

Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

НА ПРАВАХ
РУКОПИСИ

ОСНОВЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Конспект лекций

Бехер С.А., Кочетков А.С.



Новосибирск, 2013

Содержание

1 Основные понятия акустики	3
2 Закономерности распространения акустических волн	11
3 Прием и излучение ультразвуковых волн	22
4 Методы ультразвукового контроля	31
5 Изменяемые характеристики дефектов	36
6 Основные параметры контроля	45
7 Ультразвуковая толщинометрия	54
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Программа общего экзамена по УЗК на II уровень квалификации	58

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ АКУСТИКИ

1.1 Акустические колебания

Упругие колебания частиц среды вблизи положения равновесия называют акустическими колебаниями. Механизм колебаний определяется двумя основными физическими свойствами вещества: упругостью и инерцией.

Под упругостью понимают способность тел восстанавливать после прекращения воздействия первоначальную форму или объем. Инерция – способность тел сохранять свою скорость в отсутствии внешних сил.

Зависимость смещения частиц среды от времени (рис. 1.1) при непрерывных колебаниях описывается периодической функцией времени. Периодом T называют минимальный интервал времени между одинаковыми положениями частицы. Период – это время одного колебания, измеряется в секундах (с), миллисекундах (мс), микросекундах (мкс).

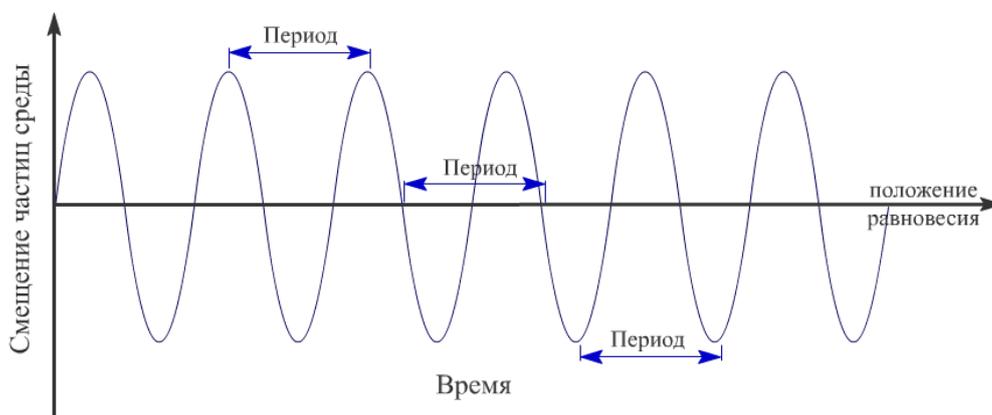


Рис. 1.1 - Зависимость смещения частиц от времени, непрерывные колебания

Для целей ультразвукового контроля практическую значимость имеют импульсные колебания (рис. 1.2). В отличие от непрерывных, импульсные колебания (рис. 1.2) ограничены во времени, имеют начало и конец. Под импульсом понимают часть сигнала, амплитуда колебаний которого превышает установленный порог. Изменение амплитуды колебаний описывается огибающей.

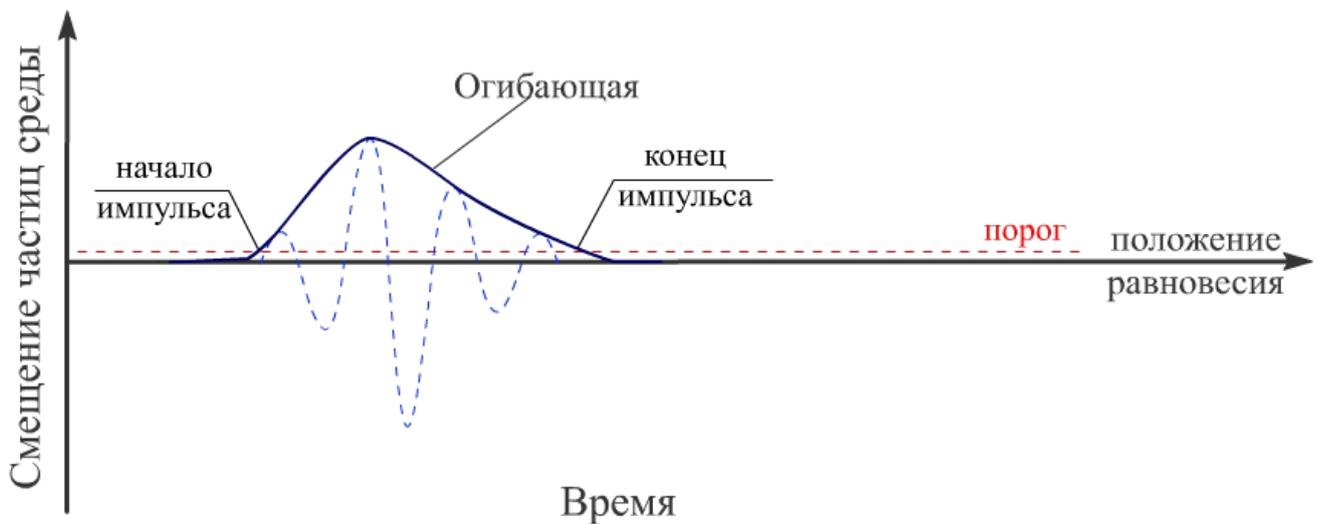


Рис. 1.2 - Зависимость смещения частиц от времени (импульсные колебания)

1.2 Акустические волны

Процесс распространения акустических колебаний (рис. 1.3) в объекте контроля называют акустической волной. В процессе распространения волны происходит перенос энергии колебаний из одной точки среды в другую.

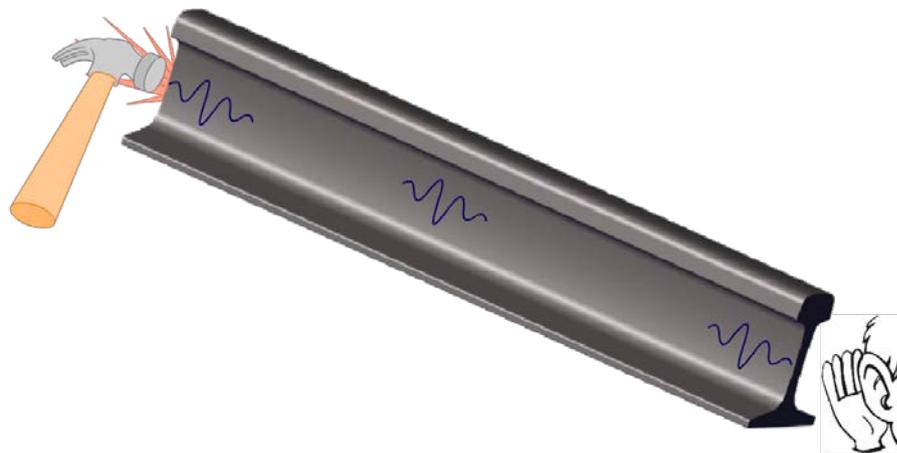


Рис. 1.3 – Распространение акустических колебаний

Механизм распространения волн иллюстрирует рисунок 1.4. Колебания в разных точках среды синхронизированы, например, в точках А и Б колебания смещены относительно друг друга на половину периода. Когда в точке А частица смещена вниз, в точке Б частица смещена вверх и наоборот. Стрелками на рисунке 1.4 показаны смещения частиц среды в процессе распространения волны вправо.

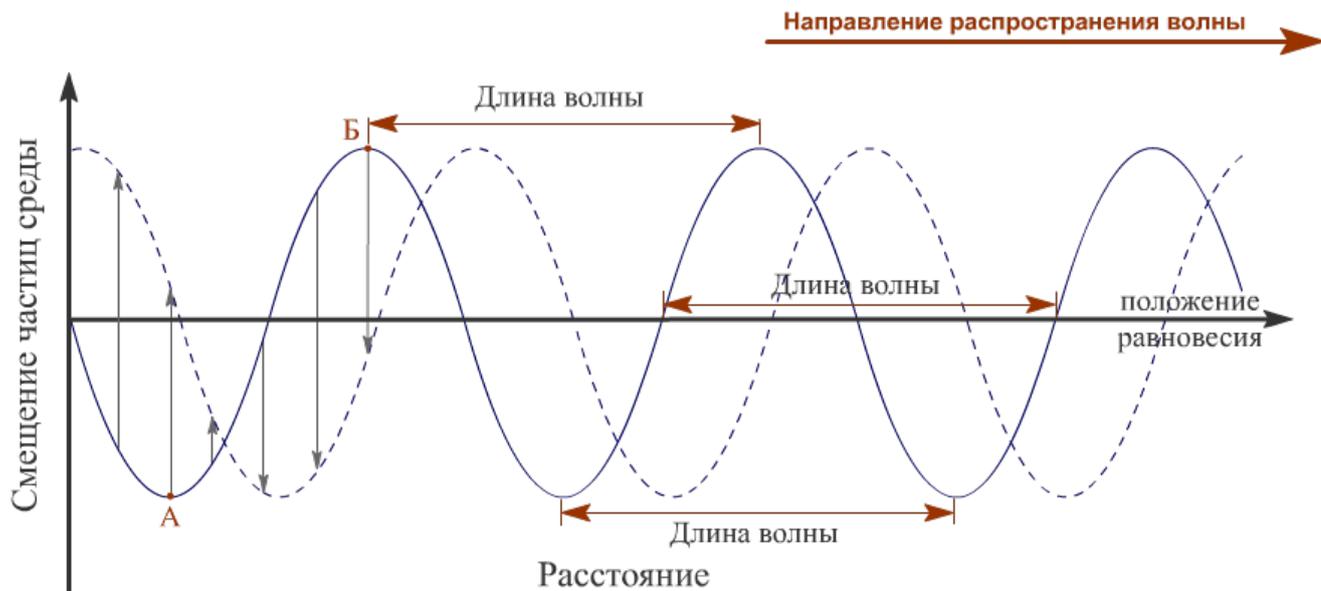


Рис. 1.4 – Распространение акустических колебаний

1.3 Скорость распространения волны

Скорость распространения волны определяется как путь проходимый волной за единицу времени (секунду). Скорость объемных волн (продольного, поперечного, поверхностного типа) зависит только от упругости и плотности среды, типа волны:

$$c \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль упругости, Па; ρ – плотность среды, кг/м³.

Необходимо отметить, что для целей ультразвукового контроля считают скорость распространения объемных и поверхностных волн независимой от частоты, амплитуды и направления распространения волны.

1.4 Частота волны (колебаний)

В ультразвуковом контроле наибольшее распространение получила величина обратно пропорциональная периоду – частота:

$$F = \frac{1}{T}$$

Частота – это число колебаний совершаемой частицей среды за единицу времени. Единицы измерения частоты: Гц, кГц, МГц приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Единицы измерения частоты

Частота		Число колебаний в секунду
Обозначение	Наименование	
1 Гц	герц	1
1 кГц	килогерц	1 000
1 МГц	мегагерц	1 000 000

Частота колебаний определяет характер взаимодействия акустических колебаний с веществом (Рис. 1.5). Высокочастотные колебания с частотой больше 10 МГц испытывают сильное затухание и не проникают в объект контроля на значительную глубину. Низкочастотные колебания с частотой меньше 1 МГц испытывают дифракцию, огибают дефекты с размерами меньше длины волны. Поэтому наибольшее распространение в акустическом контроле получили ультразвуковые колебания с частотой от 0,4 МГц до 10 МГц.

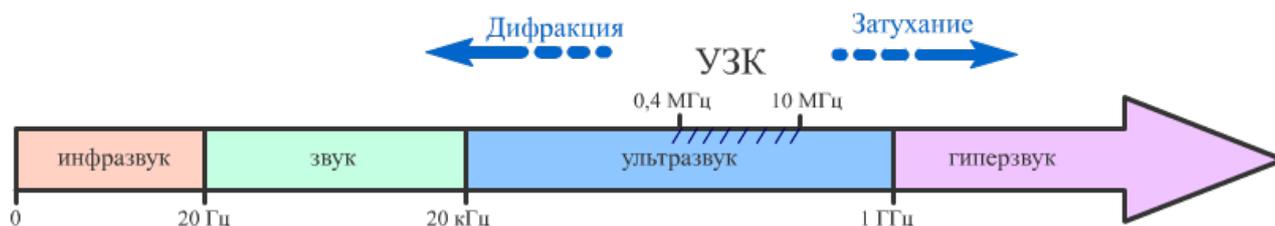


Рис. 1.5 – Классификация акустических волн по частоте

1.5 Длина волны

Акустические волны являются периодическими в пространстве, при этом пространственный период волны называют длиной волны. Длина волны – это минимальное расстояние между частицами среды, которые колеблются в одной фазе (одновременно, синхронно) (рисунок 1.4), обозначается символом λ и измеряется в м, мм.

