти члены:

1-й член отличен от 0 только при условии $i=j, k=l$. Поэтому эти индексы можно менять. Получим $\lambda \frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k}$;

2-й член $i=l, j=k \rightarrow \mu \frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k}$;

3-й член $i=k, j=l \rightarrow \mu \frac{d^2 u_i}{dx_j^2}$.

В результате получается

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \lambda \frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k} + \mu \frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k} + \mu \frac{d^2 u_i}{dx_j^2}. \quad (1.22)$$

Или

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \mu \frac{d^2 u_i}{dx_j^2} + (\lambda + \mu) \frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k}. \quad (1.23)$$

Здесь

$$\begin{aligned}\frac{d^2 u_k}{dx_i dx_k} &= \frac{d}{dx_i} \left(\frac{du_k}{dx_k} \right) \rightarrow \text{grad div } \vec{u}; \\ \frac{d^2 u_i}{dx_j^2} &= \frac{d}{dx_j} \left(\frac{du_i}{dx_j} \right) = \frac{d}{dx_j} (\nabla \vec{u}_i) \rightarrow \nabla^2 \vec{u} = \Delta \vec{u}.\end{aligned}$$

Таким образом, получим в векторной форме:

$$\rho \frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} = (\lambda + \mu) \text{grad div} \cdot \vec{u} + \mu \cdot \Delta \vec{u}.$$

Из векторной алгебры известно, что

$$\Delta \vec{u} = \text{grad div} \vec{u} - \text{rot rot} \vec{u}.$$

Подставим

$$\rho \frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} = (\lambda + \mu) \cdot \text{grad div} \cdot \vec{u} + \mu \cdot \text{grad div} \cdot \vec{u} - \mu \cdot \text{rot rot} \cdot \vec{u}$$

или

$$\rho \frac{d^2 \vec{u}}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \cdot \text{graddiv} \cdot \vec{u} - \mu \cdot \text{rotrot} \cdot \vec{u}.$$

Это есть **уравнение состояния для изотропного твердого тела**. Оно описывает поведение во времени и пространстве вектора \vec{u} .

В теории полей существует теорема Гельмгольца, которая утверждает, что любое непрерывное векторное поле \vec{u} может быть представлено в виде суммы **потенциального и вихревого полей**. Причем это представление единственно.

1. Вектор потенциального (линейного) поля – \vec{u}_l .
2. Вектор вихревого (тангенциального) поля – \vec{u}_t .

Причем \vec{u}_l и \vec{u}_t удовлетворяют условиям:

- \vec{u}_l не содержит вращения, т. е. $\text{rot} \vec{u}_l = 0$;
- \vec{u}_t не содержит линейных перемещений, т. е. $\text{div} \vec{u}_t = 0$.

Т. е.

$$\vec{u} = \vec{u}_l + \vec{u}_t.$$

Подставим это в уравнение состояния

$$\rho \frac{d^2 (\vec{u}_l + \vec{u}_t)}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \text{graddiv} \cdot (\vec{u}_l + \vec{u}_t) - \mu \cdot \text{rotrot} \cdot (\vec{u}_l + \vec{u}_t).$$

Так все операции здесь линейны, то уравнение распадается на два.

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \text{graddiv} \cdot \vec{u}_l - \mu \cdot \text{rotrot} \cdot \vec{u}_l; \\ \rho \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \text{graddiv} \cdot \vec{u}_t - \mu \cdot \text{rotrot} \cdot \vec{u}_t. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \text{graddiv} \cdot \vec{u}_l; \\ \rho \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} = -\mu \cdot \text{rotrot} \cdot \vec{u}_t. \end{cases}$$

Вспомним, что

$$\Delta \vec{u} = \text{graddiv} \cdot \vec{u} - \text{rotrot} \cdot \vec{u}.$$

Тогда

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) [\Delta \vec{u}_l + \text{rotrot} \cdot \vec{u}_l]; \\ \rho \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} = -\mu \cdot [\text{graddiv} \cdot \vec{u}_t - \Delta \vec{u}_t]. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} = (\lambda + 2\mu) \cdot \Delta \vec{u}_l; \\ \rho \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} = -\mu \cdot \Delta \vec{u}_t. \end{cases}$$

Запишем эти уравнения в виде обычных дифференциальных уравнений 2-го порядка.

$$\begin{cases} \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} - \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \cdot \Delta \vec{u}_l = 0; \\ \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} - \frac{\mu}{\rho} \cdot \Delta \vec{u}_t = 0. \end{cases}$$

Это однородные дифференциальные уравнения 2-го порядка. Они описывают волновой процесс в пространстве и времени.

В этих уравнениях вводят обозначения

$$\begin{aligned} \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} &= C_l^2; \\ \frac{\mu}{\rho} &= C_t^2. \end{aligned}$$

C_l – называют **скоростью распространения линейных или продольных волн**.

C_t – называют **скоростью распространения тангенциальных или поперечных волн**.

Тогда уравнения принимают вид

$$\begin{cases} \frac{d^2 \vec{u}_l}{dt^2} - C_l^2 \cdot \Delta \vec{u}_l = 0; \\ \frac{d^2 \vec{u}_t}{dt^2} - C_t^2 \cdot \Delta \vec{u}_t = 0. \end{cases}$$

Так как константы Ламе всегда положительны, то всегда справедливо равенство

$$\begin{aligned} C_l &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; \\ C_t &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \\ C_l &\geq \sqrt{2} \cdot C_t, \end{aligned}$$

то есть скорость распространения продольных волн всегда больше скорости распространения поперечных волн. Для большинства твердых тел выполняется условие

$$C_l \approx 0,55 \cdot C_t.$$

Если вместо λ и μ подставить E и σ , то получим

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}};$$

$$C_t = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma) \cdot (1-2\sigma)}}. \quad (1.24)$$

Для большинства металлов μ составляет 0,38–0,40 от величины модуля Юнга E , а $\sigma=0,25-0,35$. Продольные и поперечные волны могут существовать в неорганических телах и называются **объемными волнами**.

В различных физических средах скорости продольных волн существенно отличаются.

Так для газа – $C=300-400$ м/с;

жидкость – $C=1000-1500$ м/с;

твердое тело – $C=4000-6000$ м/с.

Для некоторых основных материалов физические характеристики приведены табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения физических характеристик для некоторых материалов

Материал	Модуль упругости E (Мн/м ²) · 10 ⁻³	Плотность ρ (кг/м ³) · 10 ⁻³	Коэффициент Пуассона σ	Скорость звука (м/с)		Удельное волновое сопротивление (кг/(м ² ·с)) · 10 ⁻⁶
				C_l	C_t	
1	2	3	4	5	6	7
Алюминий	7,1	2,7	0,34	6260	3080	16,9
Вольфрам	36,2	19,1	0,35	5460	2620	104,2
Углеродистая сталь	20,4	7,8	0,28	5850	3230	45,6
Молибденовая сталь	18,6	8,4	0,28	5320	2950	44,5
Чугун	20,5	8,8	0,27	3500–5600	2200–3200	29,0
Никель	12,5	8,9	0,31	5630	2960	41,8–49,5
Медь	12,5	8,9	0,35	4700	2260	24,2–41,8
Олово	5,5	7,3	0,39	3320	1670	24,2
Титан	19,8	4,5	–	6000	3500	27,0
Магний	4,1	1,74	0,33	4600	2200	7,82
Полистирол	–	1,1	–	2370	1120	2,61
Стекло органическое	–	1,18	–	2670	1120	3,14
Резина	–	0,9	–	1480	–	1,4

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Эбонит	–	1,3	–	240	–	3,12
Эпоксидная смола	–	1,1	–	2600	–	2,86
Фторопласт	–	2,2	–	1350	–	3,5
Вода	–	0,998	–	1490	–	1,49
Масло трансформаторное	–	0,9–0,92	–	1380–1400	–	1,25–1,27
Спирт	–	0,79	–	1200	–	0,92
Воздух	–	$1,3 \cdot 10^{-3}$	–	331	–	$4,3 \cdot 10^{-4}$
Водород	–	$0,9 \cdot 10^{-4}$	–	1248	–	$1,1 \cdot 10^{-4}$

В монокристаллических твердых телах скорость звука зависит от направления распространения волны в кристалле. В тех направлениях, в которых возможно распространение чистых продольных и чистых поперечных волн, в общем случае имеется одно значение для продольной волны и два для поперечной. Если значения поперечных волн различны, то соответствующие волны называются быстрой и медленной поперечной волной.

В металлах и сплавах скорость звука существенно зависит от обработки, которой был подвергнут металл: прокат, ковка, отжиг и т. п.

В металлах, как правило, скорость звука уменьшается с увеличением температуры. При переходе металла в сверхпроводящее состояние этот характер зависимости меняется: в точке перехода изменяется знак величины $\partial c / \partial T$. В сильных магнитных полях проявляются некоторые тонкие эффекты в зависимости скорости звука от магнитного поля, которые отражают особенности поведения электронов в монокристалле металла.

В металлах, как правило, скорость звука уменьшается с увеличением температуры. При переходе металла в сверхпроводящее состояние этот характер зависимости меняется: в точке перехода изменяется знак величины $\partial c / \partial T$. В сильных магнитных полях проявляются некоторые тонкие эффекты в зависимости скорости звука от магнитного поля, которые отражают особенности поведения электронов в монокристалле металла.

В металлах, как правило, скорость звука уменьшается с увеличением температуры. При переходе металла в сверхпроводящее состояние этот характер зависимости меняется: в точке перехода изменяется знак величины $\partial c / \partial T$. В сильных магнитных полях проявляются некоторые тонкие эффекты в зависимости скорости звука от магнитного поля, которые отражают особенности поведения электронов в монокристалле металла.

В пьезоэлектриках и сегнетоэлектриках скорость звука определяется не только модулями упругости, но и пьезомодулем и проводимостью

вещества: наличие электромеханической связи делает вещество менее жестким и, следовательно, уменьшает его скорость звука.

§ 1.3. Скорость звука в газах и жидкостях

Скорость звука в газах определяется формулой:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{\text{из}} \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\chi}{\beta_{\text{ад}} \cdot \rho}}, \quad (1.25)$$

где $\beta_{\text{из}}$ и $\beta_{\text{ад}}$ – изотермическая и адиабатическая сжимаемости,
 ρ – плотность,

$\chi = C_p/C_v$ – отношение удельных теплоемкостей. Согласно формулам:

$$\beta_{\text{ад}} = -\frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T,$$

где V – молярный объем, M – молекулярный вес

Получаем

$$c = \sqrt{-\chi \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T \frac{V^2}{M}}. \quad (1.26)$$

Согласно уравнениям для идеальных газов получаем:

$$c = \sqrt{\frac{RT\chi}{M}}; \quad (1.27)$$

$$c = \sqrt{\frac{p\chi}{\rho}}. \quad (1.28)$$

Эти формулы пригодны для той температуры, при которой измерены p и ρ . Известно, что $p/\rho = (p_0/\rho_0)/(1 + \alpha t)$, тогда

$$c_T = \sqrt{\frac{p_0\chi(1 + \alpha t)}{\rho_0}}. \quad (1.29)$$

Для сухого атмосферного при 0°C и при $p=1 \text{ атм}$, $\rho_0=0.001293 \text{ г/см}^3$, тогда

$$c_{\% \text{ "КЗБ}} = 331,3\sqrt{1 + \alpha t}. \quad (1.30)$$

Согласно формуле скорость звука пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры. Для сухого атмосферного воздуха справедливо соотношение:

$$c = 20,067 T^{1/2}.$$

Процесс распространения звука в жидкостях аналогичен процессу распространения звуковых колебаний в газах, распространение колеба-

ний происходит адиабатически. То есть скорость изменения давления так велика, что теплообменом между соседними частицами среды можно пренебречь. Скорость распространения звука аналогично газам определяется выражением

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ад} \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\chi}{\beta_{уз} \cdot \rho}}. \quad (1.31)$$

Скорость звука в жидкостях больше чем скорость звука в газах. Так же как и в газах скорость звука в жидкостях зависит от температуры. Как правило, она уменьшается с ростом температуры, и изменение температуры на один градус составляет, например, $-5,5$ м/с·град для ацетона и $-3,6$ м/с·град для этилового спирта. Исключением из этого правила является вода, в которой скорость звука при комнатной температуре увеличивается с ростом температуры на $2,5$ м/с·град, достигает максимума при температуре ~ 74 °С и с дальнейшим ростом температуры уменьшается. Скорость звука в воде растет с увеличением давления примерно на $0,01$ % на одну атмосферу; кроме того, скорость звука в воде растет с увеличением содержания растворенных в ней солей. В морской воде скорость звука зависит от температуры, солености и глубины. Эти зависимости имеют сложный вид. Для расчета скорости звука в морской воде используют таблицы, рассчитанные по эмпирическим формулам. Поскольку температура, давление, а иногда и соленость меняются по глубине, то звуковые лучи, распространяющиеся в море, испытывают рефракцию и искривляются, в частности такое явление, как подводный звуковой канал.

Скорость звука в смесях жидкостей зависит от концентрации компонент смеси и имеет довольно сложный характер, который связан с видом межмолекулярных взаимодействий.

В водных растворах солей скорость звука растет с ростом концентрации во всем интервале концентраций. Таким образом, измерения скорости звука могут служить для определения и контроля концентрации компонент смесей и растворов.

§ 1.4. Акустические свойства сред

Энергетические характеристики волн

Независимо от типа волн, все они характеризуются важным параметром – **звуковая энергия**. Полная энергия звуковой волны складывается из кинетической энергии движения частиц среды и внутренней энергии. Плотность кинетической энергии равна

$$E_k = \rho \frac{V^2}{2}. \quad (1.32)$$

В бегущей волне плотность внутренней энергии равна плотности кинетической энергии, поэтому полная плотность энергии равна

$$E = E_k + E_e = \rho \cdot V^2. \quad (1.33)$$

Измеряется в $\frac{\text{дж}}{\text{м}^3}; \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3}$.

Тогда **плотность потока энергии звуковой волны** равна

$$W = C \cdot E = \rho \cdot C \cdot V^2. \quad (1.34)$$

Измеряется в $\frac{\text{дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}; \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$.

Среднее значение энергии за период называют **интенсивностью или силой звука**. Для плоской бегущей гармонической волны интенсивность равна

$$J = \frac{1}{2} W = \frac{1}{2} \rho \cdot C \cdot V^2. \quad (1.35)$$

Величина

$$p = \rho \cdot C \cdot V \quad (1.36)$$

называется **акустическим давлением звуковой волны** и измеряется

в $\frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}^2}; \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$.

Для УЗ дефектоскопии большое значение имеет **удельное волновое сопротивление среды** или **импеданс**, которое выражается как

$$z = \frac{p}{V} = \rho \cdot C. \quad (1.37)$$

Измеряется в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

Коэффициент затухания

Ослабление амплитуды плоской гармонической волны в результате взаимодействия ее со средой происходит по закону $e^{-\delta x}$, где x – путь в среде, а δ – коэффициент затухания. В дальнейшем термин «затухание» будем относить только к ослаблению, учитываемому экспоненциальным множителем, в отличие от уменьшения амплитуды, связанного с расширением волнового фронта, например, в сферической волне.

Величина, обратная коэффициенту затухания, показывает на каком пути амплитуда волны уменьшается в e раз, где e – число Непера, поэтому размерность коэффициента затухания м^{-1} . В литературе иногда эту единицу записывают непер/м (Нп/м), однако ГОСТом такая единица не предусмотрена. Часто коэффициент затухания выражают числом N отрицательных

децибел, на которое уменьшается амплитуда волны на единичном участке пути $x = 1 м \cdot N = 20 \lg e^{-\delta l} = -8,68 \delta \text{дБ} / м$, поэтому $1 м^{-1} = 1 Нп / м = 8,686 \text{дБ} / м$.

Коэффициент затухания складывается из **коэффициентов поглощения** δ_n и **рассеяния** δ_p

$$\delta = \delta_n + \delta_p.$$

При поглощении звуковая энергия переходит в тепловую, а при рассеянии энергия остается звуковой, но уходит из направленно распространяющейся волны.

Поглощение обусловлено вязкостью, **упругим гистерезисом** (т. е. различной упругой зависимостью при расширении и сжатии) и теплопроводностью. Последний механизм поглощения связан с тем, что процесс распространения акустической волны считают адиабатическим. Расширение или сжатие элементарного объема сопровождается изменением температуры, но они настолько кратковременны, что процесс выравнивания температуры можно не учитывать. В действительности теплопроводность существует и способствует потере энергии колебаний. Существуют также другие механизмы поглощения, проявляющиеся при более высоких частотах, чем применяют в акустическом контроле.

Рассеяние происходит из-за наличия в среде неоднородностей (с отличным от среды волновым сопротивлением), размеры которых соизмеримы с длиной волны. Различие в волновых сопротивлениях приводит к отражению волн. Малые размеры и большое число неоднородностей обуславливают статистический характер процесса рассеяния. Такими неоднородностями могут быть, например, капли воды в газе, взвешенные частицы или пузырьки воздуха в воде.

В газах и жидкостях, не засоренных инородными частицами, рассеяние отсутствует и затухание определяется поглощением. Коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В связи с этим в качестве характеристики поглощения звука в жидкостях и газах вводят величину $\delta' = \delta / f^2$.

В случаях, когда в жидкости наблюдается дисперсия скорости ультразвука, квадратичная зависимость δ от частоты нарушается.

Коэффициент поглощения в твердых телах пропорционален f (стекло, биологические ткани, металлы, некоторые пластмассы) или f^2 (резина, многие пластмассы). Для одной и той же среды поглощение поперечных волн при $f = \text{const}$ меньше, чем продольных. Это обусловлено тем, что поперечные колебания не связаны с изменением объема и потери на теплопроводность отсутствуют.

Рассеяние отсутствует в однородных аморфных твердых материалах типа стекла, пластмассы. Слабое рассеяние в них может возникать под влия-

нием внутренних напряжений, вызывающих изменение скорости звука и преломление (отклонение) упругих волн. В гетерогенных материалах (чугун, гранит, бетон) рассеяние весьма велико. Большое рассеяние наблюдают также в большинстве металлов даже при высокой степени их однородности.

Металлы, применяемые на практике, имеют поликристаллическую структуру, они состоят из большого количества **кристаллитов (зерен)** – монокристаллов, не имеющих явно выраженной огранки. Чаще всего кристаллиты ориентированы случайным образом; при переходе ультразвука из одного кристаллита в другой скорость звука из-за анизотропии может измениться в большей или меньшей степени. В результате возникает частичное отражение, преломление ультразвука и трансформация типов волн, что определяет механизм рассеяния.

Чем больше упругая анизотропия кристаллов, тем больше рассеяние. Анизотропию характеризуют параметром упругой анизотропии. В кубическом кристалле он представляет собой меру относительного сопротивления кристаллов, двум типам сдвиговой деформации. Велика анизотропия в меди, цинке, аустенитной (нержавеющей) стали. Мала упругая анизотропия в вольфраме, алюминии. Альфа-железо и углеродистую сталь относят к промежуточным материалам по величине упругой анизотропии и рассеяния.

Большое влияние на величину коэффициента рассеяния в средах оказывает соотношение среднего размера неоднородностей и, среднего расстояния между неоднородностями с длиной волны ультразвука. В металлах параметр среды, влияющий на рассеяние, – средний размер кристаллитов \bar{D} . При $\bar{D} \geq \lambda$ коэффициент δ_p пропорционален f^4 (рэлеевское рассеяние) (рис. 1.10). Общее затухание определяют в этом случае формулой

$$\delta = Af + Bf^4 \bar{D}^3,$$

где A и B – постоянные;

f – частота колебаний.

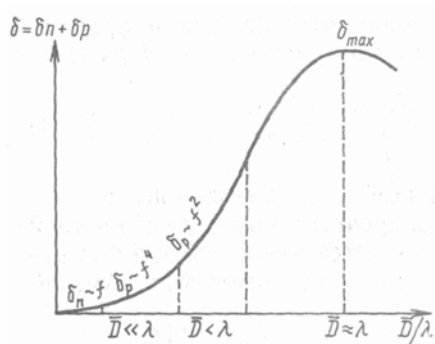


Рис. 1.10. Схематическая зависимость коэффициента затухания от соотношения среднего диаметра зерна и длины волны

Член Af обусловлен поглощением, он имеет превалирующее значение при малых f . В области $4 \leq \lambda/D \leq 10$ коэффициент δ_p пропорционален произведению $\bar{D}f^2$. В разнородных металлах показатель степени при f меняется от 2 до 4. Максимальное затухание наблюдается при $\lambda \approx \bar{D}$.

В углеродистой стали зерна состоят из очень большого числа мелких пластинок железа и цемента (Fe_3C). Размеры их значительно меньше среднего размера зерна \bar{D} . С этим, по-видимому, связан тот факт, что в широком диапазоне частот в мелкозернистых углеродистых сталях (вплоть до значений $f=4...5$ МГц) затухание определяется поглощением, т. е. пропорционально частоте. В сварных швах из аустенитной стали происходит упорядочение ориентации кристаллов.

§ 1.5. Отражение и преломление акустических волн

В ультразвуковой дефектоскопии для контроля материалов и изделий используются преобразователи, возбуждающие в объекте контроля волны различных типов в зависимости от поставленной задачи. Акустическая волна проходя через границу раздела двух сред частично отражается, а частично проходит. Знание углов преломления и отражения в зависимости от угла ввода позволяет изготавливать преобразователи, возбуждающие в объекте контроля необходимую волну.

Также важными характеристиками, определяющими количественно долю пройденной и отраженной волны, являются коэффициенты отражения R и прохождения (прозрачности) D .

Граница двух полубесконечных сред

Падающая на границу двух сред акустическая волна частично проходит через границу, а частично отражается от нее. При этом может происходить трансформация типов волн. В общем случае на границе двух твердых сред (рис. 1.11) возникают по две (продольная и поперечная) отраженных и преломленных волны.

Направления отраженных и прошедших волн определяются из **закона синусов**:

$$\frac{\sin \beta}{C_{11}} = \frac{\sin \alpha_t}{C_{t2}} = \frac{\sin \alpha_l}{C_{l2}} = \frac{\sin \gamma_l}{C_{11}} = \frac{\sin \gamma_t}{C_{t1}}, \quad (1.38)$$

где $C_{11}, C_{t1}, C_{l2}, C_{t2}$ – скорости распространения продольных и поперечных волн в верхней и нижней средах.

Этот закон следует из равенства фазовых скоростей вдоль границы для всех волн.

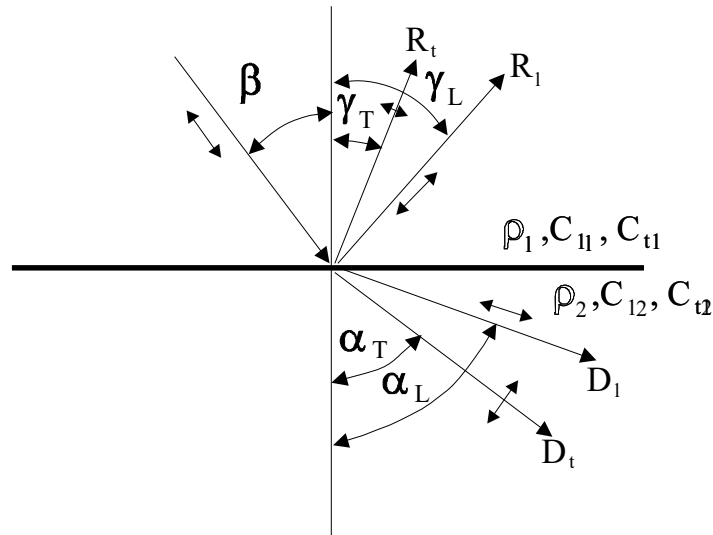


Рис. 1.11. Отражение и преломление волн на границе двух твердых тел

Угол отражения продольной волны будет равен углу падения β (т. к. падает продольная волна и скорости падающей и отраженной продольных волн равны).

Т. к. скорость распространения поперечной волны C_t меньше (≈ 2 раза) чем C_l , то поперечная волна отразится под углом γ_t , меньшим, чем γ_l .

Прошедшие продольные и поперечные волны также будут преломляться под разными углами, причем $\alpha_t < \alpha_l$. При увеличении угла падения β углы α и γ будут увеличиваться и при некотором значении $\beta_{кр1}$ (первый критический угол) преломленные продольные волны будут распространяться по поверхности, не проникая вглубь среды, а преломленная поперечная волна будет уходить вглубь среды, что видно из рис. 1.12, а.

При дальнейшем увеличении угла β до значения $\beta_{кр2}$ (второй критический угол) по поверхности пойдут поперечные (сдвиговые волны), как показано на рис. 1.12, б.

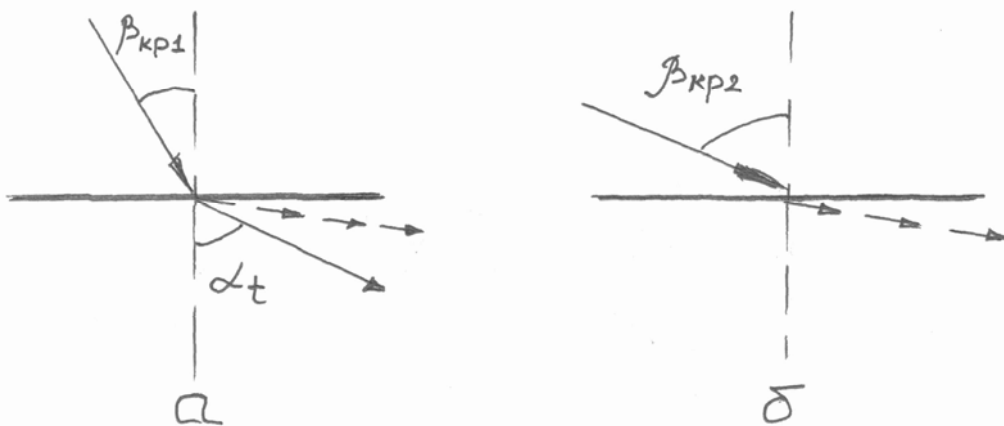


Рис. 1.12. Первый и второй критические углы

Если построить график зависимости углов $\alpha_l, \alpha_t, \gamma_l, \gamma_t$ от угла падения β , то он будет иметь вид, представленный на рис. 1.13.

Такой график строится для конкретного материала и позволяет быстро определять значения углов распространения отраженных и преломленных волн в средах в зависимости от β .

При $\beta=0$ расщепления падающей продольной волны на продольную и поперечную, отражение волны не происходит. Увеличение угла β от 0 до 90° вызывает трансформацию падающей продольной волны, в результате чего в первой среде возникают отраженные, а во второй среде – преломленные продольные поперечные волны.

При малых углах β поперечные (сдвиговые) волны очень слабы, однако с увеличением угла происходит перераспределение звуковой энергии, вследствие чего интенсивность поперечной волны увеличивается.

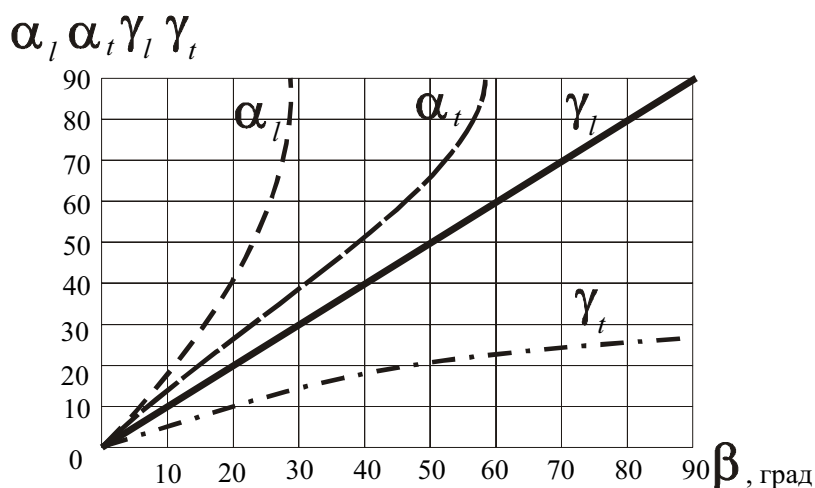


Рис. 1.13. Зависимость значений углов отражения и преломления от угла падения

Для оргстекла при $\beta < 27^\circ$ во второй среде нельзя получить поперечных, а при $\beta > 57^\circ$ – продольных волн. Эти углы соответствуют $\beta_{кр1}$ и $\beta_{кр2}$ (для оргстекла), при которых происходит полное внутреннее отражение УЗК, падающих на поверхность раздела двух сред.

Амплитуда прошедшей $A_{пр}$ и отраженной $A_{отр}$ волн характеризуются соответствующими коэффициентами прозрачности

$$D = \frac{A_{пр}}{A_0} \quad (1.39)$$

и отражения

$$R = \frac{A_{отр}}{A_0}, \quad (1.40)$$

где A_0 – амплитуда падающей волны.

При решении задач о поведении волн на границе сред эффективно использовать понятие нормального импеданса границы. Рассмотрим вначале случай **жидких или газообразных сред**. Нормальный импеданс волны здесь определяют как отношение акустического давления к нормальной составляющей колебательной скорости

$$Z = \frac{p}{v_n} = \frac{\rho c}{\cos \theta}, \quad (1.41)$$

где θ – угол между осью x и направлением волны.

Для расчета коэффициентов прозрачности и отражения имеются два граничных условия: равенство давлений и нормальных составляющих колебательной скорости сверху и снизу от границы. Из них следует, что при $x = 0$ суммарные импедансы волн сверху и снизу от границы равны:

$$\left. \frac{\sum P}{\sum v_n} \right|_{\text{сверху}} = \left. \frac{\sum P}{\sum v_n} \right|_{\text{снизу}} = Z_2. \quad (1.42)$$

Из данной формулы с учетом соотношения (1) и обозначая давление в отраженной волне p_0R , найдем

$$\frac{1+R}{1/z_1 - R/z_1} = Z_2. \quad (1.43)$$

Решая относительно R , получим

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (1.44)$$

Снизу от границы в рассматриваемом случае $Z_2 = \rho_2 c_2 / \cos \alpha$, поэтому

$$R = \frac{\rho_2 c_2 / \cos \alpha - \rho c / \cos \beta}{\rho_1 c_1 / \cos \alpha + \rho c / \cos \beta}. \quad (1.45)$$

В дальнейшем рассмотрим случаи, когда импеданс границы Z_2 характеризуется более сложными выражениями, однако формула (7) останется справедливой. Используя закон равенства импедансов сверху и снизу от границы (его можно получить из равенства давлений при $x=0$), получим $1 + R = D$. Отсюда

$$D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}. \quad (1.46)$$

Рассмотрим соотношение энергии падающей и преломленной волн. Интенсивность звука $I = |p|^2 / 2\rho c$. Для определения доли прошедшей

и отраженной энергии можно выделить компоненту потока энергии, нормальную к границе. Эти компоненты для падающей и преломленной волн соответственно равны: $I_n = I \cos \beta$; $I_{2n} = I_2 \cos \alpha$. Отсюда коэффициент прозрачности по энергии

$$\tilde{D} = \frac{4ZZ_2}{(Z_2 + Z)^2}. \quad (1.47)$$

Сопоставление со значением D по амплитуде давления показывает, что \tilde{D} равен произведению величин D при прохождении через границу в прямом и обратном направлениях. Это положение важно для дефектоскопии, поскольку при введении акустических в объект контроля через какую-либо промежуточную среду волна обычно проходит через границу в двух направлениях; оно сохраняется для границ любых сред. Коэффициент отражения по интенсивности $\tilde{R} = R^2$ и равен

$$\tilde{R} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2. \quad (1.48)$$

С учетом этого легко проверить соблюдение закона сохранения энергии

$$\tilde{R} + \tilde{D} = 1. \quad (1.49)$$

Рассмотрим случай, когда скорость звука в нижней среде больше, чем в верхней (см. рис. 1.11). Мы знаем, что с увеличением угла β волна в нижней среде быстро приближается к границе и при $\beta = \arcsin \frac{C_{11}}{C_{12}}$ сольется с ней. Значение $\beta = \beta_{кр1}$ называют критическим. Если $\beta > \beta_{кр1}$, то $\sin \alpha = \frac{C_{11}}{C_{12}} \sin \beta > 1$. Это вполне допустимо с точки зрения теории комплексных чисел

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{C_{12}}{C_{11}} \sin \beta \right)^2} = jC. \quad (1.50)$$

В выражение для преломленной волны в этом случае войдет множитель e^{-kx} . Он показывает, что эта волна, распространяясь вдоль оси y , затухает с увеличением расстояния x от поверхности, причем тем быстрее, чем угол β больше критического значения. Волна такого вида относится к типу неоднородных волн. Импеданс Z_2 будет мнимым

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{12}}{\cos \alpha} = \frac{\rho_2 C_2}{j \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \beta \right)^2 - 1}} = -jZ_{2l}; \quad (1.51)$$

$$Z_2 = \frac{\rho_2 C_{l2}}{\cos \alpha} = \frac{\rho_2 C_2}{j \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \beta\right)^2 - 1}} = -jZ_{2l}. \quad (1.52)$$

Коэффициент отражения $R = \frac{-jZ_2 - Z}{-jZ_2 + Z}$ является комплексной величиной, причем $|R|=1$, т. е. отраженная волна имеет амплитуду, равную амплитуде падающей волны, но изменяет при отражении свою фазу.

Изменение этой фазы на величину, не кратную π , при углах β больше критического приводит к явлению незеркального отражения. Экспериментально установлено, что если на границу раздела сред падает ограниченная плоская волна под углом, несколько большим критического, то отраженный пучок лучей как бы смещается вдоль поверхности тела относительно падающего (рис. 1.14).

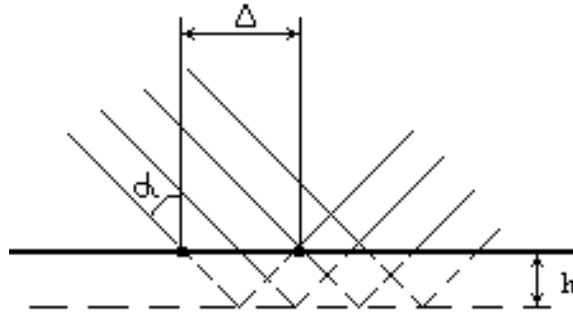


Рис. 1.14. Смещение пучка волн при незеркальном отражении

Смещение Δ такое, как если бы отражение происходило зеркально от некоторой мнимой границы, расположенной на некоторой глубине h под действительной поверхностью $\Delta = 2h \cdot \operatorname{tg} \beta$. Разность фаз волны, отражившейся от мнимой границы, т. е. прошедшей путь AED, и прямой волны, прошедшей путь ABC, равна $2kh \cdot \cos \alpha$. Оказывается, что значение совпадает с изменением фазы коэффициента отражения.

Смещение пучка Δ тем больше, чем ближе угол падения α к критическому значению. Поэтому данное явление можно рассматривать как перенос энергии вдоль поверхности неоднородной волной. Чем ближе угол β к критическому значению, тем больше амплитуда неоднородной волны на заданной глубине, тем больше расстояние она пробегает вдоль поверхности.

Если первой и второй средой являются **твердые тела**, то из закона синусов вытекает возможность существования целого ряда критических углов. Первый критический угол существует, когда падающая волна продольная и $C_{11} = C_{l2}$. Он соответствует условию слияния преломленной продольной волны с поверхностью, т. е.

$$\beta_{кр1} = \arcsin\left(\frac{C_{l1}}{C_{l2}}\right). \quad (1.53)$$

Вдоль границы в этом случае распространяется неоднородная волна. Эту волну называют **головной**, используют для целей дефектоскопии. Если преобразователь соприкасается лишь с небольшим участком поверхности объекта контроля (изделия), а остальная часть его поверхности свободна, то головная волна должна обращаться в нуль на этой поверхности для выполнения граничных условий – напряжения на поверхности равны нулю. Под поверхностью объекта головная волна имеет максимальное значение напряжения. Это значение располагается на луче, составляющем угол $\sim 12^\circ$ с поверхностью (для стали). Итак, с помощью головной волны можно обнаружить подповерхностные дефекты, при этом головная волна нечувствительна к неровностям объекта контроля.

Второй критический угол $\beta_{кр2}$ существует, когда падает продольная волна и $C_{l1} < C_{t2}$. Он соответствует условию слияния с поверхностью преломленной поперечной волны, т. е.

$$\beta_{кр2} = \arcsin\frac{C_{l1}}{C_{t2}}. \quad (1.54)$$

Соответствующую неоднородную волну трудно отличить от поверхностной рэлеевской волны.

Третий критический угол $\beta_{кр3}$ существует при падении поперечной волны. Поскольку $C_{l2} > C_{t2}$ при

$$\beta_{кр3} = \arcsin\frac{C_{t2}}{C_{l2}}. \quad (1.55)$$

продольная отраженная волна сольется с поверхностью и станет неоднородной.

Граничных условий всегда достаточно для определения амплитуд всех отраженных и преломленных волн. Например, на границе двух плотно соединенных твердых тел имеются четыре условия (равенство нормальных и тангенциальных смещений и напряжений по обе стороны от границы), позволяющих рассчитать четыре волны, показанные на рис. 1.11. На практике часто встречается случай двух твердых тел, разделенных очень тонким слоем жидкости. Слой считается настолько тонким, что изменением фазы волны при его прохождении можно пренебречь, однако наличие его приводит к появлению четырех других граничных условий: нормальные напряжения и смещения равны, а тангенциальные напряжения по обе стороны от границы обращаются в нуль.

Формулы для коэффициентов отражения и прозрачности для случая двух твердых тел или жидкости и твердого тела могут быть получены путем обобщения соотношений, выведенных ранее для границы двух жидкостей. Формулы (7) и (10) можно записать

$$R = (\sum Z - 2Z_{\text{над}}) / \sum Z; \quad (1.56)$$

$$\tilde{D} = 4Z_{\text{над}}Z_{\text{пр}} / |\sum Z|^2, \quad (1.57)$$

где $\sum Z$ – сумма импедансов всех отраженных и преломленных волн;

$Z_{\text{пад}}$ – импеданс падающей волны;

$Z_{\text{пр}}$ – импеданс прошедшей волны.

В этом обобщенном виде формулы пригодны для случая, когда одна или обе среды – твердое тело, причем формулу (18) применяют для расчета отраженной волны, одинаковой по типу с падающей, а формулу (19) – для расчета всех коэффициентов прозрачности и коэффициента отражения для волны, неодинаковой по типу с падающей. Импедансы для продольной и поперечной волн в твердом теле имеют вид

$$Z_l = \frac{\rho c_l}{\cos \theta_l} \cos^2 2\theta_l; \quad (1.58)$$

$$Z_t = \frac{\rho c_t}{\cos \theta_t} \sin^2 2\theta_t, \quad (1.59)$$

где θ_l и θ_t – углы между направлением распространения соответствующих волн и нормалью к поверхности.

При углах, больших критического значения, соответствующие импедансы становятся мнимыми подобно (14).

На рис. 1.15 приведены зависимости коэффициентов прозрачности по энергии, рассчитанные для сред, весьма часто встречающихся в дефектоскопии оргстекло–масло–сталь.

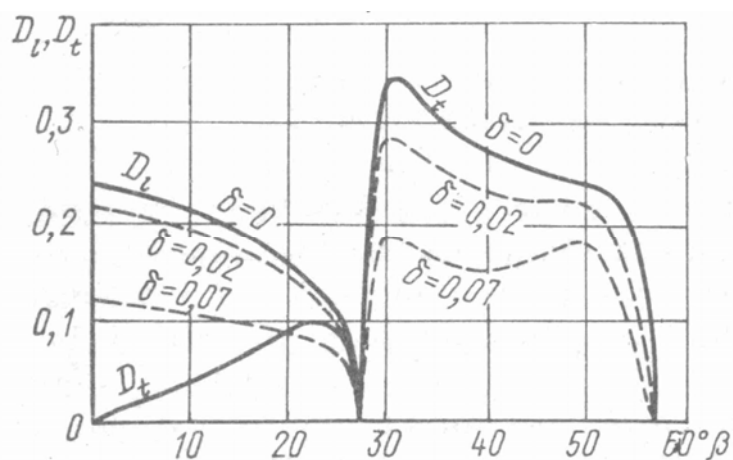


Рис. 1.15. Коэффициенты прозрачности для границы оргстекло–сталь

Граница раздела двух сред, разделенных тонким слоем

Рассмотрим случай отражения волны от границы двух сред, разделенных промежуточным слоем. Для упрощения будем рассматривать нормальное падение волны, как показано на рис. 1.16.

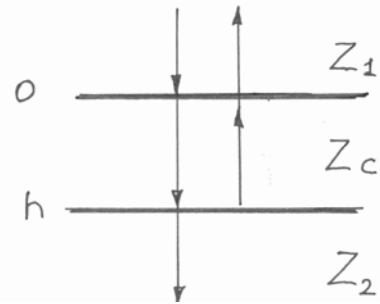


Рис. 1.16

Слой имеет толщину h . В нем существуют две волны, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях. Из волнового уравнения, с учетом граничных условий задачи (равенство давлений и смещений на обеих границах слоя) можно вычислить амплитуды всех волн. Из них получают следующее выражение для входного импеданса для волны, падающей на слой сверху (мы рассматриваем только продольные волны).

$$Z_{\text{вх}} = \rho_c \cdot C_c \frac{Z_2 - j\rho_c \cdot C_c \cdot \text{tg}(k_c \cdot h_c)}{\rho_c \cdot C_c - jZ_2 \cdot \text{tg}(k_c \cdot h_c)}, \quad (1.60)$$

где ρ_c – плотность слоя;

C_c – скорость продольной волны в слое;

$k_c = \frac{\omega}{C_c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

Z_2 – импеданс нижней среды.

Комплексное значение входного импеданса означает, что давление и колебательная скорость не совпадают по фазе. Сдвиг фазы происходит в результате многократных отражений волн в слое. Если нижняя среда протяженная, то $Z_2 = \rho_2 C_2$. Зная $Z_{\text{вх}}$, мы можем вычислить коэффициенты отражения и прозрачности

$$R = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_2}{Z_{\text{вх}} + Z_2}. \quad (1.61)$$

Здесь вместо $\sum Z$ поставили $Z_{\text{вх}}$, т. к. оно является результатом суммирования всех действующих волн. Аналогично коэффициент прозрачности

$$\tilde{D} = \frac{4Z_{\text{вх}}Z_2}{(Z_2 + Z_{\text{вх}})^2}. \quad (1.62)$$

Т. к. $Z_{\text{вх}}$ зависит от h_c , то и коэффициенты R и D также будут зависеть от h_c .

1. Пусть $h_c = n \frac{\lambda_c}{2}$ – т. е. толщина слоя кратна числу полуволен в слое.

В этом случае $k_c h_c = n\pi$ и $\text{tg}n\pi = 0$. Получается, что

$$Z_{\text{вх}} = Z_2 = \rho_2 C_2. \quad (1.63)$$

Т. е. входной импеданс такой системы равен входному импедансу нижней среды. Эффект такой, что слой h_c как бы отсутствует, т. е. он не влияет на прохождение и отражение монохроматической волны.

$$R_{1/2} = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_2}{Z_{\text{вх}} + Z_2} = 0. \quad (1.64)$$

2. Пусть $h_c = (2n+1)\frac{\lambda_c}{4}$ – т. е. толщина слоя кратна четному числу четвертей длин волн в слое. Т. е. $k_c h_c = (2n+1)\frac{\pi}{2}$, тогда $\operatorname{tg}(2n+1)\frac{\pi}{2} \rightarrow \infty$ и

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_c^2}{Z_2}. \quad (1.65)$$

Соответственно коэффициент отражения

$$R_{1/4} = \frac{\frac{Z_c^2}{Z_2} - Z}{\frac{Z_c^2}{Z_2} + Z} = \frac{Z_c^2 - Z_1 Z_2}{Z_c^2 + Z_1 Z_2}. \quad (1.66)$$

$|R_{1/4}| > |R_{1/2}|$ когда импедансы сред одновременно больше или одновременно меньше импеданса слоя. В частности, при $Z_2 = Z_1; R_{1/2} = 0$, т. е. отражение отсутствует, волна из верхней среды полностью переходит в нижнюю, а $R_{1/4} > 0$ дает максимальное значение коэффициента отражения. Следовательно, при изменении толщины слоя, коэффициент отражения осциллирует.

В несимметричном случае, когда $Z_1 < Z_c < Z_2$, а именно $Z_1 Z_2 = Z_c^2$ и $R=0$, наоборот минимум R достигается при толщине слоя, кратном нечетному числу $\frac{\lambda_c}{4}$. Следовательно, нечетный четвертьволновый слой улучшает прохождение волн через границу. Такой эффект называют **«просветление границы»**. Полное просветление достигается при $h_c = (2n+1)\frac{\lambda_c}{4}$, если

$$Z_c = \sqrt{Z_1 Z_2}. \quad (1.67)$$

Т. к. коэффициент отражения R и прозрачности D связаны соотношением $\tilde{R} + \tilde{D} = 1$, то равенство $\tilde{R} = 0$ соответствует равенству $\tilde{D} = 1$ или **полной прозрачности**.

Для реальных материалов, обладающих свойством затухания, амплитуда осцилляции коэффициентов отражения и прозрачности убывает с увеличением h_c . Поэтому для получения максимального эффекта следует брать слой минимальной толщины, а именно $h_c = \frac{\lambda_c}{4}$.

3. Рассмотрим очень тонкий слой с $Z_c = \rho_c C_c$ по обе стороны от которого расположена одинаковая среда с $Z = \rho C = Z_c$. В этом случае $\operatorname{tg} k_c h_c \approx k_c h_c$. Тогда

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \frac{Z_2 - j\rho_c \cdot C_c \cdot k_c \cdot h_c}{\rho_c \cdot C_c - jZ_2 \cdot k_c \cdot h_c}. \quad (1.68)$$

Здесь $j\rho_c \cdot C_c \cdot k_c \cdot h_c \ll Z$, поэтому

$$Z_{\text{вх}} = Z_c \frac{Z_2}{\rho_c \cdot C_c - jZ_2 \cdot k_c \cdot h_c} = \frac{Z_2 Z_c}{Z_c - jZ_2 \cdot k_c \cdot h_c}. \quad (1.69)$$

Отсюда коэффициент отражения

$$R = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_2}{Z_{\text{вх}} + Z_2} = \frac{jZ_2^2 k_c h_c}{2Z_c Z_2 - jZ_2^2 k_c h_c}. \quad (1.70)$$

Разделим эту дробь на числитель, тогда получим

$$R = \frac{1}{-1 + \frac{2Z_c}{jZ_2 \cdot k_c h_c}}. \quad (1.71)$$

Если учесть, что $k_c = \frac{\omega}{C_c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, то получим

$$R = \frac{1}{-1 + \frac{Z_c \lambda_c}{j\pi Z_2 \cdot h_c}}. \quad (1.72)$$

Для удобства мы заменим коэффициентом отражения по интенсивности \tilde{R} (т. е. по энергии), который связан с R отношением $\tilde{R} = R^2$, тогда

$$\tilde{R} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_c \lambda_c}{\pi Z_2 \cdot h_c} \right)^2}. \quad (1.73)$$

Пусть слой представляет собой воздушную прослойку в стали, тогда

$$\frac{Z_c}{\pi Z_2} = \frac{\rho_a C_a}{\rho_{cm} C_{cm}} \approx 0,3 \cdot 10^{-5}$$

$$\tilde{R} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_c \lambda_c}{\pi Z_2 \cdot h_c} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left(0,3 \cdot 10^{-5} \frac{\lambda_c}{h_c} \right)^2}.$$

Следовательно, уже при толщине слоя $h_c = 10^{-5} \cdot \lambda_c$ получается $\tilde{R} \approx 0,9$. Т. е. даже при такой чрезвычайно малой толщине воздушной прослойки от нее будет отражаться 90 % энергии падающей волны. Это свойство как раз и используется в эхо-методе дефектоскопии изделий.

§ 1.6. Другие типы волн

В ограниченных твердых телах, кроме объемных волн, существуют другие типы волн.

Так вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться **поверхностные волны**.