От длины волны зависят параметры взаимодействия волны с неоднородностями среды (несплошностями, структурой материала). Волна слабо взаимодействует («огибает») с дефектами, размеры которых значительно меньше длины волны. Длина волны зависит от частоты и скорости распространения волны:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

1.6 Амплитуда волны

Амплитуда волны – это максимальное смещение частиц среды от положения равновесия. В непрерывных колебаниях амплитуда каждого последующего колебания равна предыдущему. На рисунке 1.6 показаны непрерывные колебания с амплитудой 4 мкм.

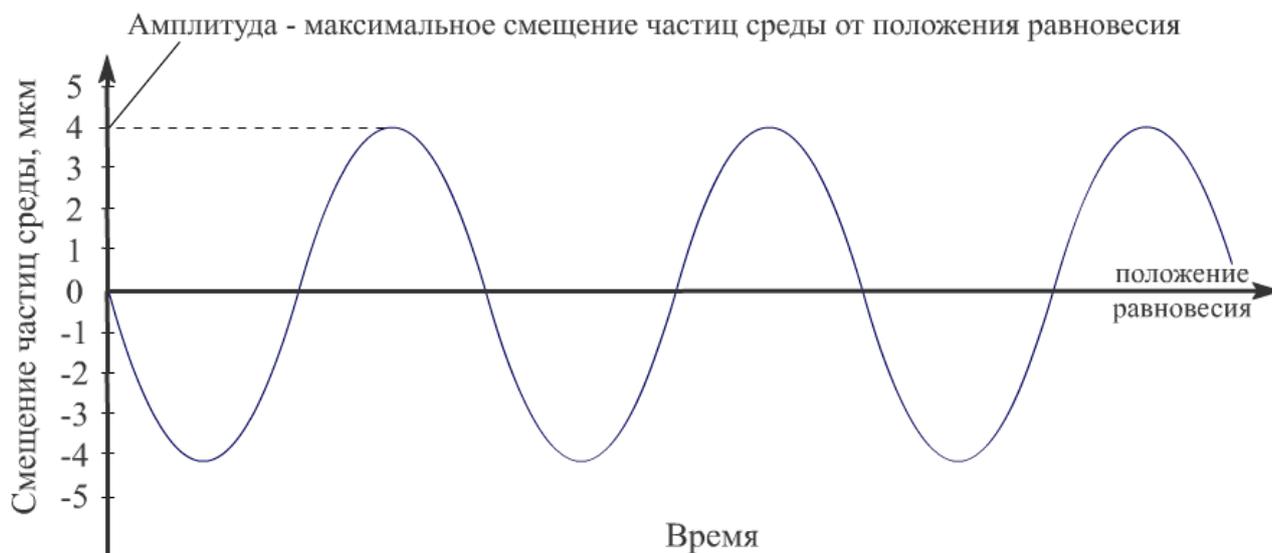


Рис. 1.6 – Непрерывные колебания с амплитудой 4 мкм

В импульсных колебаниях амплитуда изменяется во времени, при этом амплитудой импульса называют максимальную амплитуду колебаний. На рисунке 1.7 показаны импульсные колебания с амплитудой 2,8 мкм.

В неразрушающем контроле амплитуда акустического импульса является одной из основных величин, по которой принимается решение о браковке изделия. Абсолютное значение амплитуды импульса на практике не применяется, так как это значение зависит не только от характеристик дефекта, но и от посторонних факторов: состояния поверхности ввода ультразвуковых волн, расстояния до дефекта, акустических свойств материала объекта контроля. Поэтому в основу ультразвукового метода контроля положено сравнение амплитуд импульсов отраженных от дефектов с амплитудой импульсов отраженных от эталонных отражателей.

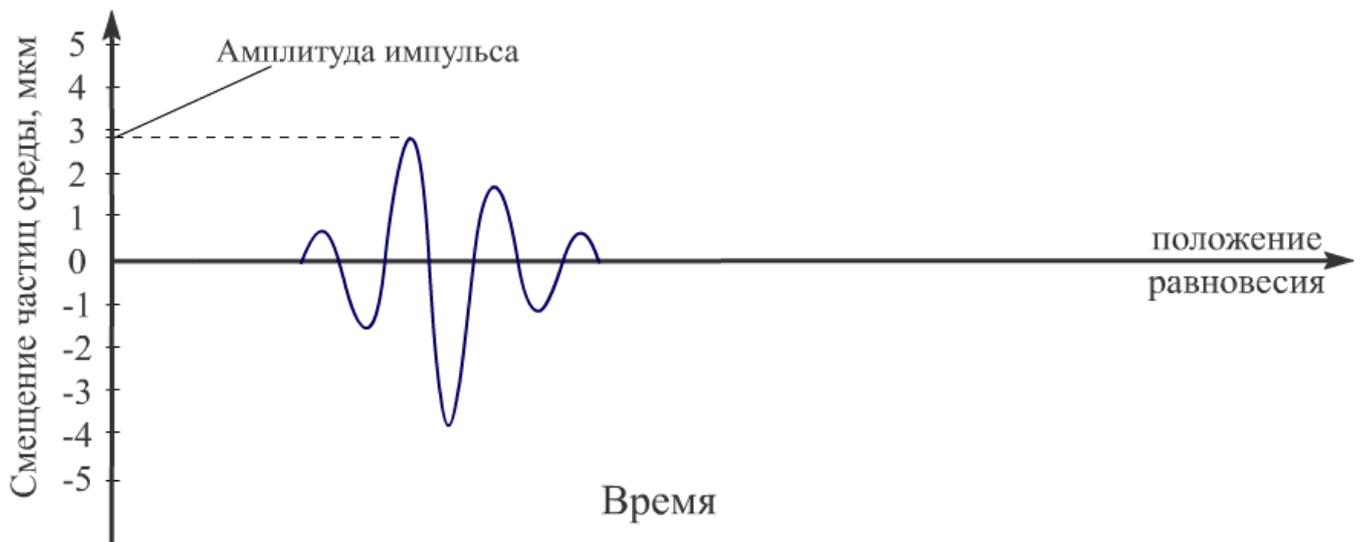


Рис. 1.7 – Импульсные колебания с амплитудой 2,8 мкм

На рисунке 1.8 показаны акустические импульсы отраженные от дефекта и эталонного отражателя с амплитудами A_d и $A_{э0}$, соответственно. Отношение амплитуд $\frac{A_d}{A_{э0}} = 0,5$ напрямую характеризует отражательную способность дефекта, а при прочих равных условиях – размер дефекта.

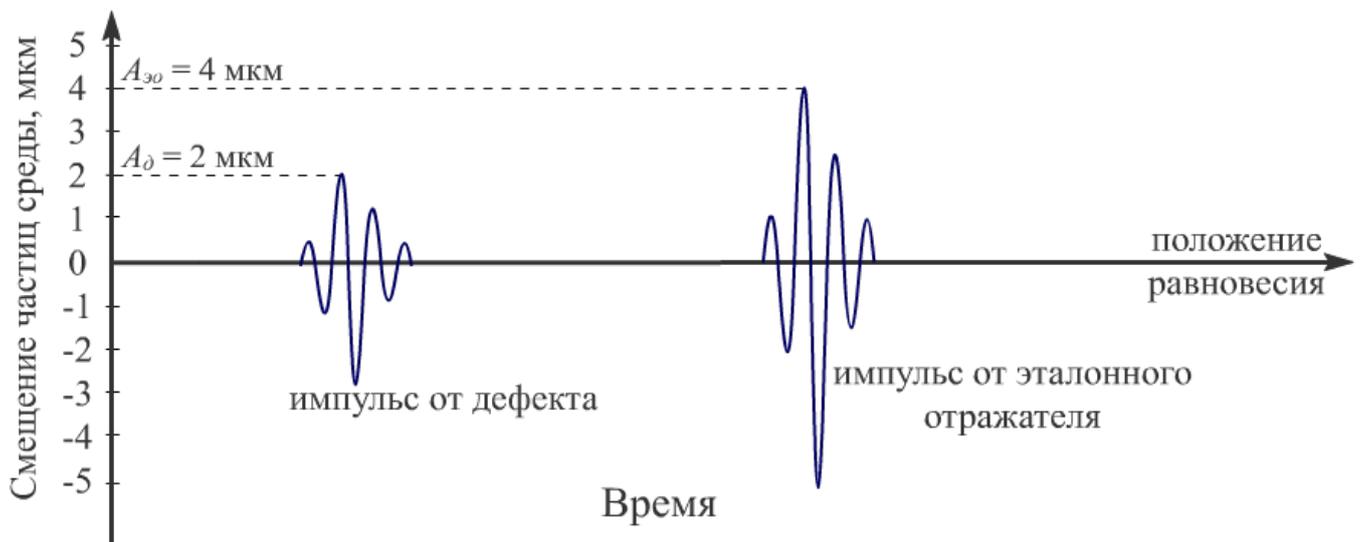


Рис. 1.8 – Импульсные колебания с амплитудой 2,8 мкм

Отношение амплитуд, коэффициент выявляемости, коэффициент усиления, условную чувствительность, принято измерять в относительных логарифмических единицах – децибелах (дБ):

$$N = 20 \cdot Lg \left(\frac{A}{A_0} \right),$$

где A – амплитуда импульса, A_0 – амплитуда эталонного импульса, $Lg()$ – десятичный логарифм.

Использование единиц дБ позволяет существенно упростить расчеты в ультразвуковой дефектоскопии: знаки « \cdot » и « $/$ » заменяются на « $+$ » и « $-$ », соответственно. В таблице 1.1 приведены соотношения между относительными единицами и дБ.

Таблица 1.1 – Значения амплитуд импульсов N в дБ и соответствующие значения относительной амплитуды A/A_0

A/A_0	$N, \text{дБ}$
100	40
10	20
2	6
1	0
0,5	- 6
0,1	- 20
0,01	- 40

1.7 Типы волн

В безграничной среде могут распространяться несколько типов волн: продольные, поперечные и поверхностные. Каждая из этих волн отличается от других направлением колебаний в волне и скоростью распространения.

Продольные волны – это акустические волны, в которых частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны. Под действием волны материал испытывает деформацию сжатия и растяжения. Волны способны распространяться во всех телах кроме вакуума и обладают самой высокой скоростью распространения в сталях $C_l = 5950$ м/с.