Предположим, что существует волна, бегущая вдоль границы твердого тела и состоящая из линейной комбинации продольной и поперечной волн (рис. 1.17). Подстановка такой комбинации в волновое уравнение показывает, что такая волна должна затухать на расстояниях порядка длины волны от поверхности. Скорость распространения такой волны

$$C_s = \frac{0,87 + 1,12\sigma}{1 + \sigma} C_t, \quad (1.74)$$

где σ – коэффициент Пуассона

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (1.75)$$



Рис. 1.17

Для металлов $\sigma \approx 0,3$ и $C_s \approx 0,93C_t$. Такая поверхностная волна называется **волной Рэлея**. Она способна распространяться на большое расстояние вдоль поверхности твердого тела, незначительно проникая внутрь тела. Так на расстоянии длины волны от поверхности интенсивность составляет приблизительно 5 %. При распространении поверхностной волны частицы двигаются, вращаясь по эллипсам, большая ось которых перпендикулярна границе. Вытянутость эллипса с глубиной увеличивается. Такие волны хорошо распространяются вдоль искривленных поверхностей, хотя на вогнутых участках они испытывают значительное дополнительное затухание вследствие излучения энергии вглубь изделия. Поверхностные волны успешно используются для выявления дефектов вблизи поверхности изделия.

Одним из решений волнового уравнения для поля \bar{U} вблизи границы твердого тела является также волна, представляющая собой линейную комбинацию поверхностной и объемной волн. В такой комбинации поверхностная компонента непрерывно трансформируется в объемную

и уходит от поверхности. Единообразного названия такая волна пока не получила. Ее называют **вытекающей, поверхностно-продольной, ползучей** (рис. 1.18). Сама волна затухает довольно быстро вдоль поверхности тела, но порожденные ею объемные волны распространяются на значительные расстояния и могут использоваться для контроля. Совокупность поверхностно-продольной и порождаемой ею продольной (объемной) волн в дефектоскопии называют **головной волной**.

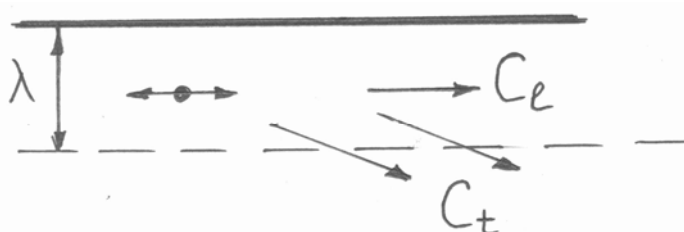


Рис. 1.18

Помимо рэлеевских волн существуют и другие типы поверхностных волн в твердых телах. Коснемся наиболее важных из них. Прежде всего следует назвать поверхностные волны в кристаллах. Как известно, в кристаллах существует значительная анизотропия упругих свойств в трех главных направлениях. В связи с этим поверхностная волна имеет три компоненты смещения, существенно различающихся по скорости распространения. В связи с этим волновой вектор \bar{k} , который в изотропной среде совпадает с направлением вектора групповой скорости \bar{V} (или C) и, следовательно, с направлением распространения волны, отклоняется по направлению от вектора групповой скорости.

$$\bar{k} = \bar{n} \frac{\omega}{C}, \quad (1.76)$$

где \bar{n} – единичный вектор, характеризующий направления волны.

Такие поверхностные волны, схожие с рэлеевскими волнами, называют волнами **рэлеевского типа**.

В кристаллах, обладающих пьезоэффектом, существуют чисто **сдвиговые волны**, которые называются **волнами Гуляева–Блюштейна**. Эти волны распространяются со скоростью $C \approx C_t$, спадают с глубиной на расстоянии

$$l \approx K_{эм}^{-2} \cdot K_t, \quad (1.77)$$

где K_t – волновое число t-волны;

$K_{эм}$ – коэффициент электромеханической связи, характеризующей «силу» пьезоэффекта.

Обычно $l \approx 50 - 100\lambda$. Волны такого же типа могут существовать и в пьезоэлектрических средах при приложении к ним внешних полей – электрического (за счет наведенного пьезоэффекта) и магнитного (за счет действия силы Лоренца на электроны в металлах). При этом имеется возможность управлять глубиной локализации таких волн с помощью изменения напряженности прикладываемых полей.

К важной разновидности поверхностных волн относятся **волны Лява**, возникающие в слоистой системе, состоящей из упругого полупространства и слоя, скорость поперечных волн в котором C_{t1} меньше их скорости в полупространстве C_{t2} , как показано на рис. 1.19.

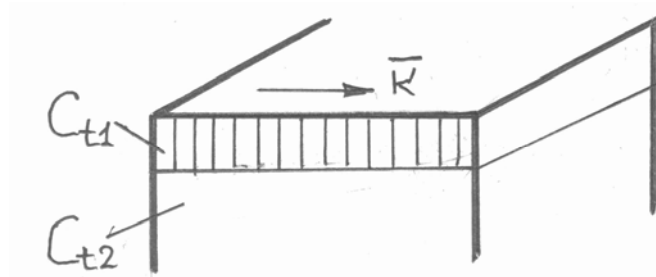


Рис. 1.19

При условии $C_{t1} < C_{t2}$ в такой системе могут существовать чисто сдвиговые поверхностные волны, фазовая скорость которых больше скорости C_{t1} , но меньше C_{t2} . Вообще, волны Лява не являются строго поверхностной волной, т. к. для их существования требуется слоистая среда. Волны Лява, также как и волны Рэлея, часто наблюдаются при землетрясениях, поскольку земная кора имеет слоистую структуру. В дефектоскопии волны Лява используются для контроля тонких неметаллических слоев на металлах.

Кроме волн, существующих на границе твердого тела с вакуумом, существуют волны на границе двух сред. К ним относятся волны с вертикальной поляризацией, распространяющейся вдоль границы твердого тела с жидкостью или **волны Стоунли**. Эти волны распространяются со скоростью, меньшей скорости звука в жидкости, спадая экспоненциально при удалении от общей границы. Волны Стоунли могут существовать и на границе двух твердых сред, если их плотности и упругие постоянные удовлетворяют определенным соотношениям.

Целый ряд поверхностных волн обусловлен чисто геометрическими факторами. Так на выпуклых цилиндрических поверхностях твердых тел, кроме волн рэлеевского типа, могут существовать и нерэлеевские волны, у которых продольная компонента, как и у рэлеевской волны, спадает по экспоненциальному закону, а сдвиговая часть убывает с глубиной, осциллируя. Такие волны получили название волн **смешанного типа**.

Сдвиговые поверхностные волны могут распространяться вдоль периодически неровной границы твердого тела, как показано на рис. 1.20.

Фазовая скорость такой волны равна

$$C = C_t \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2 \operatorname{tg}^2(kh)}}, \quad (1.78)$$

где a – длина выступа;

l – период неоднородности;

h – высота выступа;

$k=1,2,\dots$

Выбором параметров неоднородностей a , l , h можно замедлять поверхностные волны, т. е. управлять распространением акустической волны.

Можно также сказать о **линейных волнах**, распространяющихся вдоль ребер упругих клиньев, в связи с чем такие волны называют еще **клиновыми**, что видно из рис. 1.21.

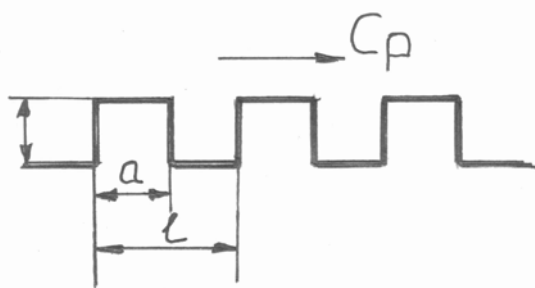


Рис. 1.20

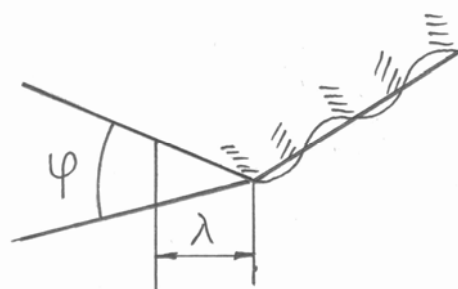


Рис. 1.21

Амплитуда таких волн быстро спадает при удалении от ребра, так что практически вся энергия волны оказывается сосредоточенной около острия клина. Скорость клиновых волн уменьшается с уменьшением угла раскрытия клина α_k и может оказаться на порядок ниже C_t при $\alpha_k \approx 5-10^\circ$.

Если твердое тело имеет две свободные поверхности (пластина), то в нем могут существовать специфические типы упругих волн. Их называют **волнами в пластинах** или **волнами Лэмба** (рис. 1.22). Это волны, бегущие вдоль границ среды и стоящие в перпендикулярном направлении.

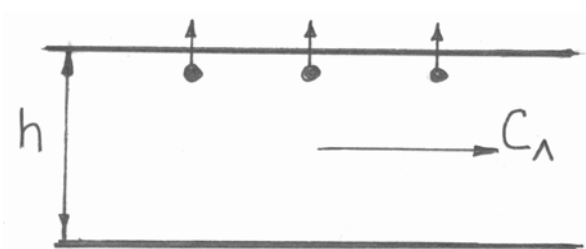


Рис. 1.22

Фазовая скорость нормальных волн зависит от частоты колебаний (длины волны λ) и толщины слоя h . Т. е. фазовая скорость нормальной волны имеет дисперсию (изменяется). В точках, где

$$h = n \frac{\lambda}{2}$$

скорость $C_p \rightarrow \infty$. Это означает, что вся поверхность колеблется одновременно. При $h \rightarrow \infty$ $C_p \rightarrow C_2$, т. е. при увеличении толщины слоя C_p стремится к скорости обычной волны.

Волны с нечетными n называют **симметричными**, т. к. движение частиц в них симметрично относительно оси пластины. Волны с четными n называют **антисимметричными**.

Для твердого слоя сущность явления образования поперечной волны с движущейся вдоль слоя фазой сохраняется. Однако все явления значительно усложняются из-за наличия в пластине продольных и поперечных волн. Если мы построим зависимость C_p от отношения $\frac{2h}{\lambda}$, то получим картину, представленную на рис. 1.23.

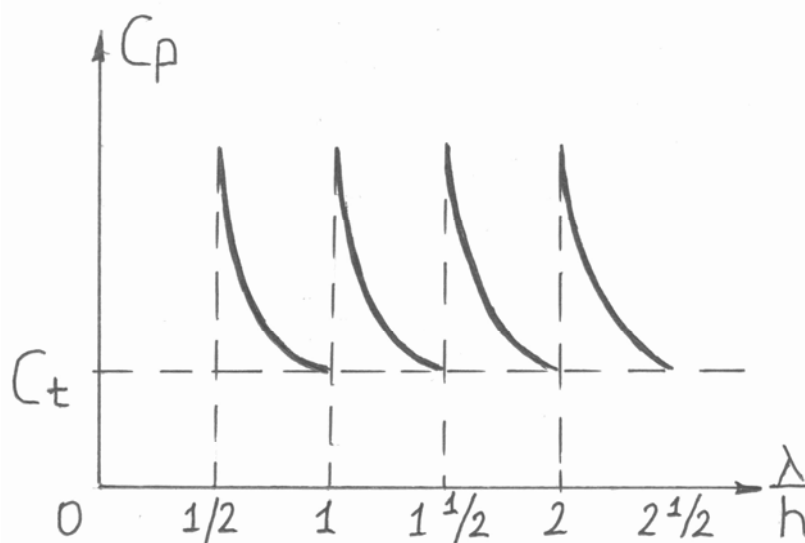


Рис. 1.23

При $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{2}, 1, 0, \frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2}$ и т. д. $C_p \rightarrow \infty$. Кривые на таком графике называют **дисперсионными кривыми**. При отражении эти волны частично трансформируются друг в друга, фаза волны при отражении меняется на число, не кратное π . Система дисперсионных кривых будет сложнее.

Фазовая скорость волны C_p определяет скорость распространения фазы волны вдоль пластины. Она позволяет вычислить длину волны, и необходима при расчетах условий возбуждения волн. Скорость рас-

пространения энергии или импульса характеризуется групповой скоростью, которая нигде не обращается в бесконечность.

$$C_{\partial} = C_p - \lambda \frac{dC_p}{d\lambda}. \quad (1.79)$$

C_{∂} совпадает с C_p , когда производная $\frac{dC_p}{d\lambda}$ возрастает и $C_{\partial} \rightarrow 0$.

В рассматриваемых поперечных волнах частицы колеблются в плоскости, перпендикулярной распространению волны.

Однако в пластине могут существовать другие волны, при которых колебания совершаются в направлении, перпендикулярном этой плоскости. Такие волны называются **нормальными поперечными волнами**. При отражении от границ пластины такие волны не трансформируются, а система дисперсионных кривых аналогична такой же системе для нормальных волн. Нормальные волны распространяются в пластине, как в волноводе, на большие расстояния. Их успешно применяют для контроля листов, оболочек, труб. Изменение сечения волновода, появление в нем неоднородностей (дефектов) вызывает отражение нормальных волн. Причем характеристики прохождения нормальных волн будут изменяться также продольными дефектами (например, расслоениями).

В круглых стержнях могут существовать симметричные и антисимметричные волны, сходные с волнами в пластинах (рис. 1.24). Кроме того, в круглом стержне могут существовать **крутильные волны**, заключающиеся в повороте некоторого сечения стержня вокруг его оси. Стержень, подобно пластине, служит волноводом, и упругие волны могут выявлять в нем как поперечно, так и продольно ориентированные дефекты. Волны в стержнях успешно применяются для контроля прутков и проволок.

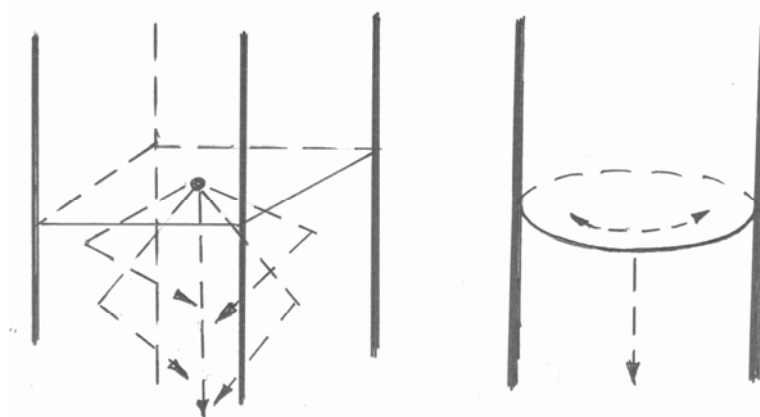


Рис. 1.24. Волны в стержнях

Кроме отмеченных существуют другие типы волн в твердых телах. Однако в практической дефектоскопии они используются мало.

Глава 2 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 2.1. Излучатели и приемники акустических колебаний

Как мы уже говорили, ввод акустических колебаний в изделие и регистрация выходящих из изделия акустических колебаний осуществляется с помощью преобразователей электрической энергии в акустический сигнал (излучатели) и преобразователей акустической энергии в электрический сигнал (приемники).

В качестве излучателей и приемников используют чаще всего преобразователи, действие которых основано на пьезоэлектрическом и магнитострикционном эффекте.

Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при сжатии или растяжении пластинки из материала, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, на ее гранях появятся электрические заряды, пропорциональные действующей силе и скорости механической деформации пластинки. Этот эффект обратим. Т. е. если мы к пьезопластинке приложим переменное электрическое поле, то ее геометрические форма и размеры будут меняться. Этим изменения пропорциональны амплитуде и скорости изменения электрического поля.

Магнитострикционный эффект заключается в изменении геометрических размеров материалов под действием изменяющегося магнитного поля. Он также обратим. Т. е. при измерении геометрических размеров магнитостриктора, вокруг него возникает изменяющееся магнитное поле, величина которого зависит от силы и скорости изменения геометрических размеров.

В упругой среде, соприкасающейся с пластиной из пьезоэлектрика или магнитостриктора, находящихся соответственно в электрическом или магнитном полях, возникают упругие колебания с частотой, определяемой частотой приложенного магнитного поля.

Максимум энергии, излучаемой в среду, будет наблюдаться при совпадении частоты возмущающего электрического или магнитного поля с частотой механического резонанса пластины.

В настоящее время известно большое число пьезоэлектрических и магнитострикционных материалов. И те, и другие широко применя-

ются для изготовления излучателей и приемников. Правда, в качестве приемников чаще всего используются пьезоэлектрические материалы.

Кристаллы сегнетовой соли – значительно дешевле кварца. Их получают выращиванием из насыщенных растворов, получаемых путем смешения соответствующих компонентов. Легко обрабатываются. По эффективности в режиме приема и излучения намного превосходят кварц. Главный недостаток – малая механическая прочность и узкая область рабочих температур (+5...+35 °С). Кроме того кристаллы сегнетовой соли сильно гигроскопичны и растворяются в воде. Поэтому сегнетовую соль редко применяют в качестве излучателей, а чаще всего используют для изготовления приемников.

Для повышения механической прочности изготавливают преобразователи в виде пакета склеенных пластин. Такие преобразователи имеют достаточно высокую прочность и низкие резонансные частоты (из-за большой массы) (15–50 кГц), что позволяет использовать их для контроля бетонов, в сейсмических исследованиях и др.

Кристаллы фосфата аммония – также механически непрочны и по своим пьезоэлектрическим свойствам близки к кристаллам сегнетовой соли. Но в отличие от них они не гигроскопичны и могут работать при температурах до +100 °С. Главный недостаток – низкая стабильность пьезоэлектрических свойств. Как и для сегнетовой соли изготавливают преобразователи в виде пакетов склеенных пластин. Наиболее целесообразно использование в качестве приемников.

Титанат бария (тибар) – это пьезокерамика, обладающая высокими пьезоэлектрическими свойствами, легко получаемая и дешевая. Изготавливают из тонкодисперсного порошка BaTiO₃ путем прессования с небольшой добавкой цементирующего материала с последующим обжигом. Таким путем получают пьезодатчики любой формы: диски, призмы, полусферы, полые цилиндры и т. п. После формовки керамические элементы шлифуют и на рабочую поверхность наносятся путем вжигания металлические (серебряные) электроды. После этого их подвергают поляризации по следующей методике: помещают в трансформаторное масло, нагревают до температуры +150 °С, подают на нее высокое напряжение (из расчета 1,2 кВ/мм), выдерживают в таких условиях 30–60 мин, а затем медленно охлаждают. Величина пьезомодуля такого датчика быстро уменьшается в течение 10–12 суток на 20–40 %, а затем стабилизируется.

Такие пьезопреобразователи по пьезоэлектрическим свойствам намного превышают кварц и немного уступают сегнетовой соли, но обладают низкой температурной стабильностью и большими диэлектрическими потерями. Поэтому в последнее время они чаще применяются в УЗ технологических

установках. Для стабилизации характеристик применяют тибары с добавками 5 %CaTiO₂ (приемники) или 5 %CaTiO₃+0,75 %CaCO₃ (излучатели). Однако технология изготовления таких материалов сложна и они очень хрупки.

Более стабильными являются керамические преобразователи из ниобата-свинца бария [60 %PbNbO₆+40 %BaNbO₆] и цирконата-титана свинца (ЦТС) [Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Ti_{0,47}Zr_{0,53})O₃+1 %Ta₂O₅ и 1 %Nb₂O₅]. Особенно большое распространение получила керамика ЦТС, являющаяся универсальной по своим свойствам, стабильной по характеристикам, дешевой. Из нее изготавливают преобразователи самых различных форм.

Магнитострикционные материалы.

Магнитострикционный эффект, в отличие от пьезоэлектрического – односторонний, т. е. независимо от знака изменения магнитного поля, изменение размеров сердечника происходит в одну сторону.

Поэтому, если магнитное поле изменяется с частотой f , то размеры будут изменяться с частотой $2f$. Поэтому магнитострикторы обычно поляризуют, т. е. подают постоянное подмагничивание B_0 . В этом случае изменения размеров будут происходить с частотой f и иметь значительно большую амплитуду.

Магнитострикционными свойствами обладают некоторые металлы и ферриты.

Преобразователи из металлов изготавливают в виде набора пластин толщиной 0,1–0,2 мм. Толщина берется небольшой – для уменьшения влияния вихревых токов. Из ленты такой толщины нарубают пластины чаще всего в виде прямоугольника. Эти пластины обезжиривают, промывают горячей водой и сушат. После этого пластины зажимают и укладывают в герметически закрытые железные ящики, из которых откачивают воздух. Ящики помещают в печь с температурой 600 °С. Затем температуру увеличивают до 850 °С и выдерживают пластины в течение 5 ч. Затем печь охлаждают со скоростью 50 °С в час до 400 °С, после чего ящики вынимают и охлаждают на воздухе до полного остывания. После такого отжига пластинки поштучно раскладывают на поддонах, которые загружают в печь с температурой 300–350 °С. Потом температуру в печи поднимают до 450 °С и выдерживают в течение 2 ч. За это время пластина покрывается окисной пленкой. Затем печь охлаждают со скоростью 100 °С в час до температуры 250 °С, после чего пластины охлаждают на воздухе до полного остывания.

Потом пластинки собирают в пакет и по краям стягивают бандажом из очищенной медной проволоки толщиной 1,5–2 мм. Затем на пакет наматывают две обмотки встречно по 16 витков проводом диаметром 2,5 мм. Такой преобразователь с размерами 63×115 мм имеет собственную резонансную частоту 12–22 кГц и может отдавать мощность до 25 кВт при токе возбуждения до 25 А.

Такие излучатели используют для исследования материалов с сильным акустическим затуханием (грунты, горные породы, строительные материалы и т. д.). Для сравнения рабочей частоты размеры преобразователей уменьшают. Однако для металлических магнитоотрикаторов $f_{\max} \leq 80$ кГц из-за резкого возрастания потерь на вихревые токи. Более высокие рабочие частоты получаются на ферритовых магнитоотрикаторах, т. к. в них потери на вихревые токи малы (электропроводность в 10^{10} раз меньше, чем у металлов). Для излучателей и приемников сердечники изготавливают в виде монолитных блоков. Для приемников рабочая обмотка имеет, как правило, большее число витков. В последнее время для возбуждения и приема акустических волн стали использовать **электромагнитно-акустические преобразователи**, действие которых основано на эффектах электромагнитного поля. Работают в основном следующие три эффекта:

- *Эффект намагниченности* – ферромагнитное изделие имеет внутреннее магнитное поле. При взаимодействии его с меняющимся внешним магнитным полем происходит смещение частичек среды.
- *Эффект магнитоотрикции* – это изменение размеров материала при изменениях результирующего магнитного поля.
- *Эффект вихревых токов* – переменное внешнее магнитное поле создает в изделии вихревые токи, которые создают свои переменные магнитные поля.

Магнитное поле вихревых токов, взаимодействуя с переменным внешним магнитным полем, приводит к смещению частичек среды.

В диапазоне частот до 10 МГц основной вклад дают эффекты вихревых токов и намагниченности.

С помощью электромагнитно-акустических преобразователей можно возбуждать как продольные, так и поперечные волны. Для примера рассмотрим рис. 2.1:

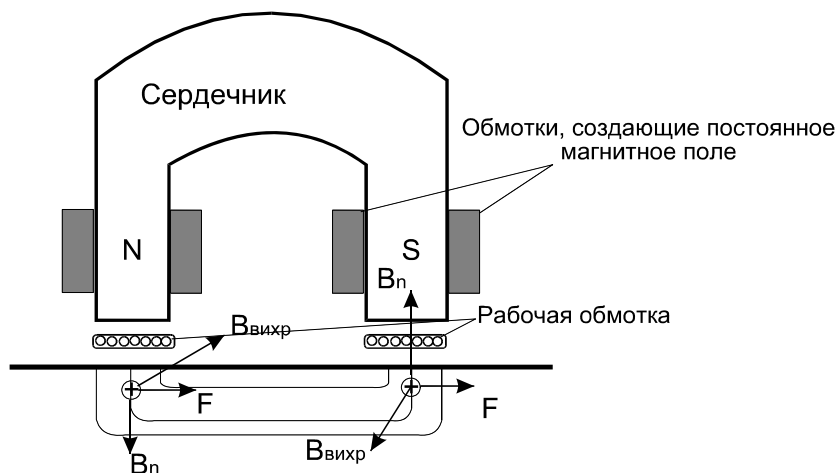


Рис. 2.1. Конструкция ЭМА – преобразователя

При таком расстоянии рабочей обмотки, изменение индукции B_n в зоне действия вихревых токов, расположено нормально к поверхности. Сила F взаимодействия такого поля с полем вихревых токов будет перпендикулярна B_n и $B_{\text{вихр.}}$, т. е. будет направлена по касательной к поверхности. Следовательно, частички среды будут также смещаться вдоль поверхности, т. е. возбуждаются поперечные волны. Для возбуждения продольных волн используют другой тип преобразователя. Здесь изменение индукции B_t направлено по касательной к поверхности, следовательно, возбуждаются отходящие от границы продольные волны.

Термоакустический эффект. Известно, что если нагреть поверхностный участок какого-либо тела, то другие участки этого тела приобретут повышенную температуру не сразу, а лишь спустя некоторое время. Неравномерное распределение температуры приводит к неравномерному тепловому расширению тела, к появлению термомеханических напряжений. Поскольку эти напряжения изменяются во времени, то в результате возникают акустические волны, излучаемые слоем с изменяющейся температурой. В этом и заключается суть термоакустического эффекта.

Нагрев может осуществляться бесконтактно (индукционный нагрев) и даже дистанционно (нагрев лучом лазера), что дает возможность для бесконтактного возбуждения акустических колебаний в объекте контроля.

§ 2.2. Основные уравнения прямого и обратного пьезоэффекта

Описание пьезоэлектрического эффекта в общем случае достаточно сложно. Это связано с тем, что пьезоэффект многосторонне связан с другими свойствами пьезоматериала: упругими, электрическими, тепловыми.

Каждое из этих свойств описывает соответствующее поле: упругое, электрическое, тепловое. В свою очередь, каждое из этих полей описывается своим напряжением и своей деформацией.

Рассмотрим эти основные поля, действующие в пьезопреобразователе.

Упругое поле (поле механических напряжений или собственная упругость пластины).

Мы его описываем двумя величинами:

- упругим напряжением – σ ,
- упругой деформацией – $\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}$.

Когда мы рассматриваем элементы теории упругости, мы говорим, что вектор смещения $\Delta \vec{U}$ зависит от расстояния между соседними точками $\Delta \vec{r}$, причем

$$\Delta \vec{U} = \vec{\varepsilon} \cdot \Delta \vec{r}, \quad (2.1)$$

где ε – линейная вектор-функция, является тензором второго ранга и называется тензором деформации.

Если рассмотреть только X-ю координату векторов $\Delta\vec{U}$ и $\Delta\vec{r}$, то можно записать

$$\Delta U = \varepsilon_x \cdot \Delta x, \quad (2.2)$$

отсюда

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (2.3)$$

или переходя к бесконечно малым приращениям, можем записать

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (2.4)$$

Связь между ε и σ дается законом Гука

$$\sigma = c \cdot \varepsilon = C \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (2.5)$$

где C – тензор модулей упругости. Здесь у нас независимая переменная – ε .

Можно в качестве независимой переменной взять σ , тогда будет иметь соотношение

$$\varepsilon = S \cdot \sigma, \quad (2.6)$$

где S – тензор упругой податливости.

Упругое поле имеет энергию, она равна

$$dW_{\text{упр}} = \sigma \cdot d\varepsilon. \quad (2.7)$$

Электрическое поле (собственное электрическое поле).

Описывается также двумя величинами:

- электрической напряженностью – E ;
- электрической деформацией (или электрическим смещением или электрическим током).

Пьезопластина – это диэлектрик. Ток в диэлектриках, если вы помните, описывается электрической функцией D . E и D связаны между собой соотношением

$$E = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D, \quad (2.8)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Величина ε определяет свойства пьезоматериала как диэлектрика, а пьезопластины – как конденсатора с емкостью

$$C_{nl} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{nl}}{h_1}, \quad (2.9)$$

где S_{nl} – площадь пьезопластины,

h_1 – толщина пьезопластины.

Если в качестве независимой переменной взять E , то будет иметь место связь

$$D = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E. \quad (2.10)$$

Энергия электрического поля

$$dW_{эл} = EdD. \quad (2.11)$$

Тепловое поле (собственное поле).

Описывается также двумя величинами:

- тепловым напряжением (или температурой) – T ;
- тепловой деформацией (или энтропией) – S .

Энтропия S является функцией состояния системы и описывает степень необратимости тепловых процессов. Для замкнутой системы S всегда является возрастающей функцией, т. е. $dS \geq 0$. Для незамкнутой системы dS может быть как >0 , так и <0 . Энтропия S имеет размерность

$$[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{град}}; \frac{\text{эрг}}{\text{град}}; \frac{\text{кал}}{\text{град}}; \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{град}}.$$

Энергия теплового поля

$$dW_{менл.} = TdS. \quad (2.12)$$

Полная энергия пьезоэлектрического поля складывается из энергии этих трех полей. Полный дифференциал энергии равен

$$dW = dW_{упр} + dW_{эл} + dW_{менл.}, \quad (2.13)$$

т. е.

$$dW = \sigma \cdot d\varepsilon + EdD + TdS. \quad (2.14)$$

Это есть **уравнение баланса энергий** для тела при наличии в нем трех полей.

Т. к. нас интересуют процессы преобразования электрической энергии в упругую и наоборот, то нам необходимо получить выражения для упругих напряжений и деформации, и для электрических напряжений и деформации.

Обычно пьезоэлектрическую систему рассматривают изолированной от окружающей среды, т. е. без обмена теплом (адиабатический процесс). В этом случае $dS=0$ и $dW_{менл.} = TdS=0$.

Тогда можно рассматривать только взаимодействие упругого и электрического полей.

Отличие пьезоэлектрика от обычного материала состоит в том, что внешние механические деформации, кроме собственного упругого напряжения, создают также и электрическое напряжение, а внешнее электрическое поле создает также механические деформации.

1. Рассмотрим **полное упругое напряжение σ** , действующее в пьезоматериале, находящемся в электрическом поле с напряженностью E и под действием упругой деформации $\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x}$. Оно будет складываться из двух частей:

- собственно упругое напряжение $\sigma_{упр}$

$$\sigma_{упр} = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (2.15)$$

Через C_D мы обозначаем модули упругости при постоянном электрическом поле.

В пьезоэлектриках

$$C_D = \lambda + 2\mu. \quad (2.16)$$

В данном случае C_D определяет скорость распространения продольных волн

$$C_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_D}{\rho}} \quad (2.17)$$

или

$$C_D = \rho \cdot C_l^2; \quad (2.18)$$

- упругое внутреннее напряжение $\sigma_{эл}$, создаваемое электрическим напряжением E .

Связь между $\sigma_{эл}$ и E дается через пьезоконстанту e в виде

$$\sigma_{эл} = eE. \quad (2.19)$$

Для внешнего электрического напряжения (или для внешнего механического напряжения)

$$\sigma_{эл} = -eE = -e \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} D. \quad (2.20)$$

Отсюда нельзя написать $E = \frac{\sigma}{e}$, т. к. e – это тензор.

Таким образом, полное механическое напряжение в пьезопластине

$$\sigma = \sigma_{упр} + \sigma_{эл} = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} D. \quad (2.21)$$

2. Рассмотрим **полное электрическое напряжение** в пьезоматериале, находящегося под действием механической деформации $\frac{\partial U}{\partial x}$. Оно будет складываться из двух частей:

- собственно-электрического поля $E_{эл}$

$$E_{эл} = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} D; \quad (2.22)$$

- электрического поля $E_{упр}$. (внутреннего), создаваемого механической деформацией $\frac{\partial U}{\partial x}$.

Связь упругой составляющей электрического поля с механической деформацией также выражается через пьезоконстанту e , но только в виде

$$D_{упр} = e \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Это электрическое смещение, возникающее под действием механической деформации. Тогда

$$E_{упр} = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D_{упр} = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Для внешнего упругого воздействия

$$E_{упр} = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}.$$

Тогда полное электрическое напряжение

$$E = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (2.23)$$

где $\frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D$ – электрическое напряжение электрического поля;

$\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}$ – электрическое напряжение за счет действия механического поля.

Таким образом, получается следующая система уравнений в частных производных, описывающая поля в пьезоэлектрическом материале.

$$\begin{cases} \sigma = C_D \cdot \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D; \\ E = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \end{cases} \quad (2.24)$$

Анализ пьезопреобразователей заключается в решении этой системы уравнений при граничных условиях, задаваемых конкретной конструкцией преобразователей.

Важное значение при анализе работы преобразователя имеет понятие **коэффициенты электромеханической связи β** .

Он определяется как отношение взаимной упруго-электрической энергии преобразователя к среднему геометрическому значению упругой и электрической энергии.

Внутренняя энергия пьезопреобразователя определяется выражением

$$W = \frac{1}{2} \sigma \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} E \cdot D. \quad (2.25)$$

Подставим сюда значения σ и E . Получим

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} \\ W &= \frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D^2. \end{aligned} \quad (2.26)$$

В этом выражении:

$\frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2$ – механическая энергия;

$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D^2$ – электрическая энергия;

$\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x}$ – удвоенная взаимная упруго-электрическая энергия.

Тогда по определению β

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D \frac{\partial U}{\partial x}}{\sqrt{\frac{1}{2} C_D \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D^2}} = \frac{e \cdot \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0}}{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \sqrt{C_D}} = \frac{e}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 C_D}}. \quad (2.27)$$

Т. к. $C_D = \rho C_l^2$, можно записать

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{C_l} \cdot \frac{e}{\sqrt{\rho \varepsilon \varepsilon_0}}; \\ \beta^2 &= \frac{e^2}{\rho \varepsilon \varepsilon_0 C_l^2}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Множитель $\frac{e}{\sqrt{\rho \varepsilon \varepsilon_0}}$ имеет размерность (м/с). Квадрат коэффициента электромеханической связи β^2 описывает эффективность работы преобразователя при излучении и приеме.

§ 2.3. Расчет электроакустического тракта дефектоскопа

Электроакустическим трактом дефектоскопа называются участки дефектоскопа, в которых происходят процессы преобразования электрической энергии в механическую (излучение УЗ) и преобразования механической энергии в электрическую (прием УЗ).

В процессе излучения участвуют генератор импульсов излучения и преобразователь.

В процессе приема участвуют преобразователь и усилитель.

Требования к генератору и усилителю будут рассмотрены нами дальше. В данный момент мы считаем, что они соответствуют всем требованиям.

Наиболее важным элементом электроакустического тракта является пьезопреобразователь.

Конструкцию преобразователя можно представить в виде рис. 2.2.

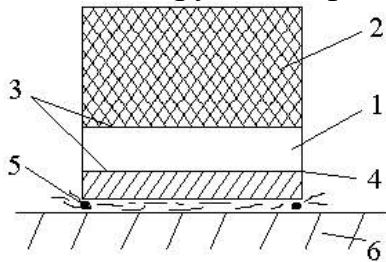
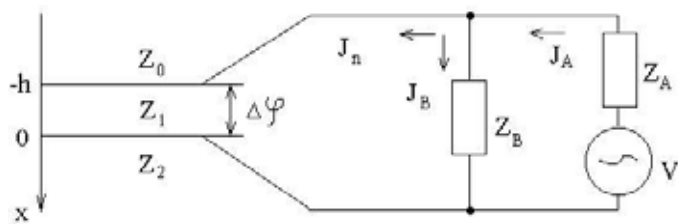


Рис. 2.2. Изделие

Основной элемент преобразователя – пьезопластина (1). На ее грани нанесены электроды (3). К пьезопластине (к верхней грани) приклеен демпфер (2). Он изготавливается из материала импедансом $z_g = z_{nl}$ и с большим затуханием, чтобы на границе верхняя грань-демпфер отсутствовало отражение, а вошедшая в демпфер волна полностью затухла. Между пластиной (1) и средой (6) расположено несколько слоев: электрод (3), протектор (4), защищающий пластину от повреждений, и прослойка контактной жидкости (5). Следовательно, пластина работает в условиях довольно сложной акустической нагрузки.



Для расчетов обычно используют следующую модель такого преобразователя. $\rho_0 \geq Z_0$ – полный акустический импеданс, на который погружена верхняя грань пластины. $\rho_1 C_1 = Z_1$ – акустический импеданс пластины, $\rho_2 C_2 = Z_2$ – полный акустический импеданс, на который нагружена нижняя грань пластины.

Пластина имеет площадь S_{nl} и толщину h по оси x .

Преобразователь подключен к генератору V , создающему на электродах пластины переменное напряжение $\Delta\varphi$ (разность потенциалов). Элементы Z_a и Z_B – комплексные сопротивления цепи генератора (Z_A) и элементов, подключенных параллельно пластине (Z_B).

В режиме излучения генератор напряжением V создает в цепи Z_A ток J_A , который ответвляется частично в цепь Z_B , создавая ток J_B , и частично уходит в пластину J_n , создавая на ней падение напряжения $\Delta\varphi$.

Для расчета режима излучения необходимо построить эквивалентную электрическую схему преобразователя, в которой он будет представлять некоторую пассивную нагрузку Z_n , и найти выражение для волны, излучаемой в изделии. Такую задачу называют расчетом электроакустического тракта дефектоскопа.

Для ее решения необходимо сформулировать граничные условия и решить систему уравнений, которые мы получили

$$\begin{cases} \sigma = C_D \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D; \\ E = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}. \end{cases} \quad (2.29)$$

Будем считать, что нижняя грань пластины расположена в точке $x = 0$. Тогда верхняя грань будет находиться в точке h .

Решение этой системы будем проводить в следующей последовательности.

1. Выразим электростатическую индукцию D через параметры электрической цепи, V и через смещение ΔU .

проинтегрируем второе уравнение по толщине пластины

$$\begin{aligned} \int_{-h}^0 E dx &= \int_{-h}^0 \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} D dx - \int_{-h}^0 \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} dx = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} Dh - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} U \Big|_{-h}^0 = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} Dh - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} (U_0 - U_{-h}) = \\ &= \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} Dh - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U; \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\int_{-h}^0 E dx = E \cdot x \Big|_{-h}^0 = E \cdot h = \Delta \phi. \quad (2.31)$$

Получим

$$\Delta \phi = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0} Dh - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U. \quad (2.32)$$

Здесь ΔU – разность смещений граней пластины, т. е. суммарное изменение ее толщины.

Отсюда можно найти D

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} \Delta \phi + \frac{e}{h} \Delta U. \quad (2.33)$$

2. Для вычисления D надо знать $\Delta \phi$. Выразим $\Delta \phi$ через элементы электрической цепи.

$$\Delta \phi = J_B \cdot Z_B = (J_A - J_n) \cdot Z_B$$

$$J_A = \frac{V - \Delta \phi}{Z_A}$$

$$\Delta \phi = \left(\frac{V - \Delta \phi}{Z_A} - J_n \right) \cdot Z_B = V \frac{Z_B}{Z_A} - \Delta \phi \frac{Z_B}{Z_A} - J_n \cdot Z_B$$

$$\Delta \phi \left(1 + \frac{Z_B}{Z_A} \right) = V \frac{Z_B}{Z_A} - J_n \cdot Z_B = \Delta \phi \left(\frac{Z_A + Z_B}{Z_A} \right)$$

$$\Delta\phi = V \frac{Z_B \cdot Z_A}{Z_A(Z_A + Z_B)} - J_n \frac{Z_B \cdot Z_A}{Z_A + Z_B}$$

$$\Delta\phi = \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} (V - J_n Z_A). \quad (2.34)$$

Здесь нам известен J_n (ток пластины).

3. Найдем ток пластины J_n .

Т. к. пластина – диэлектрик, то ток через диэлектрик – это ток смещения. Если пластина имеет площадь S , то

$$J_n = S \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2.35)$$

где D – это электростатического смещения.

Обычно генератор создает гармоническое напряжение

$$V = V_0 \cdot e^{-j\omega t}. \quad (2.36)$$

Тогда D имеет точно такой же вид

$$D = D_0 \cdot e^{-j\omega t}. \quad (2.37)$$

Следовательно,

$$J_n = -j\omega S \cdot D \quad (2.38)$$

или

$$J_n = -j\omega S \left[\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{h} \Delta\phi + \frac{e}{h} \Delta U \right] = -j\omega S \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{h} \left[\Delta\phi + \frac{e \cdot h}{h \cdot \varepsilon\varepsilon_0} \Delta U \right]. \quad (2.39)$$

Но $\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{n} = C_{nl}$ – емкость пластины, следовательно,

$$J_n = -j\omega C_{nl} \left[\Delta\phi + \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \Delta U \right] = \frac{1}{-j\omega C_{nl}} = Z_{nl} \quad (2.40)$$

$$J_n = \frac{1}{Z_c} \left[\Delta\phi + \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \Delta U \right]. \quad (2.41)$$

4. Продолжаем находить $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \left\{ V - \frac{Z_A}{Z_C} \left[\Delta\phi + \frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} \Delta U \right] \right\}. \quad (2.42)$$

Внесем член, содержащий $\Delta\phi$ в левую часть

$$\begin{aligned}\Delta\phi + \frac{Z_A \cdot Z_B}{(Z_A + Z_B)Z_C} \Delta\phi &= \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \left(V - \frac{Z_A e}{Z_C \varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right) \\ \Delta\phi \left[\frac{Z_A Z_C + Z_B Z_C + Z_A Z_B}{(Z_A + Z_B)Z_C} \right] &= \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \left(V - \frac{Z_A e}{Z_C \varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right) \\ \Delta\phi &= \frac{Z_B Z_C}{Z_A Z_C + Z_B Z_C + Z_A Z_B} \left(V - \frac{e Z_A}{\varepsilon \varepsilon_0 Z_C} \Delta U \right).\end{aligned}$$

Введя такое обозначение, получим

$$\Delta\phi = B \left(V - \frac{Z_A \cdot e}{Z_C \varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right). \quad (2.43)$$

Таким образом, мы разность потенциалов на пластине $\Delta\phi$ выразим через элементы электрической цепи.

5. Теперь мы можем вычислить D .

Первоначально было

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} \Delta\phi + \frac{e}{h} \Delta U. \quad (2.44)$$

Подставляем сюда $\Delta\phi$

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} B \left(V - \frac{Z_A \cdot e}{Z_C \varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right) + \frac{e}{h} \Delta U. \quad (2.45)$$

Откроем скобки

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} B V - \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} B \frac{Z_A e}{Z_C \cdot \varepsilon \varepsilon_0} \Delta U + \frac{e}{h} \Delta U;$$

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} B V + \left(1 - B \frac{Z_A}{Z_C} \right) \frac{e}{h} \Delta U;$$

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} B V + B \left(\frac{1}{B} - \frac{Z_A}{Z_C} \right) \frac{e}{h} \Delta U.$$

Отсюда получаем

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 B}{h} V + \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) \frac{e B}{h} \Delta U; \quad (2.46)$$

$$D = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 B}{h} V + \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) \frac{e B}{h} \Delta U. \quad (2.47)$$

Таким образом, интегрирование второго уравнения дало нам возможность вычислить электронную деформацию D через элементы электрической цепи.

6. Полученное значение D подставим в первое уравнение системы для σ

$$\sigma = C_D \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} D = C_D \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e \cdot \varepsilon \varepsilon_0 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} V - \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{eB}{h} \Delta U; \quad (2.48)$$

$$\sigma = C_D \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{eB}{h} V - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U. \quad (2.49)$$

Это выражение – важный промежуточный результат. Здесь, в правой части, стоят все механические напряжения.

$C_D \frac{\partial U}{\partial x}$ – это напряжение, определяемое деформацией, оно соответствует обычным условиям распространения упругих волн;

$\frac{eB}{h} V$ – это механическое напряжение, вызванное действием генератора электрического напряжения V ;

$\left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U$ – это дополнительное механическое напряжение, возникающее вследствие смещения грани пластины (деформации по толщине).

Если e мало (например для кварца $e=0,175$), то третьим членом можно пренебречь, как членом второго порядка малости. Однако, для пьезоэлектрических материалов он дает заметный вклад.

На основании полученных выражений для тока пластины J_n и падения напряжения на ней $\Delta\phi$ мы можем построить эквивалентную схему преобразователя.

Мы имеем

$$\begin{cases} J_n = \frac{1}{Z_c} \left[\Delta\phi + \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right] \\ \Delta\phi = B \left[V - \frac{Z_A}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right] \end{cases} \quad (2.50)$$

подставим $\Delta\phi$ в J_n

$$\begin{aligned} J_n &= \frac{1}{Z_c} \left[B \left(V - \frac{Z_A}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right) \right] + \frac{1}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U = \\ &= \frac{B}{Z_c} V - \frac{B \cdot Z_A}{Z_c \cdot Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U + \frac{1}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U = \\ &= \frac{B}{Z_c} \left[V - \frac{Z_A}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U + \frac{1}{B} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right] = \\ &= \frac{B}{Z_c} \left[V + \left(\frac{1}{B} - \frac{Z_A}{Z_c} \right) \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{cases} J_n = \frac{B}{Z_c} \left[V + \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right] \\ \Delta \phi = B \left[V - \frac{Z_A}{Z_c} \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U \right] \end{cases} \quad (2.51)$$

Здесь: выражения в квадратных скобках – это напряжения, причем V – это напряжение генератора. Отсюда следует, что дробь $\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U$ – это тоже электрическое напряжение. Но это напряжение генерируется пластиной вследствие изменения ее толщины ΔU . Т. е. пластину можно заменить эквивалентным генератором напряжения $V_n = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta U$. Тогда получим

$$\begin{cases} J_n = \frac{B}{Z_c} \left[V + \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) V_n \right]; \\ \Delta \phi = B \left[V - \frac{Z_A}{Z_c} V_n \right]. \end{cases} \quad (2.52)$$

Из второго выражения следует, что генератор V_n подключен к основному генератору V встречно. Т. е. можно нарисовать схему, представленную на рис. 2.3:

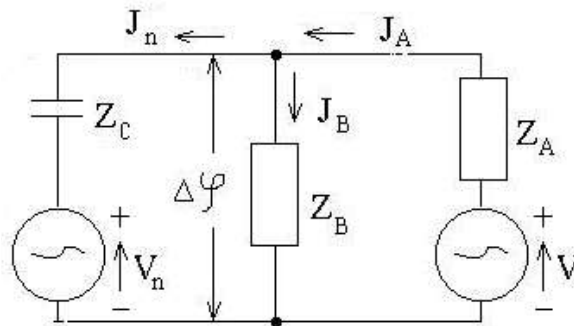


Рис. 2.3

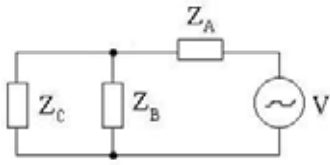
$$C_n = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h};$$

$$Z_c = -\frac{1}{j\omega C_n};$$

$$V_n = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \Delta h.$$

Для проверки соответствия этой схемы уравнениям для J_n и $\Delta \phi$, необходимо найти J_n и $\Delta \phi$ из этой схемы, пользуясь законами Кирхгоффа.

Получим сначала выражение для $\Delta\phi$. Оно будет складываться из двух напряжений:



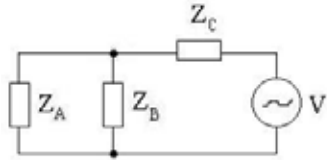
напряжение от генератора V , через делитель

Z_A – последовательно,

Z_B, Z_C – параллельно.

То есть

$$\frac{Z_B \parallel Z_C}{Z_A + Z_B \parallel Z_C} V$$



напряжение от генератора V_n , через делитель

Z_C – последовательно,

Z_A, Z_B – параллельно.

Т. е.

$$\frac{Z_A \parallel Z_B}{Z_C + Z_A \parallel Z_B} V_n.$$

Эти напряжения действуют противофазно, поэтому

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{Z_B \parallel Z_C}{Z_A + Z_B \parallel Z_C} V - \frac{Z_B \parallel Z_A}{Z_C + Z_B \parallel Z_A} V_n = \frac{Z_B \cdot Z_C}{(Z_B + Z_C) \left(Z_A + \frac{Z_B \cdot Z_C}{Z_B + Z_C} \right)} V - \\ &- \frac{Z_A Z_B}{(Z_A + Z_B) \left(Z_C + \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} \right)} V_n = \frac{Z_B \cdot Z_C}{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C} V - \\ &- \frac{Z_A Z_B Z_C}{(Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C) Z_C} V_n = BV - \frac{Z_A}{Z_C} BV_n \end{aligned}$$

или получаем:

$$\Delta\phi = B \left[V - \frac{Z_A}{Z_C} V_n \right]. \quad (2.53)$$

Т. е. нарисованная нами схема дает такое же значение для $\Delta\phi$, с которым мы подошли. Аналогично мы можем получить из этой схемы выражение для J_n

$$J_n = \frac{\Delta\phi + V_n}{Z_C} = \frac{B \left[V - \frac{Z_A}{Z_C} V_n \right]}{Z_C} + \frac{V_n}{Z_C}. \quad (2.54)$$

Вынесем сразу B

$$J_n = \frac{B}{Z_C} \left[V - \frac{Z_A}{Z_C} V_n + \frac{1}{B} V_n \right] = \frac{B}{Z_C} \left[V + \left(\frac{1}{B} - \frac{Z_A}{Z_C} \right) V_n \right] = \frac{B}{Z_C} \left[V + \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) V_n \right]. \quad (2.55)$$

Т. е. опять такое же выражение для J_n , с которым мы подошли. Следовательно, наша схема действительно дает эквивалентное представление для преобразователя.

Полученное нами уравнение для σ дает возможность решать задачу об излучении ультразвука преобразователем. Мы получим

$$\sigma = C_D \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{eB}{h} V - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\epsilon \epsilon_0 h} \Delta U. \quad (2.56)$$

Для решения этого уравнения в частных производных первого порядка необходимо сформулировать граничные условия. Для их получения рассмотрим акустическую схему преобразователя, представленную на рис. 2.4.

Рассмотрим границу $x = -h$. Здесь излучаемая волна будет выходить из пластины в слой с акустическим импедансом Z_0 . (Мы рассматриваем только нормальную составляющую). Если между Z_1 и Z_0

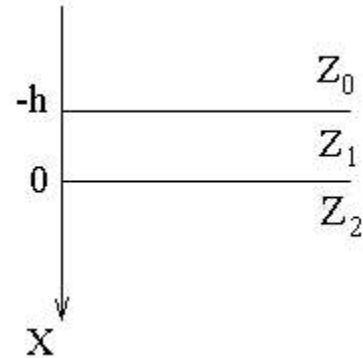


Рис. 2.4

нет промежуточных слоев, то входной импеданс для выходящей волны будет равен Z_0 . Акустический импеданс – это есть отношение давления P к нормальной составляющей колебательной скорости v ,

$$z = \frac{P}{v}.$$

Откуда

$$P = Z \cdot v.$$

Отсюда можно получить условие на границе $x = -h$

$$P = \Big|_{x=-h} = Z_0 \cdot v \Big|_{x=-h} = Z_0 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=-h}. \quad (2.57)$$

Теперь, если мы рассматриваем единичную площадку, т. е. вместо давления P можно поставить σ , учитывая при этом, что σ считаются положительными, когда они растягивающие, а P – когда они сжимающие.

Тогда получим

$$\begin{cases} \sigma \Big|_{x=-h} = -Z_0 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=-h}; \\ \sigma \Big|_{x=0} = -Z_2 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=0}. \end{cases} \quad (2.58)$$

С учетом этих граничных условий получим систему уравнений

$$\begin{aligned}\sigma \Big|_{x=-h} &= -Z_0 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=-h} = C_D \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=-4} - \frac{eB}{h} V - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U; \\ \sigma \Big|_{x=0} &= -Z_2 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=0} = C_D \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{eB}{h} V - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U.\end{aligned}\quad (2.59)$$

Первое уравнение описывает смещение верхней грани пластины, второе – нижней. Сумма этих смещений дает нам колебание пластины по толщине

$$\Delta U = U \Big|_0 - U \Big|_{-h}.$$

Тогда получается следующая система уравнений для двух границ

$$\begin{cases} -Z_0 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=-h} = C_D \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=-4} - \frac{eB}{h} V e^{-j\omega t} - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U; \\ -Z_2 \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=0} = C_D \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} - \frac{eB}{h} V e^{-j\omega t} - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} \Delta U.\end{cases}\quad (2.60)$$

Это есть система дифференциальных уравнений первого порядка в пространстве $\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)$ и времени $\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)$.

Решение таких уравнений обычно ищут в виде гармоничной в пространстве и времени волны. Причем, в общем случае, для того, чтобы учесть явления отражения на границах, считают, что в пластине распространяется прямая волна с амплитудой U^+ и отраженная с амплитудой U^- .

Т. е. в общем виде

$$U(x, t) = (U^+ \cdot e^{jk_1 x} + U^- \cdot e^{-jk_1 x}) \cdot e^{-j\omega t}, \quad (2.61)$$

где $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ – волновое число для пластины.

Приняв решение в таком виде, мы можем найти скорости $\left(\frac{\partial U}{\partial t}\right)$ для $x = -h$ и $x = 0$.

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=-4} = -j\omega [U^+ \cdot e^{-jk_1 h} + U^- \cdot e^{jk_1 h}] \cdot e^{-j\omega t}; \\ \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{x=0} = -j\omega [U^+ + U^-] \cdot e^{-j\omega t}.\end{cases}\quad (2.62)$$

Аналогично для производных по x . В общем виде

$$\frac{\partial U}{\partial x} = e^{-j\omega t} [jk_1 U^+ e^{jk_1 x} - jk_1 U^- e^{-jk_1 x}]. \quad (2.63)$$

Тогда для $x = -h$ и $x = 0$ будем иметь

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=-h} = -jk_1 [U^+ \cdot e^{-jk_1 h} + U^- e^{jk_1 h}] \cdot e^{-j\omega t}; \\ \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = -jk_1 [U^+ + U^-] \cdot e^{-j\omega t}. \end{cases} \quad (2.63)$$

Нам осталось записать еще суммарное изменение толщины пластины ΔU . Оно равно

$$\Delta U = U \Big|_0 - U \Big|_{-h},$$

т. е.

$$\Delta U = (U^+ + U^-) e^{-j\omega t} - (U^+ e^{-jk_1 h} + U^- e^{jk_1 h}) e^{-j\omega t}$$

или

$$\Delta U = [U^+ (1 - e^{-jk_1 h}) + U^- (1 - e^{jk_1 h})] e^{-j\omega t}.$$

Подставим теперь $\left. \frac{\partial U}{\partial t} \right|_{x=-h}$; $\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=h}$; ΔU в первое граничное условие

$$\begin{aligned} j\omega Z_0 [U^+ e^{-jk_1 h} + U^- e^{jk_1 h}] e^{-j\omega t} &= jk_1 C_D [U^+ e^{-jk_1 h} - U^- e^{jk_1 h}]. \\ \cdot e^{-j\omega t} - \frac{eB}{h} V_0 e^{-j\omega t} - \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\varepsilon \varepsilon_0 h} [U^+ (1 - e^{-jk_1 h}) + U^- (1 - e^{jk_1 h})] \cdot e^{-jk_1 t}; \end{aligned}$$

сократим везде $e^{-j\omega t}$;

разделим все на $j\omega$.

Перед первым членом в правой части уравнения получится

$$\frac{jk_1 C_D}{j\omega} = \frac{2\pi C_D}{\lambda_1 \omega} = \frac{2\pi C_D t}{C_1 \omega} = \frac{C_D}{C_1}.$$

Ранее мы записывали, что модуль упругости C_D также определяет скорость распространения продольных волн C_1 , причем

$$C_1 = \sqrt{\frac{C_D}{\rho}},$$

т. е.

$$C_D = \rho C_1^2,$$

тогда

$$\frac{C_D}{C_1} = \frac{\rho C_1^2}{C_1} = \rho C_1 = Z_1.$$

Перед вторым и третьим членами появится множитель $\frac{1}{j\omega}$. Переместив j из знаменателя в числитель, мы одновременно поменяем знаки. Тогда получим

$$Z_0 [U^+ e^{-jk_1 h} + U^- e^{jk_1 h}] = Z_1 [U^+ e^{-jk_1 h} - U^- e^{jk_1 h}] + j \frac{eB}{h\omega} V_0 + j \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\omega \varepsilon \varepsilon_0 h} [U^+ (1 - e^{-jk_1 h}) + U^- (1 - e^{jk_1 h})]. \quad (2.65)$$

Аналогичное выражение получится для нижней грани пластины, если мы во второе граничное условие подставим $\sigma|_{x=0}$; $\frac{\partial U}{\partial t}|_{x=0}$; $\frac{\partial U}{\partial x}|_{x=0}$; ΔU . Получим

$$Z_2 [U^+ + U^-] = Z_1 [U^+ - U^-] + j \frac{eB}{h\omega} V_0 + j \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) \frac{e^2 B}{\omega \varepsilon \varepsilon_0 h} [U^+ (1 - e^{-jk_1 h}) + U^- (1 - e^{jk_1 h})]; \quad (2.66)$$

Получается система уравнений, решая которую, можно рассчитать U^+ и U^- и, зная их, определить колебания пластины по толщине ΔU .

В результате такого решения получим

$$\Delta U = \frac{eB V_0}{jh_1 \omega Z_1} \cdot \frac{F}{1 + jg \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B}\right) FB}; \quad (2.67)$$

где $F = \frac{\xi_1 + \xi_2}{\xi_3}$;

$$\xi_1 = 1 - \cos k_1 h_1 - j \frac{Z_0}{Z_1} \sin k_1 h_1;$$

$$\xi_2 = 1 - \cos k_1 h_1 + j \frac{Z_2}{Z_1} \sin k_1 h_1;$$

$$\xi_3 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_1} \cos k_1 h_1 - j \left(1 - \frac{Z_2 Z_0}{Z_1}\right) \sin k_1 h_1;$$

$$g = \frac{e^2}{\omega \varepsilon \varepsilon_0 h Z_1} = \frac{\beta^2 f_0}{\pi f};$$

f_0 – частота, при которой толщина пластины равна половине длины волны (резонансная частота $f = \frac{\omega}{2\pi}$);

β – коэффициент электромеханической связи.

При вводе УЗ в материал нас интересуют колебания нижней грани пластины и акустическое напряжение σ бегущей волны в ближайшей

к пьезопластине протяженной среде. При этом необходимо учитывать прохождение ультразвука через систему слоев, находящихся между нижней гранью пластины и изделием. Ослабление волны в наборе тонких слоев от второго до n -го (первый слой – это пластина) записывается в виде произведения ослаблений в каждом из слоев. Т. е. суммарное ослабление равно

$$G = \prod_{i=2}^n \left(\cos k_i h_i - \frac{Z_{i+1}}{Z_i} \sin k_i h_i \right), \quad (2.68)$$

где k_i, h_i, Z_i – волновое число, толщина, импеданс i -го слоя, соответственно,

Z_{i+1} – входной импеданс $(i+1)$ -го слоя.

Тогда напряжение волны в изделии будет равно

$$\sigma = \frac{eB}{h_1} V_0 \frac{Z}{Z_1} F_1 G,$$

где $F_1 = \frac{\xi_1 / \xi_3}{1 + jg \left(1 + \frac{Z_A}{Z_B} \right) FB}$

Z – импеданс изделия.

Зная σ можно найти давление, создаваемое пластиной, учитывая, что площадь пластины S и P имеет другой знак по отношению к σ .

$$P_0 = -\frac{eB}{h} V_0 \frac{Z}{Z_1} F_1 G S \quad (2.89)$$

или по модулю

$$|P_0| = L \cdot V_0,$$

где $L = \frac{eBSZ}{h_1 Z_1} F_1 G$ – называется коэффициентом преобразования при излучении.

Аналогично можно рассмотреть и работу преобразователя в режиме приема.

Режим приема УЗК

При решении задачи о приеме УЗК расчетная схема совпадает с рис. 2.5, только генератор отсутствует и Z_a и Z_b будут включены параллельно. Из изделия с характеристическим импедансом $Z = \rho C$ падает волна с акустическим напряжением σ' на промежуточные слои и, прой-

для их – на пьезопластину. Пьезопластина генерирует электрическое напряжение V' на входном сопротивлении Z_a' . Это напряжение равно

$$V' = \sigma' \frac{2e'S'}{h'Z_1'} Z_a' B' F_1' G'$$

здесь S' – площадь пьезопластины.

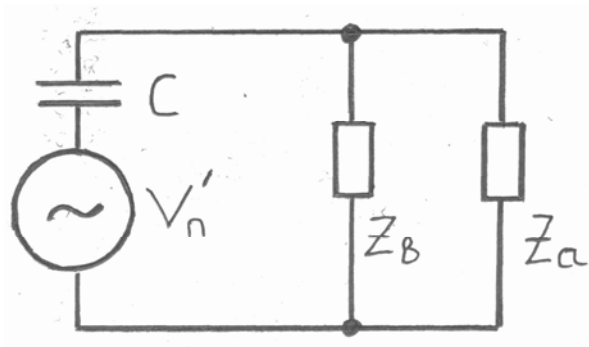


Рис. 2.5

Величины $L = \frac{\sigma}{V}$ и $M = \frac{V'}{\sigma'}$ называют **коэффициентами преобразования при излучении и приеме.**

Очень часто излучение и прием производят одним и тем же преобразователем. Тогда общая чувствительность определяется **коэффициентом двойного преобразования**

$$k = LM = \frac{2e^2 S Z Z_a}{h_1^2 Z_1^2} (B F_1 G)^2 = \frac{2}{\pi} \beta^2 \omega_0 C \frac{Z}{Z_1} Z_a (B F_1) \quad (2.70)$$

Задача вычисления амплитуды акустического сигнала при контроле методом отражения или прохождения рассматривается в следующей последовательности:

1. Амплитуда акустического сигнала равна

$$|\sigma| = |LV|$$

2. Акустическая волна испытывает ослабление в результате прохождения через объект контроля и рассеяние на дефекте. Это ослабление учитывается функцией N .

3. Амплитуда волны, пришедшей к приемнику

$$|\sigma'| = |N\sigma|$$

4. Амплитуда сигнала на входе приемника дефектоскопа

$$|V'| = |M\sigma'| = |kNV|$$

Обычно решение такой задачи разделяют на две:

- определение коэффициента двойного преобразования $k = LM$ – задача об электроакустическом тракте дефектоскопа;

- определение N – задача об акустическом тракте дефектоскопа.

Выбор параметров преобразователей

Основные требования к преобразователям

При проектировании УЗ дефектоскопов решаются следующие основные задачи:

1. Достижение максимальной чувствительности, т. е. максимального значения модуля коэффициента двойного преобразования k на некоторой оптимальной рабочей частоте.
2. Получение максимальной ширины полосы пропускания частот, т. е. расширение АЧХ коэффициента преобразования k . Широкополосность преобразователя обеспечивает возможность формирования акустического импульса заданной формы при излучении и возможность неискаженного восстановления акустического импульса при приеме.
3. Достижение максимальной стабильности акустического контакта преобразователя с объектом контроля. Это условие обеспечивает постоянство величины k при перемещении преобразователя по поверхности контролируемого изделия. При постоянном акустическом контакте в результате измерения будет вноситься дополнительная погрешность. Численно стабильность контакта оценивается статическим и динамическим коэффициентами.
4. Снижение шумов преобразователя. Шум определяется реверберационно-шумовой характеристикой, т. е. зависимостью амплитуды шумов от времени после окончания зондирующего импульса. Главный источник шумов – многократное отражение УЗК от протектора, демпфера и других конструктивных элементов.
5. Согласование полного электрического сопротивления преобразователя с генератором и усилителем. Полное электрическое сопротивление зависит от электрической и акустической нагрузок и является величиной комплексной.
6. Формирование акустического поля с заданными параметрами.
7. Повышение износостойкости преобразователя.

Рассмотрим применяемые в настоящее время технические решения для выполнения перечисленных требований.

Достижение максимальной чувствительности

Для достижения максимальной чувствительности преобразователь возбуждают радиоимпульсом с частотой заполнения, равной собственной частоте пьезопластины. С этой целью пластину включают в колебательный контур по схеме рис. 2.6.

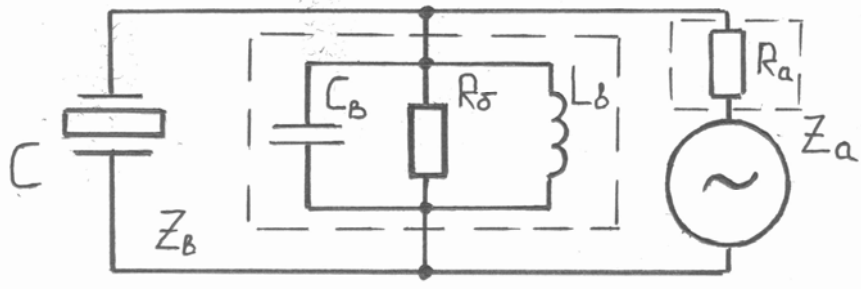


Рис. 2.6

Для такой схемы $Z_a = R_a$. Z_b состоит из параллельно соединенных сопротивления R_b , емкости соединительного кабеля C_b , индуктивности контура L_b . Поэтому в общем случае

$$\frac{1}{Z_b} = \frac{1}{R_b} - \frac{1}{j\omega L_b} - j\omega C_b.$$

Рассчитаем значение двойного коэффициента преобразования k при условии совпадения резонансной частоты контура и пьезопластины. Под резонансной частотой пьезопластины понимают частоту, при которой по толщине пластины укладывается половина длины волны. На этой частоте эквивалентное сопротивление пьезопластины обращается в ∞ . То есть выполняется условие

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \pi \frac{C_l}{h_1}. \quad (2.71)$$

Электрическая добротность такого контура

$$Q_s = \omega_0 R_0 C,$$

где $R_0 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}$ – параллельно соединенные сопротивления.

Считаем $C_b = 0$. Тогда при $\omega = \omega_0$ получим

$$1 + \frac{Z_a}{Z_b} = (1 + jQ_s) \frac{R_a}{R_b};$$

$$\frac{1}{B} = (1 + jQ_s) \frac{R_a}{R_0}.$$

Если пьезоэлемент нагружен с одной стороны на демпфер, а с другой – на протяженную среду (изделие), то при $\omega = \omega_0$ можно вычислить также коэффициент F_1

$$F_1 = \frac{2}{\frac{-(Z + Z_0)}{Z_1} + 4jg(1 + jQ_s)},$$

где Z_0 – акустический импеданс демпфера;
 Z – акустический импеданс изделия;
 Z_1 – акустический импеданс пластины.

Подставляя значения, приведенные выше в выражение для k , получаем

$$|k| = \frac{\frac{8}{\pi} \beta^2 \frac{Z}{Z_1} Q_3 \frac{R_0}{R_a}}{\left(\frac{Z + Z_0}{Z_1} + \frac{4}{\pi} \beta^2 Q_3 \right)^2 + \left(\frac{4\beta}{\pi} \right)^2}. \quad (2.72)$$

Величиной $\left(\frac{4\beta}{\pi} \right)^2$ обычно пренебрегают ввиду ее малости. Кроме этого для преобразователя вводят понятие **акустической добротности** Q_a . Она определяется отношением акустического импеданса пластины к суммарному акустическому импедансу демпфера и изделия

$$Q_a = \frac{\pi Z_1}{2(Z + Z_0)}. \quad (2.73)$$

С учетом этого выражения для k записывается в виде

$$|k| = \frac{\frac{32}{\pi} \beta^2 \frac{Z}{Z_1} \frac{R_0}{R_a} Q_3 Q_a^2}{\left(1 + \frac{8}{\pi} \beta^2 Q_3 Q_a \right)^2}, \quad (2.74)$$

где β – коэффициент электромеханической связи.

Максимальная чувствительность получается при

$$Q_3 = \frac{\pi^2}{8\beta^2 Q_a}.$$

В этом случае правое слагаемое в знаменателе принимает минимальное значение, равное 1, а

$$|k_{\max}| = \frac{R_0 Z}{2R_a (Z + Z_0)}.$$

Из этой формулы видно, что k_{\max} уменьшается с увеличением акустического импеданса демпфера.

Чувствительность можно повысить применением согласующего четвертьволнового протектора, для которого $k_2 h_2 = \frac{\pi}{2}$. В этом случае

$$|k_{\text{прот}}|_{\max} = \frac{R_0 Z}{R_a (Z + Z_0)}. \quad (2.75)$$

Расширение полосы частот

Для анализа полосы пропускания излучателя приемника используют выражение для k

$$k = \frac{2}{\pi} \beta^2 \omega_0 C \frac{Z}{Z_1} Z_a (BF_1 G)^2. \quad (2.76)$$

Такие расчеты выполняют обычно на ЭВМ, Примеры таких расчетов для преобразователей, работающих на иммерсионную жидкость, приведены на рис. 2.7.

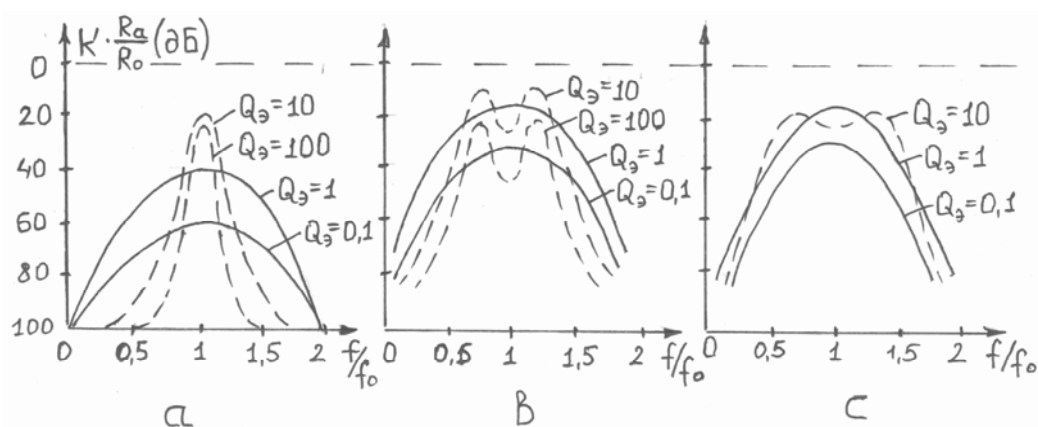


Рис. 2.7

Для кварцевого преобразователя k достигает максимума при $f=f_0$. Увеличение электрической добротности увеличивает k , однако при этом уменьшается полоса частот. Оптимальные условия работы с точки зрения расширения полосы пропускания на уровне $0,1k_{\max}$ получаются при $Q_s = 2-4$. При этом полоса частот составляет около 30 % от f_0 . Увеличивая акустическое сопротивление демпфера (уменьшая добротность) полосу частот можно расширить. Однако при этом падает чувствительность.

Для керамических пьезоматериалов кривая $k\left(\frac{f}{f_0}\right)$ имеет один максимум только при $Q_s < 1$. При $Q_s > 10$ кривые имеют минимум в точке $f=f_0$ и два максимума в точках, равных приблизительно $0,8f_0$ и $1,2f_0$.

Появление двух максимумов связано с тем, что пластина и контур представляют собой два связанных колебательных контура с сильной связью между собой, приводящей к появлению минимума при резонансе. При малой добротности проявляются только резонансные свойства пластины и на кривой имеется 1 максимум.

Если для преобразователя на ЦТС ввести демпфер и просветляющий протектор, то удастся расширить полосу пропускания с сохранением чувствительности (рис. 2.7, с).

Просветляющий четвертьволновый протектор оказывает особенно благоприятное влияние, т. к. он одновременно снижает акустическую добротность за счет более полного отвода акустической энергии в изделие.

Чаще всего в импульсных дефектоскопах возбуждающий импульс имеет вид затухающей синусоиды (рис. 2.8, а) или колоколообразный радиоимпульс (рис. 2.8, б).

Колоколообразный радиоимпульс имеет наиболее узкий частотный спектр.

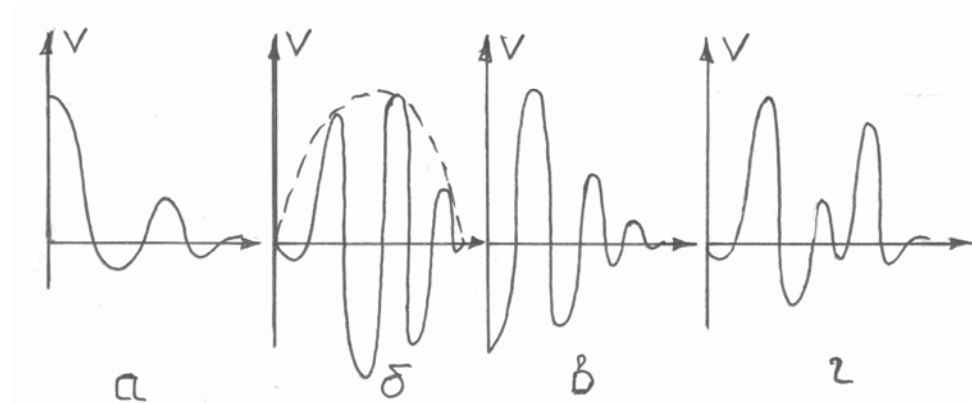


Рис. 2.8

В связи с низкой эффективностью возбуждения – приема низких и высоких частот формы электрического сигнала при приеме акустического сигнала или при возбуждении, отличаются от порождающих их принимаемого акустического сигнала или возбуждающего электрического сигнала.

Например, вместо импульса (рис. 2.8, а) образуется импульс (рис. 2.8, в). При регистрации преобразователем с двумя максимумами сигнал будет иметь форму, как на рис. 2.8, г.

Широкополосность очень важна для уменьшения мертвой зоны, т. к. с расширением полосы пропускания уменьшается длительность реверберации импульса.

§ 2.4. Классификация преобразователей и основные требования, предъявляемые к ним

Преобразователи для приборов неразрушающего контроля классифицируются по ряду признаков.

По способу акустического контакта твердотельной части преобразователя (протектора, призмы) с контролируемым объектом **различают:**

контактные преобразователи, которые прижимаются к поверхности изделия, предварительно смазанной жидкостью (маслом, глицерином и т. п.); в некоторых случаях слой жидкости заменяют эластичным материалом (эластичным протектором);

иммерсионные преобразователи, между поверхностью которых и изделием имеется толстый слой жидкости (толщина этого слоя во много раз превышает длину волны); при этом изделие целиком или частично погружают в иммерсионную ванну, используют струю воды и т. д.;

контактно-иммерсионные преобразователи, которые имеют локальную иммерсионную ванну с эластичной мембраной, контактирующей с изделием непосредственно или через тонкий слой жидкости;

щелевые (менисковые) преобразователи, между поверхностью которых и изделием создается зазор порядка длины волны ультразвука; жидкость в зазоре удерживается силами поверхностного натяжения;

преобразователи с сухим точечным контактом, имеющие шарообразную поверхность, плотно соприкасающуюся с изделием; площадь соприкосновения 0.01–0.5 мм²;

бесконтактные преобразователи, возбуждающие акустические колебания в изделии через слой воздуха (воздушно-акустическая связь) с помощью электромагнитно-акустических и оптико-тепловых эффектов; чувствительность этих преобразователей в десятки тысяч раз ниже чувствительности других преобразователей, поэтому они не нашли широкого практического применения.

Использование контактных преобразователей с эластичным проектором, а также щелевых, контактно-иммерсионных и бесконтактных преобразователей позволяет снизить требования к чистоте поверхности контролируемого изделия.

По способу соединения преобразователей с электрической схемой прибора можно выделить:

совмещенные преобразователи, которые соединяются одновременно с генератором и усилителем прибора и служат как для излучения, так и приема ультразвука;

раздельные преобразователи, состоящие из излучателя, соединенного с генератором прибора, и приемника, соединенного с усилителем;

раздельно-совмещенные преобразователи, состоящие из излучающего и приемного элементов, конструктивно связанных между собой, но разделенных электрическим и акустическим экранами.

По направлению акустической оси преобразователя подразделяют на:

прямые, излучающие волны нормально к поверхности изделия;

наклонные.

Раздельно-совмещенные преобразователи называют нормальными или наклонными, в зависимости от направления их общей акустической оси, соответствующей направлению максимальной чувствительности таких преобразователей. Преобразователи с переменным углом наклона позволяют изменять угол ввода лучей.

По форме акустического поля различают:

плоские преобразователи с пьезопластиной плоской формы, у которых форма акустического поля зависит от формы электродов, поляризации пьезопластины и т. п.;

фокусирующие преобразователи, обеспечивающие сужение акустического поля в некоторой области контролируемого объекта;

широконаправленные (или веерные), излучающие пучок расходящихся лучей;

фазированные решетки (мозаичные преобразователи), представляющие собой плоский преобразователь, состоящий из ряда отдельно управляемых элементов; подавая различные по фазе и амплитуде сигналы на эти элементы, можно изменять направление излучения (т. е. угол ввода), добиваться фокусировки или расфокусировки, устранять боковые лепестки.

По ширине полосы рабочих частот выделяют узкополосные и широкополосные преобразователи; к первому типу условно относят преобразователи с шириной полосы пропускания меньше одной октавы, а ко второму – с шириной полосы пропускания больше одной октавы (отношение максимальной частоты к минимальной больше двух); широкополосности можно достигнуть, если сделать пьезоэлемент переменной толщины, включить в конструкцию несколько активных (т. е. из пьезоэлектрических материалов) и пассивных (непьезоэлектрических) слоев, использовать толстый пьезоэлемент, излучающий только своей поверхностью (остальная часть пластины служит просто волноводом); в зависимости от способа достижения широкополосности различают преобразователи переменной толщины, многослойные преобразователи и толстые, или аперодические, преобразователи.

Преобразователи для контроля эхо-методом

Современные дефектоскопы комплектуют обычно целым набором излучателей и приемников ультразвуковых волн. Они отличаются по ряду признаков:

- по способу контакта с изделием различают – **контактные, щелевые, иммерсионные преобразователи**;
- по направлению УЗ колебаний к поверхности изделия – **прямые и наклонные**;
- по способу соединения с дефектоскопом – **раздельные** (один элемент выполняет роль излучателя, другой – приемника), **совмещенные** (один и тот же элемент выполняет функции излучателя и приемника).

Кроме того существуют **специальные преобразователи**: фокусирующие, широкозахватные, для контроля по грубой поверхности, с переменным углом ввода. Рассмотрим устройство основных типов преобразователей.

Прямые преобразователи

Контактного типа для работы по совмещенной схеме. В отечественных преобразователях пьезопластина обычно изготавливается из ЦТС. В преобразователях фирмы «Крауткремер» пьезопластину изготавливают из кварца, хотя в последнее время часто применяют пьезокерамику. Применение кварца, обладающего низкой чувствительностью, объясняется его высокой стабильностью и равномерностью излучения всех элементов пластины. Толщину пьезопластины делают равной половине длины волны. Примеры практических конструкций приведены на рис. 2.9.

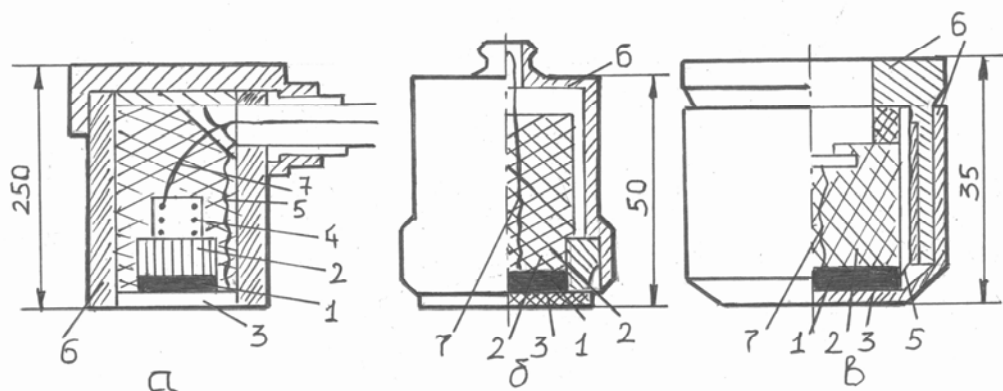


Рис. 2.9

Пластина 1 соединяется с кабелем и дефектоскопом проводниками 5, 7. Обычно один электрод соединяется с корпусом, который заземляется. В преобразователе «Снежинка» в демпфере размещают катушку индуктивности контура пьезопластины. Иногда даже внутри преобразователя помещают предусилитель. В преобразователе «Крауткремер» катушку индуктивности монтируют в разьеме кабеля, подсоединяемого к преобразователю. Преобразователь ИЦ-1 предназначен для работы с дефектоскопом, в котором катушки индуктивности размещены в приборе.

Пьезопластину приклеивают к демпферу 2. В преобразователе ИЦ-1 демпфер изготовлен из эпоксидной смолы. В его часть, прилегающую к пластине, вводят порошок вольфрама или свинца в пропорции 1:12 (по массе). Это повышает характеристический импеданс демпфера и увеличивает широкополосность преобразователя.

Протектор 3 преобразователя должен обладать высокой износостойчивостью, обеспечивает высокую чувствительность преобразователя и стабильность акустического контакта с изделием. В преобразователе «Снежинка» используют металлокерамический протектор. Он удовлетворяет лишь первым двум условиям. Протектор преобразователя ИЦ-1 изготавливают из материала с повышенным затуханием ультразвука – эпоксидной смолы с металлическим (обычно бериллиевым) наполнителем или из лигнофоля – прессованной древесины. Это повышает стабильность аку-

стического тракта, однако износостойкость такого протектора значительно хуже, чем металлокерамического. В преобразователе «Крауткремер» протектор выполнен из эластичного материала типа полиуретана. Он обладает большим поглощением звука, может деформироваться и до некоторой степени облегать неровности поверхности изделия, что повышает стабильность акустического контакта. Такой преобразователь позволяет контролировать изделия с неровностями поверхности до 0,2 мм без смазки жидкостью. Однако он не может скользить по поверхности изделия. Для сканирования его нужно отрывать и вновь плотно прижимать к поверхности, что сильно замедляет процесс контроля. Большое затухание в протекторе снижает чувствительность примерно на 20 дБ.

Размеры пьезопластины выбирают с учетом поля излучения – приема. Увеличение ее диаметра сужает диаграмму направленности в дальней зоне, но в то же время увеличивает протяженность ближней зоны, где выявление дефектов затруднено из-за наличия максимального и минимального сигнала. Целесообразно применять маленькие преобразователи для контроля тонких изделий и большие – для контроля изделий больших толщин.

В серийных преобразователях отечественных дефектоскопов отношение диаметра пьезопластины к длине волны в стали

$$\frac{2a}{\lambda_{cm}} = 2,5 - 8.$$

В других странах обычно применяют пьезопластины большего диаметра

$$\frac{2a}{\lambda_{cm}} = 4 - 20.$$

Максимальный диаметр пластин может достигать 50–100 мм.

Наклонные преобразователи

Отличаются от прямого наличием наклонной призмы (рис. 2.10).

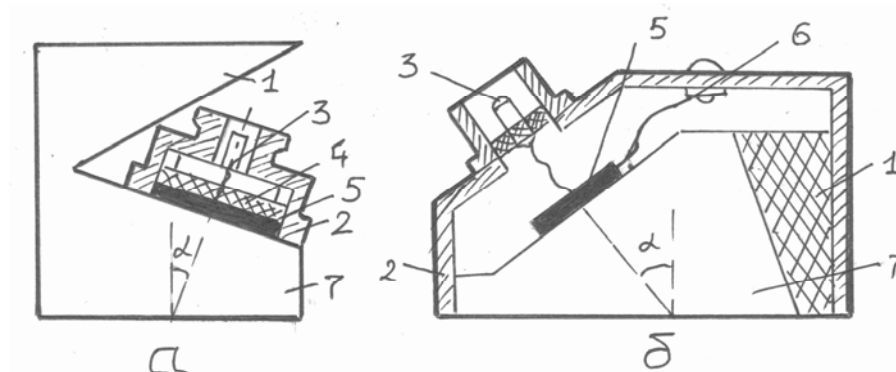


Рис. 2.10

Пьезоэлемент излучает в призму продольные волны, которые на границе призмы с изделием преломляются и трансформируются в поперечные. Не вошедшая в изделие часть ультразвуковой энергии попадает в ловушку и гасится в ней. Демпфер в наклонных преобразователях либо отсутствует, либо его делают из материала с малым акустическим сопротивлением (т. к. здесь нет идущей в направлении к пластине отраженной волны). Пьезопластину прижимают к призме через слой масла или приклеивают к ней. Призму чаще всего делают из оргстекла. Угол падения луча или преломляющий угол α выбирают таким, чтобы в изделии возникали только поперечные волны. Это условие выполняется в интервале между первым и вторым критическими углами. Особенное внимание уделяют на то, чтобы не возбуждалась поверхностная волна, т. к. она вызовет появление интенсивных ложных сигналов от неровностей поверхности изделия. Для этого необходимо выполнить условие

$$\alpha + \frac{\lambda_a}{2a} < \alpha_s,$$

где λ_a – длина волны в материале призмы;

$2a$ – диаметр пластины;

α_s – угол падения, при котором возбуждается поверхностная волна.

Для пары оргстекло–сталь при $\frac{\lambda_a}{2a} \leq 0,12$ угол α выбирают в пределах $28,5$ – 55° . При этом, согласно закону синусов, в стали будут возбуждаться поперечные волны под углами $\gamma_m = 35$ – 80° .

Если возникает задача возбуждения волны в изделии под меньшими углами преломления, угол падения выбирают меньше первого критического и используют продольную преломленную волну. Чтобы поперечная волна не мешала контролю, следует отступить от первого критического угла на 4 и более градусов в меньшую сторону. Например, для пары оргстекло–сталь при $\alpha = 18^\circ$ угол преломления продольной волны будет 45° , а поток энергии продольной волны в два раза больше потока энергии поперечной волны. Наклонные преобразователи с возбуждением продольных волн используют часто для контроля сварных швов.

Выбирая соответствующие углы наклона, с помощью наклонных преобразователей возбуждают поверхностные, поверхностно-продольные волны и различные моды волн в пластинах и стержнях.

При конструировании призмы обращают внимание на то, чтобы отраженные от поверхности призма–изделие волны попадали в ловушку, а не на пьезопластину. Для улучшения гашения ультразвуковых волн в ловушке ее грани иногда делают ребристыми или в ловушке сверлят много мелких отверстий.

Преобразователи с переменным углом наклона

Для определения оптимальных условий возбуждения поверхностных волн, волн в пластинах и стержнях требуется плавная регулировка угла наклонного преобразователя. Для этой цели иногда применяют преобразователи с переменным углом наклона (рис. 2.11)

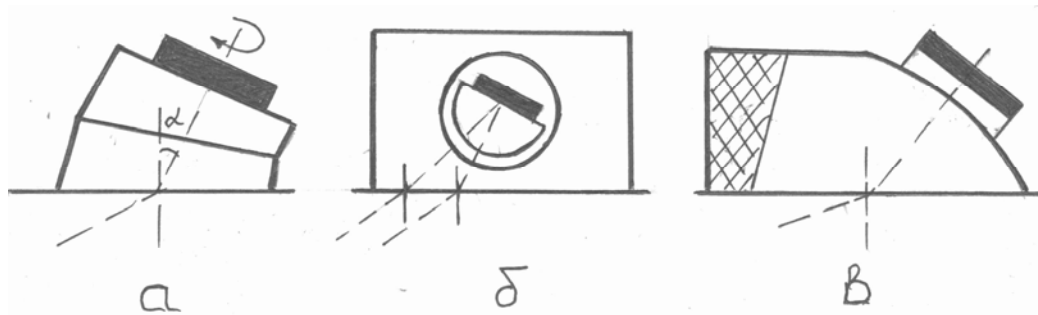


Рис. 2.11

В преобразователе – рис. 2.11, а два круговых клина вращаются друг относительно друга. На верхнем клине помещается пьезопластина. При вращении верхнего клина угол падения α изменяется от 0 до удвоенного угла наклона клина. При вращении точка входа луча в изделие смещается, что требует корректировки положения преобразователя на поверхности изделия. Кроме того в таком преобразователе имеется много помех от многократных отражений, ввиду чего его можно применять лишь при раздельной схеме включения. В преобразователе типа – рис. 2.11, б пластина укреплена на полуцилиндре, который вращается в блоке из того же материала. Здесь плоскость падения лучей сохраняется, однако точка входа лучей в изделие также смещается. Для того, чтобы сохранить положение точки ввода пучка в изделие при изменении угла наклона, применяют преобразователь – рис. 2.11, в, в котором пьезопластина с пластиковой прокладкой перемещается по цилиндрической поверхности из того же материала. Такой преобразователь может работать в совмещенном режиме, т. к. сохраняется не только плоскость наклона и точка ввода, но и длина пути луча в призме, что значительно ослабляет чувствительность, особенно на высоких частотах.

Раздельно-совмещенные преобразователи

Представлены на рис. 2.12.

Излучатель 1 и приемник 3 таких преобразователей разделены электрическим и акустическим экраном 2. В то же время они объединены конструктивно корпусом 4. Акустическая и электрическая изоляция должны быть такими, чтобы зондирующий импульс практически не попадал в приемник. Варьируя углами призм 5, 6 (от 0 до 10°), высотой и расстоянием между ни-

ми и размерами пьезоэлементов, можно изменять минимальную и максимальную глубину прозвучивания, уменьшать мертвую зону до 1–2 мм. Можно даже обеспечить постоянную чувствительность к дефектам при различном расстоянии от поверхности. Раздельно-совмещенному преобразователю свойственен специфический вид помех, связанный с передачей сигнала от излучателя к приемнику с помощью поверхностных волн.

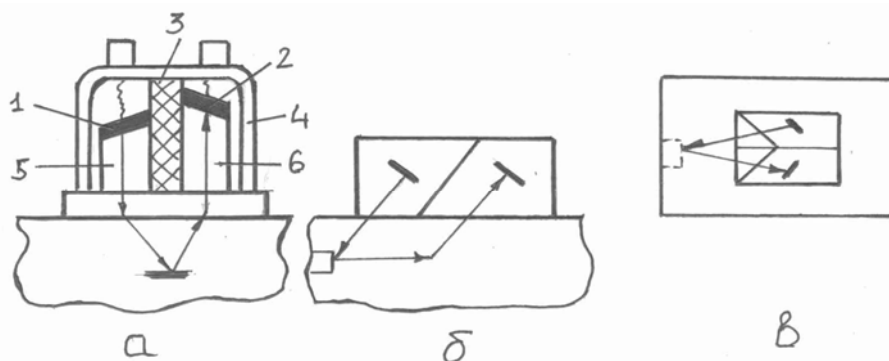


Рис. 2.12

Раздельно-совмещенные преобразователи применяют также как вариант наклонного преобразователя. В этом случае призмы выполняют таким образом, чтобы обеспечить большой угол наклона общей оси преобразователя и значительно меньший (от $0-10^\circ$) угол встречи осей излучателя и приемника.

Для возбуждения и приема поверхностно-продольных (головных) волн применяются преобразователи только раздельно-совмещенного типа, т. к. большой уровень помех в призме полностью маскирует полезные сигналы при включении преобразователя по совмещенной схеме.

Используются два типа таких преобразователей (рис. 2.12, б, в). Преобразователь типа – рис. 2.12, б позволяет контролировать участок вдоль поверхности протяженностью до 50 мм из одного положения, но обладает высоким уровнем помех. Преобразователь типа – рис. 2.12, в имеет низкий уровень помех и локализованную зону контроля. С его помощью можно обнаруживать дефекты диаметром 2 мм на расстоянии 5–20 мм вдоль поверхности и глубине 5–6 мм.

Иммерсионные преобразователи

Преобразователи, предназначенные для контроля изделия, помещенного в иммерсионную ванну, отличаются от прямых контактных преобразователей тем, что имеют повышенный характеристический импеданс демпфера. Протектор обычно изготавливают из эпоксидной смолы толщиной, равной четверти длины волны. Он обеспечивает просветление границы пьезоэлемента – иммерсионная жидкость и гидроизоляцию пластины.

Важное достоинство иммерсионного способа – высокая стабильность акустического контакта. В связи с этим предложены различные конструкции преобразователей, сохраняющие иммерсионную жидкость в месте контакта – локально-иммерсионные преобразователи. Одна из конструкций (рис. 2.13, а) использует для обеспечения акустического контакта непрерывно истекающую струю жидкости.

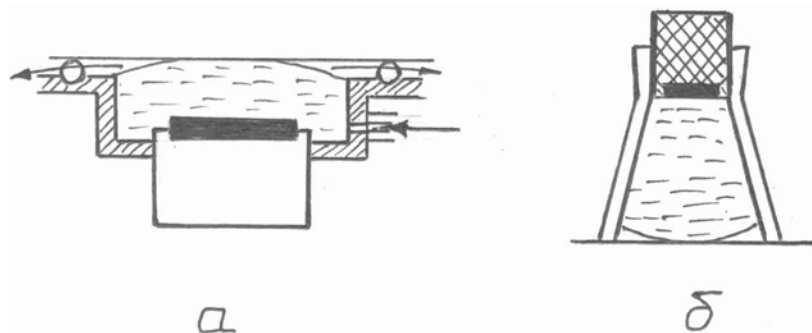


Рис. 2.13

Если такой преобразователь расположен сверху над изделием, то расход жидкости будет велик. Поэтому обычно его располагают снизу. При слабом напоре на открытой поверхности жидкости образуется выпуклый мениск и жидкость почти не вытекает. Такие преобразователи используются с пьезопластинами малого диаметра.

Для пьезопластин большого диаметра разработаны локальные иммерсионные ванны с тонкой эластичной мембраной – рис. 2.13, б, препятствующей вытеканию жидкости и довольно хорошо облегающей неровности поверхности. Мембрану изготавливают из маслостойкой резины или полиуретана, характеристический импеданс которых близок к импедансу воды. Благодаря этому эхо-сигнал от границы мембрана-жидкость практически отсутствует.

Из других типов преобразователей, используемых в промышленных дефектоскопах можно отметить:

Широкозахватные преобразователи

Прямоугольные, сильно вытянутые пьезопластины; мозаичные преобразователи, состоящие из ряда электрически связанных пьезоэлементов.

Преобразователи для контроля при высоких температурах

Для температур до 400–600 °С удастся подобрать пластмассовые теплостойкие материалы для акустических задержек и силиконовые смазки, обеспечивающие возможность сохранения обычной схемы контроля. В качестве пьезопреобразователя для температуры до 300 °С используют специальные сорта ЦТС, до 500 °С – кварц, а до 1000 °С – ниобат лития.

§ 2.5. Акустическое поле преобразователя

Акустическое поле излучения преобразователя определяется давлением (или действующей компонентой тензора напряжения), которое действует на элементарный приемник, расположенный в произвольной точке пространства.

Акустическое поле приема определяется сигналом приемного преобразователя при действии элементарного излучателя, расположенного в произвольной точке пространства.

Акустическое поле излучения–приема определяется сигналом приемного преобразователя, возникающим при отражении сигнала возбуждающего преобразователя от элементарного рассеивателя, расположенного в произвольной точке пространства.

Обычно поле приема преобразователя повторяет его же поле излучения. Поэтому поле излучения–приема одного и того же преобразователя пропорционально квадрату поля излучения.

Для наглядности мы рассмотрим формирование полей излучения с точки зрения геометрической акустики, путем построения моделей прохождения лучей продольных, сдвиговых и поверхностных волн в некоторых телах, ограниченных плоскими и кривыми поверхностями.

Будем считать твердые тела однородными, изотропными, а ограничивающие их поверхности – гладкими.

Рассмотрим геометрию волнового поля дискового излучателя, расположенного на плоской поверхности твердого упругого полупространства с неограниченными размерами по осям X , Y , Z . Считаем, что излучатель создает напряжение σ_{xk} , нормальное к поверхности. Если пренебречь влиянием промежуточных слоев между излучателем и средой, то волновое поле будет иметь вид, представленный на рис. 2.14.

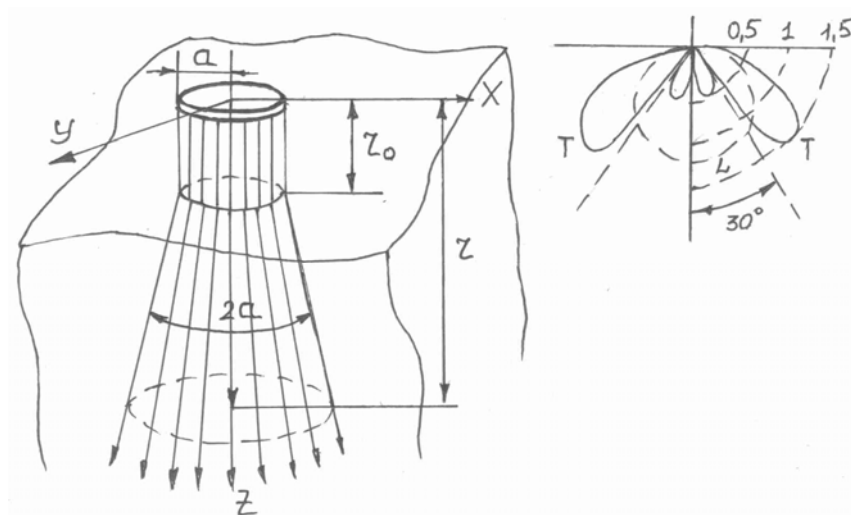


Рис. 2.14

Такое поле имеет две зоны:

1. Ближняя зона (зона Френеля) толщиной $r_0 \approx \frac{a^2}{\lambda}$, в пределах которой отсутствует расхождение лучей и пучок лучей в сечении повторяет сечение пластины. При этом

$$P(x) = P_0 \cdot 2 \sin \left(\frac{\pi}{\lambda} \left[\sqrt{a^2 + x^2} - x \right] \right).$$

Для ближней зоны максимум наблюдается при $x = \frac{a}{2n\lambda}$ (рис. 2.15).