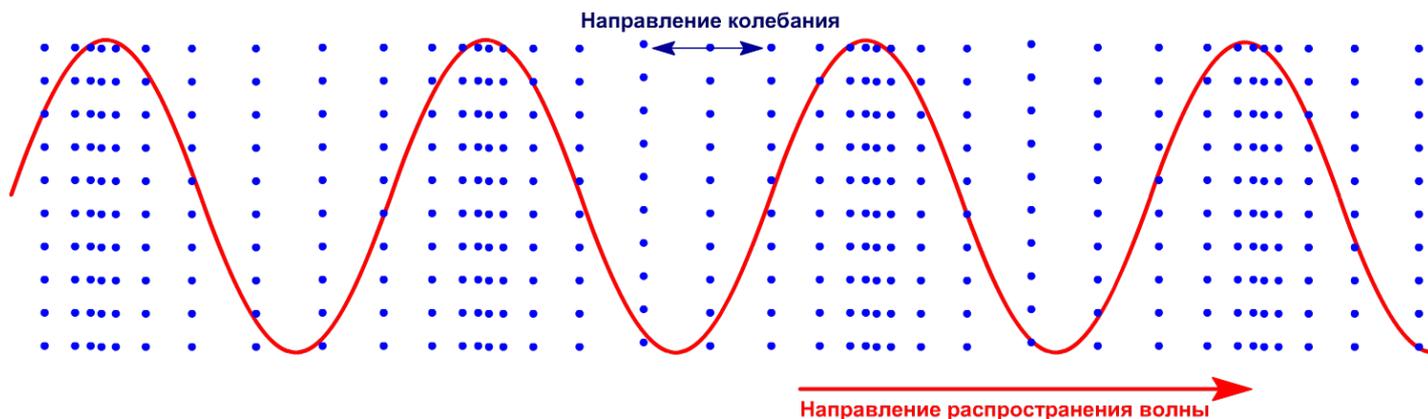


Рис. 1.9 – Схема распространения продольной волны

Поперечные волны – это акустические волны, в которых частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Под действием волны материал испытывает деформацию сдвига. Данный тип волн может распространяться только в твердых телах. В жидкостях и газах поперечные волны не распространяются. Скорость сдвиговых волн (C_t) в одном материале всегда меньше скорости продольных волн (C_l), для стали выполняется следующее соотношение:

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

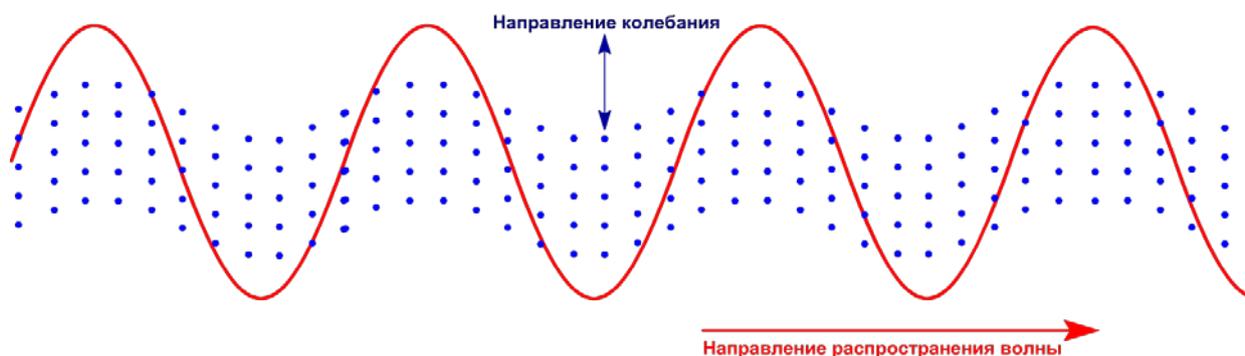


Рис. 1.10 – Схема распространения поперечной волны

Поверхностные волны (волны Релея) – это акустические волны, которые распространяются по границе раздела сред, в слое с характерной толщиной от 1,5 до 2 длины волны $(1,5-2) \cdot \lambda$. Колебания частиц среды волны объединяют в себе продольные и поперечные колебания, при этом частицы движутся по замкнутым эллиптическим траекториям скорость (C_n), самая низкая, в сталях приближенно выполняется соотношение:

$$C_n = 0,96 \cdot C_t.$$

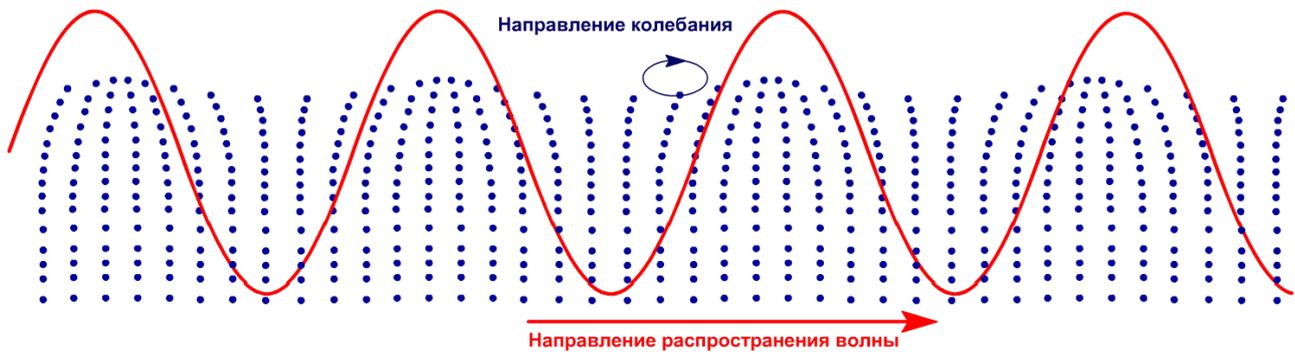


Рис. 1.11 – Схема распространения поверхностные волны

В общем случае в одном материале всегда выполняется соотношение:

$$C_l > C_t > C_n$$

2 ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

2.1 Акустическое поле

В ультразвуковом контроле в большинстве практических задач принимается прямолинейный закон распространения акустических волн. Для описания акустического поля волны применяют понятия: фронт и луч (рис. 2.1). Луч волны – прямая линия, вдоль которой распространяется волна, фронт волны – поверхность все точки которой колеблются в одной фазе.

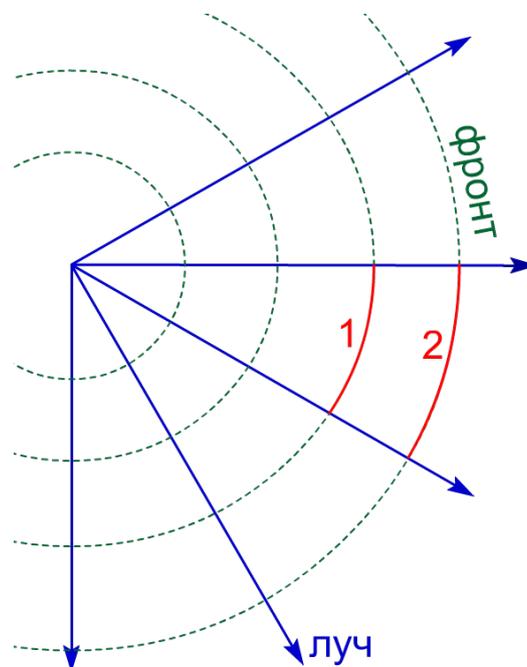


Рис. 2.1 – Акустическое поле волны

В процессе распространения волны лучи расходятся, площадь фронта

увеличивается. На рис. 2.1 показано, что площадь поверхности фронта 2 больше, чем у фронта 1. Так как площадь увеличивается, а количество энергии при этом остается величиной постоянной, следовательно, амплитуда уменьшается. Это один из основных механизмов уменьшения амплитуды волны, связанный с расхождением лучей.

Понятия луч и фронт широко применяются для построения схем прозвучивания объектов контроля. На рис. 2.2 приведена схема прозвучивания сварного шва наклонным преобразователем. Акустическая волна показана центральным лучом. Контроль шва проводится в двух положениях преобразователя:

- 1 – контроль верхней части шва отраженным от донной поверхности лучом;
- 2 – контроль нижней части шва прямым лучом.

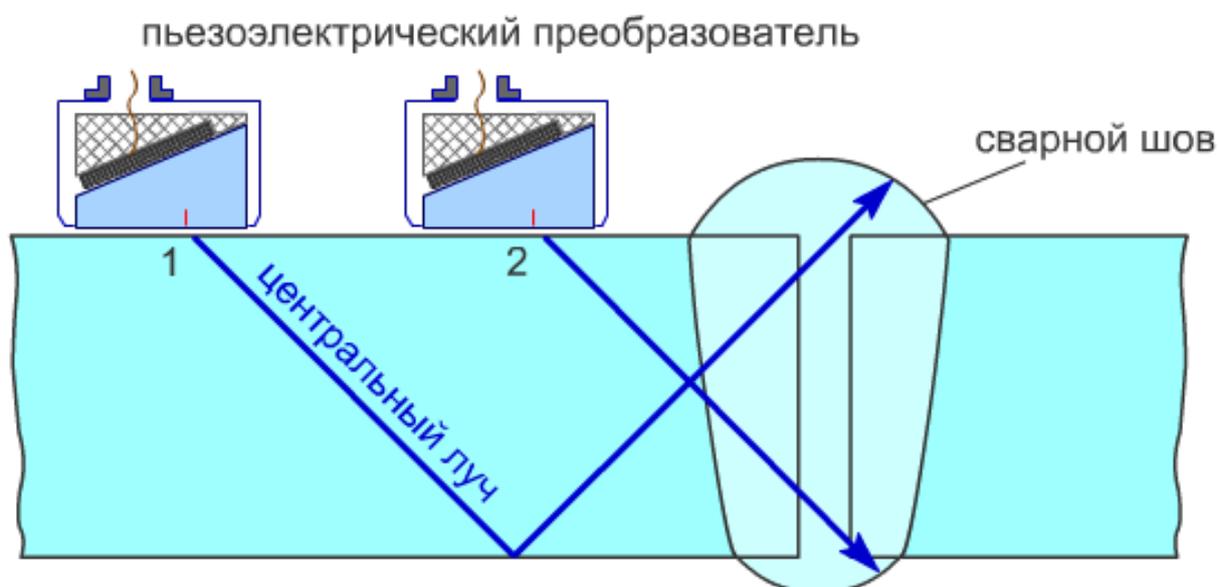


Рис. 2.2 – Схема прозвучивания сварного шва наклонным пьезоэлектрическим преобразователем

Построение и анализ схемы прозвучивания позволяет определить расположение и ориентацию выявляемых дефектов, зону контроля и т.д.

Различают следующие фронты волны: плоский, цилиндрический и сферический. У волны с плоским фронтом ультразвуковые лучи параллельны, площадь фронта не увеличивается, поэтому амплитуда волны остается постоянной. У волн с цилиндрическим и сферическим фронтами лучи расходятся, фронт увеличивается, поэтому амплитуда волны при распространении волны уменьшается. Плоский фронт имеют волны в стержнях, цилиндрическим фронтом – поверхностные или волны в пластинах, сферический продольный и поперечные волны массивных образцах.

Расхождение волны от источника приводит к уменьшению амплитуды эхо-импульсов, отраженных от дефектов. При этом, чем дальше от преобразователя расположен дефект, тем меньше регистрируемая дефектоскопом амплитуда эхо-импульса.

2.2 Затухание

Затуханием называют процесс уменьшения амплитуды волны, связанный с поглощением и рассеянием в материале объекта контроля. Коэффициент затухания определяется свойствами материала.

Поглощение – это прямой переход энергии волны в тепловую энергию (нагрев объекта контроля) за счет внутреннего трения, теплопроводности среды и так далее. Поглощение ультразвука преобладает над рассеянием в газах, жидкостях и однородных твердых телах. В процессе контроля основным механизмом затухания в контактной жидкости и в материале призмы, протектора является поглощение. Поглощение возрастает при увеличении вязкости жидкости. Если наклон поверхности объекта позволяет для обеспечения акустического контакта рекомендуется использовать менее вязкие жидкости.

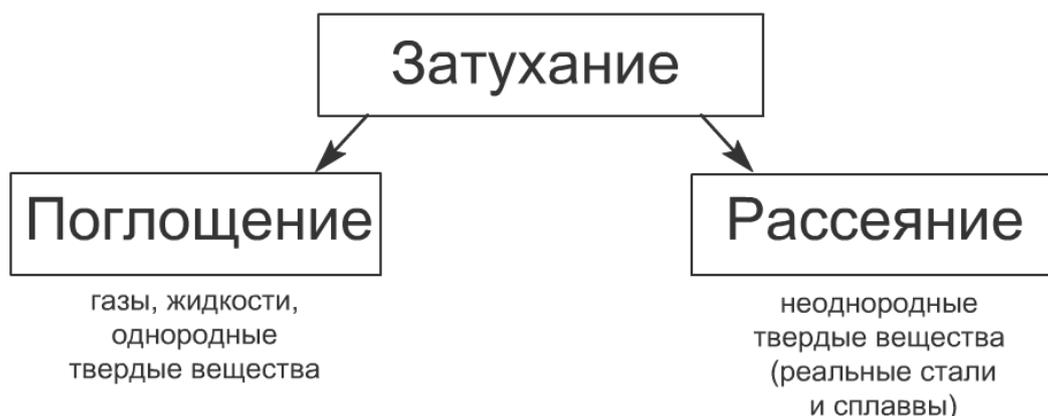


Рис. 2.3 – Составляющие затухания

Рассеяние акустических волн возникает на структурных неоднородностях среды. Реальные стали и сплавы имеют зернистую структуру, образующуюся на этапе кристаллизации (затвердевания). Размер зерна зависит от многих факторов: скорости охлаждения, химического состава, термообработки, механической обработки и так далее.