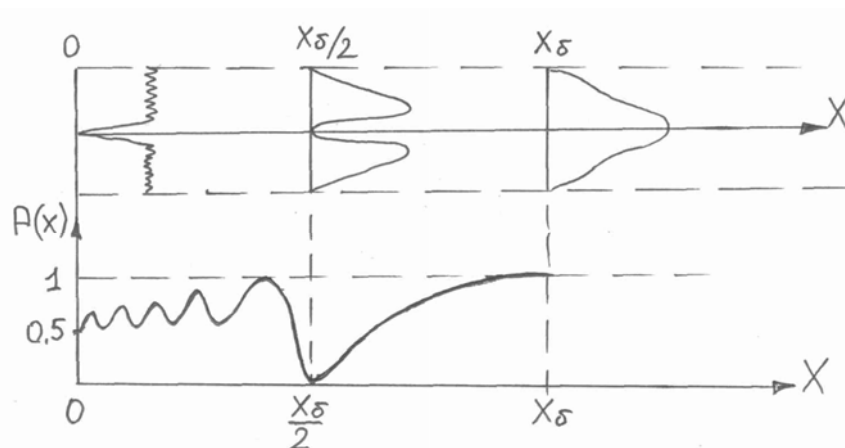


Рис. 2.15

2. Дальняя зона (зона Фраунгофера) – это зона при $z > r_0$, в пределах которой наблюдается расхождение лучей. Она характеризуется тем, что интенсивность акустической волны при удалении от преобразователя уменьшается обратно пропорционально расстоянию r . Угол расхождения θ , за пределами которого интенсивность волны меньше 0,1 равен

$$\theta = \arcsin 0,54 \frac{\lambda}{a}, \quad (2.77)$$

где λ – длина волны.

Для дальней зоны диаграмма направленности имеет вид, показанный на рис. 2.16.

$$P_m(x) = P_0 \frac{S_a}{\lambda x}; \quad (2.78)$$

$$P(x, \alpha) = P_m(x) \cdot \Phi(\alpha); \quad (2.79)$$

$$P(x, \gamma) = 2P(x) \frac{J\left(\pi \frac{a}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\pi \frac{a}{\lambda} \sin \alpha} = 2P(x) \frac{J(\alpha k \cdot \sin \alpha)}{\alpha k \cdot \sin \alpha}, \quad (2.80)$$

где $J(\alpha k \cdot \sin \alpha)$ – функция Бесселя первого рода.

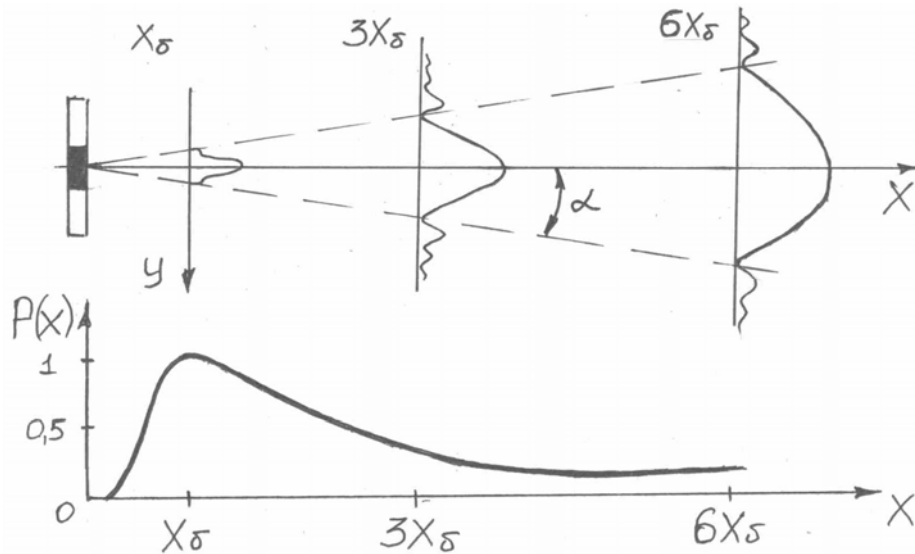


Рис. 2.16

На рис. 2.17 показано изменение формы пучка при увеличении диаметра преобразователя.

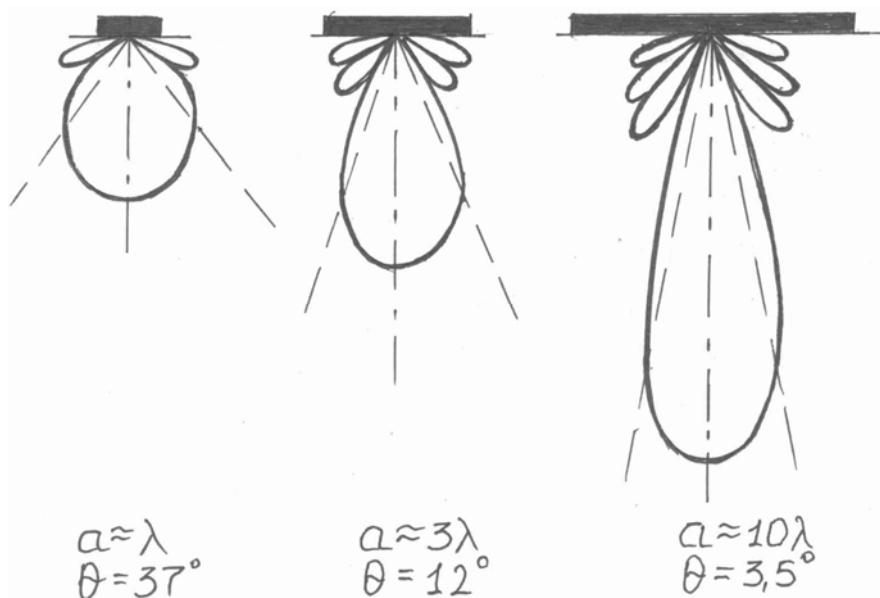


Рис. 2.17

Такая картина является идеальной. Практически мы всегда имеем дело с ограниченными телами. Кроме того, нормально приложенная к поверхности среды сила, вызовет в ней не только нормальную компоненту напряжения. На границах преобразователя возникнут напряжения, перпендикулярные направлению действующей силы, т. е. параллельно поверхности. В результате на границе излучателя возникнут сдвиговые и поверхностные волны, затухающие с глубиной. Взаимодействие всех этих волн приводит к искажению идеальной картины.

Кроме того, реальные тела имеют ограниченные размеры, т. е. существуют границы. Отраженные от границ волны взаимодействуют с первичными, создавая сложные акустические поля.

Рассмотрим несколько наиболее сложных случаев.

Дисковой излучатель на плоской поверхности среды, ограниченной в направлении Z

Представлен на рис. 2.18.

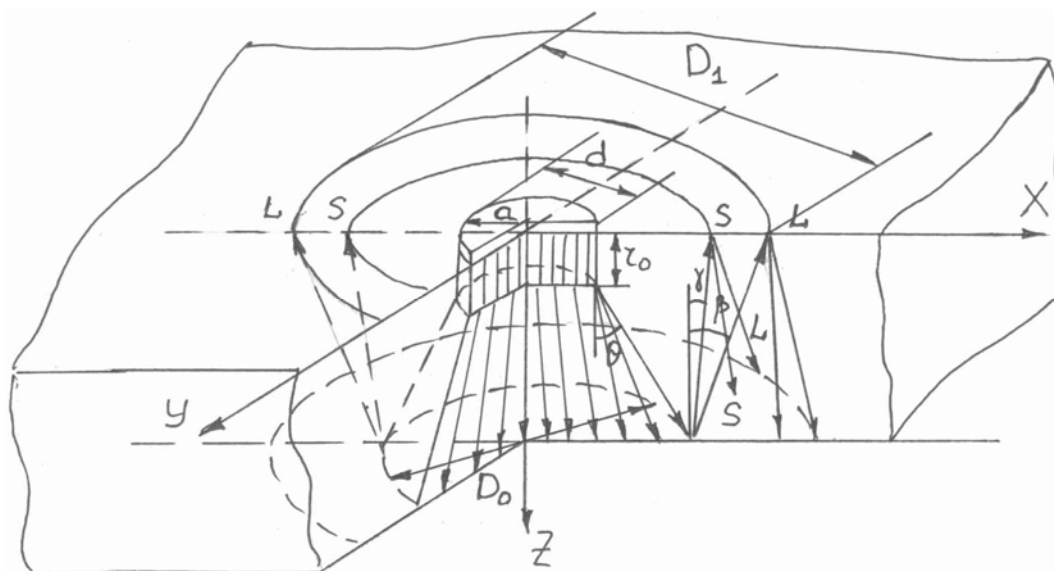


Рис. 2.18

При $Z > Z_0$ в среде распространяется конический пучок волн, образуя на противоположной поверхности изделия фокальное пятно диаметром $D_0 > d$. Угол падения лучей в таком пучке изменяется от 90° для центрального луча до $(90 - \theta)^\circ$ для лучей на образующей конуса.

В месте падения наклонного луча будут образовываться как продольные L , так и поперечные S волны. Эти колебания, складываясь, приводят к появлению на поверхности комбинированных сложных волн, которые распространяются от границы. По мере их удаления, лучи продольных и сдвиговых волн расходятся, одновременное их воздействие на частицы среды уменьшается и на какой-то определенной глубине частицы совершают чисто продольные и чисто поперечные колебания.

Отраженные от нижней поверхности волны образуют свое волновое поле, которое представляет собой расходящийся конусом лучи продольных и сдвиговых волн, распространяющихся с разными скоростями в направлении к верхней поверхности. Можно считать, что это поле создано мнимым излучателем, расположенным на нижней поверхности с диаметром, равным диаметру фокального пятна D_0 . Отраженные вол-

ны распространяются от каждой точки фокального пятна двумя расходящимися лучами с углами расхождения:

- от 0 до θ° – для продольных волн;
- $\gamma=0^\circ$ до $\gamma=\omega^\circ$ – для сдвиговых волн, где $\omega < \theta$.

Лучи продольных и сдвиговых волн вновь отразятся от верхней поверхности, образуя новое волновое поле и т. д.

Наибольшая интенсивность волн наблюдается на участке падения центрального и близлежащих к нему лучей, которые распространяются под малыми углами и, отражаясь обратно, полностью воспринимаются излучателем. Периферийные лучи, падая на поверхность, под большими углами, при отражении не попадают на излучатель и многократно отражаясь с расщеплением от противоположных поверхностей, уходят в сторону от преобразователя.

Если толщина $Z < Z_0$, то в среде распространяется параллельный пучок лучей, образуя на противоположной поверхности фокальное пятно, диаметр которого $D_0 = d$.

Однако на границе излучателя также будут возникать сдвиговые и поверхностные волны, распространяющиеся от излучателя в разные стороны. В результате, на участке облучения создается сложная интерференционная картина.

Дисковый излучатель, расположенный на расстоянии h от плоской поверхности облучаемой среды

Представлен на рис. 2.19.

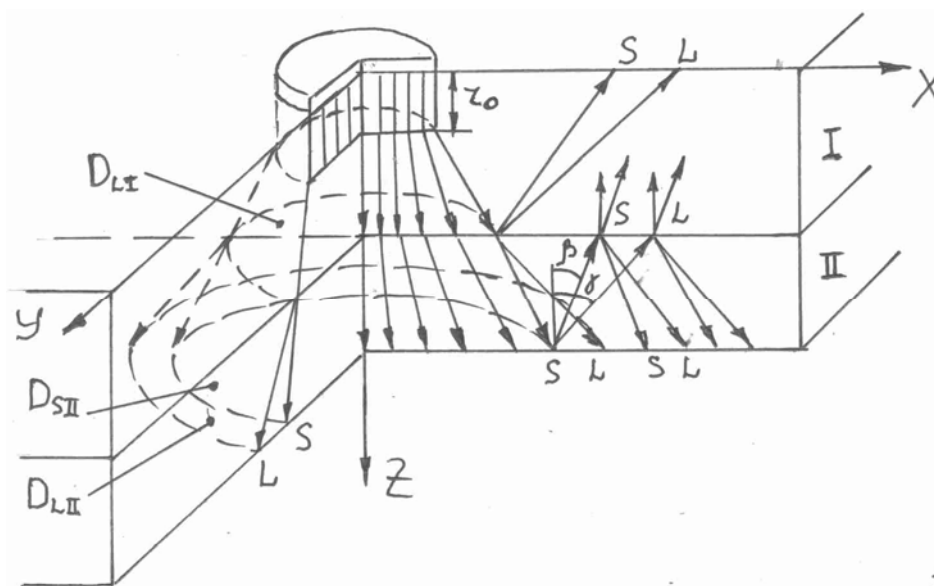


Рис. 2.19

Где промежуток h заполнен жидкой или твердой средой с $\rho_1 C_1 < \rho_2 C_2$. На нижней границе среды 1 образуется фокальное пятно D_{L1} . На границе раздела сред 1 и 2 часть продольных волн отразится назад в среду 1 в виде продольных и сдвиговых волн.

Другая часть продольных волн войдет в среду 2 с расщеплением на продольную и поперечную составляющие, которые распространяются в ней под углами β и γ , большими, чем угол расхождения лучей в среде 1.

Трансформированные волны образуют на донной поверхности среды фокальные пятна диаметрами D_{L2} и D_{S2} , от которых происходит отражение продольных и сдвиговых волн с их расщеплением снова на продольную и сдвиговую составляющие.

Эти волны возвращаются в среду 2 и, дойдя до границы сред 1 и 2, частично вновь отражаются в среду 2 также с расщеплением.

Из этой картины видно, что во 2 среде будет наблюдаться сложное волновое поле и интенсивность УЗ волн будет меньше, чем в случае облучения излучателем, расположенным на ее поверхности.

Дисковый излучатель, расположенный на плоской поверхности среды, ограниченной по оси X

Представлен на рис. 2.20.

Если $b \gg D_{изл}$, то будет иметь место картина, которую мы рассматривали для неограниченной среды. При b сравнимом с D , характер волнового поля становится иным. Центральный и близлежащие лучи распространяются вдоль оси Z. Краевые лучи падают на боковые границы под углами от $(90-\theta)^\circ$ до 90° . В месте падения лучей происходит их расщепление на продольную и сдвиговую составляющие, которые распространяются в среде под своими углами. При этом продольная составляющая распространяется под углом, равном углу падения, а сдвиговая составляющая – под углом определяемом из соотношения

$$\frac{\sin(90^\circ - \theta)}{C_{пр}} = \frac{\sin \beta}{C_{сдв}},$$

где $C_{пр}$ и $C_{сдв}$ – скорости продольных и сдвиговых волн.

На противоположной стороне сдвиговая и продольная волны вновь трансформируются в сдвиговую и продольную и т. д.

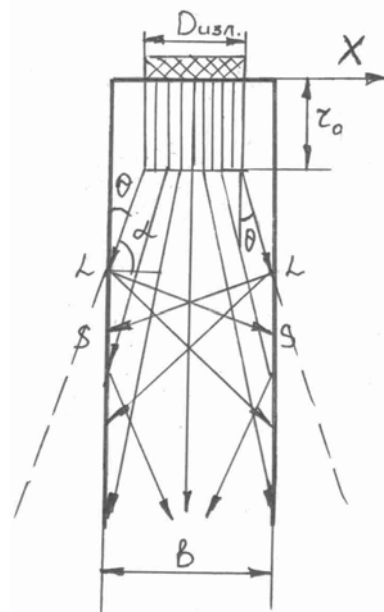


Рис. 2.20

Интенсивность поверхностных волн будет максимальной на граничных поверхностях, где они формируются, а интенсивность продольных волн – на оси, т. е. в области, наиболее удаленной от поверхностей.

Дисковой излучатель, расположенный на плоской поверхности среды, ограниченной в двух плоскостях X и Y

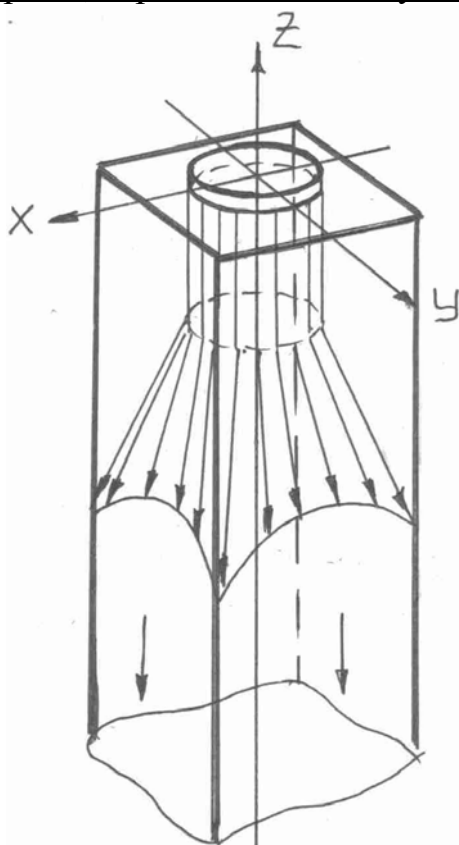


Рис. 2.21

Страняется на большие расстояния.

Дисковый излучатель, расположенный под углом к плоской поверхности среды

Представлен на рис. 2.22.

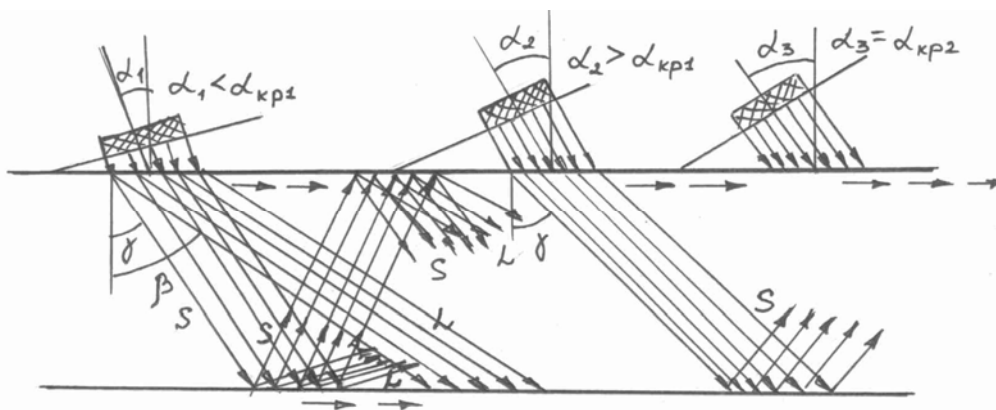


Рис. 2.22

Представлен на рис. 2.21.

В этом случае, на некотором расстоянии от поверхности боковые лучи конического пучка лучей встретятся с ограничивающими плоскостями.

На каждой из 4-х ограничивающих плоскостях происходит расщепление волн на продольную и поперечную составляющую, которые многократно отражаясь, распространяются в направлении прозвучивания. Вследствие косо падения продольных и сдвиговых волн на граничные поверхности, на них возникают также поверхностные волны, распространяющиеся в том же направлении.

Чем меньше размеры b , тем большими становятся углы падения и тем большая часть энергии отражается внутрь среды. При достаточно малых сечениях среды по отношению к излучателю, среда становится волноводом, в котором ультразвук распро-

Проведем к границе раздела нормальную плоскость через центр излучателя так, чтобы центральный луч лежал в этой плоскости. Тогда продольные волны, падая на границу раздела по линии lm под углом $\alpha_{кр1}$, частично отражаются в среду 1 и частично входят в среду 2, трансформируясь на продольные и сдвиговые составляющие, распространяющиеся под углами β и γ . Если среда 2 ограничена плоскостью, параллельной границе раздела сред, то продольные и сдвиговые волны, достигнув противоположной поверхности, отразятся от нее под теми же углами, вновь расщепляясь на продольные и сдвиговые и т. д. Вследствие косоугольного падения лучей продольных и сдвиговых волн в граничных поверхностях среды 2, возникают также и поверхностные волны небольшой мощности.

Если увеличивать угол наклона излучателя, то наступит момент, когда продольные волны «выйдут» на поверхность среды 2 и суммируются к ранее возникшим поверхностным волнам. Этот угол, как известно, равен первому критическому углу. В среде, при этом, в направлении излучения распространяются сдвиговые волны, попеременно отражаясь от граничных поверхностей, а в граничных поверхностях в том же направлении распространяются поверхностные волны.

При дальнейшем увеличении угла наклона пластины наступит момент, когда на поверхность «выйдут» сдвиговые волны. Этот угол равен второму критическому углу. В среде, в направлении излучения, распространяются преимущественно поверхностные волны. Глубинные волны в толще слоя отсутствуют.

Такая картина наблюдается только в рассматриваемой плоскости при условии, что среда 2 безгранична в направлении ХУ, а падающий пучок лучей параллелен. При контроле конкретных изделий таких условий практически не существует. Поэтому при возбуждении УЗ волн в деталях, ограниченных размеров, на границах тел за счет отражения и трансформации возникает сложное волновое движение, представляющее собой различные комбинации продольных, сдвиговых и других волн.

Кольцеобразный преобразователь

Очень часто пластина преобразователя выполняется в виде кольца, наружные и внутренние радиусы которого a_n и a_b . (рис. 2.23).

Граница ближней зоны для него находится из выражения

$$r_0 = \frac{S_a}{\pi \cdot \lambda} = \frac{a_n^2 - a_b^2}{\lambda}; \quad (2.81)$$

$$r_0 = \frac{S_a}{\pi \cdot \lambda} = \frac{a_n^2 - a_b^2}{\lambda}.$$

По сравнению с дисковым преобразователем кольцевой преобразователь имеет более узкую диаграмму направленности, но одновременно увеличенные боковые лепестки.

По сравнению с дисковым преобразователем радиуса a_n кольцеобразный преобразователь такого же наружного диаметра имеет меньшую площадь и, как следствие, меньшую эффективность преобразования.

В связи с этим, некоторые кольцеобразные преобразователи и преобразователи на их основе применяются там, где требуется узкая диаграмма направленности и широкополосность.

Преобразователи с акустической задержкой

Практически во всех реальных конструкциях пьезопреобразователей пластина отделена от изделия слоем толщиной x_a , который представляет собой акустическую задержку (рис. 2.24).

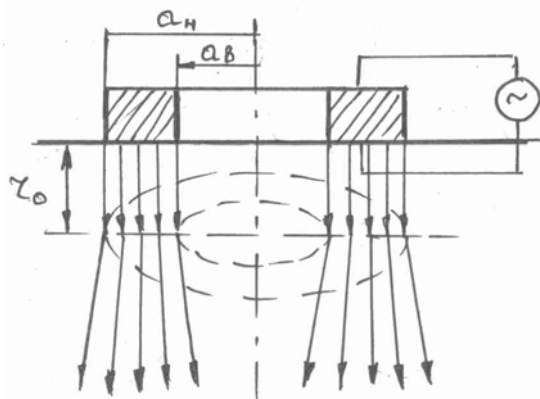


Рис. 2.23

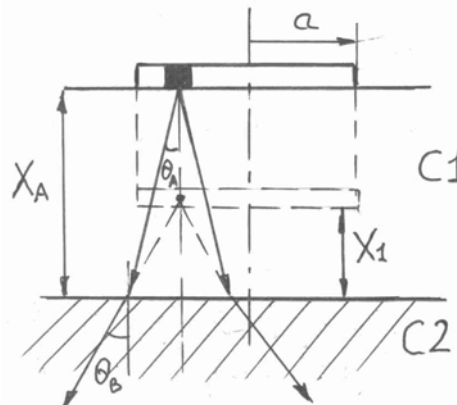


Рис. 2.24

Лучи каждого элементарного излучателя пластины при прохождении через этот слой будут испытывать преломление. При построении акустического поля в этом случае вводят мнимый источник, находящийся внутри акустической задержки на расстоянии x_1 от поверхности изделия

$$x_1 = x_a \frac{C_1}{C_2}, \quad (2.82)$$

где C_1, C_2 – скорости в задержке и изделии.

Дальнейшее построение поля проводят, используя мнимый преобразователь и вычисляя границу ближней зоны из соотношения

$$r' = r_0 + x_a \frac{C_1}{C_2}; \quad (2.83)$$

$$r' = r_0 + x_a \frac{C_1}{C_2}.$$

При $C_1 \gg C_2$ можно считать $r' \approx r_0 = \frac{a^2}{\lambda}$.

Раздельно-совмещенный преобразователь

РС преобразователь состоит из объединенных конструктивно излучающего и приемного преобразователей, обычно расположенных на призматических акустических задержках (рис. 2.25).

Такие преобразователи отличаются минимальным уровнем собственных шумов, очень малой мертвой зоной, высокой чувствительностью. С их помощью можно добиться выравнивания чувствительности к дефектам, расположенным на разной глубине.

Акустическое поле РС преобразователя рассчитывают путем введения мнимых излучателя и приемника.

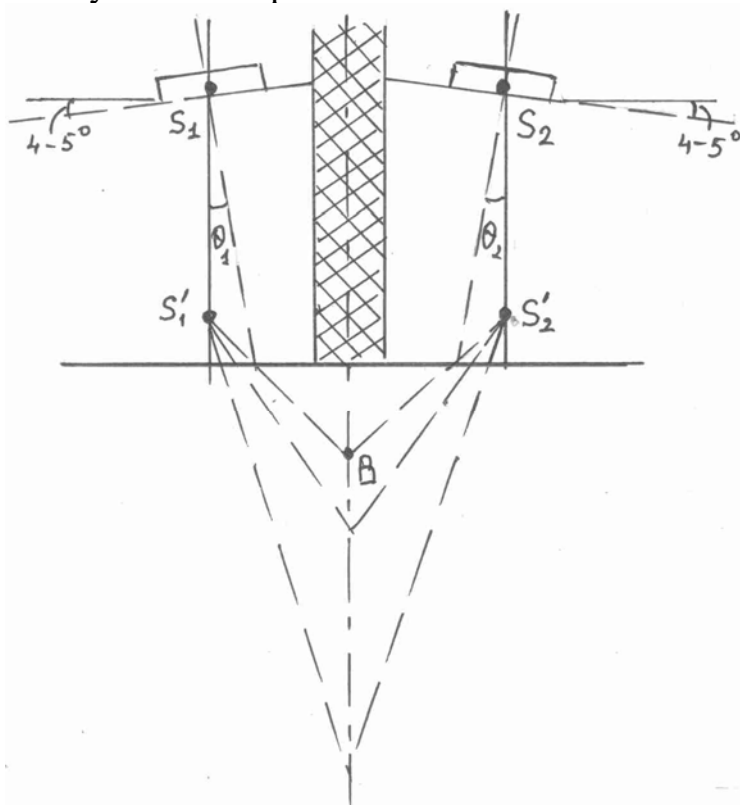


Рис. 2.25

Обычно призмы изготавливают из оргстекла. Пластины располагаются под небольшим углом $4-5^\circ$. Между пластинами помещается звукопоглощающий экран. Углы наклона призм, расстояние между пластинами подбирается так, чтобы обеспечить выявление дефектов в заданном диапазоне толщин. Максимум излучения находится несколько выше точки пересечения акустических осей из-за затухания и расхождения.

Фокусирующие преобразователи

Фокусирующие системы применяют для повышения разрешающей способности, чувствительности, точности определения координат и размеров дефектов. Существует 4 основных типа фокусирующих систем.

Активные концентраторы – изогнутые пьезоэлементы, представляющие собой часть сферы или цилиндра (рис. 2.26).

Фокусное расстояние таких концентраторов равно их радиусу кривизны, а радиус зрачка a связан с фокусным расстоянием F через угол раскрытия фронта θ_m формулой

$$a = F \cdot \sin \theta_m. \quad (2.84)$$

Радиус фокального пятна

$$\rho_0 = 0,61F \frac{\lambda}{a}. \quad (2.85)$$

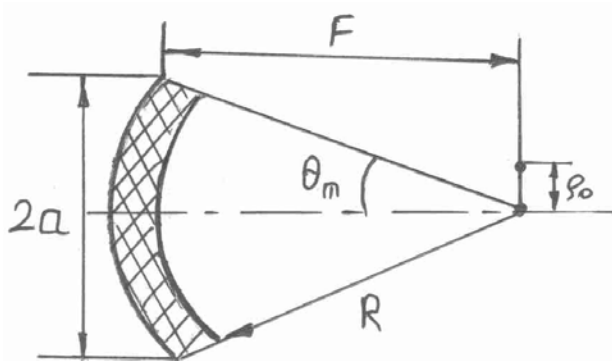


Рис. 2.26

Рефракторы – линзы, преобразующие плоскую волну в сходящуюся (рис. 2.27).

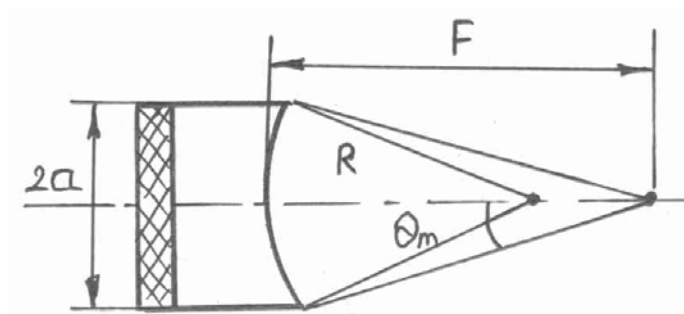


Рис. 2.27

Линзы могут быть вогнутыми (ускоряющими), если скорость распространения УЗ в материале линзы C_l больше скорости УЗ в среде C_c , или выпуклыми (замедляющими), если $C_l < C_c$.

Если среда – иммерсионная жидкость, а линза – оргстекло, то

$$\frac{C_c}{C_l} = n < 1, \quad (2.86)$$

где n – показатель преломления.

Фокусное расстояние такой плоско-вогнутой линзы связано с ее радиусом кривизны соотношением

$$F = \frac{R}{(n-1)} = \frac{R}{\left(1 - \frac{C_c}{C_n}\right)}. \quad (2.87)$$

Рефлекторы – отражатели, преобразующие плоскую волну в сходящуюся (рис. 2.28).

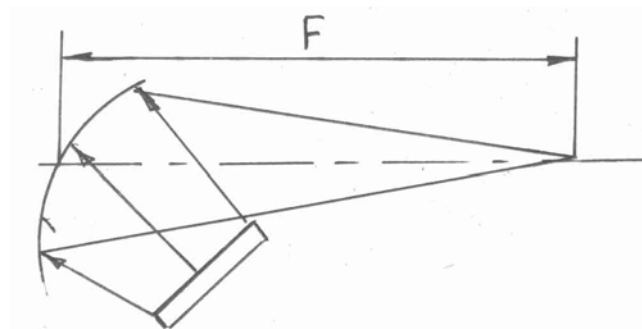


Рис. 2.28

В дефектоскопии применяют рефлекторы в виде криволинейных зеркал в призме, в которых сходящийся фронт формируется одновременно с поворотом пучка.

Дефлекторы – зональные пластинки из чередующихся акустически прозрачных колец (рис. 2.29), внутренний a_v и наружный a_n , радиусы которых определяются отношением

$$\begin{aligned} a_v &= \sqrt{2mF\lambda}; \\ a_n &= \sqrt{(2m+1)F\lambda}, \end{aligned} \quad (2.88)$$

где $m=0,1,2,\dots$ – номер кольца.

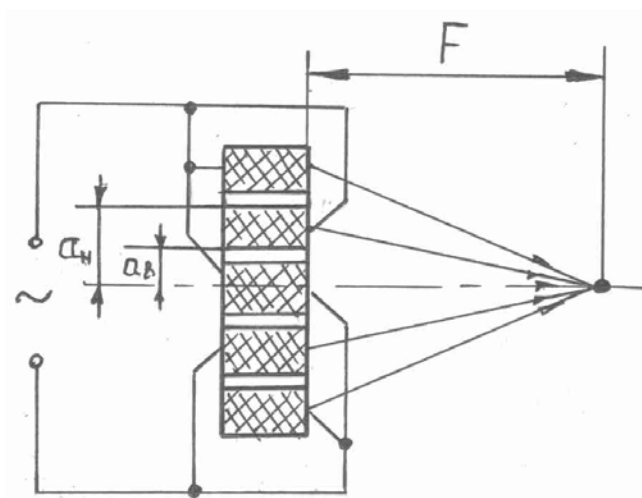


Рис. 2.29

На чередующиеся кольца подаются противофазные напряжения. Существенного выигрыша в амплитуде сигнала можно достичь, если разделить пластинку на кольца, соответствующие зонам Френеля (например, глубокими бороздками).

Фокусировка всех отмеченных систем эффективна только в ближней зоне. При $x \gg r_0$ фокусирующий преобразователь практически не отличается от дискового преобразователя радиуса a .

Коэффициент усиления фокусирующего преобразователя определяют как отношение амплитуд их полей в заданной точке. Так для сферического активного концентратора

$$K_z = \frac{S_a}{2\lambda F}. \quad (2.89)$$

Из-за кривизны поверхности все фокусирующие преобразователи можно использовать в дефектоскопии только при контакте через акустическую задержку. Преломление лучей на границе задержка–изделие изменяет положение и форму фокального пятна.

Так для сферического концентратора с фокусным расстоянием F (его ось перпендикулярна поверхности изделия) и толщине акустической задержки h расстояние фокуса от поверхности изделия рассчитывается по формуле

$$F' = (F - h) \frac{C_a}{C_b}, \quad (2.90)$$

где C_a – скорость звука в задержке;
 C_b – скорость звука в изделии.

При наклонном расположении оси преобразователя к изделию фокальные расстояния в перпендикулярной плоскости не совпадают и фокальное пятно сильно размывается.

Эффекты фокусировки и расфокусировки могут возникать при вводе УЗ колебаний в изделие с криволинейной поверхностью (рис. 2.30).

Для выпуклой поверхности будет иметь место расфокусировка. При этом, если расстояние между пластиной и изделием x_a меньше толщины ближней зоны $x_a - r_0$, то падающую волну можно считать плоской, а если $x_a > r_0$, то сферической. Фокальное расстояние для такой поверхности определяют как и для плоско-вогнутой линзы (рис. 2.31)

$$F = \frac{R}{\frac{C_b}{C_a} - 1}. \quad (2.91)$$

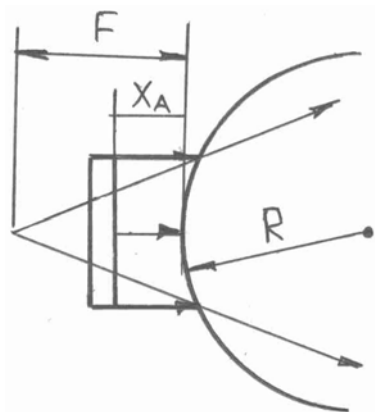


Рис. 2.30

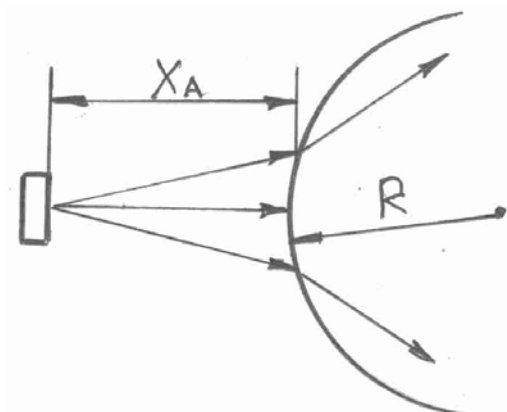


Рис. 2.31

Для вогнутой поверхности будет иметь место фокусировка (рис. 2.32).

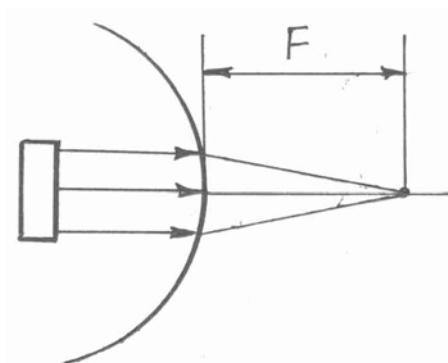


Рис. 2.32

Глава 3

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

§ 3.1. Общие сведения

Акустическими методами называют методы контроля, основанные на изменении упругих колебаний и волн в контролируемом объекте.

Согласно ГОСТ 23829–79 акустические методы делят на две большие группы:

Активные – использующие излучение и прием акустических колебаний

Пассивные – основанные только на приеме колебаний.

К активным методам относят методы, основанные на прохождении и отражении УЗК.

Активные методы

Теневой метод

Основан на ослаблении проходящих ультразвуковых волн при наличии внутри детали дефектов, создающих ультразвуковую тень (рис. 3.1).

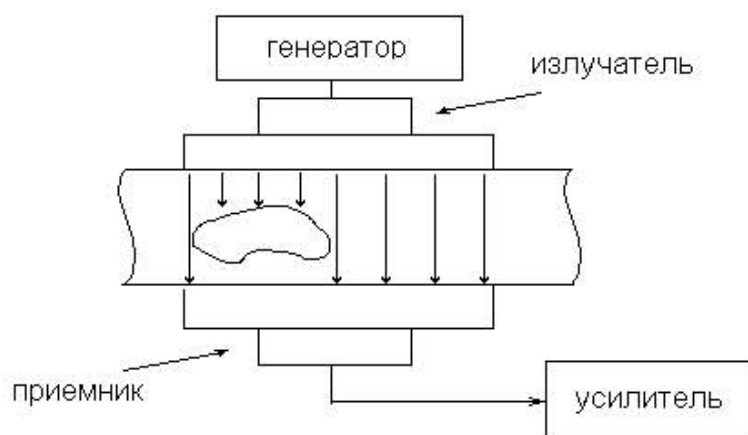


Рис. 3.1. Схема теневого метода

При теневом методе используется два преобразователя. Один из них излучает УЗК, а другой принимает их. Уменьшение интенсивности колебаний зависит от величины дефекта. Чем больше дефект, тем больше ослабляется звуковой поток.

Теневой метод малочувствителен. Дефект можно обнаружить, если вызываемое им изменение сигнала составляет 15–20 %. Более мелкие дефекты не

обнаруживаются. Существенный недостаток теневого метода – невозможность определить глубину залегания дефекта. Кроме того, при контроле трудно определить изменения сигнала за счет дефекта от изменения сигнала за счет изменения толщины детали. Так как теневой метод не зависит от разрешающей способности излучателя, он нашел широкое применение при дефектоскопии тонких деталей (стальных листов, автомобильных покрышек и др.).

Временной теневой метод

Метод основан на измерении временного запаздывания УЗ импульса при огибании дефекта. Имеет те же преимущества и недостатки что и теневой метод.

Велосиметрический метод

Основан на изменении скорости упругих волн при наличии дефекта. Например, если в тонком изделии распространяется изгибная волна, то появление расслоения вызовет уменьшение ее скорости, которая обычно измеряется по сдвигу фазы прошедшей волны.

В методах отражения используют как один, так и два преобразователя; применяется как правило импульсное излучение. Выделяют следующие методы:

Эхо-метод

Высококачественный генератор вырабатывает кратковременные импульсы (либо с высокочастотным заполнением – радиоимпульсы, либо просто короткие импульсы). Посланный излучателем импульс, отразившись, возвращается обратно к преобразователю, который работает в это время на прием (рис. 3.2).

С преобразователя сигнал поступает на усилитель, а затем, на отклоняющие пластины ЭЛТ (рис. 3.3).

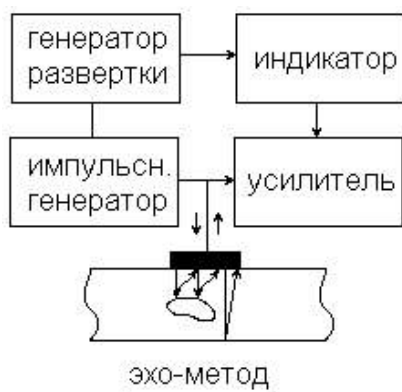


Рис. 3.2. Схема эхо-метода

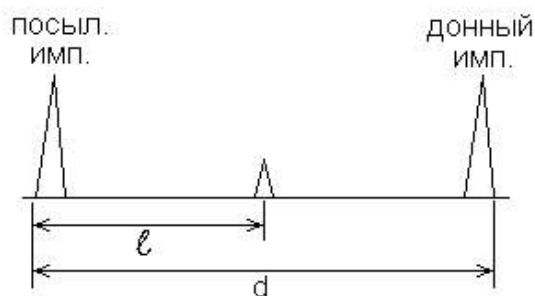


Рис. 3.3

Эхо-метод обладает рядом преимуществ перед теневым. Он позволяет использовать изделия при одностороннем доступе к ним. Это особенно ценно при проверке изделий, в которых отсутствует двусторон-

ний доступ. Кроме того, чувствительность эхо-метода значительно выше теневого. При теневом методе ослабление УЗК на 5 % трудно зарегистрировать, а при эхо-методе отражение даже 1 % энергии очень хорошо не только обнаруживается, но и измеряется. Кроме того, эхо-метод позволяет определить, на какой глубине находится дефект. Если временное расстояние между зондирующим и отраженным от противоположной поверхности детали (донный импульс) принять за размер детали, то время между посылаемым импульсом и моментом прихода отраженного от дефекта импульса дает глубину залегания дефекта.

Кроме того, по амплитуде отраженного сигнала можно судить о размерах дефекта, а изучая спектральный состав отраженного импульса, можно получить информацию о типе и форме дефекта.

Главный недостаток эхо-метода – наличие мертвой зоны под датчиком, что не дает возможности применять его для тонких изделий. Наличие мертвой зоны связано с тем, что при близко расположенном дефекте в момент прихода эхо-сигнала от него еще продолжается излучение зондирующего импульса. Для уменьшения мертвой зоны повышают частоту УЗК, что позволяет уменьшить длительность зондирующего импульса.

Длительность импульса определяет и разрешающую способность метода, т. е. минимальное расстояние между дефектами по глубине, при котором их эхо-сигналы воспринимаются раздельно. Очевидно разрешающая способность эхо-метода по глубине равна длительности зондирующего импульса.

Повышение частоты с целью увеличения разрешения ограничено сверху тем, что короткие волны начинают отражаться от границ кристаллических зерен металла, что вызывает появление помех. Кроме того, с увеличением частоты возрастает затухание УЗК.

Эхо-зеркальный метод

Является разновидностью эхо-метода, и используется для обнаружения дефектов, ориентированных вертикально к поверхности изделия (рис. 3.4).

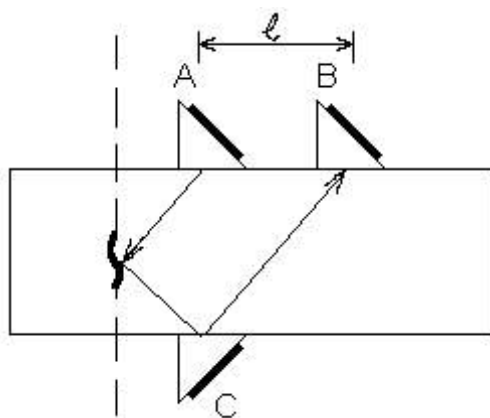


Рис. 3.4. Схема эхо-зеркального метода

Обычным эхо-методом такой дефект не обнаруживается из-за очень малой площади его сечения в плоскости поверхности. Для обнаружения таких дефектов наклонные искатели А и В располагаются на некотором расстоянии L с одной стороны изделия, либо второй искатель С, тоже наклонных располагается с противоположной стороны. Расстояние L определяется толщиной изделия и углом ввода УЗК в изделие. Т. к. площадь дефекта в сечении, перпендикулярном вводимому наклонному лучу значительно превышает площадь нормального к поверхности сечения дефекта, то повышается вероятность обнаружения и чувствительность контроля.

Дельта-метод

Использует рассеяние УЗК на дефектах. Для этого УЗК с помощью наклонного искателя А вводится в изделие и распространяется в нем вдоль изделия (рис. 3.5).

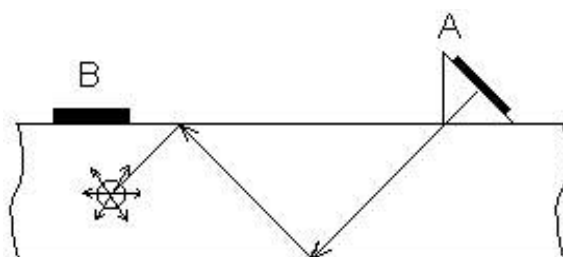


Рис. 3.5. Схема дельта-метода

Искатель В (приемник) сканирует поверхность изделия. В месте расположения дефекта УЗК будут отражаться в различных направлениях. Часть из них отразится в направлении к поверхности и будет зарегистрирована искателем В. Этот метод позволяет получить визуальное распределение дефектов в плане.

Реверберационный метод

Метод предназначен для контроля слоистых конструкций, например, металл-пластик и основан на анализе длительности реверберации УЗК (рис. 3.6).

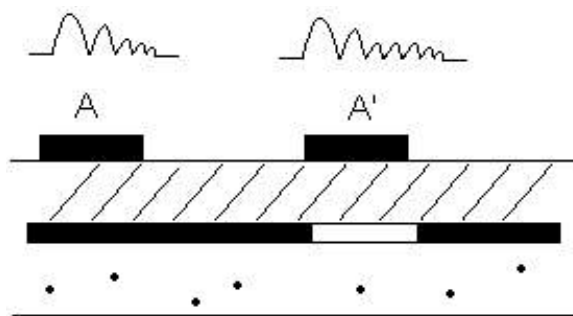


Рис. 3.6. Схема Реверберационного метода

Когда преобразователь расположен в точке А с плотным контактом между слоями, то УЗК проходят из металла в пластик и там гасятся. В результате потери энергии УЗК оказываются достаточно большими, что приводит к быстрому гашению реверберации. А в области неплотного контакта между слоями большая часть энергии УЗК отражается назад в металл. Т. к. поглощение энергии УЗК в металле мало, то УЗК будет затухать достаточно медленно, т. е. длительность реверберации будет увеличиваться.

Существует ряд методов, использующих комбинацию проходящих и отраженных УЗК. Выделяют такие методы:

Зеркально-теневой метод

Измеряется амплитуда УЗК, отраженного от противоположной поверхности изделия (донный импульс), т. е. дважды прошедшего через изделие. Величина ослабления зависит от размеров дефекта.

Эхо-теневой метод

В этом методе анализируются как прошедшие, так и отраженные сигналы.

Эхо-сквозной метод

В этом методе фиксируется сквозной сигнал I и сигнал II, испытывающий двукратное отражение (рис. 3.7).

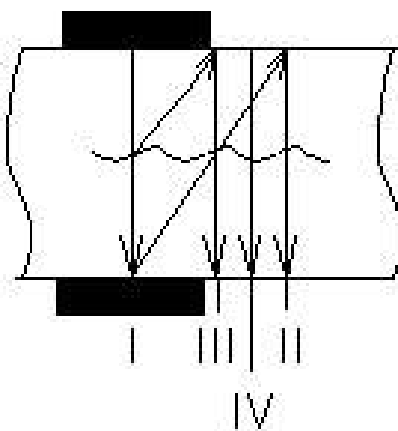


Рис. 3.7. Схема эхо-сквозного метода

При появлении дефекта эти сигналы уменьшаются как в теневом и зеркально-теневом методах. Кроме того, появляются эхо-сигналы III и IV, соответствующие отражениям дефектов лучей I и II. По сравнению с теневым методом эхо-сквозной метод обладает повышенной чувствительностью. Преимуществом по сравнению с обычным эхо-методом является уменьшение размеров мертвой зоны из-за увеличения пути отраженного сигнала. Недостаток – трудность точной оценки местоположения дефекта и его размеров.