При распространении акустической волны в структурно-неоднородной среде (Рис. 2.4) на границах зерен возникают хаотично рассеянные волны, которые уносят часть энергии основной волны. Амплитуда волны при этом уменьшается.

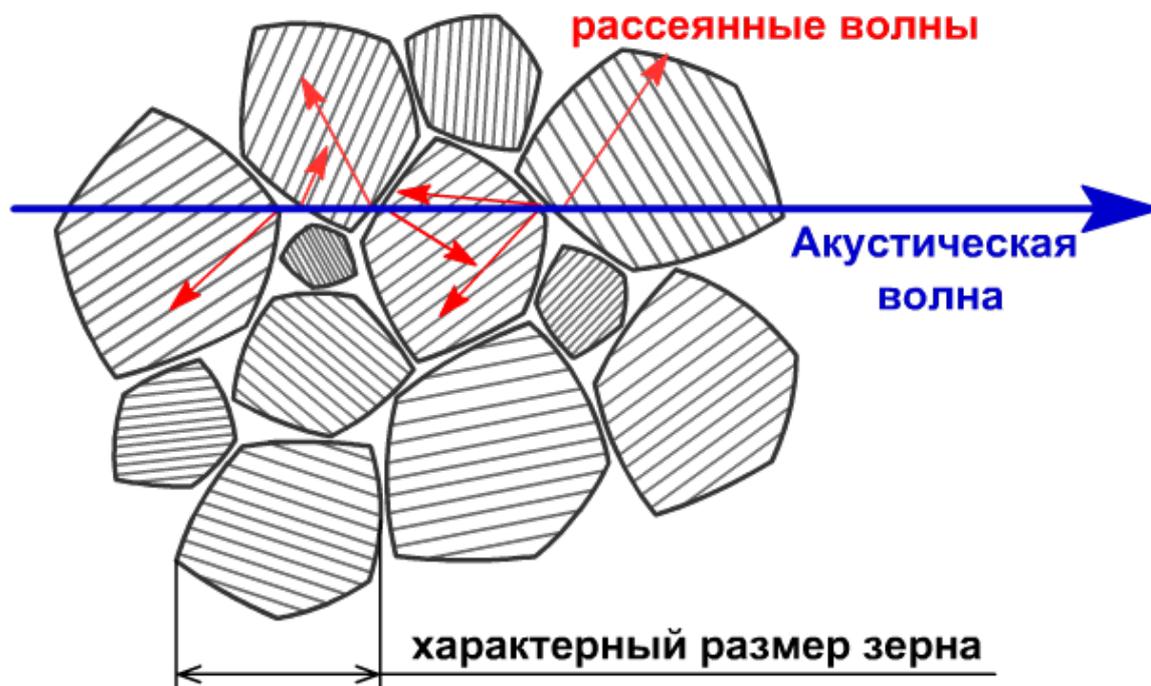
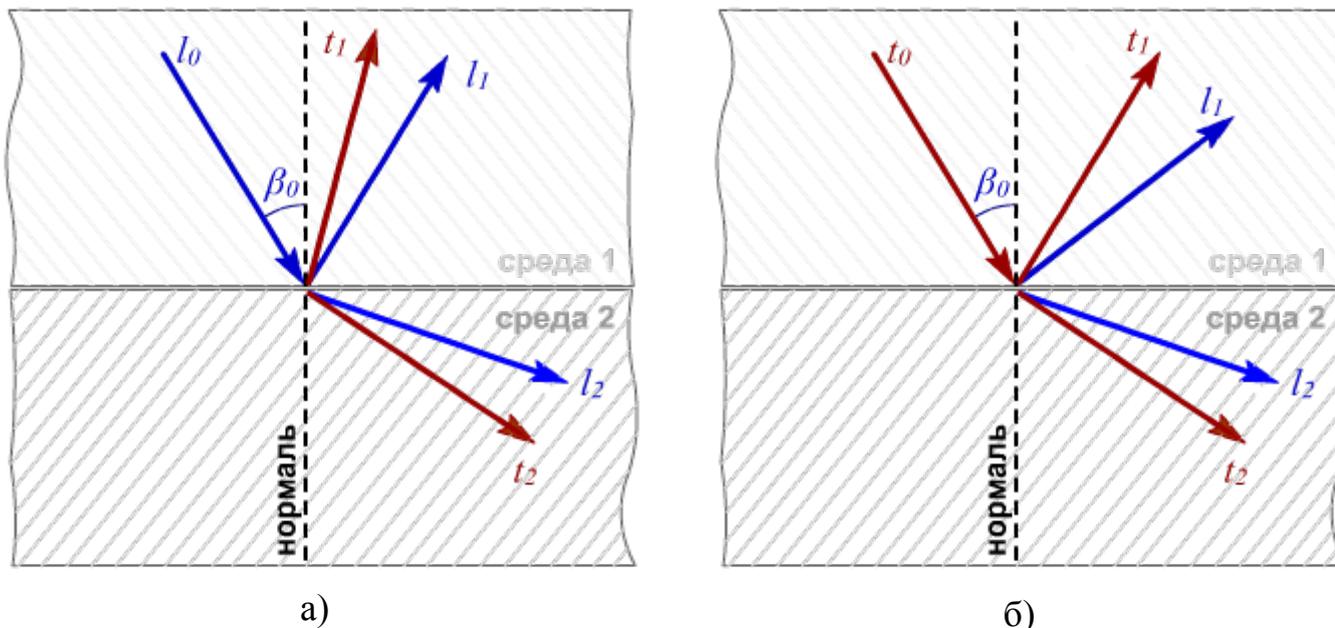


Рис. 2.4 – Иллюстрация рассеяния акустических волн

2.3 Взаимодействие волны с границей раздела сред

Падение волны на границу раздела сред сопровождается тремя основными процессами (рис. 2.5): отражением, преломлением и трансформацией. При отражении от границы возникает волна того же типа, распространяющаяся обратно в первую среду. Преломление приводит к изменению направления распространения волны во второй среде. Трансформация вызывает появления в первой и второй средах волн другого типа, отличного от типа падающей волны.



а) б)
Рис. 2.5 – Схемы падения продольной (а) и поперечной (б) волны на границу раздела сред

На рис. 2.5, а показано падение продольной волны на границу раздела сред, при котором возникают:

- l_0 – падающая продольная волна;
- l_1 – отраженная продольная волна;
- l_2 – преломленная продольная волна;
- t_1 – трансформированная отраженная поперечная волна;
- t_2 – трансформированная прошедшая поперечная волна.

На рис. 2.5, б показано падение поперечной волны на границу раздела сред, при котором возникают:

- t_0 – падающая поперечная волна;
- t_1 – отраженная поперечная волна;
- t_2 – преломленная поперечная волна;
- l_1 – трансформированная отраженная продольная волна;
- l_2 – трансформированная прошедшая продольная волна.

Углы падения, преломления и отражения связаны друг с другом законом Снеллиуса. Следствиями этого закона являются следующие утверждения:

- угол падения равен углу отражения;
- чем больше скорость волны, тем больше угол к нормали;
- продольные волны отражаются и преломляются под большими углами к нормали,

чем поперечные.

2.4 Связь процессов отражения, преломления и трансформации с углом падения продольной волны

Волновые процессы на границе раздела сред определяют закономерности прохождения волн из преобразователя в объект контроля и обратно. На рис. 2.6 схематично показан наклонный преобразователь, установленный на объект контроля. Под действием электрического сигнала, вырабатываемого дефектоскопом, пьезопластина совершает колебания, в процессе которых изменяется ее толщина. В призме преобразователя возбуждается акустическая волна продольного типа, падающая на границу раздела с объектом контроля под некоторым углом к нормали.



Рис. 2.6 – Схема прохождения волны из призмы преобразователя в объект контроля

В зависимости от угла падения в объект контроля проникают только продольные волны, продольные и поперечные, только поперечные или поверхностные волны.

При падении продольной волны на границу раздела сред по нормали (рис. 2.7, а) $\beta_0 = 0^\circ$ поперечные волны не возникают, а отраженные и прошедшие волны так же распространяются по нормали.

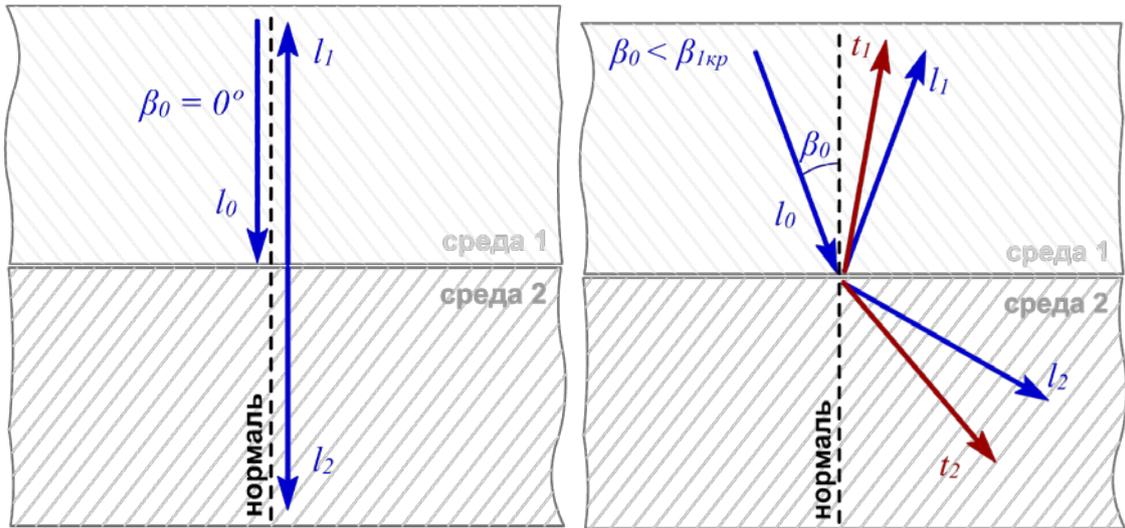
Увеличение угла падения продольной волны (рис. 2.7, б) $\beta_0 > 0$ приводит к появлению прошедших и отраженных поперечных волн. В каждой среде распространяются две волны, причем углы распространения продольных волн больше

углов распространения поперечных.

Первым критическим углом (рис. 2.7, в) называют минимальный угол падения продольной волны, при котором продольная волна во вторую среду не проникает. При углах падения близких к первому критическому по границе распространяется неоднородная головная-продольная волна, которая быстро затухает, переизлучая боковые поперечные волны. Для границы оргстекло-сталь первый критический угол равен $\beta_{1кр} = 27^\circ$.

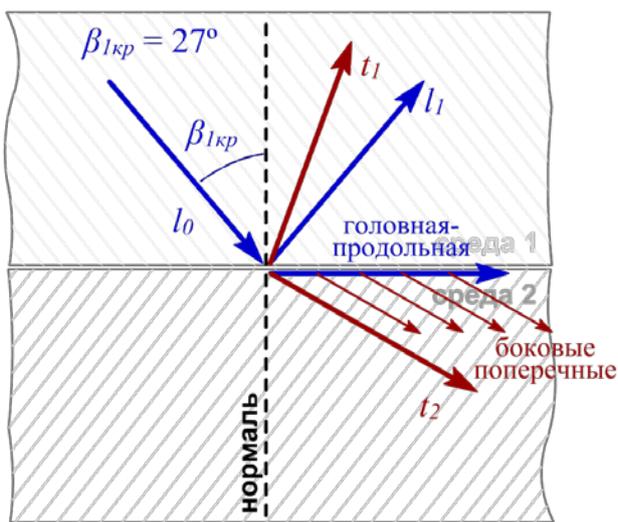
При падении продольной волны под углом к нормали больше первого, но меньше второго критического угла, во вторую среду проникает только поперечная волна (рис. 2.7, г). Это дает возможность проводить контроль объекта только поперечными волнами.

Вторым критическим углом (рис. 2.7, д) называют минимальный угол падения продольной волны при котором поперечная волна во вторую среду не проникает. При углах падения близких ко второму критическому по границе распространяется неоднородная головная-поперечная волна, которая быстро затухает. Для границы оргстекло-сталь второй критический угол равен $\beta_{2кр} = 55^\circ$. При углах больше второго критического (рис. 2.7, е) объемные волны (продольные и поперечные) во вторую среду не проникают.