От рассмотренных методов существенно отличается:

Импедансный метод

Он основан на использовании зависимости полного механического импеданса (сопротивления) контролируемого изделия от качества соединения его элементов между собой (рис. 3.8). Изменение входного импеданса изделия может быть обнаружено по изменению амплитуды или фазы силы реакции, оказываемой на датчик или по изменению частоты датчика. Чаще всего используется для контроля клеевых, паяных, клепаных соединений.

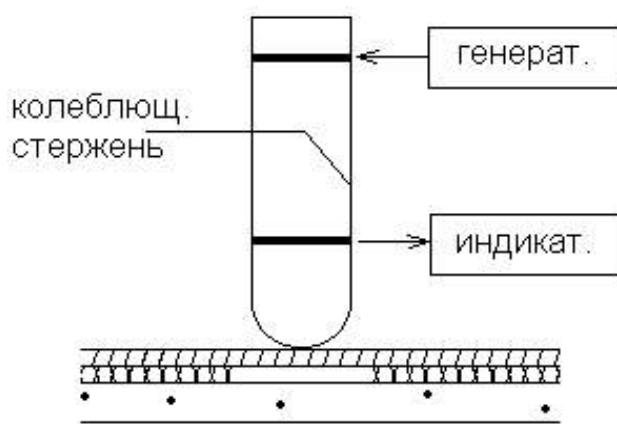


Рис. 3.8. Схема Импедансного метода

В приборах импедансного типа датчик представляет собой стержень, на разных концах которого расположены излучатель и приемник. Излучатель возбуждает в стержне колебания, а приемник фиксирует их.

Такой датчик приводится в акустический контакт с изделием, в результате которого изменяется либо частота колебаний стержня, либо амплитуда и фаза сигналов с приемника.

При использовании стоячих волн возбуждаются свободные или вынужденные колебания либо объекта контроля в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы). Свободные колебания чаще всего возбуждаются путем механического удара, а вынужденные – путем воздействия гармонической силы с переменной частотой. Состояние объекта анализируется по частоте свободных колебаний. Иногда используют амплитуду колебаний.

На использовании стоячих волн основаны следующие методы:

Локальный метод свободных колебаний

Согласно этому методу в части контролируемого изделия возбуждают колебания с помощью ударов молоточка вибратора и анализируют спектр возбуждаемых частот (рис. 3.9). В дефектных изделиях, как правило, спектр смещается в высокочастотную сторону.

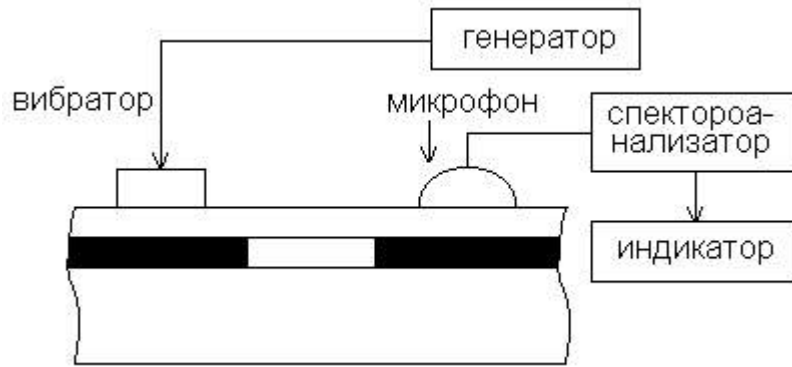


Рис. 3.9. Схема локального метода свободных колебаний

К этой же группе относится способ, получивший сокращенное название «Предеф». Сущность его состоит в возбуждении через слой жидкости вынужденных колебаний в стенке изделия с частотой, близкой к резонансной. После окончания возбуждения стенка продолжает колебаться в свободном режиме. По частоте этих свободных колебаний с очень высокой точностью измеряют толщину стенки.

Интегральный метод свободных колебаний

Здесь ударом возбуждаются во всем изделии или значительной его части. Этот метод используется, например, при проверке бандажей железнодорожных колес или стеклянной посуды по частоте звона. Применяется он также в медицине для определения состояния внутренних органов (простукивание).

Локальный резонансный метод

В стенке изделия с помощью преобразователя возбуждают ультразвуковые волны (рис. 3.10).

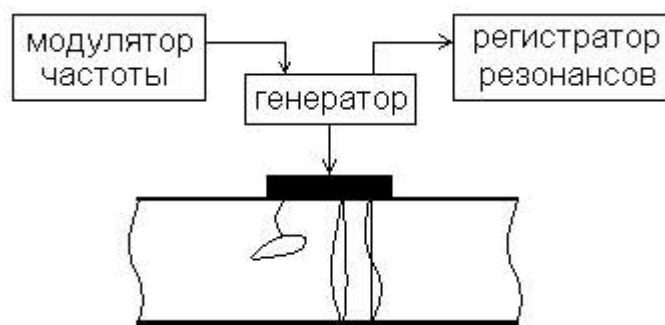


Рис. 3.10. Схема локального резонансного метода

Частоту колебаний модулируют и фиксируют частоты, на которых возникают резонансы, соответствующие целому числу полуволн в стенке изделия. По резонансным частотам измеряют толщину стенки. Дефекты фиксируют по резкому изменению толщины или пропаданию ре-

зонансов. Метод чаще всего применяется в толщиномерах при одностороннем доступе (обшивка кораблей, котлов, труб и т. д.). Сравнительно недавно резонансный метод стал применяться для проверки качества строительных материалов (кирпича, бетона, леса и т. д.).

Интегральный резонансный метод

Применяют для определения модулей упругости материала по резонансным частотам продольных, изгибных или крутильных колебаний образцов простой геометрической формы. Метод применяют для контроля небольших изделий: абразивных кругов, турбинных лопаток и т. д. Появление дефектов или изменение свойств материалов определяют по отклонениям резонансных частот.

К методам вынужденных колебаний относится также:

Акустико-топографический метод

В этом методе распределение амплитуд упругих колебаний на поверхности контролируемого объекта регистрируют с помощью наносимого на поверхность порошка. Дефективный участок отличают увеличением амплитуды колебаний в результате резонансных явлений, вследствие чего оседание порошка на нем меньше.

Пассивные методы

Наиболее распространенными пассивными методами являются: метод акустической эмиссии, вибрационно-диагностический, шумо-диагностический.

Вибрационно-диагностический метод

В этом методе анализируются параметры вибрации какой-либо детали или узла, находящейся в рабочем режиме с помощью приемников контактного типа.

Шумо-диагностический метод

В этом методе изучают спектр шумов работающего изделия с помощью микрофонных приемников. И по изменениям в спектре шумов целого изделия судят о качестве составляющих его элементов.

По частотному признаку все рассмотренные методы можно разделить на низкочастотные (до 20 кГц) и высокочастотные или ультразвуковые (свыше 20 кГц).

Метод акустической эмиссии

Метод основан на регистрации упругих волн, возникающих в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел. Акустическая эмиссия появляется при пластической деформации, при возникновении и развитии дефектов, например, при образовании трещин, при фазовых превращениях, связанных с изменением кристаллической решетки, при резании металлов.

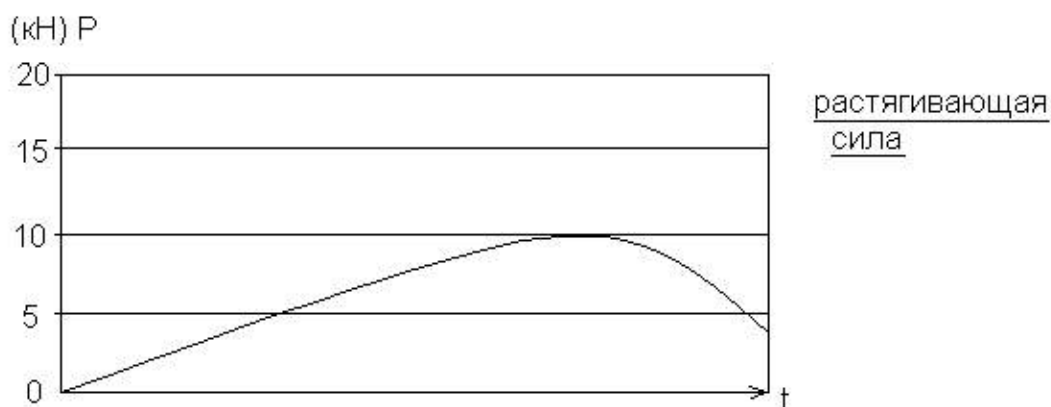


Рис. 3.11. Схема метода акустической эмиссии

Физическим механизмом акустической эмиссии является движение в веществе дислокаций и их скоплений. Неравномерность, прерывистость дислокационных процессов, связанных с отрывом дислокаций от точек закрепления, торможением их у препятствий, возникновением и уничтожением отдельных дислокаций, является причиной, обуславливающей изучение волн напряжения. Поэтому акустическая эмиссия имеет взрывной характер, представляет собой поток импульсов; длительность импульса может составлять $10^{-8} \div 10^{-4}$ с, энергия отдельного импульса от 10^{-9} до 10^{-5} Дж. Это соответствует колебаниям поверхности образца в пределах $10^{-11} - 10^{-4}$ мм. Иногда эти сигналы достаточно сильны и могут восприниматься на слух (например, 2 – «крик олова» при его деформации).

Сигналы акустической эмиссии, распространяясь к поверхности образца, претерпевают существенные изменения вследствие дисперсии скорости звука, трансформации типов волн при отражении, преломлении, затухании и т. д. (рис. 3.12)

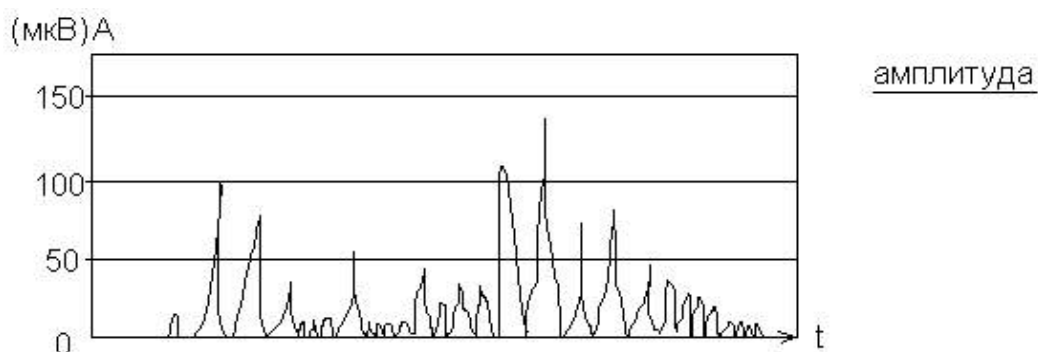


Рис. 3.12

Если интервал между отдельными актами излучения меньше времени затухания АЭ имеет характер непрерывного излучения, как правило нестационарного. Такая АЭ называется непрерывной или сплошной.

Если время затухания сигнала и время переходных процессов в образце меньше промежутка времени между излучаемыми импульсами, АЭ воспринимается в виде последовательности импульсов и называется дискретной или импульсной.

Дискретная АЭ имеет место при образовании трещин. Непрерывная – процесс резания металла.

Частотный спектр сигналов АЭ широк от слышимых частот до десятков и сотен МГц.

Сигналы АЭ принимают на поверхности образца посредством контактных датчиков или бесконтактными оптическими виброметрами.

В большинстве методов к образцу прикладывают механическое напряжение. Сигналы АЭ регистрируются в процессе возрастания или убывания приложенного к образцу внешнего механического напряжения. При этом концентрации напряжений вблизи дефектов вызывают локальное пластическое деформирование и появление симптомов АЭ.

Объем области пластической деформации зависит от размеров дефекта и величины приложенного напряжения.

Основными параметрами сигналов АЭ являются:

- Общее число импульсов дискретной АЭ за исследуемый промежуток времени, т. е. суммарная или интегральная Э.
- Число превышений сигналом АЭ установленного уровня за исключением промежутка времени (рис. 3.13).
- Интенсивность АЭ или число превышений сигналом АЭ установленного уровня за единицу времени.
- Амплитуда АЭ или максимальное значение сигнала АЭ в течение заданного промежутка времени.
- Уровень сигналов АЭ или среднее квадратичное сигнала за рассматриваемый промежуток времени.

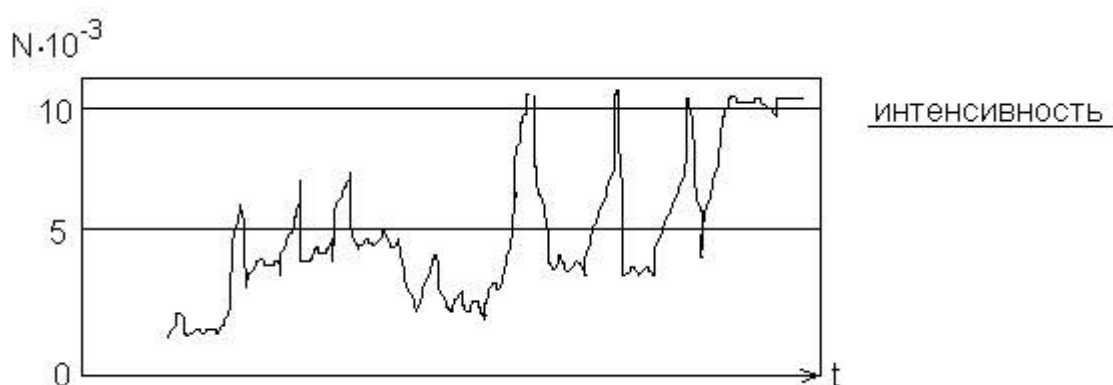


Рис. 3.13

Методы акустической эмиссии используются для раннего распознавания трещин при испытаниях материалов на прочность, для выявления дефектов в стадии их зарождения, для локации дефектов и изучения кинетики развития трещин в сварных швах и др.

При повторном напряжении эмиссия не возникает вплоть до достижения максимального напряжения предыдущего цикла (эффект Кайзера).

Электрическая связь между энергией АЭ и параметрами трещины имеет вид:

$$\Sigma V^2 = K^2(\Sigma \Delta L^2)/E,$$

где K – коэффициент концентрации напряжений на вершине трещины;

E – модуль упругости (модуль Юнга);

ΔL – приращение длины трещины.

Число используемых импульсов пропорционально K^4 .

§ 3.2. Акустический тракт эхо-метода

Акустический тракт – это путь ультразвука от излучателя до объекта, отражающего или рассеивающего ультразвук, и затем к приемнику колебаний.

Формулы акустического тракта определяют ослабление амплитуды сигнала на этом пути. При наличии или отсутствии дефектов.

Естественные дефекты могут иметь самую различную форму (объемные, плоскостные), величину, ориентацию (вертикальную, горизонтальную и т. д.), акустические свойства, которые заранее не известны. Поэтому формулы выводят для моделей дефектов простых геометрических форм: бесконечно тонкого диска, сферы, цилиндра, бесконечно тонкой полосы, плоскости и т. д. При экспериментах эти модели заменяют искусственными отражателями в виде плоскодонного отверстия, отверстием со сферическим дном, боковым цилиндрическим отверстием, полоской (рис. 3.14), так как они наиболее соответствуют основным типам реальных дефектов (рис. 3.15).

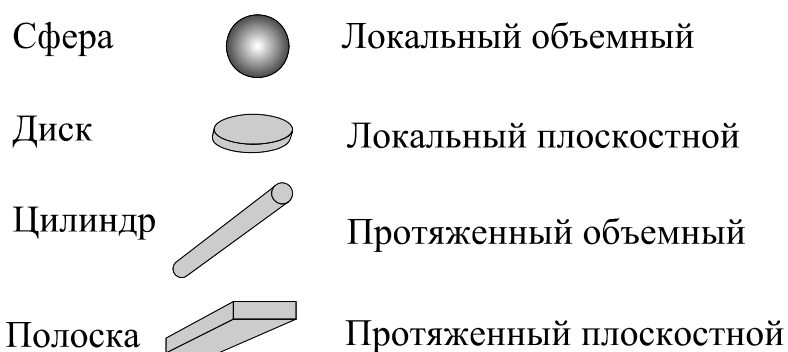


Рис. 3.14. Физические модели дефектов модели дефектов

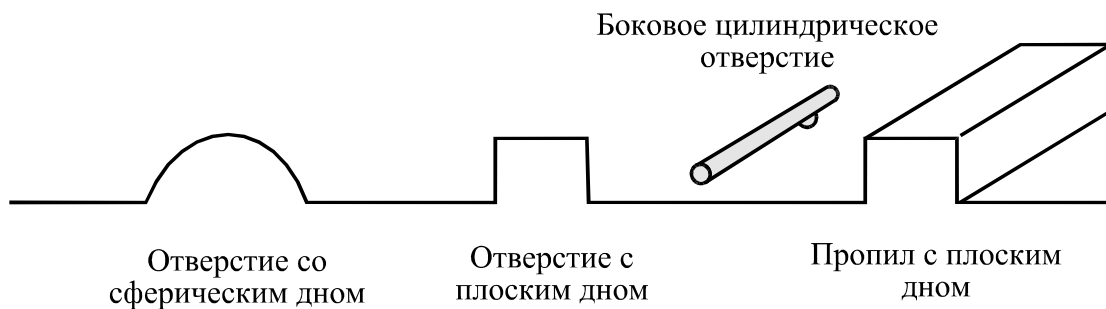


Рис. 3.15. Реальные модели физических дефектов

Амплитуды эхо-сигналов от дефектов мало отличаются, если размеры дефектов больше длины волны ультразвука.

Обычно при выводе формул акустического тракта не учитывают затухание ультразвука. Поэтому в формулы добавляют множитель $e^{-2\delta \cdot x}$, где δ – коэффициент затухания, x – расстояние от преобразователя до отражателя.

Отражение от диска или отверстия с плоским дном.

Для случая, когда один и тот же преобразователь работает на излучение и прием (рис. 3.16), получают следующее выражение для давления на приемнике

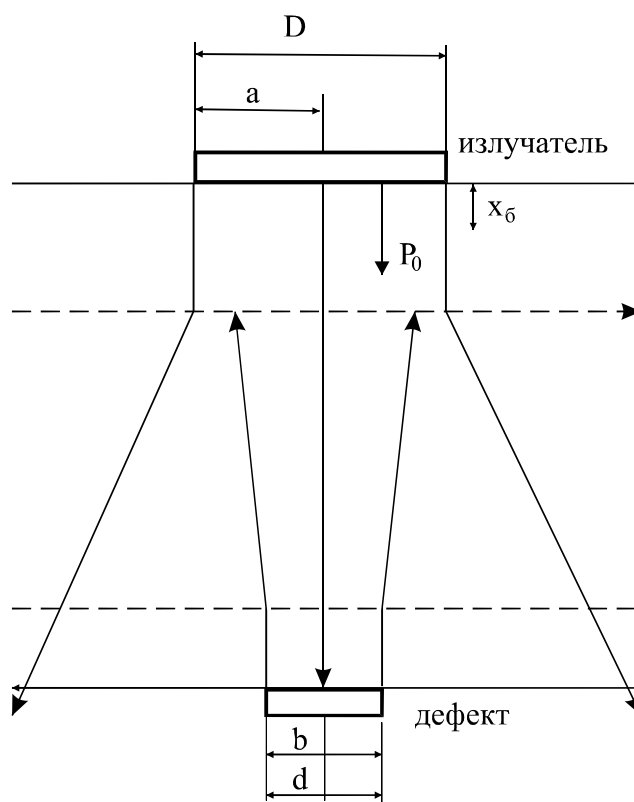


Рис. 3.16. К расчету акустического тракта

$$P = \frac{K}{S_a} \cdot P_0 \cdot J^2(x). \quad (3.1)$$

Или

$$\frac{P}{P_0} = \frac{K}{S_a} \cdot J^2(x), \quad (3.2)$$

где P – давление на приемнике;

S_a – площадь преобразователя ($S_a = \pi \cdot a^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$);

K – коэффициент, определяющий отражающую способность дефекта;

P_0 – давление, создаваемое излучателем;

$J(x)$ – функция, описывающая пространственное распределение поля излучателя.

Рассматривая дефект в виде произвольной площадки площадью S_b получим для K соотношение

$$K = R \cdot S_b, \quad (3.3)$$

где $R \approx 1$ – коэффициент отражения волны на границе сталь–воздух;

S_b – площадь дефекта (для диска $S_b = \pi \cdot b^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$)/

Отсюда, давление на приемнике будет определяться соотношением

$$\frac{P}{P_0} = \frac{S_b}{S_a} \cdot J^2(x). \quad (3.4)$$

Для дискового преобразователя в ближней зоне функция $J(x)$ имеет максимумы и минимумы и принимает значения от 1÷4 (рис. 3.17). В дальней зоне $J(x)$ монотонно уменьшается по закону

$$J(x) = \frac{S}{\lambda \cdot x}, \quad (3.5)$$

где λ – длина волны;

x – расстояние от преобразователя до дефекта.

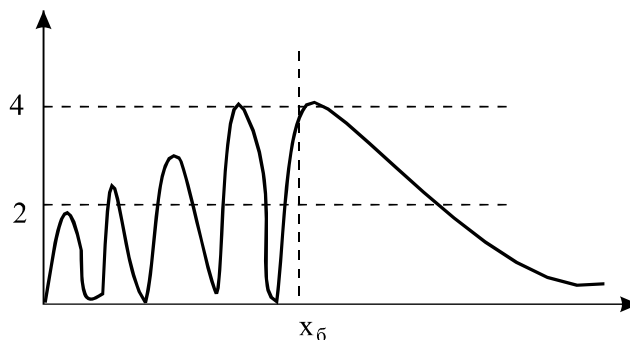


Рис. 3.17. Удельная мощность

Полное давление на приемнике определяется как интеграл по всей площади отражающего диска, т. е.

$$P = \frac{P_a}{S_a} \cdot \int_{S_b} J^2 R \cdot dS_b = P_0 \cdot \frac{S_b}{S_a} \cdot R \cdot J^2. \quad (3.6)$$

Для полого диска $R \approx l$. Если размеры дефекта невелики, но больше длины волны λ , то функцию J в пределах дефекта можно считать постоянной. Тогда отражательная способность K определяется площадью дефекта S_b . Отсюда запишем

для ближней зоны
$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = (1 \dots 16) \cdot \frac{S_b}{S_a}; \quad (3.7)$$

для дальней зоны
$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{S_a^2 \cdot S_b}{\lambda^2 \cdot x^2 \cdot S_a} = \frac{S_a \cdot S_b}{\lambda^2 \cdot x^2} \quad (3.8)$$

Следовательно, амплитуда отражения от небольшого плоского дефекта не зависит от его формы и пропорциональна его площади.

Отношение площади дефекта к квадрату длины волны обозначают через $A_\partial = \frac{S_b}{\lambda^2}$. Коэффициент A_∂ характеризует отражающую способность дефекта. Через него выражают эхо-сигнал

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = |J^2| \cdot A_\partial \frac{\lambda^2}{S_a}; \quad (3.9)$$

$$A_\partial = \frac{\pi \cdot b^2}{\lambda^2}. \quad (3.10)$$

Когда дефект значительно меньше длины волны, то зависимость отражательной способности от диаметра дефекта и длины волны имеет другой характер

$$A_\partial = \frac{b^3}{\lambda^3}. \quad (3.11)$$

Экспериментально трудно проверить зависимость A_∂ от относительного размера дефекта, так как трудно изготовить модель дискообразного дефекта, неимеющего входного отверстия. Зависимость A_∂ от отношения b/λ для плоскодонного отверстия имеет вид (рис. 3.18).

В расчетах предполагалось постоянство функции J на всей площади дефекта.

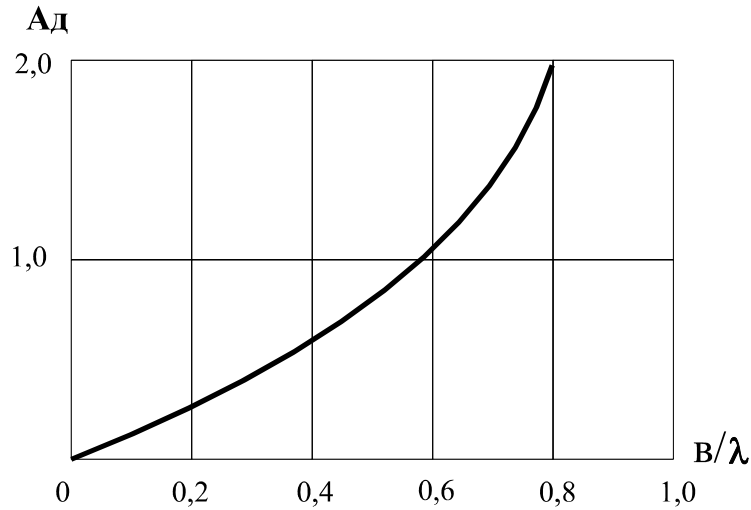


Рис. 3.18. Отражательная способность дефекта

Если площадь отражающего диска (плоскодонного отверстия) увеличить и приблизить к площади преобразователя, то изменением функции J на поверхности дефекта пренебречь нельзя. В результате уменьшения функции J от центра к периферии отражателя амплитуда сигнала возрастает с ростом дефекта медленнее, чем по закону $\frac{S_b}{\lambda^2}$. Когда размер дефекта достигает, а затем превосходит размер преобразователя, возможны две закономерности изменения амплитуды эхо-сигнала.

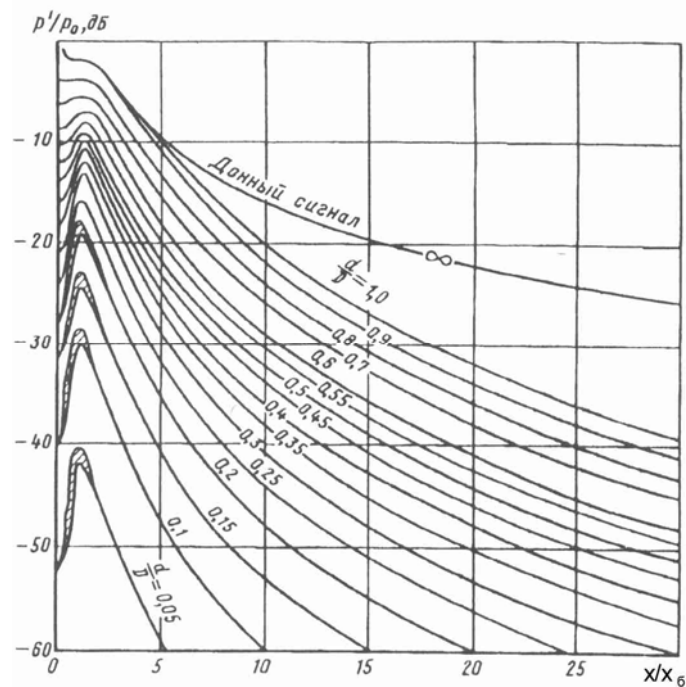


Рис. 3.19. Безразмерная АД-диаграмма

Если отражатель находится в ближней зоне, то амплитуда эхо-сигнала от него возрастает и приближается к амплитуде донного сигнала (дно находится на расстоянии, равном расстоянию до дефекта, дефект становится большим и превращается в дно). Если же отражатель находится в дальней зоне преобразователя, то амплитуда эхо-сигнала от него может превзойти амплитуду донного сигнала, испытать одну или две осцилляции и только после этого принять значение, равное амплитуде донного сигнала.

Такая зависимость объясняется тем, что отражающий диск подобен вторичному излучателю, имеющему свою ближнюю и дальнюю зоны.

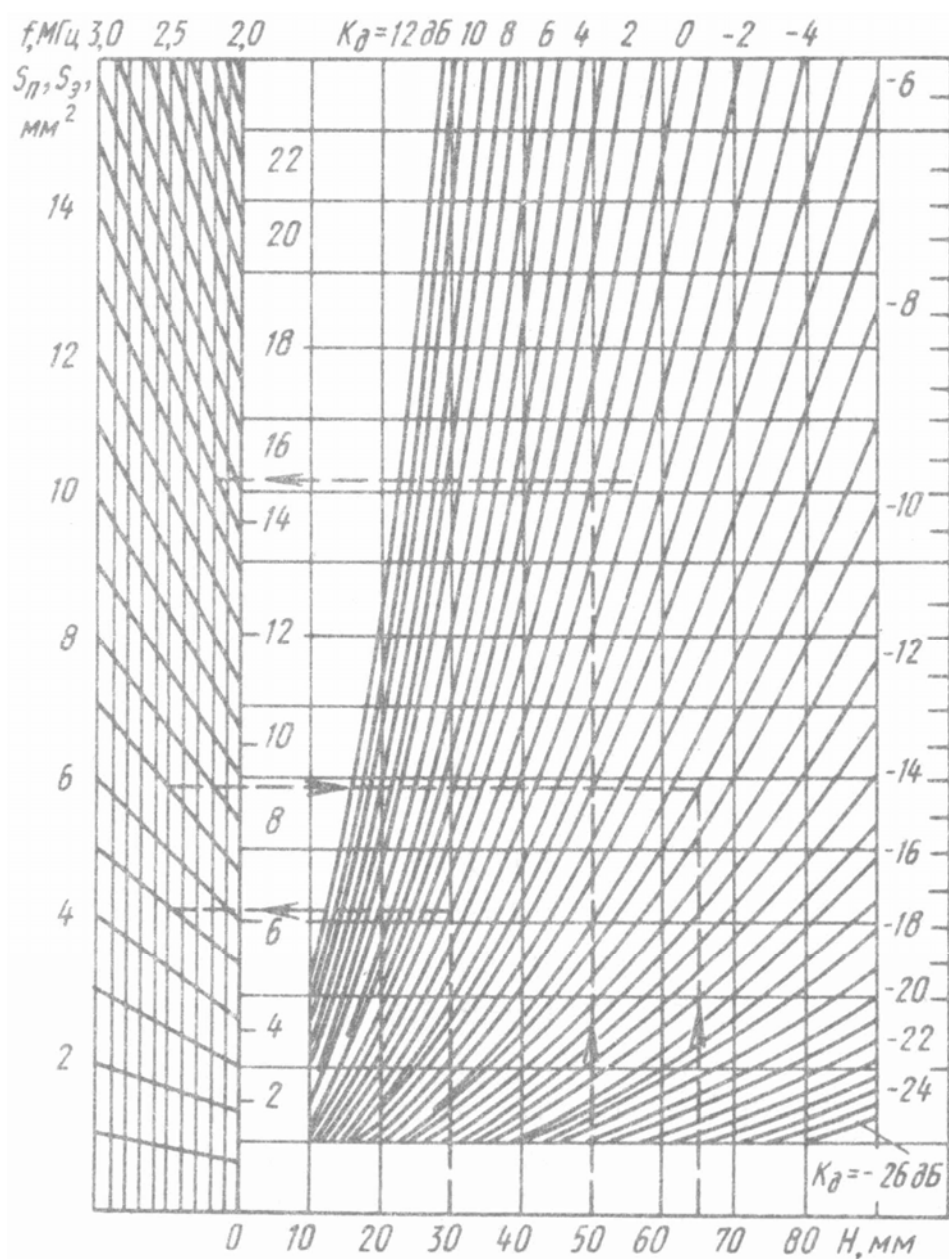


Рис. 3.20. SKH-диаграмма

Когда отражающий диск больше преобразователя, диск может находиться в его дальней зоне, а преобразователь – в ближней зоне отражающего диска. Это и служит причиной осциллирующий эхо-сигнала. При диаметре диска $b = \sqrt{0,5 \cdot \lambda \cdot x}$ преобразователь находится на границе ближней зоны отражателя и это положение соответствует максимуму амплитуды отраженного сигнала.

Анализ выражения показывает, что величина $\left| \frac{P}{P_0} \right|$ может быть

представлена как функция двух безразмерных параметров:

- 1) расстояния от преобразователя до отражателя, отнесенного к длине ближней зоны (x/x_0);
- 2) отношения диаметра отражающего диска к диаметру преобразователя ($2b/2a = d/D$).

В самом деле заменяя путем подстановки и преобразований можно получить следующее выражение

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \pi^2 \cdot \frac{(d/D)^2}{(x/x_0)^2}. \quad (3.12)$$

На основе этого соотношения для расчета амплитуды отражения от диска или плоскодонного отверстия в широком диапазоне расстояний и диаметров можно построить семейство безразмерных кривых амплитуда–расстояние–диаметр (АРД-диаграмма). В этой диаграмме по оси абсцисс откладывают относительное расстояние до дефекта в единицах длин ближней зоны, по оси ординат откладывают амплитуду отраженного сигнала в отрицательных децибелах (или относительных единицах) (рис. 3.19).

В таких диаграммах учитывается также экспоненциальное ослабление амплитуды отраженного сигнала за счет затухания.

§ 3.3. Акустический тракт теневого метода

Признаком обнаружения дефектов при дефектоскопии теньевым методом служит ослабление амплитуды упругих волн, прошедших через изделие. Выявляемость дефекта при теньевом методе количественно оценивают отношением амплитуд электрических сигналов V_i/V_c , характеризующим регистрируемое ослабление дефектом амплитуды сквозного сигнала V_c , прошедшего от излучателя к приемнику.

V_i – минимальная амплитуда сигнала при наличии дефекта.

Величина $V_i/V_c = 0 \dots 1$ и изменяется при увеличении дефекта.

Вместо отношения амплитуд электрических сигналов можно пользоваться относительной амплитудой акустических сигналов $\left| \frac{P_t}{P_c} \right|$.

В теновом методе появление дефекта отмечают по пропаданию или уменьшению амплитуды сквозного сигнала.

Расчет акустического тракта для тенового метода сводится к анализу ослабления амплитуды сквозного сигнала. Рассмотрим схему сквозного прозвучивания, представленную на рис. 3.21.

В отсутствии дефекта амплитуда акустического сигнала, прошедшего в элемент единичной площади приемного преобразователя около точки С, из элемента единичной площади излучателя около точки А, будет равно

$$P_c^n = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda \cdot r_{ac}} \cdot e^{-\delta r_{ac}}. \quad (3.13)$$

При однократном прохождении будет

$$P = \frac{P_0 \cdot S_{излуч}}{S_a \cdot \lambda \cdot x}. \quad (3.14)$$

Для эхо-метода

$$P = \frac{P_0}{S_a} \cdot J^2, \quad (3.15)$$

где P_0 – давление, создаваемое излучателем;

S_a – площадь излучателя;

J – функция, описывающая пространственное распределение поля излучения.

Если $S_{излуч}=1$, то

$$P = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda \cdot x}. \quad (3.16)$$

Тогда амплитуда сигнала от элементарного излучателя около точки А на приемном преобразователе с площадью S_c будет равна

$$P_c^i = \int_{S_c} P_c^n(\theta_{ac}) dS_c = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \int_{S_c} \frac{e^{-\delta r_{ac}(\theta_{ac})}}{r_{ac}(\theta_{ac})} dS_c. \quad (3.17)$$

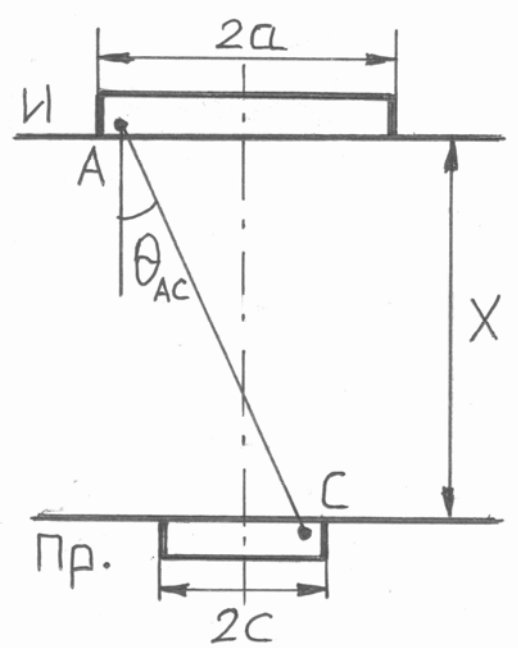


Рис. 3.21

Соответственно, амплитуда сигнала от всего излучателя с площадью S_a будет равна

$$P_c = \int_{S_a} P'_c dS_a = \iint_{S_a S_c} P''_c dS_c dS_a = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \int_{S_a} \left[\int_{S_c} \frac{e^{-\delta r_{ac}}}{r_{ac}} dS_c \right] dS_a. \quad (3.18)$$

Сигнал, принимаемый приемным преобразователем, при наличии дефекта, вычисляют следующим образом, как показано на рис. 3.22:

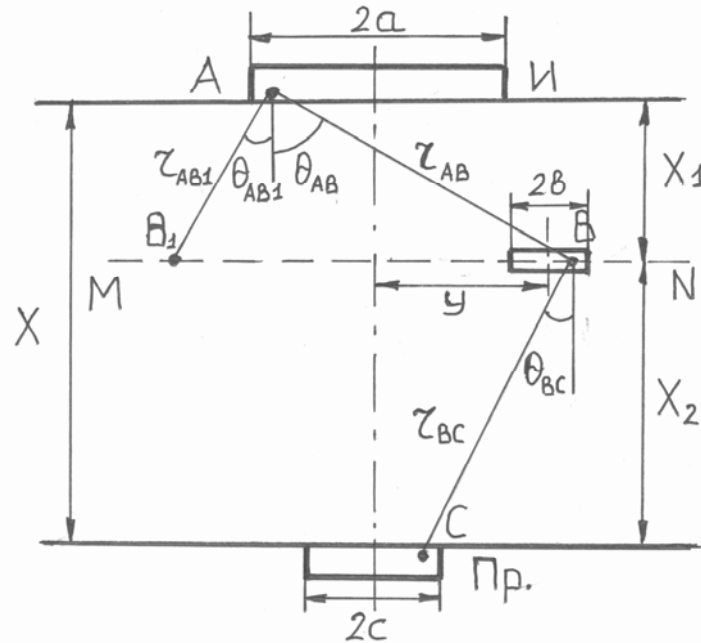


Рис. 3.22

- на уровне дефекта (на расстоянии x_1) проводят плоскость MN ;
- определяют давление, создаваемое излучателем в плоскости MN . При этом давление за дефектом считают равным нулю, т. е. за дефект акустические колебания не проходят.

Все точки B_1 плоскости MN рассматриваются как вторичные источники излучения и определяют суммарный сигнал от них на приемнике. Для этого производят интегрирование по бесконечной плоскости MN за вычетом площади дефекта S_b .

$$P''_{b1} = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{r_{ab1}} \cdot e^{-\delta r_{ab1}};$$

$$P'_{b1} = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \cdot \int_{S_a} \frac{1}{r_{ab1}} \cdot e^{-\delta r_{ab1}} dS_a;$$

$$P_{MN} = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \int_{MN} \left[\int_{S_a} \frac{1}{r_{ab1}} \cdot e^{-\delta r_{ab1}} dS_a \right] dS_{MN}. \quad (3.19)$$

Для единичной площади

$$P_b'' = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \cdot \int_{S_a} \frac{1}{r_{ab}} \cdot e^{-\delta r_{ab}} dS_a. \quad (3.20)$$

Тогда на дефекте

$$P_b' = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda} \int_{S_b} \left[\int_{S_a} \frac{1}{r_{ab}} \cdot e^{-\delta r_{ab}} dS_a \right] dS_b \rightarrow z_{ab}. \quad (3.21)$$

Таким образом,

$$P_b = \frac{P_0}{S_a \cdot \lambda \cdot S_b \cdot \lambda} \iint_{S_b S_a} (z_{ab}) dS_a dS_b \cdot \int_{S_c} \frac{1}{r_{bc}} \cdot e^{-\delta r_{bc}} dS_c. \quad (3.22)$$

Второй интеграл дает нам часть акустического давления, не прошедшего за дефект площадью S_b . Эта непрошедшая часть будет отражаться дефектом. Т. к. коэффициент отражения дефектом мы считаем практически равным 1, то эту непрошедшую часть можно заменить отраженной от дефекта частью суммарного давления в плоскости MN , но с обратным знаком. Т. е. мы считаем, что возмущение поля за экраном (дефектом) равно возмущению поля перед экраном (дефектом). Это положение носит название **принципа Бабине**.

$$P_T = P_C - P_B. \quad (3.23)$$

Однако поля перед экраном и за экраном в общем случае неодинаковы. Отраженная волна ни с чем не интерферирует, возмущение за экраном складывается с падающей волной. Т. е. имеются существенные различия. Равенство может возникнуть лишь в некоторых частных случаях. Перед дефектом давление постепенно уменьшается с увеличением расстояния от него.

Позади дефекта имеется «светлое пятно», т. е. постоянный максимум. Существование светлого пятна позади экрана (дефекта) было предсказано Пуассоном. Он оппонировал Френелю, когда тот предложил свою теорию дифракции света. Пуассон заявил, что эта теория ошибочна, потому что применяя ее, можно доказать существование света позади дискообразного непрозрачного экрана, чего не может быть. Пуассон доказал это, стоя зоны Гюйгенса-Френеля в плоскости MN , начиная не от оси экрана, а от его края. Суммарный сигнал от всех зон получался примерно такой же, как и без экрана. Экспериментальная проверка затем показала, что действительно в центре тени, образуемой экраном, имеется светлая точка. Явление это получило название **эффекта Пуассона** и послужило лучшим подтверждением теории Френеля. Потом уже вспомнили, что открыто оно было де-Лиллем сто лет назад.

Запишем отношение, определяющее появление сигнала за счет дефекта

$$\left| \frac{P_T}{P_C} \right| = \left| 1 - \frac{P_B}{P_C} \right|. \quad (3.24)$$

Интегрирование выражения, описывающего сигнал при наличии дефекта, представляет значительные трудности, поэтому применяют тот же прием, что и при анализе эхо-метода. Выделяют безразмерные параметры:

$\frac{x}{x_0}$ – относительное расстояние между преобразователями;

$\frac{b}{a}$ – относительный размер дефекта;

$\frac{x_1}{x}$ – относительное расстояние до дефекта;

$\frac{y}{a}$ – относительное смещение дефекта от оси преобразователей.

На основе этих безразмерных параметров строят АРД-диаграмму теневого метода. Для этого надо сначала исключить два лишних параметра $\frac{x_1}{x}$ и $\frac{y}{a}$. С этой целью полагают: $\frac{x_1}{x} = 0,5$, т. е. дефект расположен посередине между преобразователями.

Т. к. наибольшее ослабление будет иметь место, если дефект расположен на оси преобразователя, то полагают $y=0$ и параметр $\frac{y}{a}$ исключают.

Тогда у нас остаются два безразмерных параметра $\frac{x}{x_0}$ – расстояние;

$\frac{b}{a}$ – диаметр. На их основе строится АРД-диаграмма, представленная на рис. 3.23.

При $x \rightarrow 0$ приемник находится в ближней зоне излучателя, и ослабление сигнала будет прямо пропорционально отношению площади дефекта к площади преобразователя. Т. е. для точек на оси ординат

$$\left| \frac{P_T}{P_C} \right| = 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2. \quad (3.25)$$

При $b=a$ происходит практически полное перекрытие пучка и $\left(\frac{P_T}{P_C} \right) \approx 0$. С увеличением расстояния x (при $b=a$) за счет расхождения пучка излучателя часть акустической волны огибает дефект и попадает в приемник. Эта часть увеличивается с увеличением x . Такое же увели-

чение вклада огибающей части волны имеет место и для остальных диаметров дефектов. Поэтому все кривые имеют

$$\left| \frac{P_T}{P_C} \right|_{x=x_6} > \left| \frac{P_T}{P_C} \right|_{x=0} \quad (3.26)$$

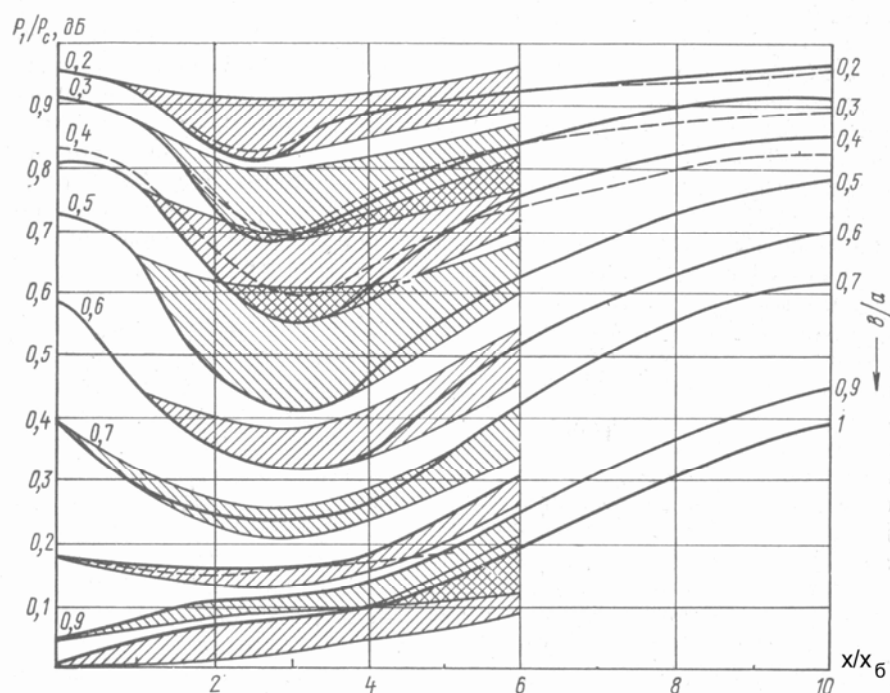


Рис. 3.23. АРД-диаграмма теневого метода контроля

На расстояниях $x = (2-4)x_6$ кривые до $\frac{b}{a} \approx 0,7$ имеют минимум. Такой ход кривых связан со следующим явлением. От излучателя уходит продольная волна. При взаимодействии с дефектом она в каждой точке дефекта рассеивается, распадаясь на продольную и поперечную волны. Поперечная волна уносит значительную часть энергии из пучка, причем эта часть энергии не попадает в приемник. Величина уносимой энергии связана с площадью внешней поверхности дефекта, а не с его диаметром. Разность в этих площадях тем больше, чем меньше диаметр дефекта и максимальное проявление переноса энергии наблюдается при расстояниях между преобразователями $(2-4)x_6$. Более строго в этой области необходимо учитывать не только диаметр дефекта, но и его длину в направлении прозвучивания l .

Использование АРД-диаграмм теневого метода также позволяет определять размер дефекта по известному расстоянию x и уменьшению амплитуды сквозного сигнала от бездефектного изделия.

Практическая чувствительность контроля теньвым методом оценивается следующими неравенствами

при $x \leq 3x_0$

$$1 - 4 \frac{S_b}{S_a} \leq \left| \frac{P_T}{P_C} \right| \leq 1 - \frac{S_b}{S_a}, \quad \text{при} \quad x \leq 3x_0; \quad (3.27)$$

$$1 - 4 \frac{S_b}{\lambda x} \leq \left| \frac{P_T}{P_C} \right| \leq 1 - 4 \frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2}, \quad \text{при} \quad x \geq 5x_0. \quad (3.28)$$

Влияние перемещения дефекта перпендикулярно оси преобразователей в средней плоскости имеет вид, показанный на рис. 3.24.

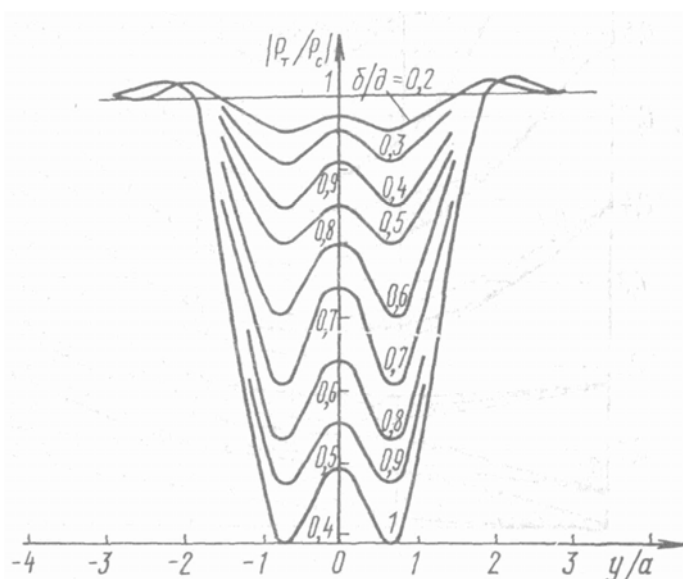


Рис. 3.24

Максимум при $\frac{y}{a} = 0$ соответствует «светлому пятну» позади экрана.

В ближней и переходной зонах $\left(\frac{x}{x_0} \leq 5 \right)$ этого эффекта нет и на оси позади экрана наблюдается наибольшее ослабление сигнала. В области $x \geq 5x_0$ максимальное ослабление сигнала (т. е. максимальная чувствительность) наблюдается только тогда, когда дефект смещен в сторону от оси.

Если дефект имеет квадратную или прямоугольную форму, то максимальное ослабление соответствует расположению дефекта ближе к оси. По данным эксперимента минимальный размер выявляемого дефекта на оси составляет

$$b_{\min} = 0,83 \sqrt{\lambda \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2}}. \quad (3.29)$$

Следовательно, чувствительность повышается:

- с увеличением частоты (уменьшением длины волны);
- с уменьшением расстояния от дефекта до приемника – x_2 ;
- с уменьшением расстояния от источника до дефекта – x_1 .

Наименьшая чувствительность получается при $x_1=x_2$, т. е. когда дефект расположен посередине между излучателем и приемником. При увеличении размеров преобразователей чувствительность повышается благодаря более направленному излучению.

Аналогичные соотношения получены для **зеркально-теневого метода**. А.К. Гурвичем предложена инженерная формула для расчета ослабления донного сигнала диском

$$\left| \frac{P_3}{P_0} \right| = \left| 1 - \frac{kb^2 H \cdot \cos \alpha}{x_1 (2H - x_1)} \right|, \quad (3.30)$$

где H – толщина изделия;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda};$$

x_1 – расстояние до дефекта;

P_3 – давление при наличии дефекта;

P_0 – давление, создаваемое отражением от дна без дефекта.

Если дефект расположен около дна (в корне шва) $x_1=H$, то

$$\left| \frac{P_3}{P_0} \right| = \left| 1 - \frac{kb^2 \cdot \cos \alpha}{H} \right|. \quad (3.31)$$

Помехи при контроле теньвым методом

К помехам в данном случае следует относить всякое возмущение, приводящее к ослаблению сигнала. Поэтому очень высокие требования при контроле теньвым методом предъявляются к стабильности акустического контакта.

При контроле эхо-методом случайное нарушение акустического контакта приведет к некачественному контролю некоторого участка изделия. В теньвом методе такое кратковременное ухудшение контакта воспримется как дефект. Поэтому при контроле теньвым методом преобразователи контактного типа почти не применяют – контроль ведут иммерсионным способом.

Специфическим видом помех теневого метода являются нарушения соосности преобразователей в процессе сканирования. Для борьбы с этим явлением предусматривают точную юстировку преобразователей и жесткое их крепление.

Стабилизация амплитуды сквозного сигнала затрудняется при контроле объектов с поверхностями сложной формы. В этом случае не всегда может помочь даже иммерсионный способ ввода УЗ колебаний. Для уменьшения влияния кривизны поверхности обычно применяют компенсаторы, выравнивающие поверхность до плоской. Однако здесь также существует трудность в подборе компенсатора, скорость звука в котором должна быть равной скорости звука в материале контролируемого изделия.

Специфический вид помех связан с возникновением стоячих волн в объекте контроля или в промежуточных слоях, резко изменяющих прохождение УЗ через различные участки изделия с одинаковой толщиной. Для борьбы с этим явлением используют импульсный режим работы излучателя, причем длительность импульса излучения τ должна быть меньше времени пробега ультразвука в прямом и обратном направлениях.

Также при контроле теневым методом помехами могут являться наличие участков в объекте контроля с различными акустическими свойствами и для осуществления контроля теневым методом необходим двусторонний доступ к объекту контроля, что не всегда возможно.

§ 3.4. Акустическая эмиссия

Физическая природа возникновения акустической эмиссии (АЭ) в материале при его пластическом деформировании и разрушении связана с микропроцессами необратимого деформирования и разрушения материалов. Приложенная нагрузка приводит к возникновению в материале полей напряжений и деформаций, энергия которых приводит к зарождению и развитию дислокаций.

Неравномерность, прерывистость дислокационных процессов связана с отрывом дислокаций от точек закрепления, торможением их у препятствий и уничтожением дислокаций. Такая прерывистость приводит к излучению упругих волн. Это явление получило название – акустическая эмиссия.

Возникновение АЭ материала, находящегося под механическим напряжением, было обнаружено более 50 лет назад. Однако систематическое исследование этого явления было выполнено в 50-х годах Кайзером. Он обнаружил явление невоспроизводимости шумов при повторном нагружении, названное позже **эффектом Кайзера**.

Экспериментальные исследования показали, что сигнал АЭ в стали и хрупких телах образуется за очень короткий промежуток времени, примерно 0,03 мкс.

В настоящее время развивается два основных направления использования метода АЭ:

1. Изучение динамических процессов в материале под нагрузкой. Оказалось возможным изучать основные характеристики материала –

предел текучести, предел прочности и др. Изучаются здесь и количественные соотношения между мощностью сигналов АЭ и размерами пластической деформации.

2. Техническая диагностика состояния промышленных объектов с целью предупреждения возможности аварий.

При анализе возникновения АЭ используются понятия:

Акустическая эмиссия – механически колебания, вызванные динамической перестройкой структуры материалов.

Единичный акт АЭ – единичный радиоимпульс на выходе приемной системы, возбуждаемые сигналом АЭ.

Амплитуда АЭ – максимальное значение огибающей акта АЭ (В).

Активность АЭ – число актов АЭ в единицу времени (имп/с).

Интенсивность АЭ – число превышений установленного порога дискриминации в единицу времени на выходе приемной системы (имп/с).

Рассмотрим основные изучаемые виды АЭ.

1. АЭ при испытаниях на растяжение.

Зависимость параметров АЭ от деформации обычно исследуется на гладких образцах при одностороннем растяжении. При испытаниях одновременно с диаграммами напряжение – деформация записывается кривая либо активности АЭ, либо общего числа импульсов АЭ, как показано на рис. 3.25.

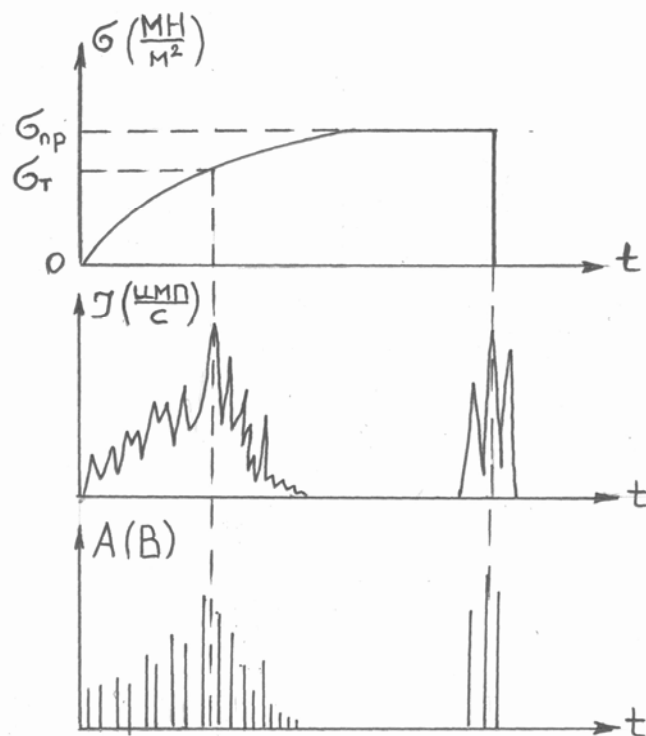


Рис. 3.25

Пик активности обычно приходится на область предела упругости – предела текучести. Установлено, что материалу с большим пределом текучести соответствует большая активность АЭ и увеличению скорости деформации соответствует рост активности АЭ. Перед разрывом образца наблюдается резкий подъем интенсивности АЭ.

2. АЭ при образовании и росте трещин.

При образовании и развитии трещин сигнал АЭ вызывается пластической деформацией материала в вершине трещины, образованием и слиянием микротрещин в окрестности вершины трещины, скачкообразным продвижением вершины трещины.

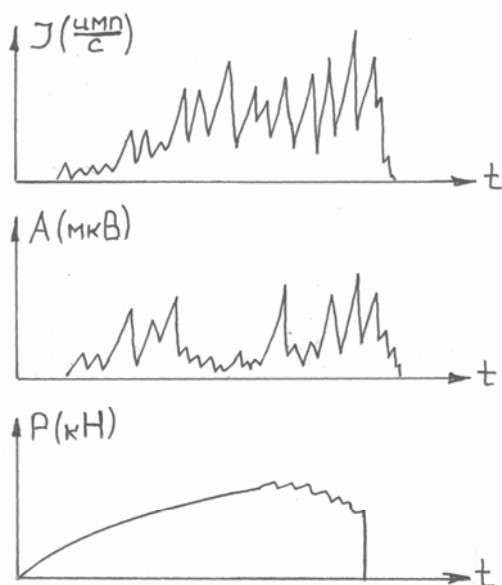


Рис. 3.26

Чаще всего регистрируется суммарная АЭ, интенсивность или активность АЭ и амплитуда актов АЭ. Сигналы АЭ появляются практически с начала нагружения, их амплитуда незначительна (до 10–50 мкВ), как видно из рис. 3.26. Однако имеются выбросы амплитуды в 3–8 раз больше средних амплитуд. Объясняют появление таких сигналов малыми продвижениями трещины. Эту связь используют для регистрации продвижения трещины. Эксперименты показывают, что первый скачок трещины надежно обнаруживается по появлению сигнала с большей амплитудой. Обработка экспериментальных

данных показывает, что в ряде случаев можно установить количественные соотношения между увеличением длины трещины и наблюдаемыми при этом амплитудами сигналов АЭ. Аппроксимирующая зависимость имеет вид

$$\Delta l = \sum_i \Delta l_i = a \left(\sum_i A_i^m \right), \quad (3.32)$$

где $\Delta l_i = l_i - l_0$; l_0 – начальная длина трещины.

Т. е. измеряя параметры АЭ можно не только обнаружить начало развития трещины, но и оценить суммарное ее увеличение.

3. АЭ при циклическом нагружении.

Широкое распространение циклических и связанные с этим особые явления, например, усталостные разрушения, создают широкие возмож-

ности для обнаружения и оценки дефектов, развивающихся в особых условиях. Исследователями была получена связь (Данеган и др.) между общим числом импульсов АЭ, длиной трещины и коэффициентом интенсивности напряжения для любого цикла нагружения. Для исследования АЭ при циклических нагрузках обычно используют образцы с односторонним надрезом или предварительно инициированной усталостной трещиной. Было обнаружено резкое возрастание АЭ за несколько десятков циклов до разрушения. При этом сохраняется хорошая корреляция между данными по АЭ и раскрытием трещины, как показано на рис. 3.27.

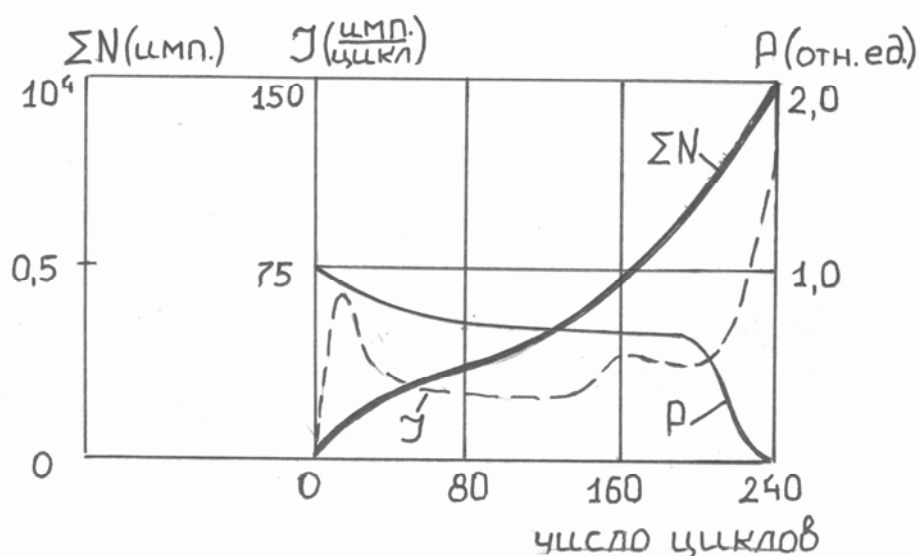


Рис. 3.27. $P_{отн.ед}$ — нагрузка; J имп./цикл — интенсивность за цикл; $\Sigma N_{имп.}$ — общее число импульсов АЭ

Считают, что при циклическом нагружении работают следующие механизмы генерации АЭ:

- накопление пластических деформаций в материале;
- скачкообразное продвижение усталостной трещины и вызванная этим динамическая разгрузка участков материала, примыкающих к берегам трещины;
- продвижение и увеличение зоны пластической деформации в области вершины трещины, обусловленное ее продвижением;
- взаимное трение берегов усталостной трещины.

Однако пока не создано методик для оценки длины усталостной трещины по результатам регистрации АЭ во время циклического нагружения.

4. Связь параметров АЭ с кинетикой разрушения.

Основную информацию о материале получают по общему количеству сигналов АЭ, их активности и амплитуде. Некоторые авторы ука-

зывают на возможность использования формы отдельного импульса, формы огибающей серии импульсов, времени нарастания переднего фронта импульсов и т. д. Теоретические и эмпирические зависимости между параметрами сигнала АЭ и параметрами состояния материала позволяют прогнозировать разрушение материала. Основную информацию несут интенсивность и амплитуда сигналов АЭ.

При теоретическом рассмотрении получают зависимость измерения активности АЭ от времени при линейном законе нарастания нагрузки. При выводе этих соотношений используются следующие допущения:

- каждая ячейка разрушается при достижении в ней некоторого критического напряжения разрыва;
- разрыв ячейки сопровождается излучением одного импульса АЭ.

Получена теоретическая зависимость между активностью АЭ и нагрузкой, изменяющейся по линейному закону $P=gt$.

$$J = N_0 \frac{e^{\frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{V\sigma_m}}}{\left(\frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{\sigma_m} + V\right) \cdot \frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{gt^2}} \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{eVg\tau} + 2\right)} \cdot \left(\frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{eVg\tau} - 1\right) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_m - \sigma_{ny}}{Vg\tau}\right)}, \quad (3.33)$$

где N_0 – первоначальное количество ячеек;

τ – время;

σ_r – предел текучести;

σ_{ny} – предел упругости;

σ_r – теоретическая прочность ячейки ($\approx 10^2 \sigma_r$);

V – структурно-чувствительный параметр материала.

Сравнение теоретической кривой с экспериментальной дает хорошее совпадение, как показано на рис. 3.28.

Можно также сказать о зависимости интенсивности АЭ и длиной трещины

$$J(l) = \frac{1}{\tau_0 e} \left[\frac{U_0 \chi(T) \cdot \sigma_l}{kT \sigma_m} \sqrt{\frac{L}{l}} + 1 \right], \quad (3.34)$$

где U_0 – энергия связи;

$\chi(T)$ – функция температуры;

σ_l – действующее напряжение;

σ_r – теоретическая прочность;

L – длина трещины;

l – расстояние ячейки от вершины трещины;

T_0 – время разрыва ячейки.

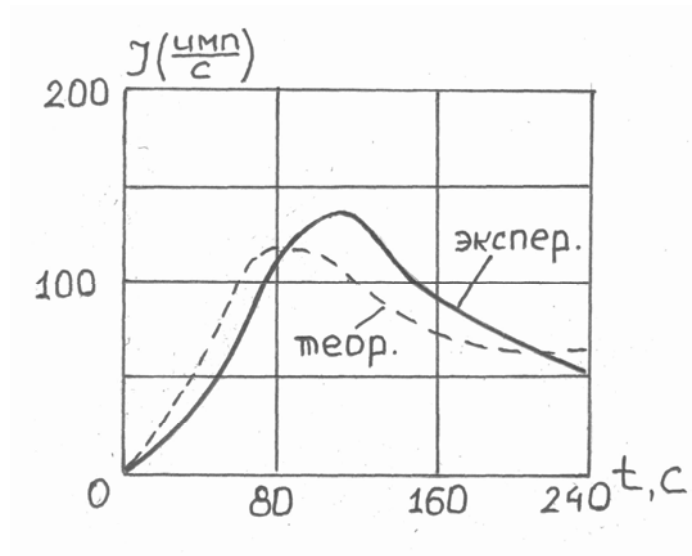


Рис. 3.28

Получают также зависимости между амплитудой импульсов АЭ и поврежденностью материала.

Основные схемы контроля с применением АЭ представлены на рис. 3.29.

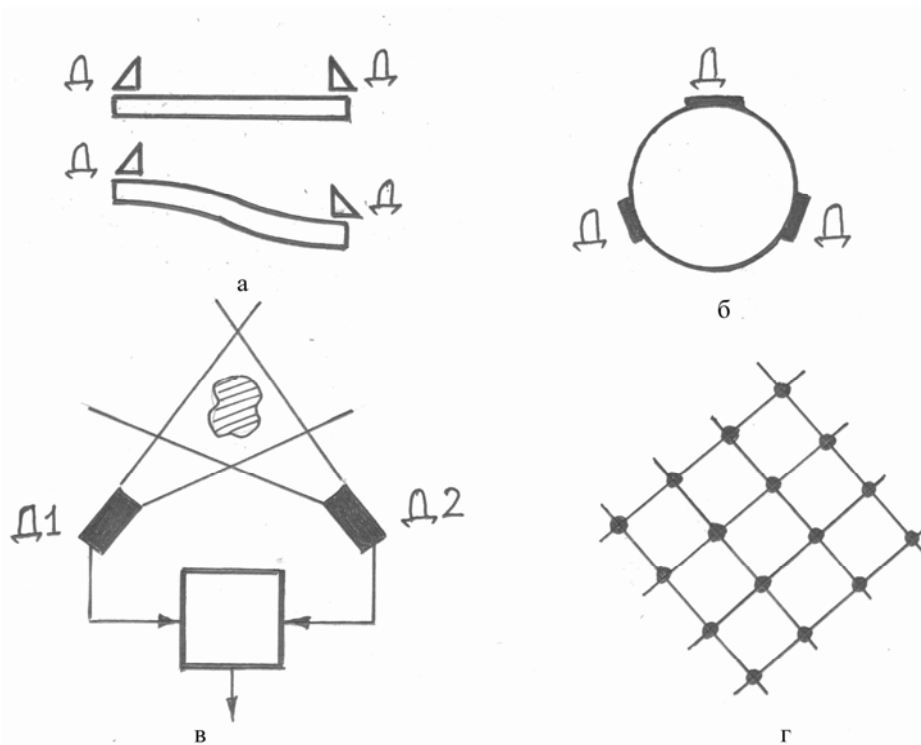


Рис. 3.29. Схемы контроля с применением АЭ

Неметаллы

Широкое применение АЭ находит в настоящее время для испытаний неметаллических материалов, например – стеклопластики, органопластики, боропластики. Эксперименты показали, что при нагружении стекло-

пластика импульсы АЭ возникают сразу же после приложения нагрузки и их причиной является разрыв наиболее слабых волокон в нитях. При нагружении образцов из чистого связующего (смола) АЭ не возникала до нагрузок около 80 % разрушающей. Форма импульсов АЭ также была резко различной. Частотный спектр сигналов АЭ здесь лежит в области от 0,2 до 200 кГц. Эксперименты показывают, что на характер зависимостей $N(P)$ и $J(f)$ существенно влияют технология изготовления стеклопластика, ориентация волокон относительно действующего усилия.

Форма сигналов АЭ

Для выяснения формы сигнала АЭ рассматривают обычно схему, представленную на рис. 3.30.

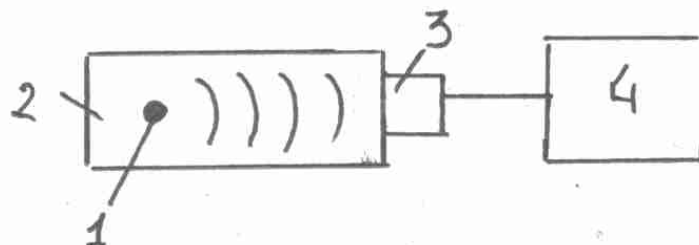


Рис. 3.30. Схема выяснения формы сигнала АЭ

Механические волны в исследуемом теле 1, вызванные источником 1, преобразуются в электрические сигналы преобразователем 3 и поступают на регистратор 4. Дисперсия волнового движения в твердом теле приводит к искажению формы исходного механического импульса.

Предположим, что механическое действие описывается во времени прямоугольным импульсом. Его можно разложить в ряд Фурье, при этом частотный спектр будет простирается от 0 до ∞ . Зависимость фазовой и групповой скорости волн от частоты приводит к искажению формы импульса по мере его распространения:

- наблюдается запаздывание;
- редкие изменения размываются;
- основной импульс сопровождается «хвостом» колебаний высокой частоты;
- прямоугольная часть импульса превращается в колебательную кривую.

Ограниченность размеров исследуемого тела приводит к отражению волн от его поверхностей, трансформации типов волн и др. явлениями. В итоге, при выходе на поверхность вместо прямоугольного получается затухающий колебательный процесс, что и показано на рис. 3.31.

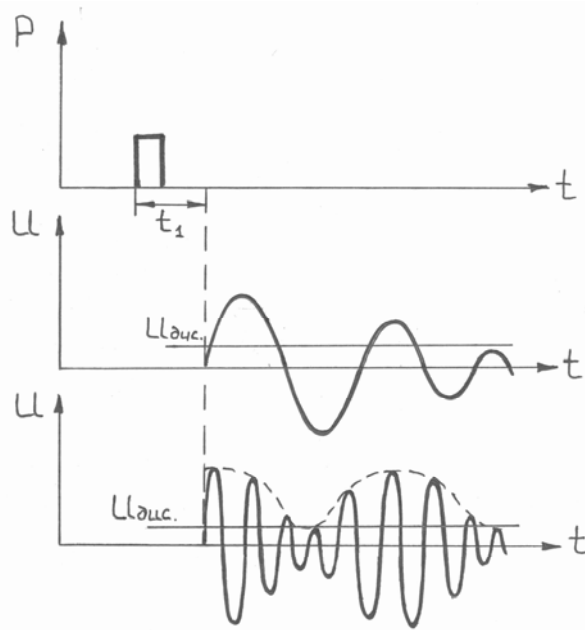


Рис. 3.31

Дополнительные искажения может вносить преобразователь, если он работает на определенной резонансной частоте. В этом случае электрический сигнал будет иметь явно выраженную частоту f_0 . Таким образом, импульс АЭ даст электрический сигнал.

Если время между двумя актами АЭ будет больше времени, установления переходных процессов в твердом теле и преобразователе, то АЭ воспринимается как дискретная последовательность импульсов. Форму каждого импульса можно описать выражением

$$U(t) = Ae^{-nt} \cdot \sin \omega t, \quad (3.35)$$

где A – амплитуда;
 n – коэффициент затухания.

Амплитуда A приближенно определяется зависимостью

$$A = \frac{S}{mp}, \quad (3.36)$$

где $S = \int_0^{t_1} P(t) dt$ – импульс силы;

$$P(t) \text{ – сила, равная } \begin{cases} 0, \text{ при } t < 0 \\ P_0 = \text{const}, \text{ при } 0 < t < t_1; \\ 0, \text{ при } t > t_1 \end{cases}$$

m – приведенная масса;

$P = \frac{C}{m}$, C – коэффициент жесткости.

Если время между двумя актами АЭ меньше времени установления переходного процесса, то говорят о непрерывной АЭ. Характеристики сигналов АЭ имеют следующий порядок величин, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Суммарная АЭ (имп.)	Интенсивность АЭ (имп./с)	Амплитуда (В)	Энергия сигнала (Дж)	Длительность импульса (с)
$0-10^7$	$0-10^5$	$10^{-7}-10^{-2}$	$10^{-9}-10^{-5}$	$10^{-4}-10^{-8}$

Т. к. сигналы АЭ представляют собой акустические волны, то для их измерения обычно используются пьезопреобразователи.

Кроме определения факта возникновения дефекта, с помощью АЭ определяется также координата трещины. Для этих целей используют несколько детекторов и измеряют задержку времени распространения во всех датчиках по сравнению с сигналом одного из датчиков.

Измерительный тракт содержит обычно преобразователь, усилитель, блок фильтров, дискриминатор, детектор, как показано на рис. 3.32. На выходе 1 формируется случайная последовательность видеоимпульсов случайной амплитуды. На выходе 2 формируется количество пересечений с порогом.

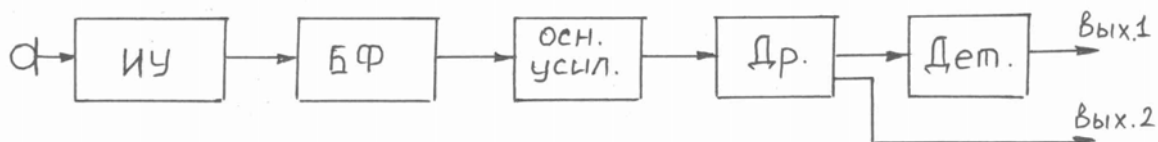


Рис. 3.32

Практическое применение метода АЭ ограничивается тем, что пока еще отсутствуют критерии, позволяющие определять степень опасности дефектов по параметрам АЭ. Не определена также связь АЭ с процессами, протекающими в материале при различных условиях нагружения. Кроме этого метод АЭ требует нагружать изделия до 10 % от разрушающих нагрузок. Не все объекты могут быть нагружены таким образом.

Наилучшие результаты по определению дефектов с использованием метода АЭ получен при контроле монолитных панелей, балок, оболочек толщиной менее 5 мм, панелей с заклепочными и болтовыми соединениями, сосудов, находящихся под давлением и т. д. Большое число работ связано с применением метода АЭ для диагностики режущего инструмента. Здесь получены количественные соотношения между параметрами сигналов АЭ и размерами трещин и скоростью их роста.

Глава 4

МЕТОДОЛОГИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

§ 4.1. Методика дефектоскопии изделий

Ультразвуковой контроль отличается многообразием методов, типов волн, широким диапазоном частот.

Реализация этих больших возможностей применительно к дефектоскопии конкретных видов изделий составляет задачу разработки методики контроля.

Методика контроля включает следующие основные задачи:

1. Выбор схемы контроля, т. е. метода дефектоскопии, типа волн, поверхности, через которую вводят УЗ волны, угла ввода.
2. Подготовка изделия к контролю. Сюда входит выработка требований к обработке поверхности, если она необходима, разделение больших изделий на сектора для последующего контроля.
3. Разработка рекомендаций по подготовке аппаратуры, выбор и настройка частоты, чувствительности, скорости развертки.
4. Поиск дефектов, выбор пути, шага и скорости сканирования.
5. Оценка результатов контроля

1. Для контроля металла применяют в основном эхо-, теневой и зеркально-теневой методы. Предпочтение отдается эхо-методу, как наиболее чувствительному и помехоустойчивому. Теневым методом контролируют тонкие, слоистые металлы с простой формой поверхности. Зеркально-теневой метод применяют при доступе к одной поверхности, когда дефекты не дают эхо сигнала (например, из-за наличия мертвой зоны или в связи с неблагоприятной ориентацией дефекта), но ослабляют донный сигнал.

Тип ультразвуковых волн выбирают следующим образом. Продольными и поперечными волнами контролируют изделия значительной толщины – в несколько раз большей длины волны. Волны в пластинах применяют для контроля листов, оболочек, труб с толщиной стенки, соизмеримой с длиной волны. Волнами в стержнях проверяют проволоки и прутки, диаметр которых соизмерим с длиной волны. Поверхностными волнами выявляют дефекты на поверхности изделия.

Для выявления подповерхностных дефектов применяют продольные подповерхностные волны (головные), возникающие при наклонном падении ультразвука на поверхность изделия под углом, равным первому критическому. Эти волны нечувствительны к неровностям и дефектам на поверхности изделия и достигают максимума чувствительности на глубине 5–10 мм от поверхности.

Направление УЗ волн должно быть таким, чтобы обеспечивалось надежное выявление наиболее опасных дефектов. Особо ответственные изделия контролируют несколько раз при различных направлениях УЗ волн.

При контроле эхо-методом выявляемость дефектов в большей степени зависит от направления продольных и поперечных волн. При включении искателей по совмещенной схеме для достижения оптимальной чувствительности к реальным дефектам волны должны падать перпендикулярно к плоскости дефекта. Ориентация дефектов в меньшей степени влияет на выявляемость дефектов при контроле волнами в пластинах и стержнях.

2. Поверхность, через которую вводят УЗ волны, должна быть относительно ровной, не иметь выступов и выемок, мешающих перемещению искателя.

При контроле изделий по криволинейной поверхности радиусом $\leq 100\text{--}150$ мм призму наклонного искателя обрабатывают таким образом, чтобы радиус кривизны ее контактной поверхности был несколько больше радиуса кривизны изделия. При контроле таких изделий нормальным искателем, используют прямоугольные пьезопластины, ориентированные вдоль поверхности изделия. При контроле иммерсионным способом применяют фокусировку ультразвука.

Качество поверхности должно обеспечивать достаточно высокую стабильность акустического контакта, так чтобы изменения чувствительности не превышали 10 %. Для контактного способа это требует обработки поверхности по 6-му классу, допустимо снижение до 4-го класса, однако в этом случае рекомендуется использовать специальные искатели. При применении иммерсионного и бесконтактного способов контроля требования к поверхности снижаются.

Во всех случаях недопустимо на поверхности отслаивающейся окалины, грубых неровностей или покрытий, препятствующих прохождению ультразвуковых волн в объект контроля.

При контроле контактным методом поверхность покрывается хорошо смачивающей жидкостью (машинным или трансформаторным маслом, глицерином, клейстером или специально выпускаемыми для этих целей контактными смазками). Такие жидкости обычно называют «контактными».

3. При настройке аппаратуры руководствуются следующими правилами.

- Частоту УЗ колебаний выбирают наиболее высокой, но с учетом затухания в материале. Для получения максимальной чувствительности ее снижают с увеличением толщины изделия и повышением затухания в материале изделия.
- Чувствительность дефектоскопа обычно выбирают выше максимально возможного значения. Часто она указывается в нормативно-технической документации на контроль. При необходимости требуемая чувствительность определяется экспериментально по результатам контроля опытной партии изделий.
- В процессе поиска дефектов при ручном контроле чувствительность увеличивают в 2–4 раза по сравнению с требуемым значением (поисковая чувствительность).
- Скорость и задержку развертки эхо-дефектоскопа регулируют таким образом, чтобы линия развертки соответствовала всему пути ультразвука в изделии. Изделия большой толщины иногда контролируют по слоям. При этом каждый слой контролируют при соответствующей регулировке развертки и чувствительности.

4. При поиске дефектов, выбирают путь, шаг и скорость сканирования таким образом, чтобы изделие было полностью проконтролировано и вероятность пропуска дефекта была сведена к минимуму.

5. Оценка результатов контроля является заключительным этапом. Которая состоит из рекомендаций по определению местоположения дефектов, измерения их размеров, оценки характера. Конечным результатом должно явиться отнесение изделия к годным и бракованным.

Рассмотрим основные положения и правила УЗ контроля некоторых изделий.

Контроль литья

Ультразвуковой контроль отливок проводится эхо- и зеркально-теневым методами обычно с помощью нормальных преобразователей. Дефекты литья (поры, шлаковые включения) имеют объемный характер и могут быть обнаружены при прозвучивании с разных сторон. Поэтому контроль ведут, как правило, в одном направлении по кратчайшему расстоянию от поверхности, удобной для ввода УЗК.

Однако имеются опасные зоны, которые должны быть проверены в направлении перпендикулярном к плоскости наиболее вероятного развития трещин. Кроме того в отливках встречаются волосовидные дефекты, плохо отражающие ультразвук. О наличии таких дефектов судят по ослаблению донного сигнала.

Ввиду того, что поверхность отливок шероховатая, целесообразно применять специальные преобразователи для контроля грубой поверхности. Как правило, стальные отливки подвергаются высокотемпературной обработке, измельчающей структуру, и их целесообразно контролировать после такой обработки, при этом чувствительность повышается в 2–4 раза. Частоту УЗК берут 1–2 МГц.

Чугун контролируется хуже чем сталь из-за больших размеров зерна. Это требует снижения частоты УЗК.

Контроль поковок и штамповок

Поковки и штамповки контролируют эхо-методом. В этих изделиях могут быть выявлены усадочные раковины, инородные включения, окисные пленки, ликвационные скопления и другие дефекты, которые практически невозможно обнаружить просвечиванием.

Контроль ведется на частоте 2–5 МГц эхо- и зеркально-теневым методами. Для ответственных изделий предусматривается прозвучивание в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях.

УЗК целесообразно направлять перпендикулярно волокнам металла. Это обусловлено, что дефекты в поковках и штамповках, как правило, ориентированы в плоскости параллельной волокнам, которая в свою очередь перпендикулярна направлению обработки изделия. Для некоторых типов штамповок (лопаток турбин и компрессоров, камер сгорания турбин) успешно используют волны Рэлея и Лэмба.

Контроль проката и проволоки

Листы и плиты толщиной 6–60 мм контролируют теневым, эхо-, эхо-сквозным методом и зеркально-теневым методами на частотах 2–3 МГц. Листы толще 60 мм контролируют эхо- или эхо-сквозным методом. Листы толщиной 6 мм и меньше, а также проволоки лучше контролировать теневым методом с использованием волн Лэмба.

Для контроля листов и заготовок при температуре 900–1000 °С применяют ЭМА метод ввода и приема УЗ колебаний или помещают преобразователи в канал, расположенный в валках прокатного стана. Акустический контакт при этом осуществляется за счет сильного прижатия валка к металлу. Но чаще всего при контроле листового проката применяется иммерсионный способ ввода УЗК.

Прутки и заготовки

Прутки и заготовки круглого и прямоугольного сечений контролируют эхо-методом с использованием прямых преобразователей (иногда используют наклонные).

Если требуется контролировать только центральную часть прутка, то используют 3 преобразователя, расположенных вокруг прутка с углом между осями 60° . Пруток перемещают только поступательно.

Трубы

Бесшовные металлические трубы контролируют эхо-методом по ГОСТ 17410–78 с помощью иммерсионных установок с локальными волнами, однако допускается и ручной контроль контактным способом.

Тонкостенные трубы ответственного назначения контролируют в двух направлениях навстречу друг другу с целью более надежного выявления разноориентированных дефектов.

Для проверки всего металла трубы необходимо обеспечить взаимное перемещение преобразователя и трубы по винтовой линии. Предпочтительной является система с поступательным движением трубы и вращательным движением преобразователя.

Проволока

Для контроля проволоки используют волны стержневого типа. Проволока перематывается между двумя катушками, проходит через иммерсионную ванну, в которой проверяется теневым или эхо-методом с производительностью 0,5–1 м/с.

Прокат сложного профиля

Из проката сложного профиля выделяют рельсы, в связи с очень высокими требованиями, предъявляемыми к ним. В соответствии с ГОСТ 18576–85 их контролируют зеркально-теневым и эхо-методами. УЗК вводят со стороны поверхности катания рельса. Наиболее распространенные дефекты в шейке рельса и в местах ее перехода в головку и подошву – вертикальные и горизонтальные трещины и расслоения. Их выявляют зеркально-теневым методом с помощью прямого преобразователя по первому и второму донным импульсам или по их отношению.

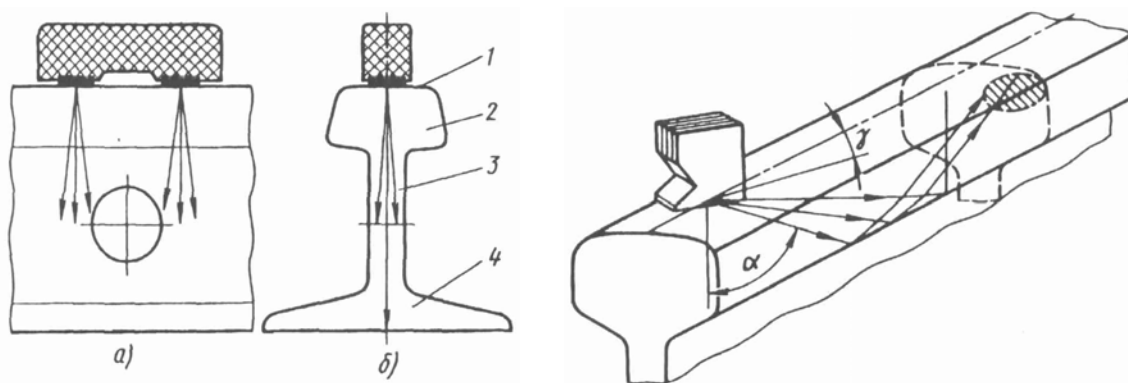


Рис. 4.1. Схема контроля рельс

Контроль основного металла головки рельса осуществляется наклонным преобразователем с углом ввода $\sim 60^\circ$. Для выявления поперечных трещин, обычно расположенных в боковой части головки, преобразователь поворачивают относительно боковой оси рельса на угол $30\text{--}37^\circ$. При этом дефекты обнаруживают лучом, отраженным от нижней поверхности головки рельса. Полный контроль рельсов зеркально-теневым и эхо-методами производят приборами УЗД-НИИМ-6 (рис. 4.1).

§ 4.2. Контроль сварных соединений

Ультразвуковой контроль сварных соединений проводят, как правило, эхо-методом с включением наклонного преобразователя по совмещенной схеме. Значительно реже применяют теневой и зеркально-теневой с отдельным и отдельно-совмещенным включением преобразователей соответственно и эхо-зеркальный методы. Угол ввода колебаний выбирают таким, чтобы расстояние от преобразователя до шва было как можно меньшим, а направление луча – возможно близким к нормали по отношению к сечению, в котором площадь ожидаемых дефектов максимальна. Контроль ведут прямым и однократно отраженным лучами. Двукратно и многократно отраженным лучом контролируют в случае, когда размеры усиления шва не позволяют прозвучивать его прямым или однократно отраженным лучом при оптимальном угле ввода луча.

Каждое соединение следует проверить так, чтобы лучи входили в наплавленный металл по четырем направлениям, т. е. шли с двух сторон и от двух поверхностей соединения. Отступление от этого правила допускается в связи с особенностями конструкции соединения.

Наплавленный металл прозвучивают поперечно-продольным или продольно-поперечным (рис. 4.2, а и б) сканированием. Последний способ

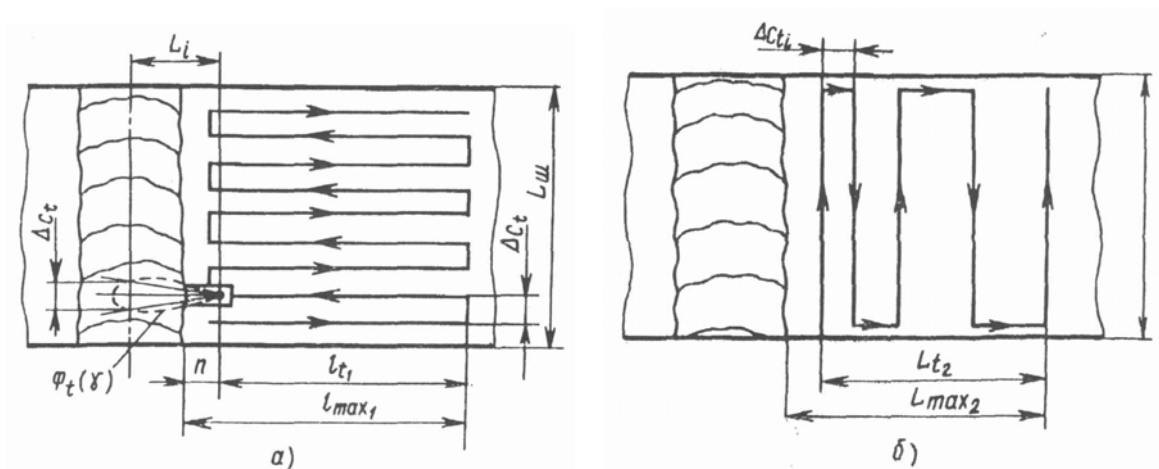


Рис. 4.2. Схемы сканирования шва

особенно эффективен на этапе поиска дефектов в сварных соединениях большой толщины, так как позволяет увеличить шаг сканирования (за счет расхождения лучей в диаграмме направленности) при контроле более глубоких слоев металла.

Для повышения надежности контроля в процессе сканирования, преобразователь непрерывно вращают на угол (ρ от нормали к оси сварного соединения).

Рекомендуемые параметры контроля наиболее распространенных соединений приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Рекомендуемые параметры контроля сварных швов из углеродистых сталей различной толщины

Толщина шва, мм	Частота, МГц	Размер пьезопластины, мм	Угол наклона Плексигласовой призмы β	Уровень фиксации (по эквивалентной площади), мм ²
3–10	5	4–6	50–55	1–2
10–50	2,5	12–15	40–50	2–7
50–200	1,5–2	15–20	30–40	7–15
200–2000	0,1–1,5	30–50	0–30	15–80

При контроле сварных соединений возникают определенные трудности – ложные отражения от элементов конфигурации швов (валиков усиления, провисаний наплавленного металла в корне шва, катетов, конструктивных непроваров). Для отстройки от ложных отражений необходимо точно измерить координаты объекта, выбрать направление распространения УЗК, дающее максимальное отношение сигнал–помеха. В некоторых случаях вследствие больших ложных сигналов от конструктивного непровара контроль оказывается неэффективным.

При контроле сварных швов толщиной менее 10 мм валик усиления мешает преобразователю приблизиться к шву для обеспечения проверки прямым лучом. С целью устранения перечисленных трудностей применяют большие углы преобразователей, высокую рабочую частоту, уменьшают размеры преобразователя за счет уменьшения его пьезопластины (см. табл. 4.1).

При контроле сварных швов толщиной 200 мм и более чувствительность дефектоскопа иногда оказывается недостаточной. Применяют преобразователи с малыми углами наклона, пониженными частотами, пьезопластины большого размера (см. табл. 4.1), контроль только прямым лучом.

При контроле сварных соединений из аустенитных сталей, особенно при малом содержании ферритной фазы и толщине более 10 мм, наблюда-

ется высокий уровень структурных помех. Для отстройки применяют наклонные преобразователи, излучающие и принимающие продольные волны с призмами, с углами наклона меньше первого критического ($18\text{--}24^\circ$ в плексиглазе), раздельно-совмещенные наклонные преобразователи с углом схождения 15° и более, наклонные фокусирующие преобразователи, а также используют двухчастотный способ контроля. Эхо-сигнал считают отражением от дефекта только в том случае, если он возникает при контроле на двух частотах, отличающихся в 1,5 раза (например, 1,8 и 2,7 МГц).

При контроле сварных соединений с узкой разделкой кромок, в частности, после электронно-лучевой сварки, дефекты располагаются строго вертикально и не дают рассеянного сигнала в сторону излучающего преобразователя. Рекомендуется применять контроль по схеме тандем.

Стыковые сварные соединения контролируют эхо-методом преобразователем, включенным по совмещенной схеме.

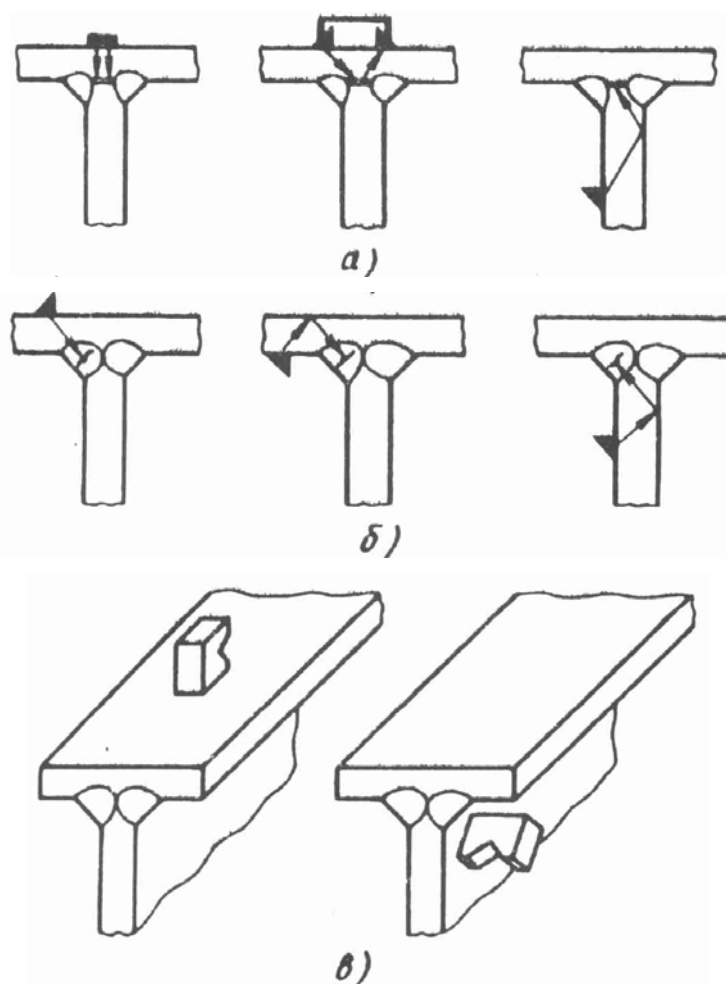


Рис. 4.3. Схемы контроля тавровых сварных соединений при выявлении дефектов: а – непровара в корне шва; б – продольных трещин, пор и шлака; в – поперечных трещин

Чувствительность настраивают по образцам с моделями дефектов (цилиндрический, угловой или сегментный отражатели); но этим же моделям проверяют точность работы глубиномера.

Соединения большой толщины (более 100–200 мм) проверяют по слоям, используя в ряде случаев последовательно несколько преобразователей с различными углами ввода луча. Чувствительность настраивают по стандартным образцам с применением АРД-диаграмм (или без них).

Тавровые соединения с полным проваром корня контролируют по схемам, приведенным на рис. 4.3. Предпочтительной является схема, приведенная на рис. 4.15, б.

Соединения, в которых допускается непровар определенной ширины b ($b < 3$ мм) в корне шва, контролируют со стороны полки (рис. 4.4). При этом для определения ширины непровара b сравнивают амплитуды эхо-сигналов от непровара и его моделей, выполненных в образце, или экспериментально снятую зависимость амплитуд эхо-сигналов от ширины непровара.

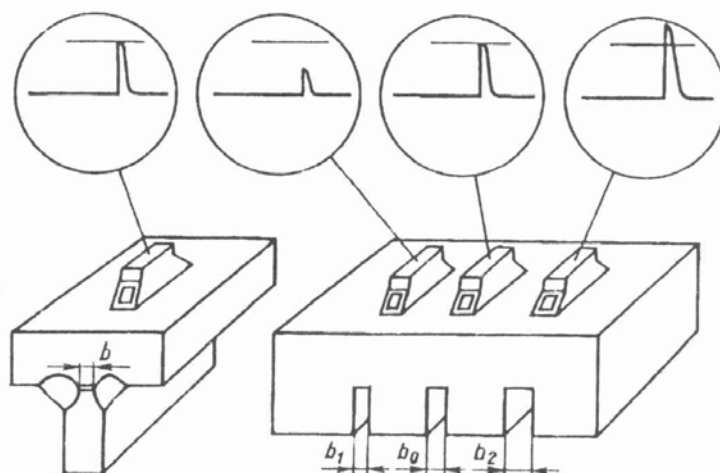


Рис. 4.4. Схема определения ширины непроваров в корне шва

Швы **нахлесточных сварных соединений** прозвучивают со стороны основного листа однократно отраженным лучом с помощью преобразователя, включенного по совмещенной схеме (рис. 4.5).

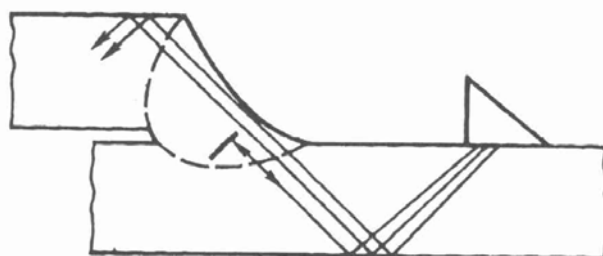


Рис. 4.5. Схема выявления трещин, пор, шлаковых включений и непровара по вертикальной кромке в нахлесточном соединении

Швы **контактной сварки** контролируют эхо-методом. Для более надежного выявления дефектов швы, выполненные сваркой оплавлением, прозвучивают по схеме тандем, поскольку дефекты в них расположены строго вертикально. Практически не отражают УЗК и не выявляются дефекты типа слипания (слабоокисленные непровары). Эти дефекты удается обнаружить при наличии сопровождающих их других дефектов (например, сильноокисленных непроваров). Эхо-метод с одним преобразователем применяют для контроля контактной сварки рельсов.