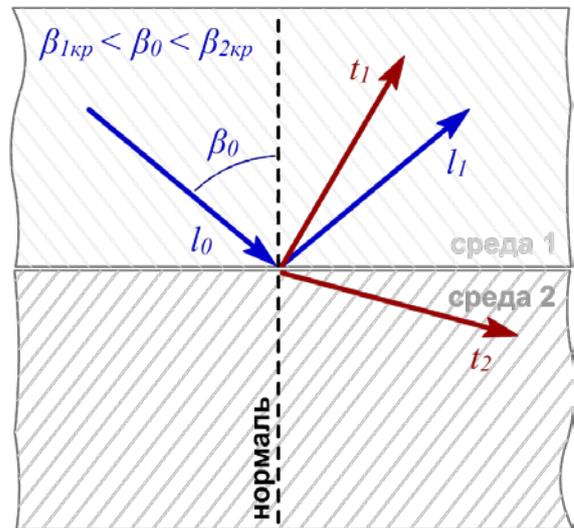


а)

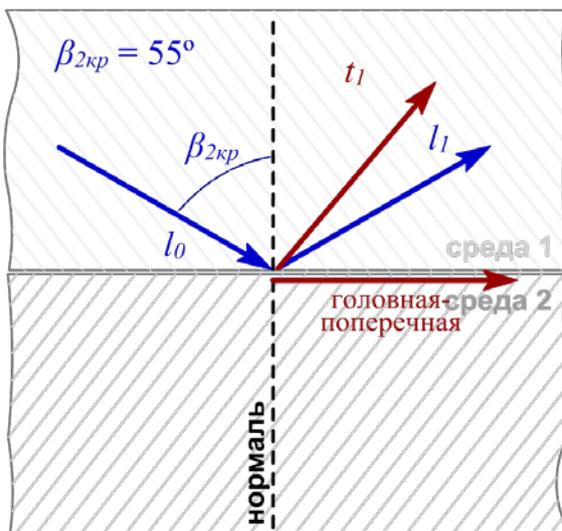
б)



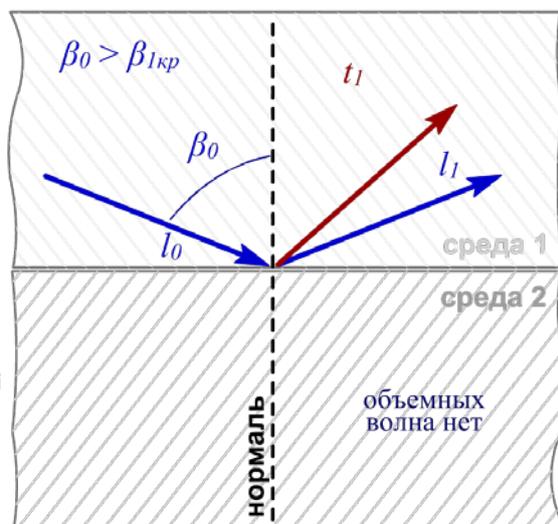
в)



г)



д)



е)

Рис. 2.7 – Схема падения продольной волны на границу под углом β_0 иллюстрирует первый и второй критические углы

Поверхностная волна возникает на границе второй среды при падении на нее продольной волны под углом $\beta_0 \approx 59^\circ$ (рис. 2.8).

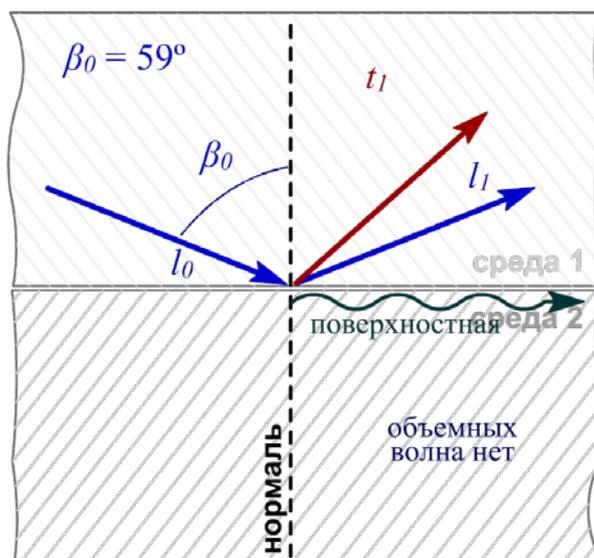


Рис. 2.8 – Схема падения продольной волны на границу под углом β_0 , иллюстрирует возбуждение поверхностной волны

Рассмотрим падение поперечной волны на границу раздела сред, например, стали с воздухом. При углах падения меньше третьего критического $\beta_0 < \beta_{3кр}$ (рис. 2.9, а) от границы отражаются две волны: продольная и поперечная.

Третьи критическим углом (рис. 2.9,б) называют угол падения поперечной волны при котором исчезает отраженная продольная волна. При угла близких к третьему критическому по границе распространяется неоднородная головная-продольная волна (аналогично первому критическому углу), которая быстро затухает, переизлучая боковые поперечные волны. Для стали третий критический угол равен $\beta_{3кр} = 34^\circ$.

При углах больше третьего критического угла $\beta_0 > \beta_{3кр}$ от границы отражается только поперечная волна (рис. 2.9, в).

В рассмотренных выше примерах отражения, преломления и трансформации приведен только один центральный луч. На практике на границу раздела сред падает пучок лучей. Для волн с плоским фронтом все лучи будут взаимодействовать с границей одинаково, поэтому описанные выше процессы остаются справедливыми.

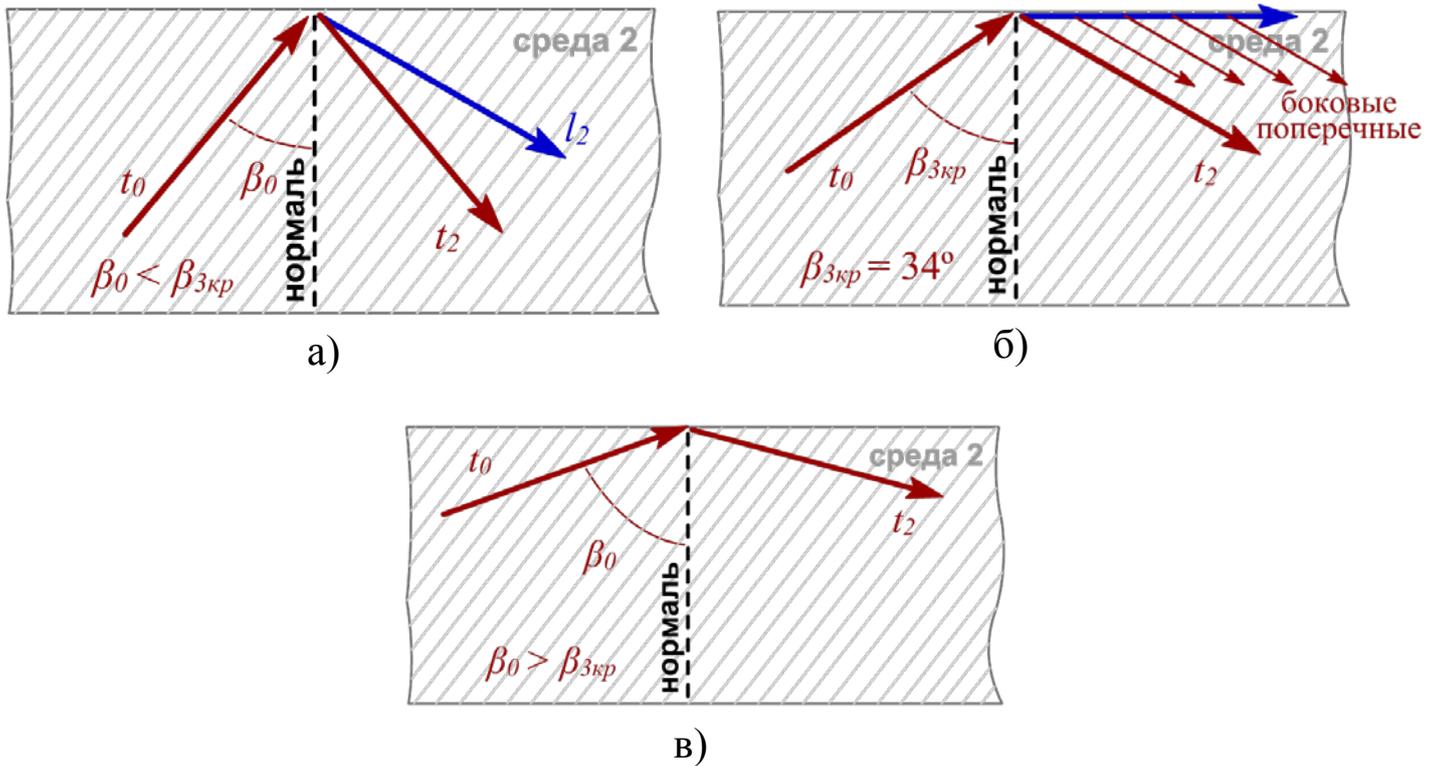


Рис. 2.9 – Схема падение поперечной волны на границу под углом β_0 иллюстрирует третий критический угол

2.5 Диффузное и зеркальное отражение и преломление

Шероховатость и неровность границы раздела сред может исказить общую картину прохождения и отражения волн.

Поверхность считается зеркальной (рис. 2.10, а), если ее шероховатость существенно меньше длины волны:

$$\lambda \ll Rz,$$

где λ – длина волны, Rz - шероховатость поверхности.

В этом случае волна практически не взаимодействует с неровностями среды. Падающий параллельный пучок лучей отражается и преломляется в виде параллельных пучков (рис. 2.10, а).

Поверхность является диффузной, если ее шероховатость сравнима с длиной волны:

$$\lambda \approx Rz.$$

Отраженное и прошедшее излучение является диффузным, параллельный пучок хаотично рассеивается на неровностях среды. происходит рассеяние волны во всех направлениях.

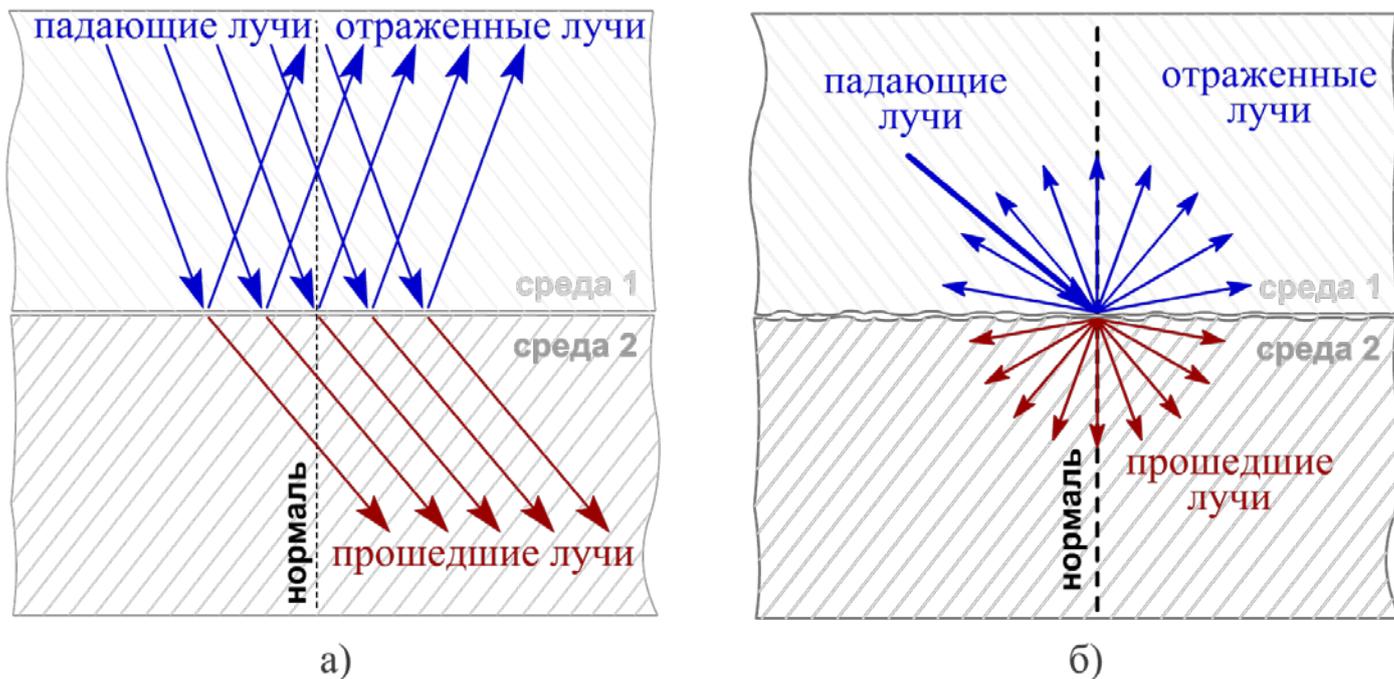


Рис. 2.10 – Схематичное изображение зеркального (а) и диффузного (б) отражения и преломления

Оптимальной шероховатостью поверхности для контроля прямым преобразователем является $Rz = 10..20$ мкм, наклонным – $Rz = 20..40$ мкм.