Сварные точки контролируют зеркально-теневым методом (рис. 4.6). Признаком отсутствия сварки является приход донного сигнала от первого листа к приемному преобразователю. Перемещая преобразователь по поверхности изделия, определяют размеры сварной точки. Недостатком данного способа является невозможность отличить наличие литого ядра (важнейший признак хорошей сварки) от слипания.

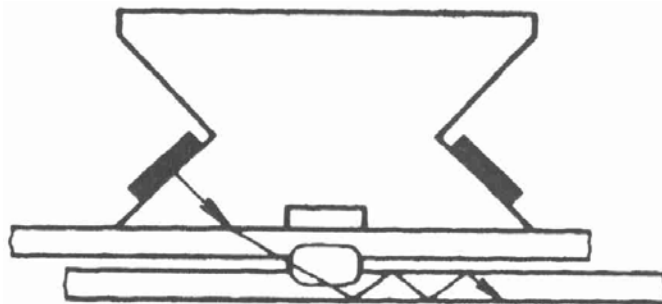


Рис. 4.6. Схема контроля сварных точек зеркально-теневым методом

Этим недостатком не обладают способы контроля в процессе сварки. Один из способов следующий: в верхний лист вводится нормальная волна, которая испытывает отражение от расплавленного ядра в момент его образования. По интервалу времени от момента появления эхо-сигнала, сообщающего о начале формирования ядра, до момента выключения сварочного тока можно оценить размеры ядра. Согласно другому способу излучающий и приемный преобразователи встроены в электроды сварочной машины. Контроль ведут теневым методом. В момент сжатия электродами свариваемых листов через зону сварки проходят УЗК. В момент образования расплавленного ядра сигнал уменьшается, а после его застывания вновь возрастает. В этом случае особенно эффективно применение поперечных волн, прохождение которых полностью экранируется расплавленным ядром.

Контроль сварных соединений в абсолютном большинстве случаев осуществляют при сканировании преобразователем вручную (ручной контроль). При ручном контроле вследствие нарушения заданных параметров сканирования могут быть пропущены дефекты с малыми

условными размерами. Для повышения вероятности обнаружения малых дефектов применяют приспособления для соблюдения параметров ручного сканирования и устройства механизированного и автоматизированного контроля.

Автоматический контроль целесообразен для протяженных сварных швов, так как для швов малой протяженности затраты на подготовку, установку и настройку аппаратуры неоправданно велики. Тонкие швы (до 5–6 мм) контролируют одним, а более толстые швы (20–40 мм) – несколькими преобразователями, захватывающими всю толщину шва, так что поперечное сканирование не требуется. Более толстые швы автоматически контролируют с продольно-поперечным сканированием.

Промышленных установок для контроля швов в процессе сварки пока не разработано за исключением случая контактной точечной сварки.

§ 4.3. Ультразвуковая толщинометрия

Терминология

Измерение – нахождение значения толщины с помощью специальных технических средств.

Результат измерения – значение величины, найденное путем ее измерения.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Грубая погрешность измерения – погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях измерения.

Доверительные границы случайного отклонения результата измерения – верхняя и нижняя границы интервала, накрывающего с заданной вероятностью случайное отклонение результата измерения.

Доверительная вероятность – вероятность, с которой погрешность измерения не выходит за доверительные границы.

Истинное значение измеряемой величины – значение, идеально соответствующее толщине объекта в данной точке.

Действительное значение толщины – значение толщины, определенное техническими средствами и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Независимое измерение – измерение, выполняемое при отсутствии информации о предыдущих измерениях или измерение толщины, выполняемое после расстройки, а затем – повторной настройки толщиномера.

Номинальная толщина – толщина, относительно которой определяются предельные толщины и которая служит началом отсчета отклонений.

Отклонение верхнее – разность между максимальным допусκαемым значением толщины и номинальной толщиной (указывается со знаком «+»).

Отклонение нижнее – разность между минимальным допусκαемым значением толщины и номинальным значением (указывается со знаком «-»).

Поле допуска – разность между максимальным и минимальным допусκαемыми значениями толщины.

Приемочные границы – интервал результатов измерений, в пределах которого объект признается годным по измеряемой величине.

Условия применимости УЗ толщинометрии

Как правило, УЗ метод измерения толщины применяют в местах, недоступных или труднодоступных для измерения толщины механическим измерительным инструментом. Особенно широко этот метод используют для определения толщины стенок труб, котлов, сосудов, то есть объектов замкнутого типа или с односторонним доступом. Обычно измерения производят на эквидистантных (равноудаленных друг от друга) поверхностях или участках поверхности, хотя принципиально возможны измерения и в других случаях.

Необходимость и возможность проведения измерений должна быть согласована между заказчиком и специалистами по УЗ контролю с целью:

- оценки технической возможности измерения толщины с заданной погрешностью;
- проведения своевременной подготовки производства (разработка методики измерения толщины, изготовление образцов, приспособлений и т. п.)

Погрешность измерений обычно определяют при доверительной вероятности $P=0,95$. При необходимости она может быть оценена при более высоком значении доверительной вероятности.

В соответствии с принятыми в метрологии правилами оценка годности объекта по фактическим показаниям прибора (без учета погрешности) производится, если выполняется одно из следующих условий:

1. Погрешность измерений не превышает 35 % от половины поля допуска на контролируемый размер. При одностороннем допусковом контроле (отдельно по верхнему или по нижнему отклонению) погрешность измерения не превышает 35 % соответствующего предельного отклонения;

В конструкторской документации указаны предельные значения измеряемой величины и погрешность измерения;

2. Погрешность измерения превышает значения, указанные в п.1, и нет возможности применить более точное средство измерения, назначены сокращенные приемочные границы, смещение Δ которых определено по правилу:

$$\Delta = |\delta| - 0,35(\Delta_n + \Delta_s) / 2, \quad (4.1)$$

где δ – погрешность измерения;

Δ_n, Δ_s – нижнее и верхнее отклонения от номинального размера.

Если условия 1–3 не выполняются, а также в тех случаях, когда конструкторская документация предусматривает факультативное измерение толщины УЗ методом, оценка годности объекта не производится.

Как правило, ручные измерения толщины производятся дискретно в отдельных точках. В настоящее время могут быть разработаны методики непрерывного контроля толщины с целью выявления участков, выходящих за пределы приемочных границ.

Документация, содержащая требование измерения толщины должна включать в себя схему разметки объекта на точки, в которых необходимо производить измерения. Схема разметки должна иметь привязку начала отсчета.

Средства ультразвуковой толщинометрии

Для измерения толщины следует применять следующую аппаратуру:

- 1) эхо-импульсные УЗ толщиномеры с цифровой индикацией результата измерения;
 - 2) УЗ дефектоскопы второй и выше групп по ГОСТ 23 049. Дефектоскопы с блоком цифрового отсчета (БЦО) применяют в диапазоне действия этого блока, а без БЦО – в диапазоне действия задержки развертки;
 - 3) импортные дефектоскопы и толщиномеры, если они имеют технические параметры, аналогичные указанным выше приборам.
- Современные УЗ толщиномеры и дефектоскопы позволяют:
- измерять толщину стенки стальных объектов в диапазоне от 0,15 мм до нескольких метров;
 - измерять скорость УЗ волн в материале;
 - запоминать результаты измерений с последующей их распечаткой или выводом на персональную ЭВМ;
 - производить допусковый контроль (прибор сигнализирует о выходе за установленные пределы);

- производить измерения на поверхностях с кривизной $R > 3$ мм;
- автоматизировать операции настройки;
- на малых толщинах (менее 10 мм) получать погрешность измерения менее 0,1 мм;
- работать на свежезаряженном комплекте батарей до 300 часов.

Основные технические параметры современных УЗ толщиномеров приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные технические данные УЗ толщиномеров

Тип толщиномера, страна, фирма изготовитель	Диапазон измерений (по стали), мм	Точность индикации, мм	Тип индикатора	Габариты, мм/мм/мм/
УТ-93П, Молдова	0,8–300	0,1	ЖК 2)	40/85/160
T-GAGE, Англия, Sonatest	0,56–199,9	0,02	ЖК	32/62/127
Echometer-70, Германия, Karl Deutsch	0,7–250	0,01 или 0,11)	ЖК	35/80/130
DM2, Германия, Krautkramer	1,2–300	0,1	СД	33/65/150
DM3, Германия, Krautkramer	0,6–300	0,1	ЖК	33/65/115
CL304, Германия, Krautkramer	0,13–380	0,003 или 0,03	ЖК	63/190/29
DME, Германия, Krautkramer	0,75–300	0,1	ЖК	42/72/165
АТ-100, Россия, АО «НПО Альянс»	1,0–600	0,01 или 0,1	СД или ЖК	40/65/170

Примечания:

1. Меньшее значение относится к диапазону до 9,99 мм.
2. ЖК – жидкокристаллический; СД – светодиодный.
3. Вес толщиномера CL304 – 1,8 кг, остальных – не более 0,4 кг.

Для измерения толщины следует применять прямые и РС ПЭП с жестким протектором, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем шумов в диапазоне частот 2,0–10,0 МГц. Для особо точных измерений толщины металла (при толщинах менее 10 мм) могут применяться высокодемпфированные ПЭП с частотой до 20 МГц. Диаметры ПЭП от 5 до 25 мм.

Для измерения толщины следует применять прямые и РС ПЭП с жестким протектором, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем шумов в диапазоне частот 2,0–10,0 МГц. Для особо точных измерений толщины металла (при толщинах менее 10 мм) могут применяться высокодемпфированные ПЭП с частотой до 20 МГц. Диаметры ПЭП от 5 до 25 мм.

Для настройки толщиномеров используют стандартные образцы предприятия (СОП), изготовленные из материалов измеряемого объекта, имеющие толщину, равную номинальной или минимальной толщине объекта, кривизну и шероховатость поверхности, соответствующие тем же характеристикам объекта. При измерении толщины труб и гибов с наружным диаметром менее 100 мм, целесообразно выполнять СОП в виде фрагментов этих изделий.

Если измеряется толщина биметалла, то СОП также должен быть изготовлен из биметалла.

Толщина металла образца на точках, по которым производится настройка, должна быть измерена с погрешностью не более +0,01 мм.

Подготовка к измерению толщины

Объект контроля должен быть размечен, точки измерения пронумерованы в соответствии со схемой, указанной в чертежно-технической документации. Разметку следует выполнять так, чтобы она не мешала измерению и не стиралась при осуществлении процесса измерения. Например, разметка может быть сделана с помощью маркировочного фломастера.

Для измерения толщины основного металла подготавливается площадка 30x30 мм с центром в точке измерения. Для измерения толщины антикоррозионной наплавки готовят площадку 50x50 мм. Подготовленная площадка должна быть свободна от загрязнений, отслаивающейся окалины и краски. Шероховатость поверхности изделия со стороны ввода УЗ колебаний должна быть не более $R_a=6,3$ мкм по ГОСТ 2789.

Допускается проводить измерения по поверхности, покрытой плотной пленкой окиси или тонким ровным слоем краски. Возможность выполнения толщинометрии и точностные характеристики измерения в этих условиях должны быть предварительно установлены экспериментально проверкой специалистами по контролю. В некоторых случаях выполняется контроль по поверхности без предварительной обработки, однако точностные характеристики при этом ухудшаются.

Допускается выполнять измерения сосудов и трубопроводов, наполненных водой или другой жидкостью.

При измерении толщины на участках зачистки поверхностных дефектов в месте максимальной глубины выборки для установления ПЭП

должна быть подготовлена плоская площадка $\Phi 15$ мм, параллельная поверхности изделия. В некоторых случаях измерение может быть выполнено со стороны, противоположной выборке.

Если выборка имеет крутой профиль и обеспечить плоскую площадку для установки ПЭП не представляется возможным, следует измерить толщину в точках вокруг выборки. Глубину выборки измеряют микрометрическим либо индикаторным глубиномером. Толщину изделия в месте выборки находят как разницу между минимальной его толщиной в окрестности выборки по данным измерений УЗ методом и максимальной глубиной выборки по результатам измерения глубиномером. Погрешность этого измерения принимается равной погрешности измерения УЗ прибором.

Настройку толщиномеров и глубиномеров дефектоскопов выполняют с учетом рекомендаций и инструкции по эксплуатации конкретного типа прибора. Для настройки глубиномера дефектоскопа иногда могут быть составлены более рациональные методики, чем это указано в инструкции по эксплуатации (это относится, например, к дефектоскопу УД2–12). Настройку выполняют с использованием СОП. Если возможно, целесообразно настроенный прибор проверить хотя бы в одной точке по кромке контролируемого объекта.

Проведение измерений

На каждом из заранее намеченных участков выполняют однократное измерение толщины. Если произошла грубая ошибка, то есть погрешность измерения существенно превысила ожидаемую в данных условиях, то этот результат отбрасывают и выполняют три измерения взамен ошибочного. За результат измерения принимают среднеарифметическое значение.

При измерении толщины труб раздельно-совмещенным преобразователем акустический экран должен быть ориентирован перпендикулярно образующей трубы.

При измерении УЗ дефектоскопами следует обеспечить равенство амплитуд измеряемых импульсов и идентичность считывания результатов измерений.

Измерения толщины антикоррозионных покрытий выполняют УЗ дефектоскопами. При измерении со стороны основного материала используют прямые совмещенные ПЭП с частотой 2–6 МГц с жестким протектором. Для измерения антикоррозионных покрытий номинальной толщиной от 2 до 8 мм со стороны покрытия применяют РС ПЭП с частотой 4–6 МГц, имеющие фокусное расстояние от 4 до 10 мм и максимальный размер контактной поверхности 16 мм, а покрытий номинальной толщиной более 8 мм – РС ПЭП с частотой 4–5 МГц, имеющие фокусное расстояние от 20 до 30 мм и максимальный размер контактной поверхности 30 мм.

На площадке, выделенной для измерения толщины, выбирают такое положение ПЭП, при котором эхо-импульс от границы раздела двух металлических сред имеет наиболее гладкую форму и крутой передний фронт.

Заведомо недостоверные показания, эхо-импульсы, от дефектов вблизи зоны сплавления, границ отдельных слоев или проходов, структурные шумы из наплавки не учитывают.

При измерении со стороны основного металла толщина покрытия определяется как разность положений эхо-импульсов от дна и зоны сплавления.

Некоторые особенности имеет измерение остаточной толщины в местах коррозионных повреждений. Перед измерением целесообразно получить сведения о характере ожидаемых коррозионных повреждений внутренней поверхности (например, визуальным осмотром, с помощью оптических приборов, в частности с использованием приборов на основе волоконной оптики или радиографическим контролем) и, по возможности, произвести зачистку поверхности, подвергнутой коррозии. При измерении остаточной толщины изделий в местах пятнистой или язвенной коррозии внутренней поверхности в заранее намеченных местах должны быть выполнены измерения с шагом не более 3 мм. За результат измерения принимают минимальное показание прибора. При измерении остаточной толщины изделий толщиной до 20 мм со стороны, противоположной подвергнутой коррозии, прибор не фиксирует изменения толщины, связанные с наличием одиночных язв сферической формы диаметром до 2,5 мм.

При отсутствии сведений о характере коррозионных повреждений изделия они могут быть ориентировочно получены при установке ПЭП в заранее намеченном месте изделия на основе следующих рекомендаций:

- прибор стабильно показывает значение толщины, равное номинальной толщине изделия или близкое к нему – изделие коррозионным повреждениям не подвергнуто;
- прибор стабильно показывает значение толщины меньше номинальной толщины изделия – объект подвергнут равномерной коррозии;
- прибор показывает номинальное значение толщины, а при дальнейшей перестановке ПЭП на ограниченном участке – нулевое (или нестабильное) значение и значение меньше номинального – изделие подвергнуто язвенной коррозии (нулевое и нестабильное показания соответствуют установке ПЭП над скосом язвы).

Если результат измерения существенно отличается от ожидаемого и не связан с грубой ошибкой измерения, целесообразно эти участки проконтролировать дефектоскопом, так как причиной уменьшения показания толщины может быть нарушение сплошности металла. Применение дефектоскопа может быть полезным и в других случаях, когда возникает неопределенность в оценке показаний толщиномера.

Контроль с целью определения минимального значения проводят дефектоскопом путем непрерывного сканирования. Крайнее левое положение эхо-импульса фиксируется фронтом строба АСД.

Считывание результата измерения производится после получения устойчивого и достоверного показания. Для цифровых приборов оно характеризуется либо одним значением, либо двумя, изменяющимися в пределах дискретности прибора. В последнем случае записывают более неблагоприятное значение.

Проверка настройки прибора по СОП производится периодически, а также после окончания измерений.

При оформлении протокола (заключения) результат измерения должен быть представлен в виде

$$x, \Delta \text{ от } \Delta_{\text{н}} \text{ до } \Delta_{\text{в}}; P,$$

где x , мм – результат измерения;

$\Delta_{\text{н}}$, $\Delta_{\text{в}}$, мм – нижний и верхний пределы погрешности измерений;

P – вероятность, с которой погрешность измерения находится в этих границах.

Пример: 3,80 мм +0,20 мм, $P=0,972$.

Наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численного показателя точности должны быть одинаковы.

Некоторые сведения об ошибках измерений

При выполнении любых измерений следует помнить, что никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Различают три вида ошибок:

Систематическими называют ошибки, величина которых одинакова во всех измерениях, проводимых одним и тем же методом с помощью одних и тех же измерительных приборов.

Рассмотрим подробнее причины возникновения систематических ошибок.

Окончательную настройку УЗ толщиномера производят по контрольной точке, замер в которой выполнен мерительным инструментом. Очевидно, что ошибка измерения при такой настройке не может быть меньше той, которая определяется погрешностью мерительного инструмента. Предположим, что при измерении толщины мерительным инструментом вместо истинного значения 72,21 мм получено значение 72,33 мм. Систематическая ошибка в этом случае составляет 0,12 мм. Много это или мало?

Прежде всего следует отметить, что чем точнее мы хотим измерить, тем труднее это сделать. Поэтому не следует требовать от измерения большей точности, чем это необходимо для решения поставленной

задачи. Однако, если мы производим измерение толщины толщиномером с приборной погрешностью $\pm 0,1$ мм, а учет только одной систематической ошибки дает большее значение, то становится очевидным, что этот результат может удовлетворить нас в довольно редких случаях. Поэтому измерение толщины в контрольной точке мерительным инструментом должно выполняться особенно тщательно.

Существует и другая группа систематических ошибок, природа которых известна и величина может быть определена достаточно точно. Такие ошибки могут быть устранены путем введения поправок. Примером является измерение толщины изделия из материала со скоростью звука C_1 , если настройка толщиномера производилась по СОП со скоростью звука $C_0=C_1$.

Пример. Контролируют изделие с действительной скоростью звука $C_d=5850$ м/с. Номинальная толщина изделия составляет 140 мм. Настройка толщиномера выполнена по СОП со скоростью $C_0=5920$ м/с. Определим погрешность измерения, связанную с систематической ошибкой настройки.

Решение. Действительное значение толщины изделия

$$H_d = C_d \cdot t_d. \quad (4.2)$$

Показание толщиномера

$$H_0 = C_0 \cdot t_d. \quad (4.3)$$

Здесь t_d – действительное время прохождения ультразвуком толщины изделия (туда и обратно).

Из вышеприведенных уравнений определим действительную толщину:

$$H_d = \frac{C_d}{C_0} \cdot H_0 = kH_0, \quad (4.4)$$

где k – поправочный коэффициент. Погрешность измерения, связанная с систематической ошибкой настройки

$$\Delta H = H_0 - H_d. \quad (4.5)$$

Для нашего примера $H_0=141,7$ мм, $\Delta H=1,7$ мм.

Случайными называют ошибки, действие которых неодинаково в каждом измерении и не может быть учтено.

Величина случайных ошибок различна даже для измерений, выполненных одинаковым образом. Случайные ошибки при измерении толщины возникают из-за:

- колебания параметров толщиномера (дефектоскопа) и преобразователей в допустимых пределах;

- неточной установки нуля глубиномера;
- смещения ПЭП при повторных его установках в точку измерения;
- колебания толщины прослойки контактной жидкости вследствие неравномерного прижима ПЭП к изделию;
- неточного считывания результата измерения с экрана дефектоскопа;
- других факторов.

В теории измерений показано, что влияние случайной ошибки на результат измерения уменьшается с увеличением числа измерений. В практике для получения удовлетворительного значения ошибки при наименьших трудозатратах достаточно выполнить в контролируемой точке 5 (реже 7) измерений.

Грубыми называют ошибки (промахи), приводящие к результату, существенно отличающемуся от ожидаемого в данных условиях. Источником таких ошибок является недостаток внимания оператора. Для исключения промахов нужно соблюдать аккуратность и тщательность в работе и записи результатов. Иногда можно выявить промах, повторив измерение в несколько иных условиях (например, настроить прибор на другую цену деления). Следует иметь в виду, что многократное измерение подряд одной и той же величины не всегда дает возможность установить промах. Для надежного выявления промаха нужно либо повторить измерение спустя некоторое время, когда оператор уже забыл полученные им цифры, либо произвести повторное измерение, начиная с настройки прибора, другим дефектоскопистом, который не знает результатов, полученных первым.

Методика определения погрешности измерений толщины

За наиболее вероятное значение измеряемой величины обычно принимают ее среднее арифметическое значение, вычисленное из всего ряда измеренных значений:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.6)$$

где x_i – результат i -го измерения толщины; n – число измерений.

Для оценки величины случайной ошибки измерения пользуются средней квадратической ошибкой, которой называется величина

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}. \quad (4.7)$$

Обозначим действительное значение измеряемой величины через x . Погрешность измерения этой величины Δx . Пусть α означает вероят-

ность того, что результат измерения отличается от действительного значения на величину, меньшую, чем Δx . Это принято записывать в виде

$$P(\bar{x} - \Delta < x < x + \Delta) = \alpha. \quad (4.8)$$

Эта вероятность носит название доверительной вероятности или коэффициента надежности. Интервал значений от $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$ называется доверительным интервалом.

Написанное выражение означает, что с вероятностью, равной α , результат измерения не выходит за пределы доверительного интервала от $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$. Разумеется, чем большей надежности мы требуем, тем большим получается соответствующий интервал. Доверительные вероятности для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратической ошибки сведены в табл. 4.3

$$\varepsilon = \Delta x / \sigma. \quad (4.9)$$

Таблица 4.3

Доверительные вероятности для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратической ошибки

ε	1,0	1,5	2,2	2,4	2,5	2,6
α	0,683	0,866	0,972	0,984	0,988	0,990

Приведем пример пользования таблицей. Определим, какой доверительный интервал нужно выбрать, чтобы примерно 98 % результатов попали в него, если $x=1,27$, $\sigma=0,032$. Из таблицы находим, что значению $\alpha=0,98$ соответствует значение $\varepsilon=2,4$, следовательно, $\sigma \cdot \varepsilon = 0,032 \times 2,4 = 0,077$, и указанной доверительной вероятности соответствует интервал:

$$1,193 < x < 1,347.$$

Округлив, получаем

$$1,19 < x < 1,35.$$

Иногда этот результат записывают в виде: $x=1,27 \pm 0,08$ с доверительной вероятностью 0,98.

В тех случаях, когда систематическая ошибка превышает 1/3 средней квадратической ошибки, ее также необходимо учитывать при определении доверительного интервала. Систематическая составляющая погрешности измерений вычисляется по формуле

$$\Delta c = \frac{\sum_{i=1}^n (x_d - x_i)}{n}, \quad (4.10)$$

где x_d – результат измерения, выполненного мерительным инструментом.

Доверительный интервал в этом случае принимает вид:

$$\bar{x} - \Delta x + \Delta_c < x < \bar{x} + \Delta x + \Delta_c. \quad (4.11)$$

Таким образом, для правильного описания погрешности измерений должны быть указаны доверительный интервал и вероятность, с которой суммарная погрешность не выходит за его пределы.

Возможно определение указанных величин двумя способами. По первому для измерений подготавливают 2–3 образца изделий, действительная толщина x_d которых, определенная с погрешностью, не превышающей 20 % приборной погрешности для данного диапазона, лежит в пределах одного диапазона измерений прибора.

Производят настройку прибора. На подготовленных участках выполняют 50 измерений толщины. По приведенным выше формулам вычисляют систематическую составляющую погрешности Δ_c , среднее квадратическое отклонение σ и доверительный интервал. Последний обычно определяют для доверительной вероятности $P=0,955$.

По второму способу производят настройку прибора. На образце изделия выполняют измерения в 50 точках. После этого изделие разрезают и в тех же точках измеряют действительную толщину x_d .

Дальнейшие вычисления производят по формулам так же, как описано для первого способа.

§ 4.4. Образцы для ультразвукового контроля

Образцом называют средство УЗ контроля в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения значений физических величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых для проверки или настройки параметров дефектоскопа и преобразователей.

Стандартные образцы

К стандартным относят образцы СО-1, СО-2, СО-3, описанные в ГОСТ 14 782, а также образцы К1, К2, VW, СВУ, широко применяемые в европейской международной практике. Стандартный образец СО-1, представленный на рис. 4.7 изготавливается из органического стекла марки ТОСП по ГОСТ 17 622. Коэффициент затухания продольной ультразвуковой волны в образце при частоте $(2,5 \pm 0,2)$ МГц и температуре (20 ± 5) °С составляет $(0,30 \pm 0,04)$ см⁻¹. Скорость продольных волн в образце $C_1 = (2670 \pm 133)$ м/с.

Стандартный образец СО-1 предназначен для:

- определения условной чувствительности в мм глубины залегания цилиндрического отверстия (ПЭП в положении А);

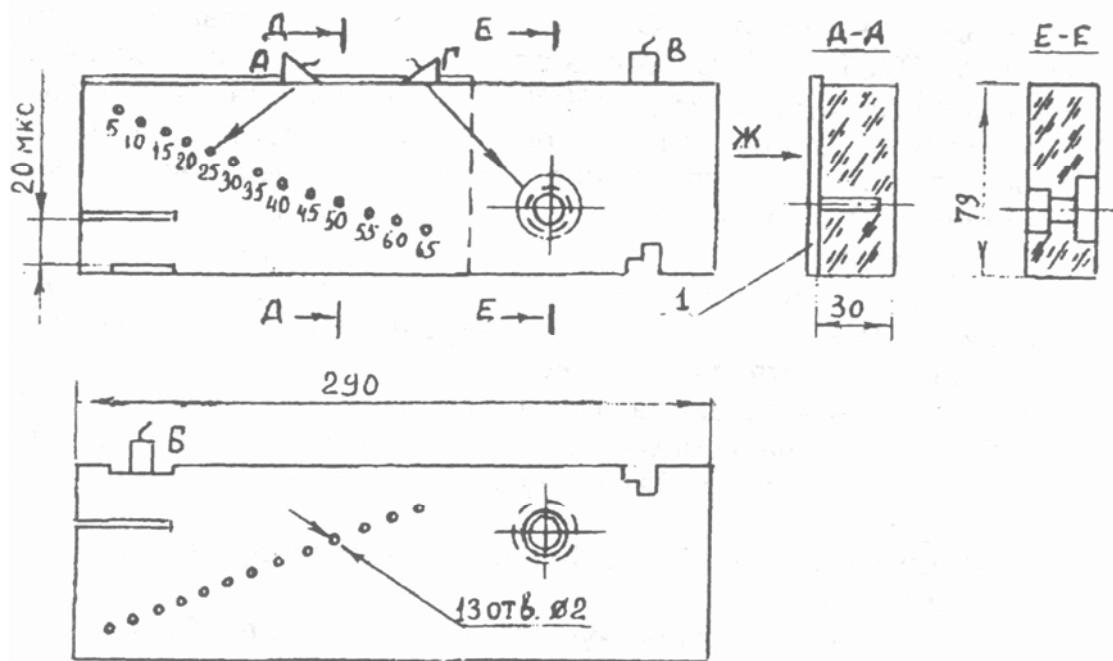


Рис. 4.7. Стандартный образец №1

- оценки точности работы глубиномера (прямой ПЭП в положении Б) для дефектоскопов, у которых глубиномер калиброван в единицах времени. Время прохождения ультразвуком расстояния от поверхности, на которую установлен ПЭП, до пропила составляет 20 мкс;
- оценки лучевой разрешающей способности прямого ПЭП (прямой ПЭП в положении В). При этом, если все три отражателя разрешаются, то на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса – рис. 4.8, расстояние между которыми соответствует по стали: 1–2–5,5 мм; 2–3–11 мм;
- оценки лучевой разрешающей способности наклонного ПЭП (наклонный ПЭП в положении Г). При этом на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса от поверхностей цилиндров, расстояние между которыми (импульсами) соответствует по стали: 1–2–5,5 мм; 2–3–11 мм.

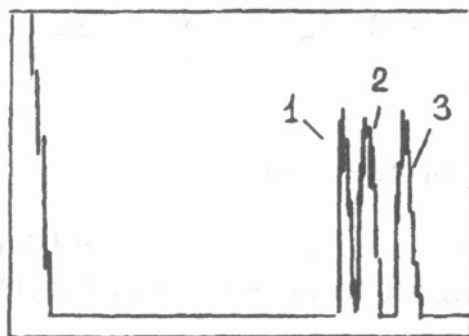


Рис. 4.8. К оценке лучевой разрешающей способности

Стандартный образец СО-2, показанный на рис. 4.9 изготавливают из стали марки 20 по ГОСТ 1050. Скорость продольной волны в образце при температуре $(20 \pm 5)^\circ$ равна $C_l = (5900 \pm 59)$ м/с. Стандартный образец СО-2 используют для настройки и проверки параметров при УЗ контроле объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей и определения условной чувствительности при контроле любых материалов. Его применяют для:

- определения погрешности глубиномера (прямой ПЭП в положении А). Время прохождения ультразвуком расстояния от поверхности до дна составляет 20 мкс;

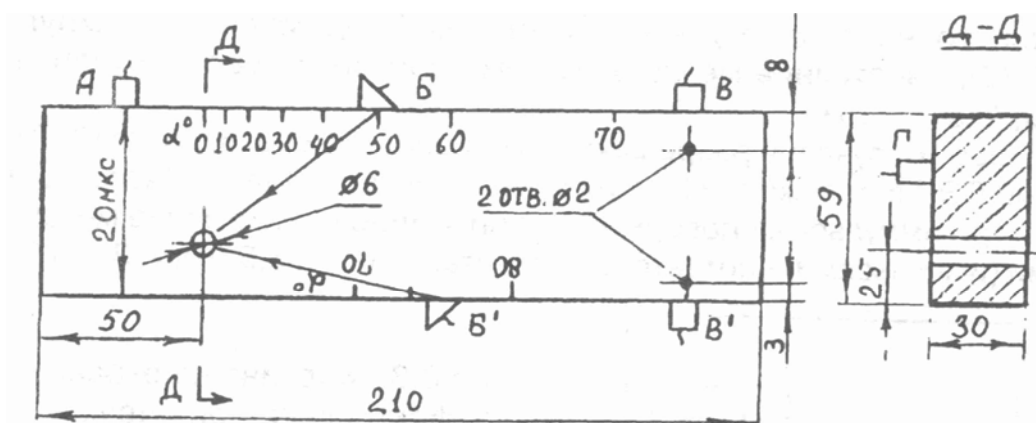


Рис. 4.9. Стандартный образец №2

- измерения угла ввода луча (наклонный ПЭП в положении Б или Б'). Перемещая наклонный ПЭП около этих положений, получают максимальный эхо-сигнал. Величину угла ввода считают по риске напротив точки выхода;
- проверки мертвой зоны дефектоскопа с преобразователем (ПЭП в положении В или В');
- определения условной чувствительности в децибелах (ПЭП в положении Б или Б');
- определения предельной чувствительности (с использованием опорного отражателя Ф6, ПЭП в положении Б или Б');
- определения ширины основного лепестка диаграммы направленности (перемещение наклонного преобразователя около положения Б или Б');
- настройки глубиномера дефектоскопа с прямым ПЭП (ПЭП в положении А или Г);
- настройки чувствительности дефектоскопа с использованием опорного сигнала от отверстия Ф6 (наклонный ПЭП в положении Б или Б').

При контроле соединений из металлов, отличающихся по акустическим характеристикам от малоуглеродистой и низколегированной сталей,

для определения указанных параметров (исключая погрешность глубиномера) должен применяться стандартный образец СО-2А, изготовленный из соответствующего материала. Конструкции образцов СО-2А и СО-2 одинаковы, однако угловые деления и время пробега продольной волной пути 59 мм должны быть определены для данного материала.

Стандартный образец СО-3, представленный на рис. 4.10, изготавливают из стали марки 20 по ГОСТ–14 637. Скорость продольной волны в образце $C_l=(5900\pm 59)$ м/с. Этот образец предназначен для:

- определения точки выхода УЗ луча. Для этого наклонный ПЭП устанавливают над центральной риской, небольшими перемещениями находят положение, соответствующее максимальному эхосигналу. Точка выхода расположена точно над центральной риской образца;
- определения условной чувствительности для наклонного ПЭП;
- определения предельной чувствительности для наклонного ПЭП;
- настройки глубиномера для наклонного ПЭП;
- настройки чувствительности для наклонного ПЭП.

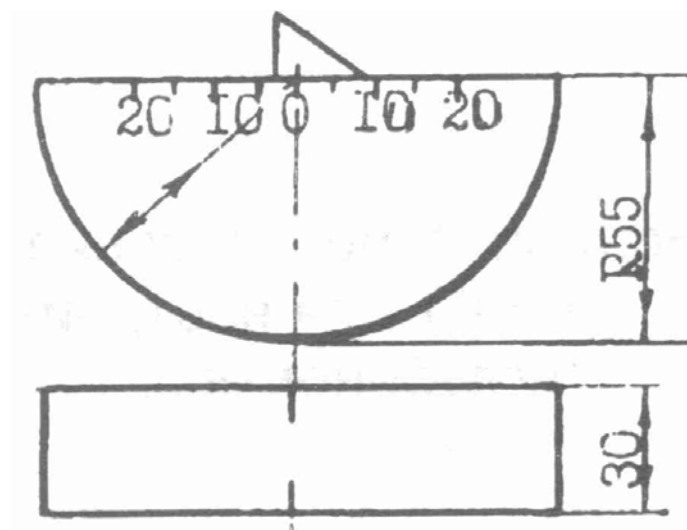


Рис. 4.10. Стандартный образец №3

Все указанные операции выполняют в положении наклонного ПЭП, когда его точка выхода совпадает с центром «О» образца. Три последние операции могут выполняться только для объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей.

Стандартный образец V2, представленный на рис. 4.11, предназначен для:

- настройки глубиномера дефектоскопа при работе с прямыми и наклонными преобразователями;

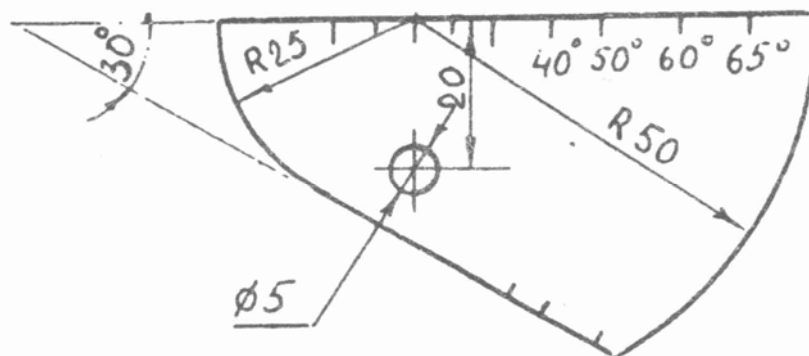


Рис. 4.11. Стандартный образец V2

- определения точки выхода луча для наклонных ПЭП.
- определения угла ввода наклонных ПЭП. В этом положении угол ввода считывают по метке, расположенной под точкой выхода ПЭП;
- настройки чувствительности дефектоскопа при работе с наклонными ПЭП. В качестве опорных используют эхо-сигналы от вогнутых цилиндрических поверхностей R25 или R50 и от отверстия Ф5. Эти же отражатели можно использовать для задания условной или определения предельной чувствительностей.

Стандартные образцы предприятия

Стандартные образцы предприятия (СОП) получили широкое распространение для настройки глубиномера и (или) чувствительности дефектоскопа. СОП воспроизводят акустические свойства материала, конфигурацию, а также форму и шероховатость поверхности контролируемых изделий.

В СОП выполняют искусственные отражатели, расположенные на различных глубинах и имитирующие естественные дефекты изделий. Конкретные типы СОП и области их применения определяются стандартами и другими методическими документами, регламентирующими проведение УЗ контроля.

Общими требованиями, предъявляемыми к СОП являются:

- однотипность акустических свойств (затухания, скорости УЗ колебаний) образца и изделия. Они однотипны по затуханию, если средняя амплитуда донных сигналов в контролируемых изделиях ниже донных сигналов в СОП не более, чем на 2 дБ. Они однотипны по скорости, если скорости отличаются не более, чем на $\pm 3\%$ (к СОП для толщинометрии по скорости предъявляются более жесткие требования);
- отсутствие в материале СОП естественных несплошностей, выявляемых при поисковой чувствительности, заданной для данного материала;
- поверхности ввода звука СОП и изделия должны быть обработаны одинаковым способом и иметь одинаковую шероховатость;

- в СОП, используемых для оценки эквивалентных размеров дефектов, выполняют на каждой глубине ряд отверстий разного размера. При этом площади торцов, ближайших по размеру отверстий должны отличаться не менее, чем в два раза;
- расстояния между отражателями, а также отражателей от боковых стенок должны быть такими, чтобы исключить их взаимное непредусмотренное влияние друг на друга;
- каждый образец должен иметь маркировку с регистрационным номером и паспорт, куда заносятся результаты аттестации и поверок.

Другие требования к СОП (глубины отражателей, допуски на изготовление отражателей и т. д.) задаются конкретной нормативно-технической документацией на контроль.

Метрологическое обеспечение средств ультразвукового контроля

С целью получения достоверных и воспроизводимых результатов средства УЗ контроля должны подвергаться:

- аттестации после изготовления или перед вводом в эксплуатацию. Аттестацию осуществляют предприятия, изготовившие средства контроля (при наличии соответствующих полномочий, выданных органами Госстандарта), или специализированные предприятия Госстандарта. Аттестация проводится по программе, разработанной владельцем средств контроля и согласованной органами Госстандарта;
- периодическим поверкам в процессе эксплуатации. Поверки осуществляют специализированные предприятия Госстандарта или ведомственные метрологические службы, получившие на это разрешение Госстандарта. Объемы и периодичность поверок предписываются инструкциями по эксплуатации средств контроля или методической документацией на проведение контроля.

Сведения об аттестации и периодических поверках заносятся в паспорт на средство контроля, либо оформляются отдельным свидетельством.

Глава 5 УЗ ИНТРОСКОПИЯ

Различают три основных вида изображений: ортографическое, томографическое, голографическое.

- ортографическое – аналогично обычному фото или рентгеновскому снимку и характеризуется тем, что его плоскость нормальна направлению лучей.
- томографическое – обычно соответствует плоскости прозвучивания и представляет собой визуализацию части объема или слоя объекта.
- голографическое – объемное изображение объекта, получаемое в результате визуализации рассеянного звукового слоя.

Ортографические изображения

Ортографические изображения получаются в результате сканирования объекта УЗ лучом с помощью пьезопреобразователя. Используются следующие типы сканирования:

1. А-сканирование – получение информации с помощью неподвижного преобразователя. Соответствующую развертку сигнала на экране ЭЛТ дефектоскопа называют А-разверткой, как показано на рис. 5.1.

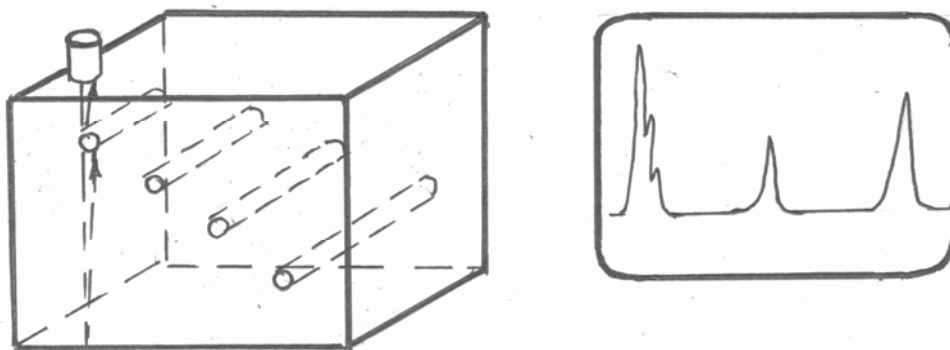


Рис. 5.1. А-развертка

2. В-сканирование – получение информации с помощью преобразователя, перемещающегося по поверхности объекта по одной прямой. При этом информация соответствует слою объекта и состоит из совокупности строк. Для представления такой информации на экране ЭЛТ используется В-развертка. Это развертка типа телевизионной,

в которой строке соответствует определенное положение преобразователя, а амплитуда импульсов отражения изменяет яркость луча в соответствующей точке, как показано на рис. 5.2. Здесь изображение является томографическим, т. к. визуализируется слой.

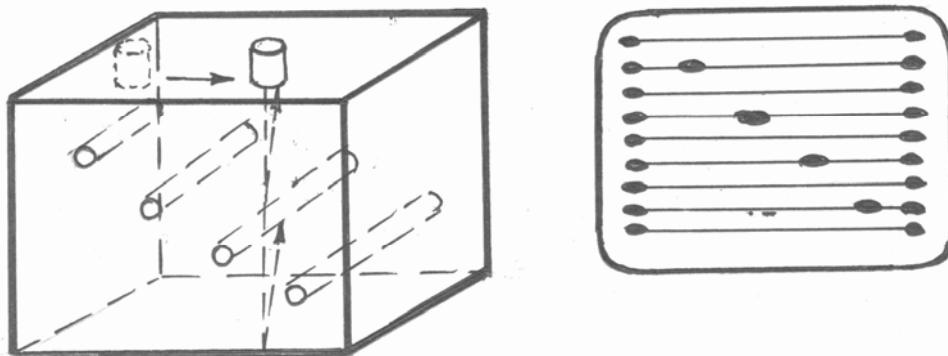


Рис. 5.2. В-скан

3. С-сканирование – получение информации путем перемещения преобразователя по поверхности изделия так, чтобы его след на поверхности образовывал растр. Если на экране ЭЛТ образовать соответствующий телевизионный растр, то это будет С-развертка. Здесь также амплитуда эхо-сигнала модулирует яркость луча, как показано на рис. 5.3.

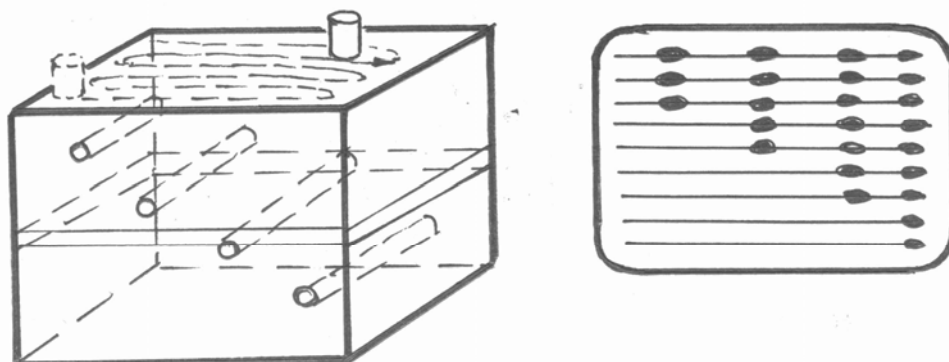


Рис. 5.3. С-скан

Такое изображение является ортографическим. Но можно выбрать информацию, соответствующую определенному временному интервалу относительно зондирующего импульса. Тогда на экране будет получаться изображение слоя изделия, глубина залегания и толщина которого определится положением и шириной временного интервала.

А, В и С сканирования являются линейным сканированиями.

Используются также их комбинации. Обычно используются такие варианты:

4. А+В или А+С. Т. е. на экране ЭЛТ формируются В или С изображения, а в нижней части экрана помещается А-изображение произ-

вольно выбранной строки, что и демонстрирует рис. 5.4. Такая система, кроме наглядности, позволяет производить детальный анализ элементов изображения.

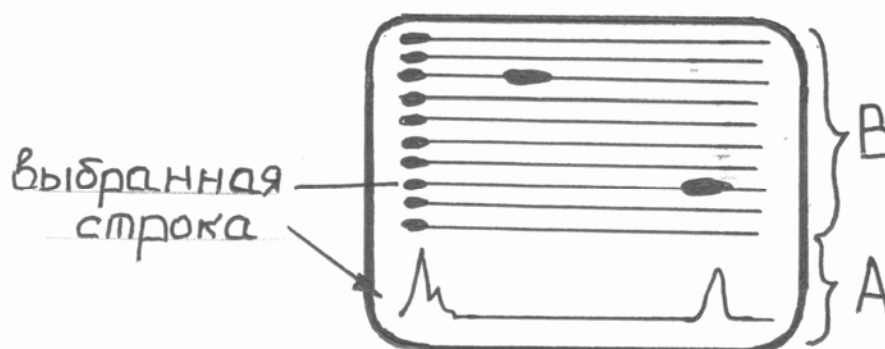


Рис. 5.4. A+B скан

5. АВ или АС изображения также являются перспективными. Здесь на экран выводятся А-изображения каждой строки, а начало каждой новой строки сдвинуто по времени относительно предыдущей строки. Получается квазиобъемная картина, представленная на рис. 5.5. Такое изображение обеспечивает больше градаций и легче оценивается, чем яркостное.

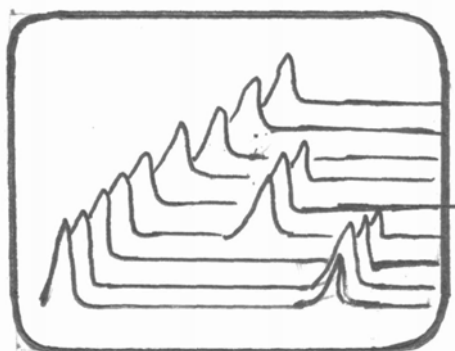


Рис. 5.5. Квазиобъемная картина

Некоторое преимущество по сравнению с линейными типами сканирования имеет **нелинейное**, так называемое **секторное сканирование**, при котором акустические лучи располагаются веером, как показано на рис. 5.6.

Преимущество такого сканирования – развертка из небольшой области, т. е. с помощью малого входного «окна». Примером получения такого изображения является УЗ интроскоп УИ-70.

В общем случае информацию о свойствах объекта контроля несут:

- временное запаздывание импульса;
- амплитуда импульса;

- частотный спектр импульса;
- форма огибающей импульса.

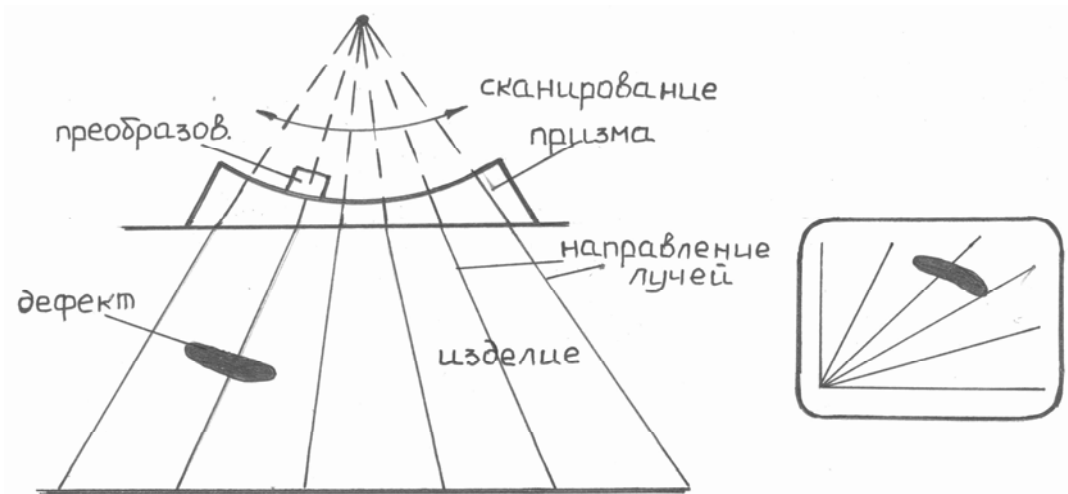


Рис. 5.6. Секторное сканирование

Поэтому изображения также могут строиться с использованием любого из этих информативных признаков или их комбинаций.