3 ПРИЕМ И ИЗЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Ультразвуковые дефектоскопы регистрируют, измеряют, обрабатывают и сохраняют электрические сигналы. В объекте контроля распространяются, отражаются от дефектов и границ ультразвуковые волны. Для организации контроля необходим элемент (Рис. 3.1), преобразующий электрические сигналы дефектоскопа в акустические колебания объекта контроля и обратно.

В настоящее время наиболее эффективные и надежные преобразователи создают на основе материалов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом.

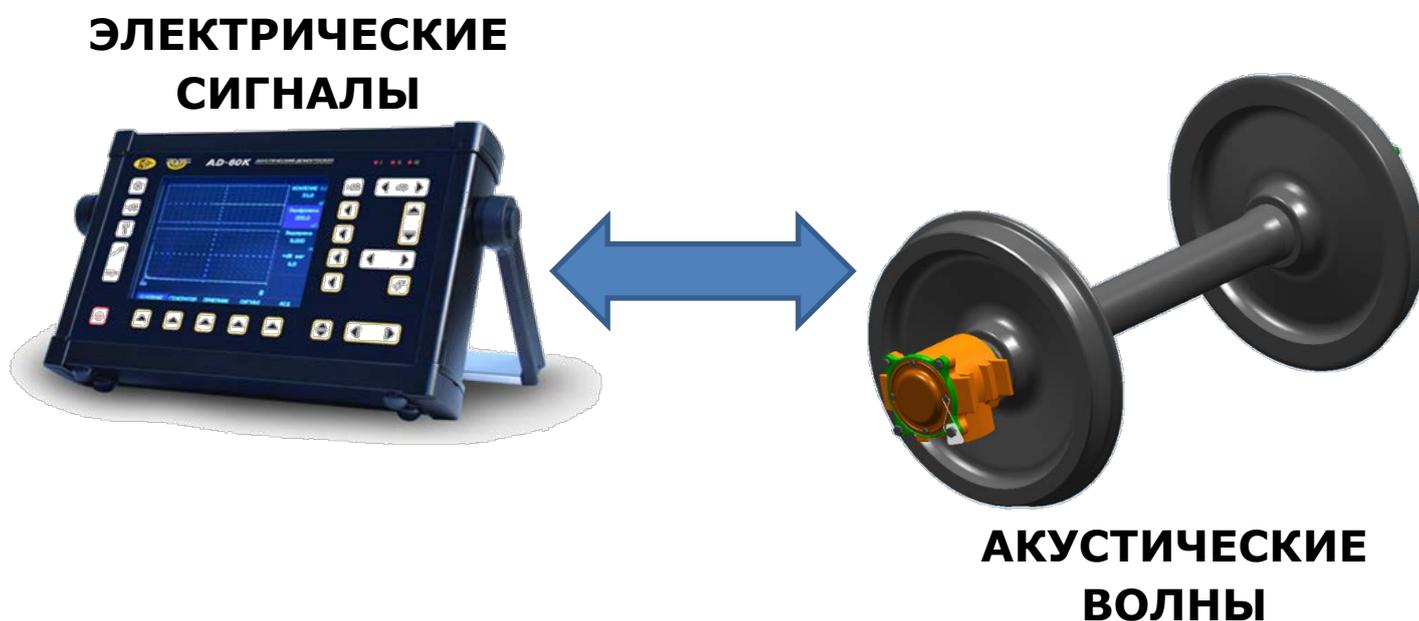


Рис. 3.1 – Преобразование дефектоскопа и объекта контроля

3.1 Пьезоэлектрический эффект

Пьезоэлектрическим эффектом прямым и обратным обладают материалы из класса диэлектриков, которые называют пьезоэлектриками.

Прямой пьезоэлектрический эффект – это преобразование акустических колебаний в электрический сигнал используется для регистрация акустических волн.

Обратный пьезоэлектрический эффект – это преобразование электрического сигнала в акустические колебания используется для излучения акустических волн.

Пьезоэлектрическим эффектом прямым и обратным обладают материалы из класса диэлектриков – пьезоэлектрики.

3.2 Конструкция пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП)

Наибольшее распространение получили ПЭП трех конструкций:

- прямой совмещенный (рис. 3.2, а);
- наклонный совмещенный (рис. 3.2, б);
- прямой раздельно-совмещенный (рис. 3.2, в)

Общими элементами для всех ПЭП являются:

- 1 – электрические выводы соединяют грани пьезопластины с разъемом (2) на корпусе (3);
- 2 – разъем предназначен для подключения ПЭП к дефектоскопу с помощью коаксиального кабеля;
- 3 – корпус обеспечивает целостность конструкции и защиту ПЭП;
- 4 – демпфер, изготовленный из материала поглощающего ультразвуковые колебания, приклеивается к пьезопластине и гасит ее свободные колебания;

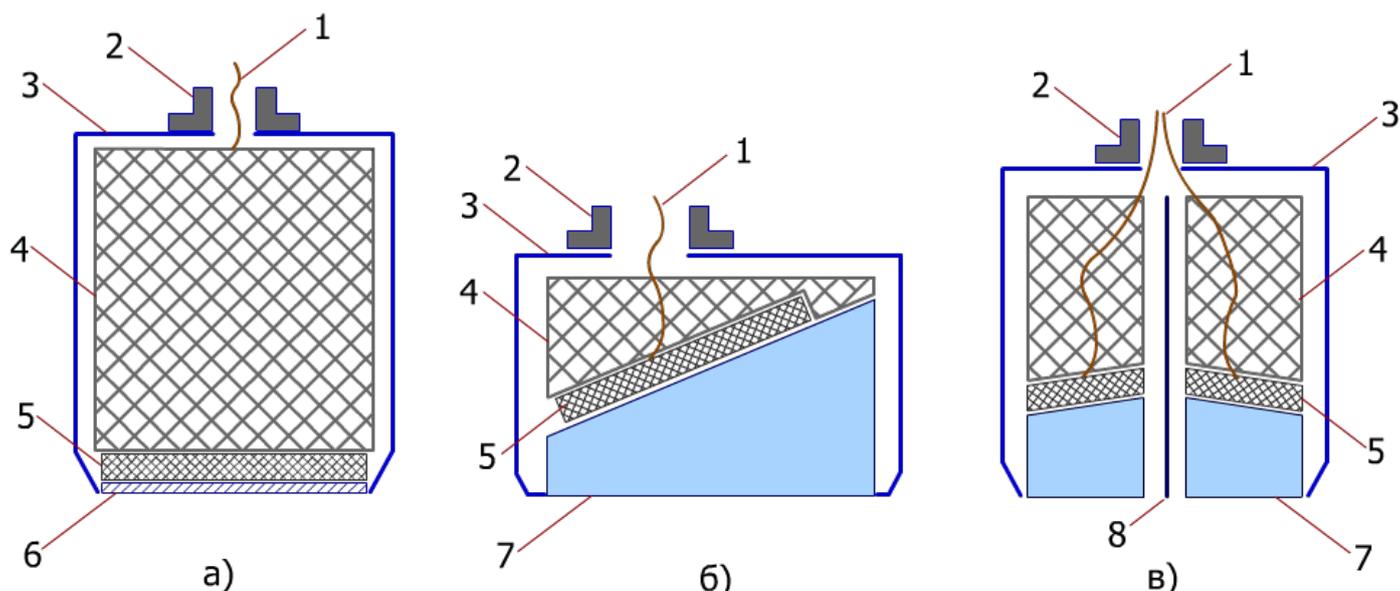


Рис. 3.2 – Конструкция ПЭП: а – прямой совмещенный, б – наклонный совмещенный, в – прямой раздельно-совмещенный

5 – пьезопластина преобразует акустические колебания в электрический сигнал и обратно;

6 – протектор прямого ПЭП расположен между объектом контроля и пьезопластиной и предназначен для ее защиты;

7 – призма наклонного преобразователя обеспечивает на границе с объектом

контроля трансформацию продольных волн в поперечные и их наклонный ввод;

8 – экран в раздельно-совмещенном преобразователе предотвращает прохождение ультразвука напрямую от источника к приемнику.

Прямой совмещенный ПЭП (рис. 3.3, а) излучает и принимает продольные волны, которые распространяются вдоль нормали к поверхности перпендикулярно поверхности ввода.

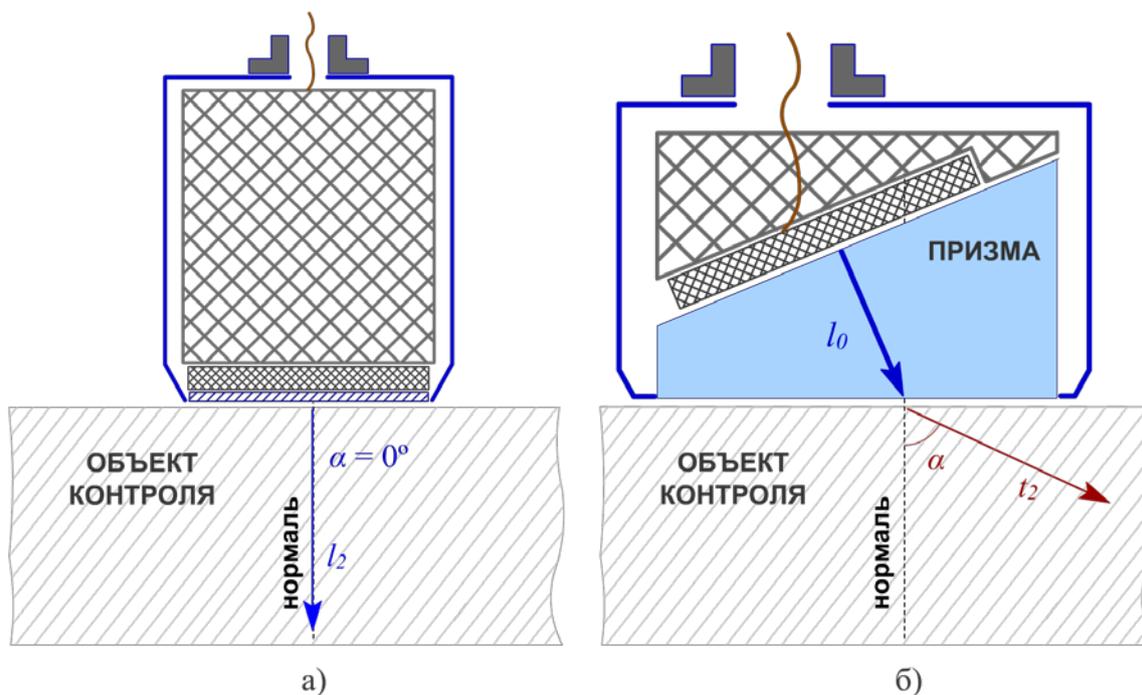


Рис. 3.3 – Схема ввода ультразвуковых волн наклонным преобразователем

Наклонный совмещенный ПЭП (рис. 3.3, б) излучает и принимает поперечные волны, которые распространяются под углом α к нормали. Наклонный ввод поперечных волн обеспечивается с помощью призмы. Пьезопластина возбуждает в призме продольные волны, которые падают на границу раздела с объектом контроля под углом больше первого, но меньше второго критического. В такой ситуации в объект контроля проходят только поперечные волны, угол их распространения зависит от угла призмы.

3.3 Чувствительность ПЭП

Чувствительность ПЭП характеризуется коэффициентом преобразования. Для преобразователей работающих на прием и излучение можно определить коэффициенты излучения и приема.

Коэффициент излучения равен отношению амплитуды излучаемой волны к амплитуде электрического сигнала (зондирующего импульса):

$$K_{II} = \frac{\Delta x_{\max}}{U_{\max}}$$

Коэффициент приема равен отношению амплитуды регистрируемого электрического импульса (эхо-, донного) к амплитуде принимаемой акустической волны:

$$K_{PI} = \frac{U_{\max}}{\Delta x_{\max}}$$

На практике наибольшее распространение получил коэффициент двойного преобразования, равный отношению амплитуды электрического сигнала на приемнике (эхо-, донного импульса) к амплитуде электрического сигнала подаваемого на источник (зондирующего импульса):

$$K_{UU} = \frac{U_n}{U_u}.$$

Оценку коэффициента двойного преобразования можно выполнить по отдельной схеме (рис. 3.4, а), установив на объект источник и приемник или по совмещенной схеме (рис. 3.4, б). В совмещенной схеме ПЭП является источником и приемником одновременно.

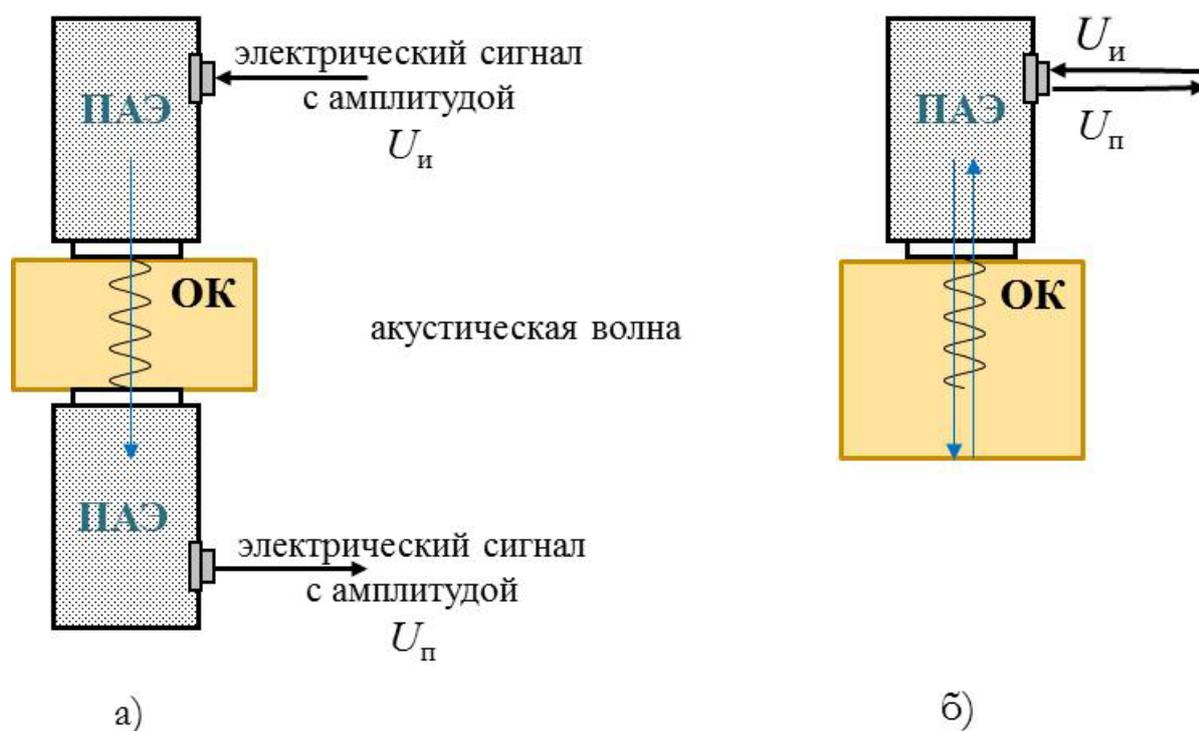


Рис. 3.4 – Общая схема измерения коэффициента двойного преобразования

3.4 Резонансная частота ПЭП

Чувствительность (коэффициент преобразования) ПЭП зависит от частоты принимаемых и излучаемых сигналов. ПЭП способен эффективно преобразовывать сигналы только в ограниченной полосе частот. Сигналы с другими частотами преобразуются в сигналы с незначительной амплитудой, ниже порога чувствительности дефектоскопа.

В ультразвуковом контроле используются резонансные преобразователи, которые имеют резкий максимум чувствительности на определенной частоте. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рис. 3.5) резонансного преобразователя является колоколообразной.

Максимальный коэффициент преобразования K_{max} наблюдается на резонансной частоте f_p , которая близка к собственной частоте свободных колебаний пьезопластины:

$$f_p \approx f_c = \frac{c}{2 \cdot h},$$

где C – скорость волны в пьезопластине, м/с; h – толщина пьезопластины, м.

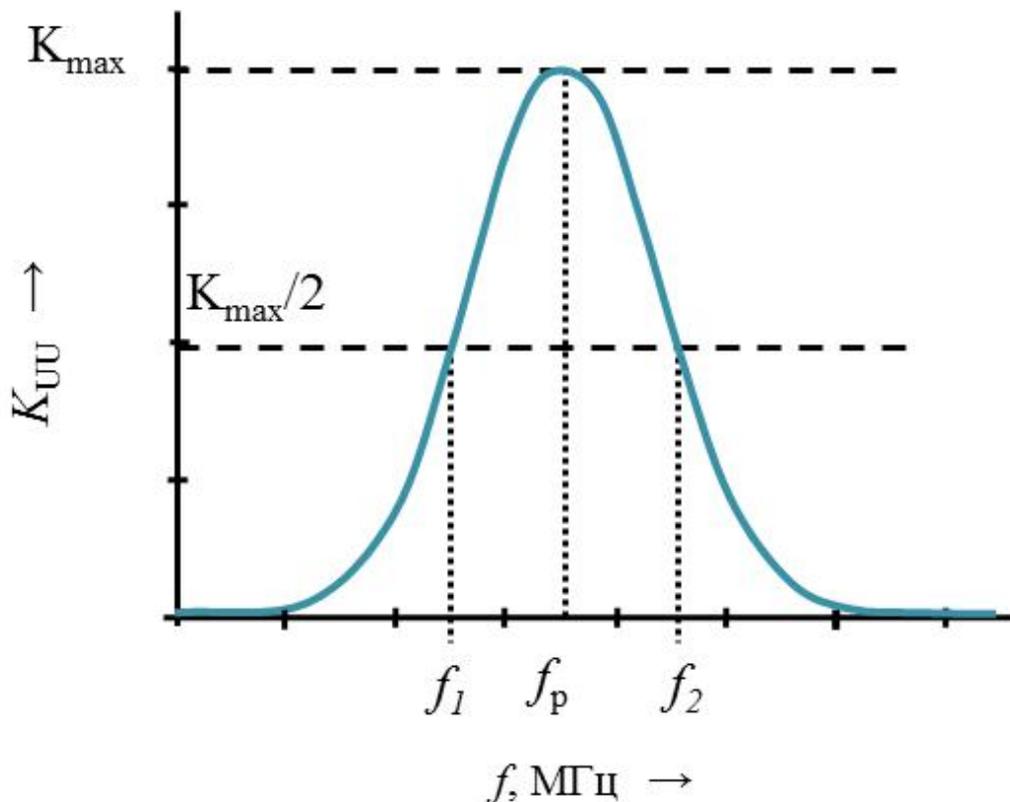


Рис. 3.5 – Амплитудно-частотная характеристика ПЭП

Резонансная частота в первую очередь зависит от толщины пластины и указывается в маркировке на ПЭП. Современные дефектоскопы дают возможность оператору изменять частоту излучаемых и принимаемых сигналов. При подготовке к контролю необходимо установить в настройках дефектоскопа частоту, соответствующую выбранному ПЭП

На рис. 3.5 показана АЧХ ПЭП, на резонансной частоте f_p наблюдается максимальный коэффициент двойного преобразования. На частотах f_1 и f_2 коэффициент преобразования составляет половину максимального, на 6 дБ меньше.

3.5 Акустическое поле ПЭП

Излучаемые ПЭП волны распределены в пространстве неравномерно. Для описания углового распределения энергии волны вводят понятие акустического поля. Акустические поля вблизи ПЭП и на удалении от него существенно отличаются.

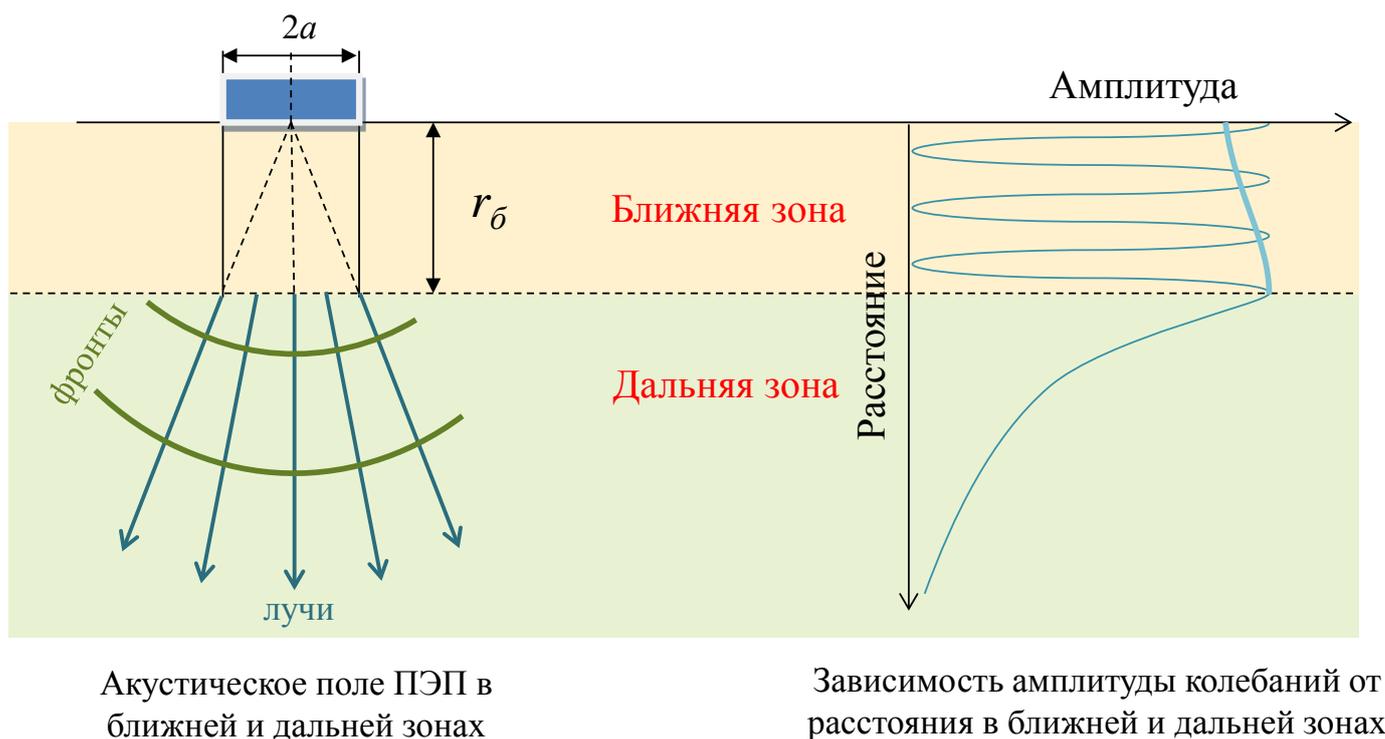


Рис. 3.6 – Ближняя и дальняя зона ПЭП

Ближняя зона (рис. 3.6) – это область объекта контроля вблизи источника волны, в которой наблюдается немонотонное изменение амплитуды колебаний (стоячих волн), связанное с интерференция волн от разных частей ПЭП.

Дальняя зона (рис. 3.6) – это область ОК вдали от источника волны в которой

распространяется бегущая волна с цилиндрическим (сферическим) фронтом. Амплитуда волны монотонно убывает из-за расхождения лучей от источника.