В перечисленных выше методах развертки мы использовали только амплитуду импульса и его временное положение.

Томографические изображения

Томографические изображения строятся с помощью методов акустической реконструктивной томографии по набору проекционных данных. Методы восстановления изображения по набору проекционных данных общие для всех томографических методов. Они основаны на свойстве систем линейных уравнений – достаточно иметь число линейно-независимых уравнений (так называемых лучевых сумм) не меньшее числа элементов изображения. Решение такой системы уравнений позволяет однозначно вычислить значения измеряемого параметра в каждой точке сечения.

В акустической томографии могут быть визуализированы поля локальных скоростей или поля локальных затуханий.

Из-за сложности аппаратуры и возможности получать акустические изображения другими методами акустическая томография используется реже, чем радиационная. Общие ограничения для всех сканирующих систем следующие:

- минимальное время сбора информации для формирования кадра из n -строк в эхо-методах при В-сканировании

$$t_{\min}^{\text{эхо}} \geq \frac{2R}{C},$$

где R – размер визуализируемой области;

- минимальное время сбора информации для формирования кадра в теневых методах при С-сканировании и в реконструктивной томографии

$$t_{\min}^{\text{мен}} \geq \frac{RN}{C},$$

где N – число элементов в кадре.

Системы акусточкипии

По типам сканирования интроскопы делятся на пять групп:

1. Система с ручным сканированием.

Структурная схема такой системы имеет вид, представленный на рис. 5.7.

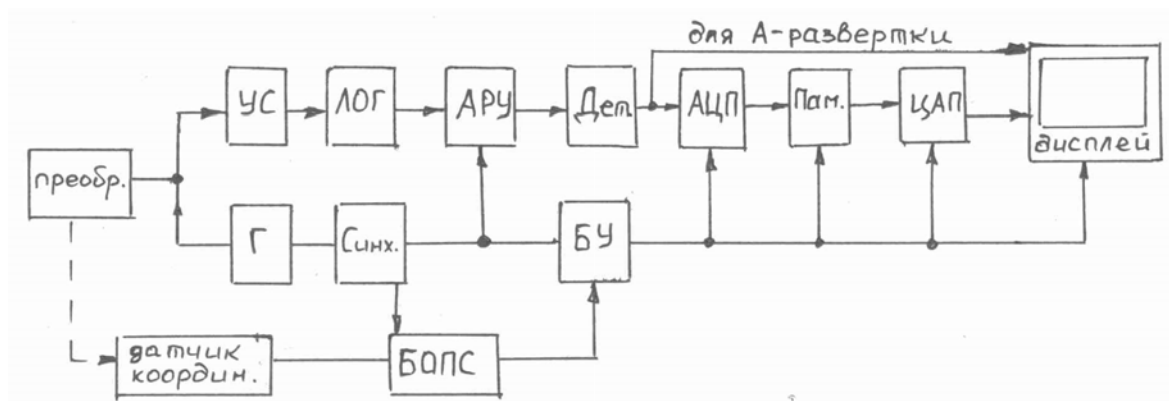


Рис. 5.7. Система с ручным сканированием

Где БОПС – блок обработки и преобразования сигналов. В отличие от обычного дефектоскопа здесь после усиления сигнал логарифмируется в ЛОГ. Оператор включает режим записи и один раз проводит преобразованием по поверхности изделия. При необходимости он может стереть старое изображение и записать новое. Блок ЛОГ необходим для сжатия динамического диапазона сигналов при формировании изображения типов В или С с модуляцией яркости. Если формируется изображение типа АВ, то блок ЛОГ исключают.

БОПС – обрабатывает сигнал датчиков координат и вычисляет координаты ячеек памяти, в которые следует заносить информацию, и передает эти координаты в БУ. БУ управляет режимом записи и считывания памяти, выводом изображения на экран дисплея и его стиранием, изменением масштаба изображения, выводом на экран дисплея меток, буквенно-цифровой информации, необходимой для фотографической регистрации изображений.

Достоинство таких интроскопов – возможность использования обычных преобразователей, произвольный способ сканирования, возможность получения большой зоны обзора, возможность контроля объектов сложной формы.

Недостатки – большое время получения и смены кадров, необходимость применения механических узлов.

Пример ручного сканирующего устройства приведен на рис. 5.8.

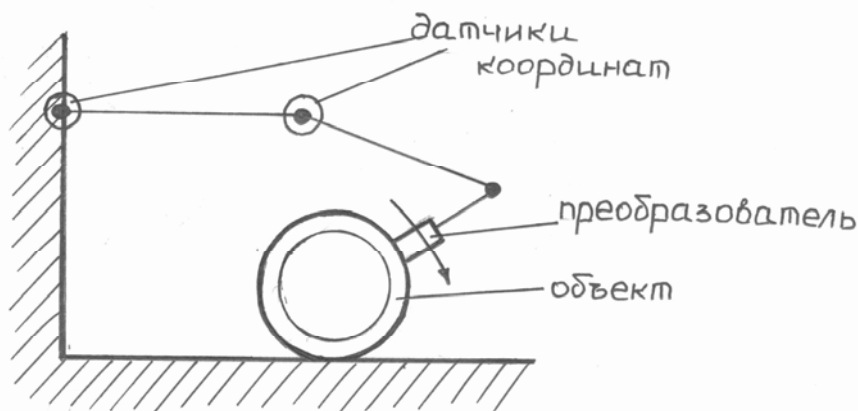


Рис. 5.8. Пример ручного сканирующего устройства

2. Система с механическим сканированием.

Структурная схема такого устройства может не отличаться от системы ручного сканирования. Отличие состоит в том, что сканирование изделия лучом осуществляется с помощью механического сканирующего устройства.

Как правило, сканирование осуществляется качающимся преобразователем и обеспечивает быстрдействие 10–15 кадр/с. При такой скорости блок памяти обычно не требуется. Поэтому система получается дешевле. Однако память все равно нужна для получения стоп-кадра, разверток АВ и А, вывода на экран необходимой буквенно-цифровой информации. Пример конструкции сканирующего устройства с механическим приводом приведен на рис. 5.9.

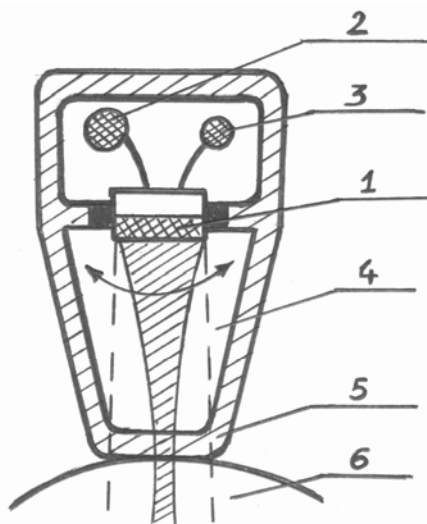


Рис. 5.9. 1 – пластина; 2 – механический привод; 3 – датчик положения; 4 – камера с водой; 5 – контактная мембрана

3. Система с электронным сканированием.

Структурная схема такого устройства с линейным сканированием имеет вид, представленный на рис. 5.10.

Блок преобразователей содержит от 8 до 64 преобразователя. Такое же количество элементов содержат блоки генераторов и приемных устройств. Запуском генераторов и коммутацией ПУ управляет коммутатор, синхронизируемый формирователем запуска ФЗ. ФЗ и коммутатор включаются одновременно, запуская 7, затем 8 преобразователей. После этого коммутатор подключает следующую группу из 7(8) преобразователей, смещенных относительно предыдущей на 1 элемент. Всего таких групп из 7–8 элементов получается 114 и соответственно формируется 114 акустических строк в контролируемом пространстве объекта.

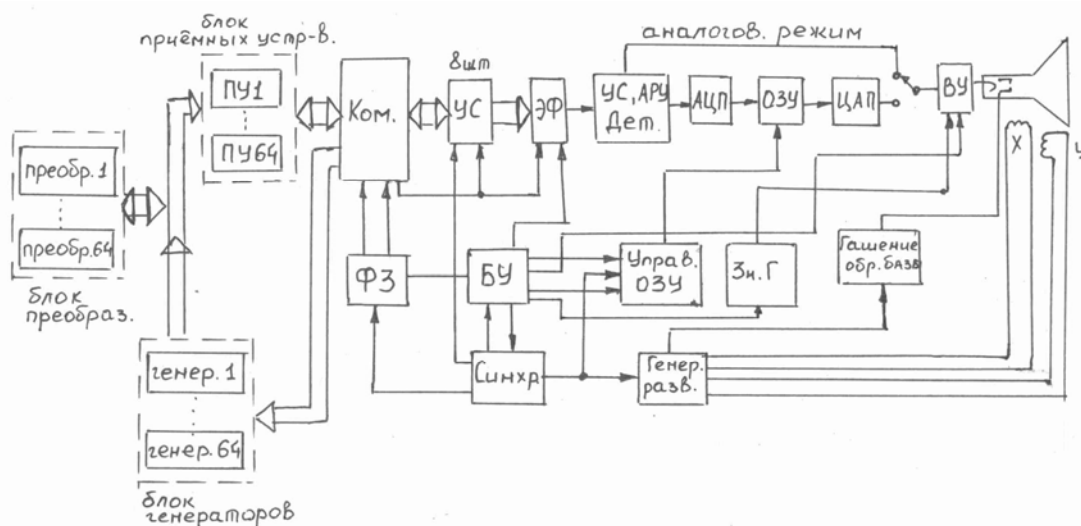


Рис. 5.10. Система с электронным сканированием

ФЗ – формирователь запуска; ЭФ – блок электронной фокусировки;
 ПУ – приемное устройство; ЗнГ – знакогенератор; ВУ – видеоусилитель

В ФЗ предусмотрена задержка импульсов запуска генераторов, обеспечивающая фокусировку результирующего акустического поля в требуемой зоне.

Электрические сигналы с преобразователем через ПУ и открытые каналы коммутатора поступают на 8 канальных усилителей УС, а затем на вход блока ЭФ. В блоке ЭФ осуществляется задержка сигналов и их суммирование.

Коммутатор управляет также распределением коэффициентов усиления в блоке УС и распределением задержек в зависимости от того, сколько включено элементов в группе (7 или 8). Такие блоки ЭФ обеспечивают зону повышенного разрешения. ЭФ имеет одиночный выход, сигнал с которого поступает на УС, Дет., АРУ и через АЦП на ОЗУ. Сигнал на видеоусилитель поступает либо с ЦАП, либо с выхода Дет. при аналоговом режиме.

БУ позволяет изменять положение зон фокусировки при излучении и приеме, величину коэффициента усиления УС вплоть до логарифмирования, обеспечивает режим стоп-кадра в ОЗУ и другие операции.

ЗнГ обеспечивает, под управлением БУ, вывод на экран необходимой буквенно-цифровой информации. Остальные блоки – типовые.

Основные достоинства – отсутствие механического узла сканирования, возможность контроля в реальном масштабе времени.

Недостатки – большая рабочая поверхность блока преобразователей, трудность осуществления одинакового акустического контакта для всех преобразователей.

4. Установка с комбинированным сканированием

Ортографические изображения типа С получают на устройстве с комбинированным сканированием: электронным и ручным (или механическим). В качестве основы здесь может быть использована установка с электронно-механическим сканированием, но должна быть предусмотрена возможность занесения в память суммы сигналов, соответствующих обычной строке В-изображения. Здесь при одном положении блока преобразователей образуется одна строка изображения типа С.

Полное изображение типа С образуется при перемещении блока преобразователей перпендикулярно направлению электронного сканирования. Возможно применение двухмерного электронного сканирования. Основные типы приборов сканирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип прибора	Фирма, страна	Вид сканирования	Краткая характеристика	Материал объекта
1	2	3	4	5
УИ-25ЭЦ	МИПО «Спектр», Россия	Ручной, В	Зона обзора 300x300 мм. Нормально сфокусированные преобразователи, работающие на частоте 2,25 и 3 МГц. Цифровая память. Изображение – томограмма	Резиноподобные, пластики
МВС-1	Институт сварки, Дания	Ручной, С	Глубина контроля по стали 250–500 мм. Наклонные преобразователи, работающие на частоте 2 и 4 МГц. Цифровая память, процессор, изображение – две проекции	Сталь и др. материалы
МВС-2		Механический, С		

1	2	3	4	5
ИРИС	SHELL, США MATE- VAL, Англия	Механи- ческий, В	Визуализируется сечение коррозированных труб. Час- тота кадров – 20. Скорость контроля до 2,5 м/мин. Вы- являемость коррозии – диа- метр пятна 1,5 мм	Металл
УИ- 50	МНПО «Спектр», Россия	Элек- трон- ный, В	Зона обзора 100x200 мм. Преобразователи – 46 с частотой работы 2,5 МГц. Число строк – 114. Частота кадров – 20. Изображение – томограмма	Металл, пластмас- са

Голографические изображения

Голография – это интерференционный способ получения изображения предметов, дает возможность получать объемное изображение предметов по рассеянному этим предметом звуковому полю.

Принцип получения голографического акустического изображения аналогичен оптической голографии: сначала регистрируется картина, полученная в результате интерференции двух звуковых волн – рассеянной предметом и опорной, а затем по полученной записи – акустической голограмме – восстанавливается либо исходное изображение предмета, либо структура рассеянного этим предметом поля на некотором расстоянии от него.

Для того, чтобы восстанавливать изображение, акустическая голограмма должна быть записана. Как и в оптической голографии акустическая голограмма записывается на фотопленке.

Изображение предмета получается при восстановлении голограммы в когерентном свете. При облучении плоской волной точечный объект, согласно принципу Гюйгенса–Френеля, рассеивает сферическую волну U_s , как показано на рис. 5.11.

Если одновременно послать другую опорную волну U_0 , когерентную первой, то в плоскости Р будет иметь место интерференционная картина. Если в плоскости Р поставить акустический пространственный квадратичный детектор,

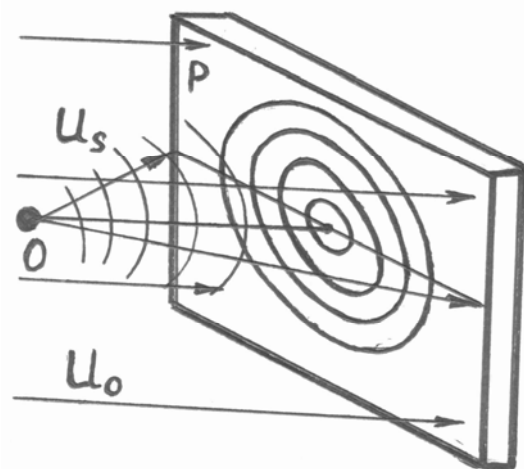


Рис. 5.11

реагирующий на звуковое давление изменением яркости, то получится распределение оптической прозрачности в плоскости детектора в соответствии с формулой

$$U^2 = U_s^2 + U_0^2 + 2U_s U_0 \cdot \cos(\phi_s - \phi_0), \quad (5.1)$$

где U_s – амплитуда предметной волны;
 U_0 – амплитуда опорной волны;
 ϕ_s – фаза предметной волны;
 ϕ_0 – фаза опорной волны.

Таким образом, прозрачность в разных местах будет переменной в виде чередующихся темных и светлых полос. Это и есть акустическая голограмма точечного объекта.

Интерференционная картина плоской опорной волны U_0 и сферической волны от точечного объекта U_s имеет вид концентрических окружностей, причем разность фаз для двух соседних окружностей равна 2π . Это так называемая зонная решетка или зонная линза Френеля.

Для восстановления голограмму освещают плоской волной от источника когерентного света. Если прозрачность изменяется по синусоидальному закону, то волны выше первого порядка отсутствуют. Углы, под которыми распространяются волны ± 1 -го порядка, увеличиваются при переходе от центра к краям. Все лучи $+1$ -го порядка пересекаются в одной точке за плоскостью P , представляющей собой действительное изображение точечного объекта, как показано на рис. 5.12.

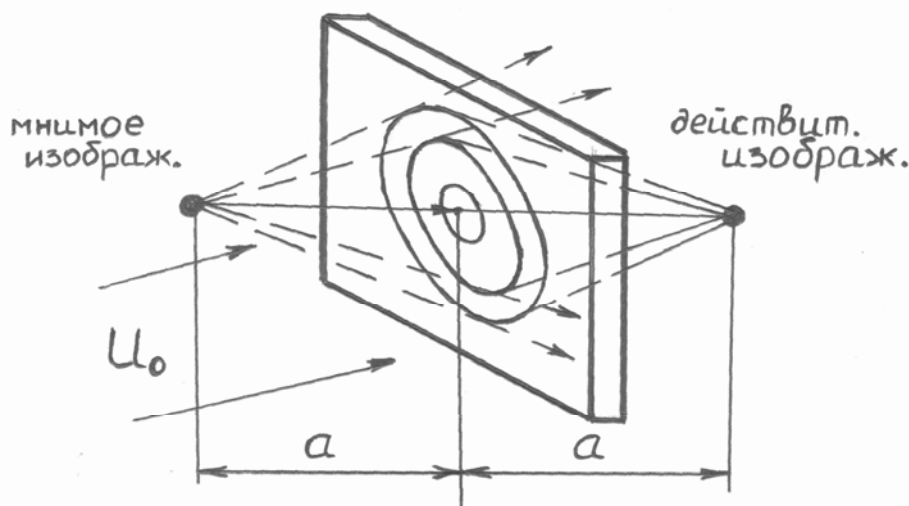


Рис. 5.12

Все лучи -1 порядка исходят из точки, которая представляет собой мнимое изображение точечного объекта.

Голограмма протяженного объекта представляет совокупность многих точек, каждая из которых является источником сферической волны. Восстановленные изображения этих точечных объектов дают изображение протяженного предмета. Чем ближе точка к плоскости регистрации, тем чаще расположены кольца ее зонной решетки, более удаленная точка дает более редкую структуру колец. Поэтому плоская голограмма при восстановлении дает объемное изображение.

Методы получения и восстановления акустической голографии

В оптической голографии регистрация голограмм осуществляется на фотопленке. В акустике функции фотопленки выполняет:

- распределенная система пьезо- или других типов акусто-электрических преобразователей. Число таких отдельных преобразователей – до десятков и сотен тысяч (т. е. мозаика). Если не требуется быстродействия, то интерференционную картину акустического поля в плоскости P можно снять одним преобразователем, который осуществляет сканирование поля в плоскости P . Сигнал с такого приемника поступает (после необходимой обработки) на модулятор яркости луча ЭЛТ. Пятно луча перемещается по экрану синхронно с перемещением преобразователя в плоскости P и на экране ЭЛТ последовательно высвечивается голограмма. Эта голограмма фиксируется на фотопленку. Восстанавливается такая голограмма с помощью когерентного света как и оптическая голограмма;
- в качестве регистраторов акустического поля могут использоваться термопластинки, электрооптические кристаллы, оптическая керамика и др., которые сразу дают оптическое изображение под действием акустического поля.

Особенность акустической голографии состоит в том, что запись происходит на звуковых волнах с длиной волны $\lambda_{зв}$, а восстановление – на световых волнах с длиной волны $\lambda_{св}$. В результате изображение предмета будет иметь размеры в μ раз меньше ($\mu = \lambda_{зв} / \lambda_0$), т. е. будет очень малым. Так если $\lambda_{зв} = 2$ см, а $\lambda_{св} = 0,63$ мкм (красный свет), то $\mu = 3 \cdot 10^7$. Т. е. объекту размером 3х3 см после восстановления будет соответствовать изображение размером 300х300 мкм. Такое изображение можно рассмотреть только в микроскоп. Это представляет собой определенную сложность при технической реализации.

Акустическая голография в настоящее время применяется в основном в медицинской диагностике. Однако есть работы по акустической голографии объектов с целью обнаружения зон с повышенным механическим напряжением. Главная трудность здесь – отсутствие мощных широкозахватных излучателей для равномерного облучения объекта.

Двумерная регистрации акустического изображения

Для осуществления некоторых способов визуализации требуются средства записи двумерного множества значений параметров акустического поля (амплитуда, давление, фаза, время прихода сигнала и др.). Простейший метод записи такой двумерной картины – перемещение преобразователя по исследуемой поверхности по траектории, описывающей растр, как было рассмотрено выше. Сканирование одним преобразователем занимает много времени, поэтому стараются сделать решетку приемных преобразователей. Пример системы визуализации с использованием решетки имеет вид, представленный на рис. 5.13.

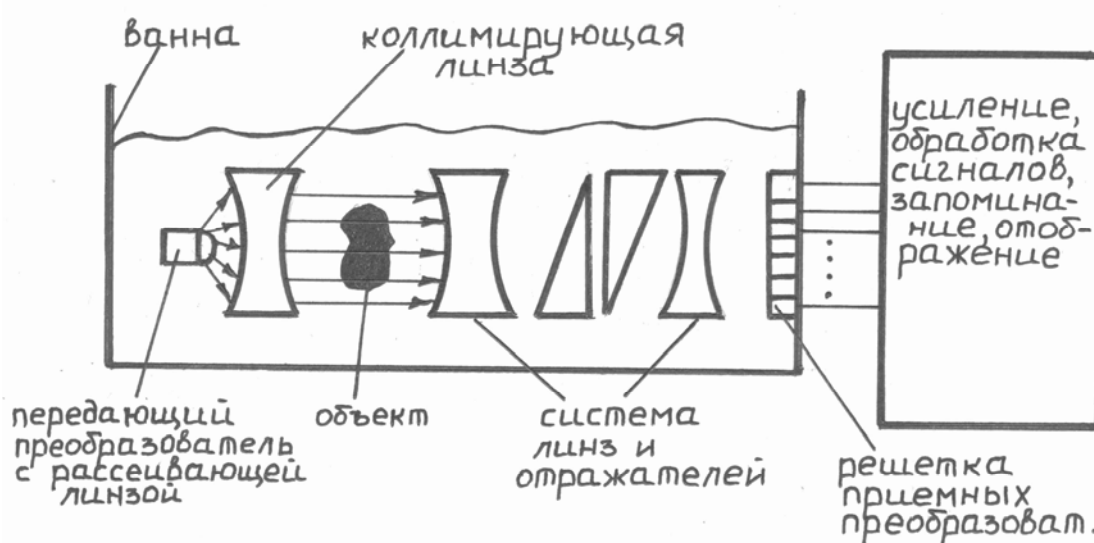


Рис. 5.13

Практическая реализация такой системы на дискретных элементах связано с большой сложностью. На практике плоскую картину получают с помощью «Звуковизора» или «Трубки Соколова». Это аналог передающей телевизионной трубки, в которой входная поверхность с внутренней стороны покрыта пьезоматериалом, а распределение заряда на внутренней поверхности считывается электронным лучом. Конструкция звуковизора имеет вид, представленный на рис. 5.14.

На обкладках каждого элемента мозаики создается заряд, пропорциональный акустическому давлению в этой точке плоскости. При попадании на элемент электронного пучка через элемент на собирающий электрод будет протекать ток, пропорциональный заряду. Этот ток протекает через нагрузочный регистр R_n пропорционально акустическому давлению $P_{ик}$. Электронный пучок перемещается по мозаике с помощью отклоняющей системы по обычному телевизионному растру. Сигнал с резистора нагрузки

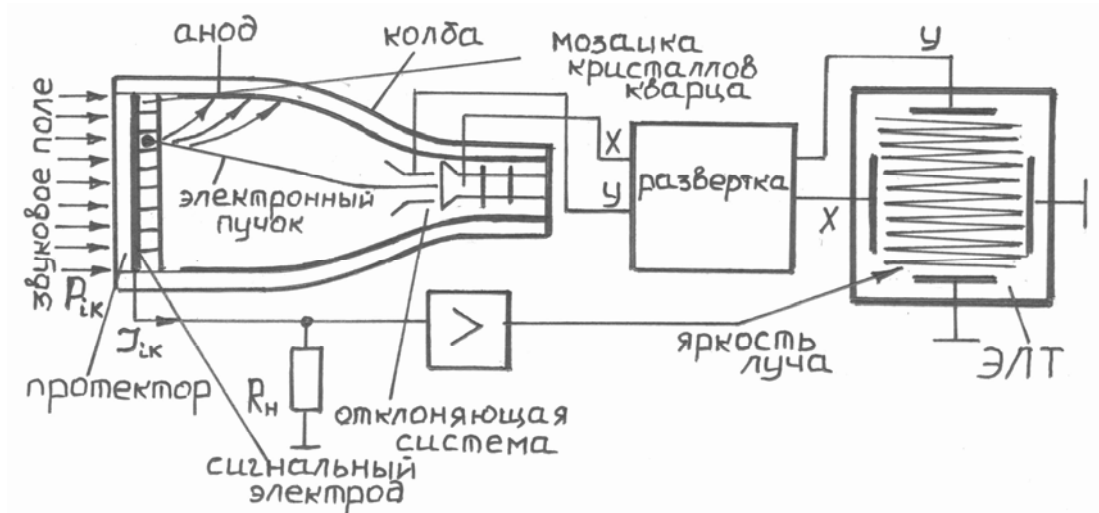


Рис. 5.14

усиливается и подается на модуляторный электрод ЭЛТ, изменяя яркость луча. Таким образом, на экране ЭЛТ формируется плоская картина распределения акустического давления на мозаике кристаллов.

Акустическая микроскопия

Способность ультразвука преломляться, позволяет изготовить фокусирующие преобразователи, которые в фокусе имеют диаметр пучка равный $\delta = 1,22 \frac{\lambda}{a}$ (кружок Эйри). Использование двух таких преобразователей позволяет просмотреть на просвет тонкий срез какого-либо объекта.

В настоящее время известны системы, работающие на частоте 900 МГц и имеющие разрешение около 2–5 мкм. Такая система представлена на рис. 5.15.

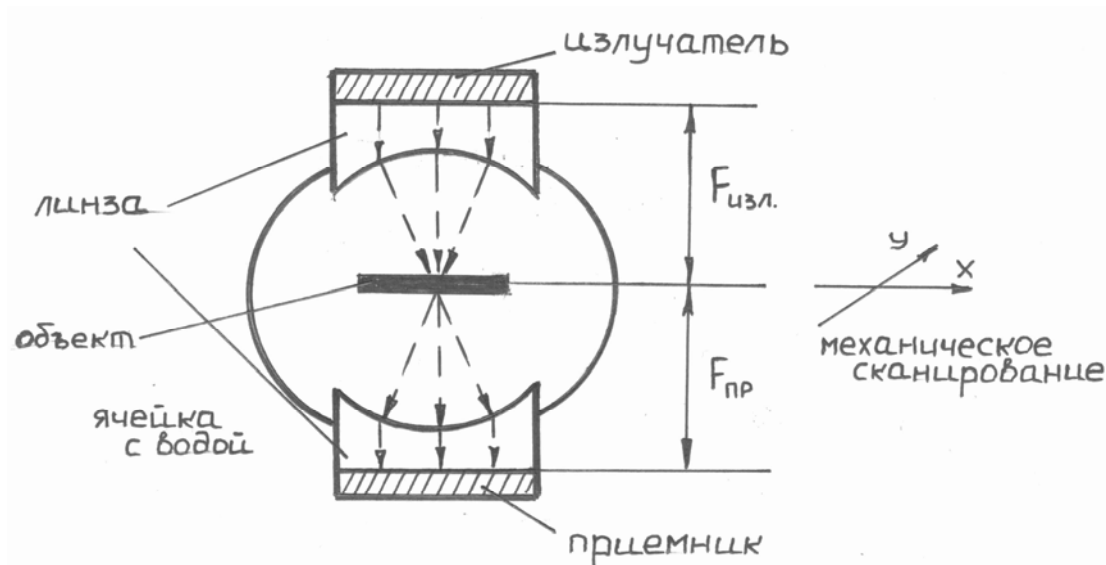


Рис. 5.15

Излучающий и приемный преобразователь являются фокусирующими. Расстояние между ними подбирается таким образом, чтобы их фокусы совместились. В эту точку помещается объект. Для получения изображения объект перемещается с помощью сканера по двум координатам x, y и сигнал с приемного преобразователя после усиления модулирует яркость луча. В этом случае мы получим изображение «на просвет», т. е. будет визуализироваться пропускающая способность объекта. Можно использовать один преобразователь и регистрировать отражение от объекта. В этом случае будет визуализироваться отражательная способность объекта. Разрешающая способность акустической линзы определяется шириной луча в фокусе, т. е. радиусом кружка Эйри. Для увеличения радиуса пучка необходимо уменьшать λ , т. е. увеличивать частоту.

Элементы акустической реконструктивной томографии

Акустическая томография в настоящее время находится в стадии развития. Ее методы в большей мере используются в медицине, однако оказываются полезными в различных областях науки и техники. Ее цель – получить изображение внутренней структуры объекта. При этом под изображением понимается некоторый образ, отображающий характер изменения данного физического параметра внутри этого объекта. В акустике такими физическими параметрами могут быть:

- рассеивающая способность;
- поглощающая способность;
- преломление акустических волн в среде;
- изменение скорости распространения;
- доплеровский сдвиг частоты, вызванный взаимным движением частей объекта.

Каждому из этих параметров соответствует свое изображение. Следовательно, таких изображений у объекта может быть много и они могут существенно различаться между собой.

В реконструктивной томографии, независимо от вида проникающего воздействия, изменение параметра внутри объекта описывают функцией $f(x, y, z)$. Эта функция представляет собой изображение внутренней структуры объекта.

В связи со сложностью формирования и регистрации трехмерных изображений, объемное изображение обычно представляют набором плоских (двумерных) изображений (слоев). Причем толщина слоя должна быть такой, что в пределах слоя структура практически не изменялась по его толщине. Совокупность таких плоских изображений (слоев) дает полное описание внутренней структуры всего объекта.

Процесс получения изображения в реконструктивной томографии состоит из двух основных этапов:

1. Томографический эксперимент.

Цель которого состоит в том, чтобы получить необходимую первичную информацию. В большинстве современных томографических схем осуществляется сбор информации поочередно с разных слоев объекта.

Основное требование к томографическому эксперименту – достаточность получаемой информации для восстановления внутренней структуры. Существует несколько схем постановки томографического эксперимента. Рассмотрим простейшую, когда объект пронизывается широким параллельным пучком, как на рис. 5.16.

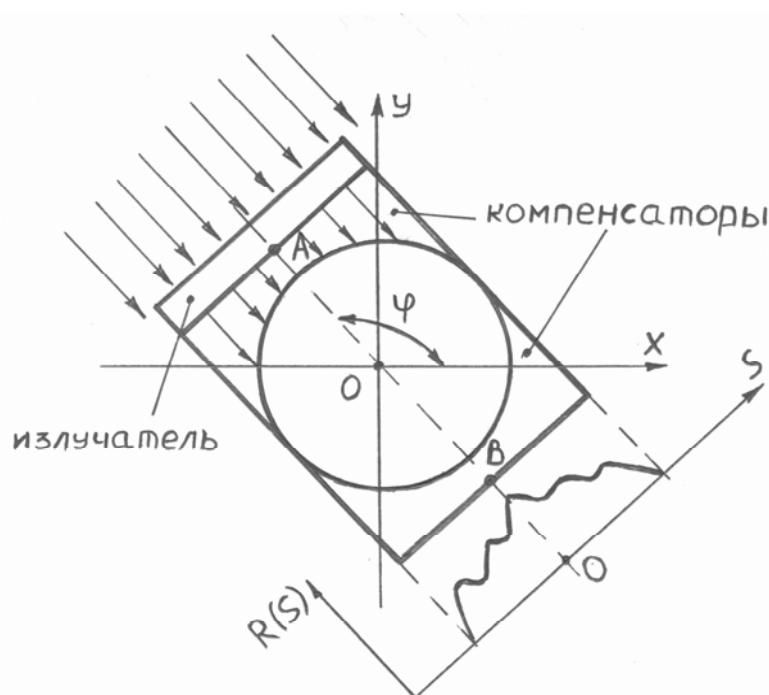


Рис. 5.16

Пусть направление этого пучка составляет угол φ с осью x . С противоположной стороны находится приемный преобразователь Пр., который измеряет амплитуду акустического сигнала в локальных областях (точках). Здесь могут быть использованы либо линейка преобразователей, либо один перемещающийся преобразователь. Будем считать, что материал компенсаторов имеет такие же акустические свойства, как и материал изделия в среднем. Тогда преломление акустических волн на границах компенсатор – изделие будет отсутствовать и в изделие будет распространяться также параллельный акустический пучок. Чтобы получаемая информация была достаточной, необходимо осуществлять

прозвучивание под всевозможными углами φ . Диапазон углов φ обычно составляет 180° , т. к. после этого получаемая информация начнет повторяться. Прозвучивание будет производиться по тем же самым лучам, только в противоположном направлении, т. е. после 180° получаемые уравнения перестанут быть линейно независимыми.

Результаты измерения для отдельного слоя описываются функцией двух переменных S и φ , которые обычно обозначаются через $R(S, \varphi)$.

φ – определяет направление прозвучивания;

S – определяет положение преобразователя на оси, перпендикулярной направлению прозвучивания, отсчитывается обычно от центра O системы координат.

Выделим один луч. Акустический импульс, распространяющийся вдоль этого луча, будет взаимодействовать с материалом объекта. В результате такого взаимодействия характеристики импульса будут изменяться. Может изменяться его давление P в каждой точке объекта за счет поглощения и рассеяния, может изменяться скорость его движения и т. д.

Сигнал, снимаемый с приемного преобразователя, дает суммарное изменение измеряемой величины (давление P или скорость C) на протяжении всего пути через изделие (AB).

Т. е. можно сказать, что сигнал приемного преобразователя представляет собой проекцию суммарного значения параметра (допустим затухания) в некоторую точку прямой, перпендикулярной направлению пучка. Отсюда появилось название «проекционные данные» или «лучевые суммы».

Для каждого луча мы получаем интеграл от функции $f(x, y)$ по этому лучу, т. е.

$$R(S)/\varphi = \int_A^B f(x, y) dl.$$

Любой луч в плоскости однозначно определяется двумя параметрами: углом φ и расстоянием от центра S . Т. е. результатом томографического эксперимента являются значения функции $R(S, \varphi)$, определяемые как интеграл от функции $f(x, y)$ по прямой, задаваемой координатами S и φ . Следовательно, функция $R(S, \varphi)$ – есть образ функции $f(x, y)$ в новом пространстве двух переменных S и φ .

Такие образы изучаются в интегральной геометрии, основы которой были заложены венгерским математиком Й. Радоном в начале XIX века. Поэтому пространство S, φ называется радоновым, а проекционные данные – радоновскими образами.

Одинаковое число переменных у функций $f(x, y)$ и $R(S, \varphi)$ приводит к тому, что в радоновском образе $R(S, \varphi)$ присутствует вся инфор-

Т. е. для каждого φ есть только одно значение S , для которого $R \neq 0$. Поэтому радоновский образ точечного объекта имеет вид кривой линии, как показано на рис. 5.18.

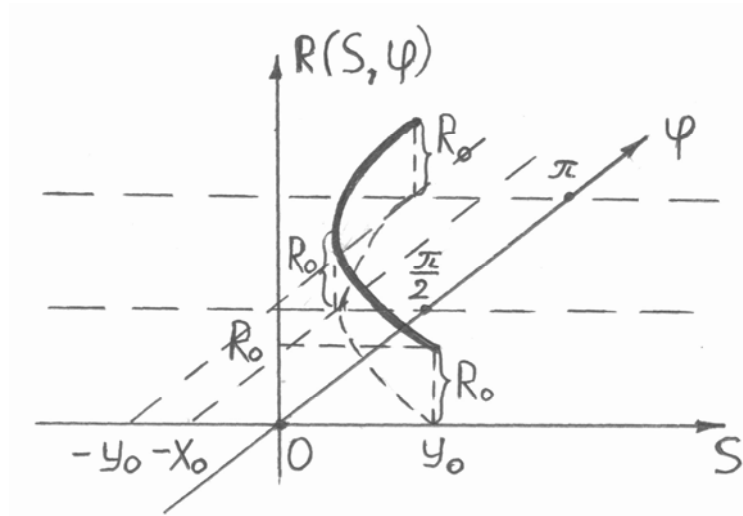


Рис. 5.18

Т. е. сама функция $f(x,y)$ и ее радоновский образ $R(S,\varphi)$ зрительно совершенно не похожи. Компактный исходной объект переходит в распределенный образ (линию). И наоборот, распределенный объект в пространстве x,y может дать компактный образ в пространстве $R(S,\varphi)$. Эта непохожесть становится тем существеннее, чем сложнее вид самого сечения. Два других примера радоновских образов простых предметов даны на рис. 5.19.

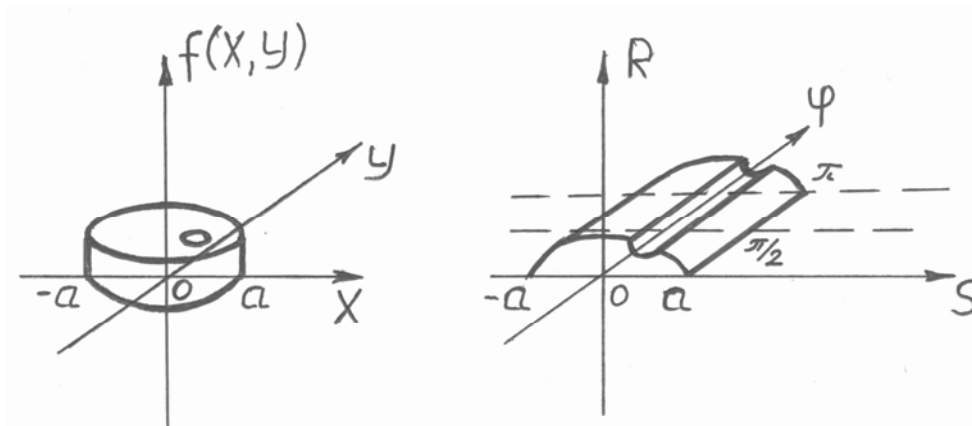


Рис. 5.19

Чистый радоновский образ дает идеальный томографический эксперимент. Реальные эксперименты дают проекционные данные, не совпадающие с радоновскими образами по многим причинам. Во всех случаях по проекционным данным строят радоновские образы, с использованием которых производят реконструкцию функции $f(x,y)$.

Восстановление или реконструкция

Специальная обработка полученной информации, в результате которой формируется изображение слоя.

Т. к. радоновский образ $R(S, \varphi)$ представляет собой интеграл от функции $f(x, y)$ по некоторому лучу, то восстановление функции $f(x, y)$ тождественно поиску решения интегрального уравнения. В настоящее время существует несколько методов решения данного интегрального уравнения. Каждый метод приводит к своей определенной последовательности математических операций, которые надо осуществлять над значениями радоновского образа $R(S, \varphi)$ для получения томограммы $f(x, y)$.

Совокупность всех математических операций по обработке $R(S, \varphi)$ с целью получения томограммы $f(x, y)$ составляет алгоритм реконструкции.

В промышленных вариантах томографов наибольшее распространение получил алгоритм, основанный на построении обратных проекций и соответствующих им суммарных изображений. Он наиболее просто реализуется программно и аппаратно.

Существуют также алгебраические алгоритмы, алгоритмы свертки. В последнее время широко применяют алгоритм с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Алгоритм обратного проецирования состоит в следующем: пусть функция $f(x, y)$ представляет собой совокупность трех всплесков, как изображено на рис. 5.20.

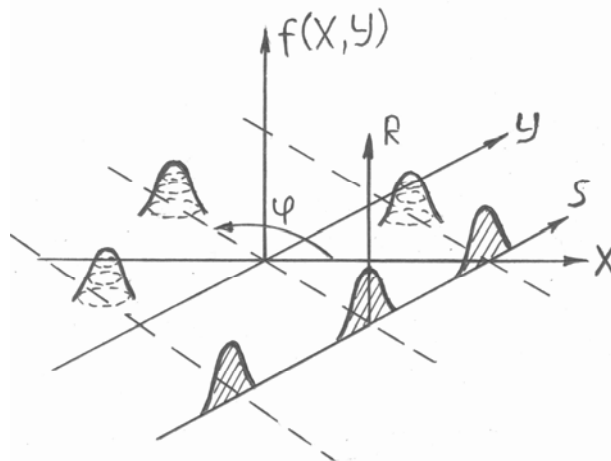


Рис. 5.20

Тогда функция $R(S, \varphi)$ при $\varphi = \text{const}$ будет также представлять собой совокупность трех всплесков [$R(S, \varphi)$ можно представить в виде тени, которую образуют всплески функции $f(x, y)$ на плоскость, перпендикулярную направлению с углом φ].

Зафиксируем угол φ . Возьмем функцию $R(S)/\varphi$ и растянем ее по всей плоскости x, y так, чтобы при сечении ее плоскостью, параллельной оси S и перпендикулярной плоскости x, y , получалась функция, тождественная $R(S)/\varphi$, что и представлено на рис. 5.21.

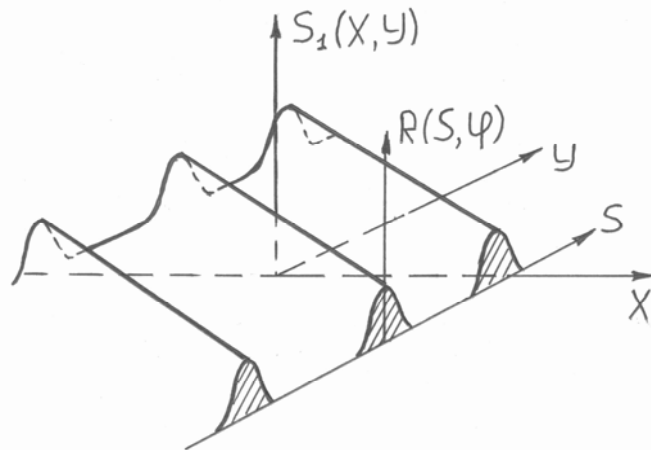


Рис. 5.21

Растянутая таким образом функция $S_1(x, y)$ зависит от двух координат x и y и называется обратной проекцией.

Возьмем теперь три обратных проекции с разностью углов в 60° и просуммируем их. В плоскости x, y получится много всплесков.

Наложение ребер обратных проекций будет происходить во всех точках x, y хаотически. Но в точках, где у функции $f(x, y)$ были расположены всплески будет происходить арифметическое суммирование. Каждая проекция увеличивает результат на определенную величину. В результате в этих точках сформируется, при увеличении числа обратных проекций, наиболее мощные всплески. Если теперь с помощью секущей плоскости P отсечь слабые всплески, то получим совокупность всплесков, аналогичную исходной функции $f(x, y)$, как и показано на рис. 5.22. Функция $S(x, y)$, получаемая в результате сложения обратных проекций, называется суммарным изображением. Это изображение лишь с какой-то степенью точности описывает исходное распределение $f(x, y)$.

Детальный анализ суммарного изображения показывает, что его отличие от искомой томограммы $f(x, y)$ локально и оно может быть устранено фильтрацией. После фильтрации получается новое изображение, которое полностью тождественно томограмме $f(x, y)$.

Т. к. реальный томографический эксперимент дает неточные проекционные данные, то восстановленное изображение отличается от истинного наличием искажений в виде ложных дополнительных деталей (атерфактов), уменьшения резкости, появления флуктуирующего шумового фона.

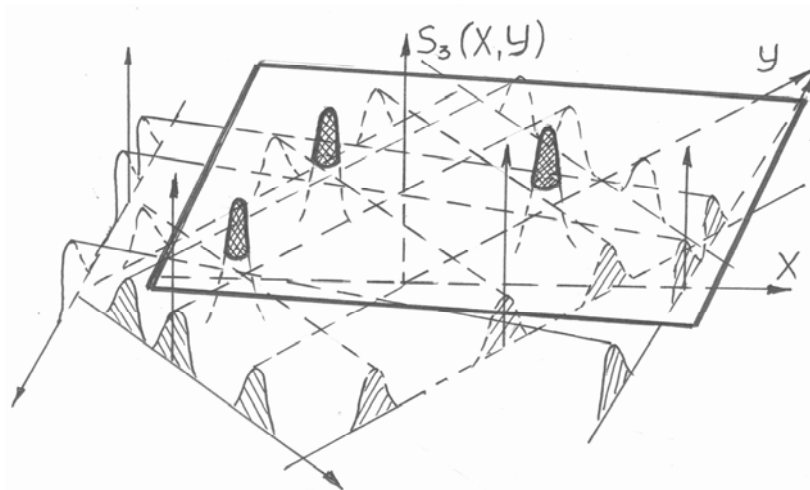


Рис. 5.22

Качество томограммы характеризуется следующими параметрами:

- линейное разрешение – минимальный размер фрагмента, который можно увидеть на восстановленной томограмме;
- контрастная чувствительность – минимальный перепад акустических свойств, обнаруживаемый на томограмме;
- уровень шума.

Вся обработка информации в акустической томографии выполняется с помощью ЭВМ по соответствующим алгоритмам и программам. При этом программное обеспечение является одним из элементов реконструктивной томографии и никогда не раскрывается фирмами, изготавливающими томографы.

Основные особенности УЗ томографии состоят в том, что на практике акустические колебания редко распространяются по прямым линиям. В результате получаемые проекционные данные только отдаленно похожи на радоновские образы и они требуют дополнительной обработки с учетом таких явлений, как рефракция (отклонение на границе раздела) и дифракция.

В акустике как мы уже рассматривали, можно получить томографическое изображение с помощью эхо-метода. В этом случае не требуется никакой реконструкции. Однако есть трудности. Главная трудность состоит в том, что рассеяние УЗ колебаний наиболее эффективно на границах неоднородностей. Локальные свойства вещества (коэффициент поглощения или скорость распространения) дают меньший вклад в эхо-сигнал. В результате эхо-метод позволяет визуализировать только распределение границ между неоднородностями.

В настоящее время акустическая томография, как и рентгеновская, наибольшее применение находит в медицине. Но также интенсивно внедряется и в промышленность для контроля внутренней структуры материала и изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля: практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов/ под ред. И.Н. Сухорукова: в 5 кн. – М.: Высш. шк., 1991. – Кн. 2. – 283 с.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во. Иностран. Литературы, 1956 (1957).
3. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль: учебник для специалистов 1 и 2 уровней квалификации. – М.: НПО ЦНИИТМАШ, 1993. – 202 с.
4. Патент № 11371, кл. 42 к 49 С.Я. Соколов. Способ и устройство для испытания металлов.
5. Йофе В.К., Мясникова Е.Н., Соколова Е.С. Сергей Яковлевич Соколов. – С.-Петербург.: ГЭТУ, 1997. – 176 с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
7. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – Кн 2. – 352 с.
8. Бреховский Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
9. Викторов И.А. Ультразвуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
10. Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1972. – 469 с.
11. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
12. Иванов В.И., Белов В.М. Акустикоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
13. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в машиностроении. – С.-Петербург.: Изд-во. «Радиоавионика», 1995.
14. Й. Крауткремер, Г. Крауткремер Ультразвуковой контроль материалов: справочник. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
15. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы неразрушающего контроля многослойных конструкций из композитных материалов. – М.: Машиностроение, 1991.

16. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н.П. Алешина. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
17. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композитных материалов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 261 с.
18. Скучик Е. Основы акустики: в 2 т. – М.: Мир, 1976. – Т1, 2. – 546 с.
19. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред И.П. Голяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
20. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под ред И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
21. Физическая акустика: в 4 т. / под ред. У. Мэзона. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч. А. – М.: Мир, 1966. – Т. 1. – 592 с.
22. Шрайбер Д.С. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Metallurgia, 1965. – 392 с.

Учебное издание

Капранов Борис Иванович
Коротков Михаил Михайлович

АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

Часть 1

Учебное пособие


Редактор	<i>Е.О. Фукалова</i>
Верстка	<i>К.С. Чечельницкая</i>
Дизайн обложки	<i>О.Ю. Аршинова О.А. Дмитриев</i>

Подписано к печати 01.08.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 10,82. Уч.-изд.л. 9,78.
Заказ 737. Тираж 500 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.