В дальней (волновой) зоне угловое распределение амплитуды волны описывается диаграммой направленности (рис. 3.7). На диаграмме направленности выделяют основной лепесток (85% всей энергии излучения) и боковые лепестки (15% всей энергии излучения). Технологию контроля разрабатывают таким образом, что бы дефекты выявлялись основным лепестком.

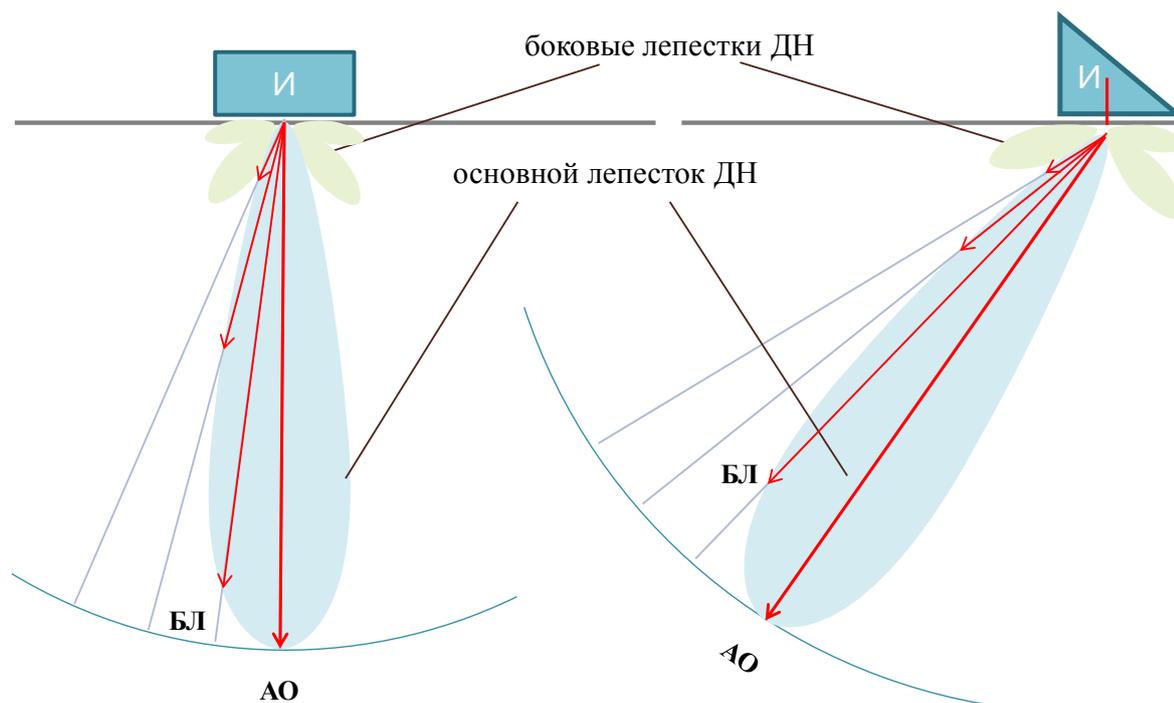


Рис. 3.7 – Диаграмма направленности прямого и наклонного ПЭП

Угловое распределение амплитуд (рис. 3.7) имеет максимум в направлении акустической оси, амплитуда боковых лучей убывает при удалении от нее. Максимальная амплитуда от ненаправленного округлого отражателя будет наблюдаться в положении отражателя на акустической оси.

Диаграмму направленности принято характеризовать двумя параметрами: углом наклона акустической оси и углом раскрытия диаграммы направленности (рис. 3.8).

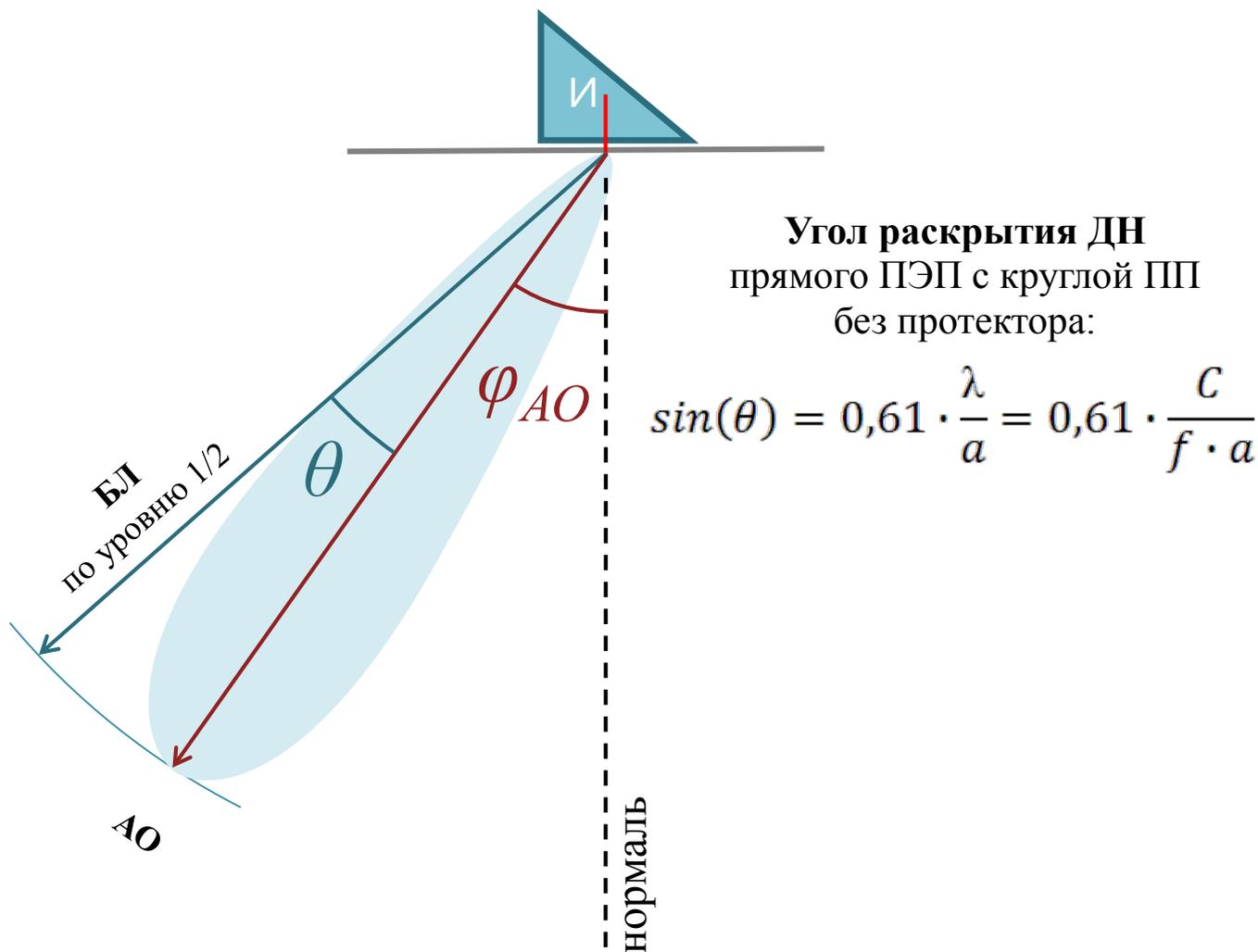


Рис. 3.8 – Параметры диаграммы направленности

Угол наклона акустической оси $\varphi_{АО}$ (рис. 3.8) определяется углом призмы и отношением скоростей волн в призме и в объекте контроля.

Угол раскрытия диаграммы направленности θ (рис. 3.8) зависит от длины волны в объекте контроля, радиуса пьезопластины, угла призмы, скоростей ультразвуковых волн.

Широкая диаграмма направленности с большим углом раскрытия имеет преимущества на этапе поиска дефектов, так как позволяет озвучивать значительные объемы материала.

Узкая диаграмма направленности позволяет проводить измерения координат дефектов, оценивать их форму и размеры с меньшей погрешностью. Это достигается за счет возможности установить более точно преобразователь в положение максимальной амплитуды.

На практике для настройки дефектоскопа используют следующие параметры

преобразователя: точка выхода луча, время ПЭП, угол ввода, погрешность глубиномера дефектоскопа.

Точка выхода луча (рис. 3.9) – это условная точка на поверхности преобразователя, из которой выходит расходящийся пучок лучей. Точка выхода луча наклонных ПЭП обозначается на боковой поверхности риску. Контроль точки выхода луча проводят на стандартном образце СО-3 или СО-3Р по боковой цилиндрической поверхности.

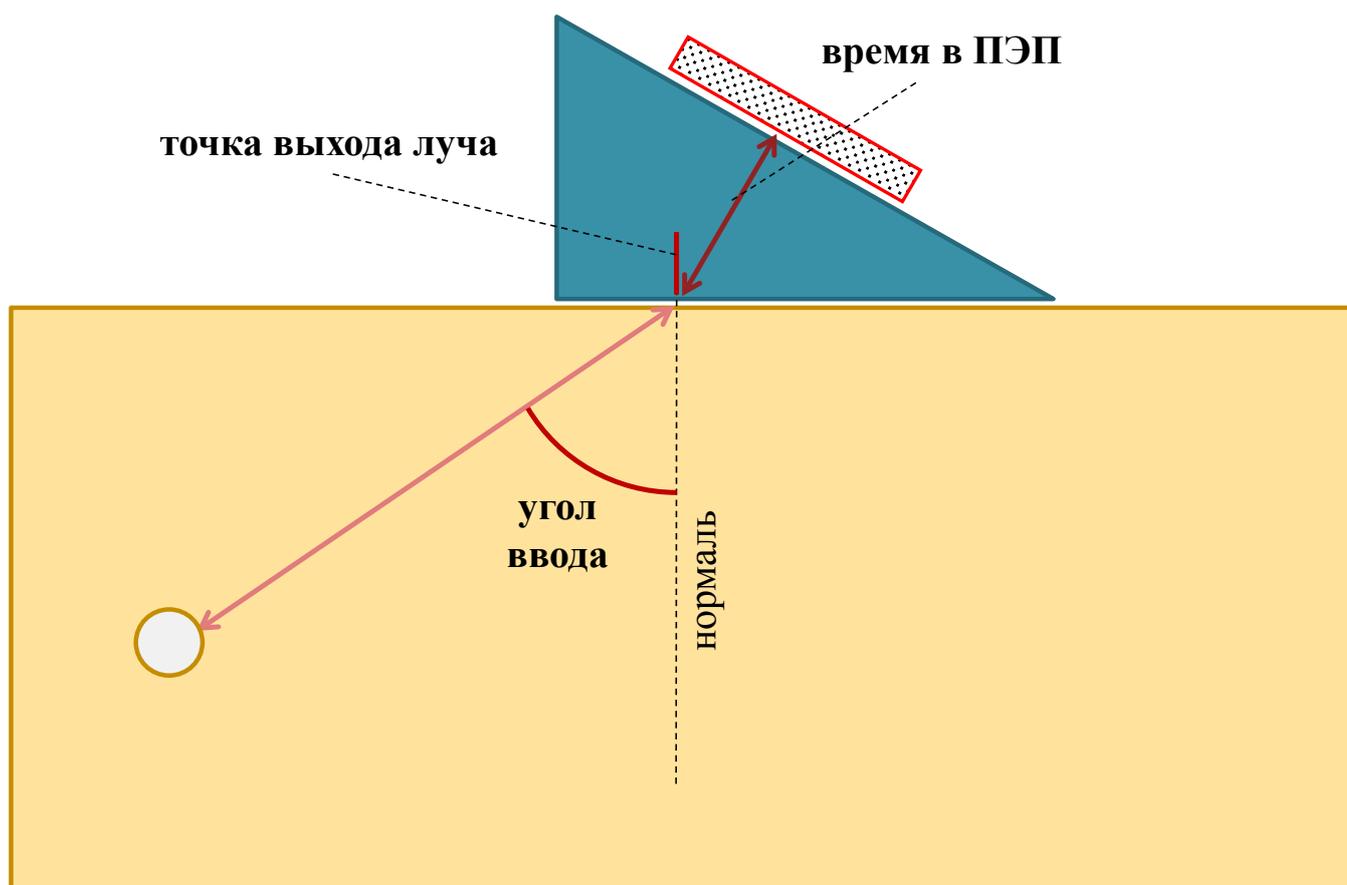


Рис. 3.9 – Параметры ПЭП, используемые для настройки дефектоскопа

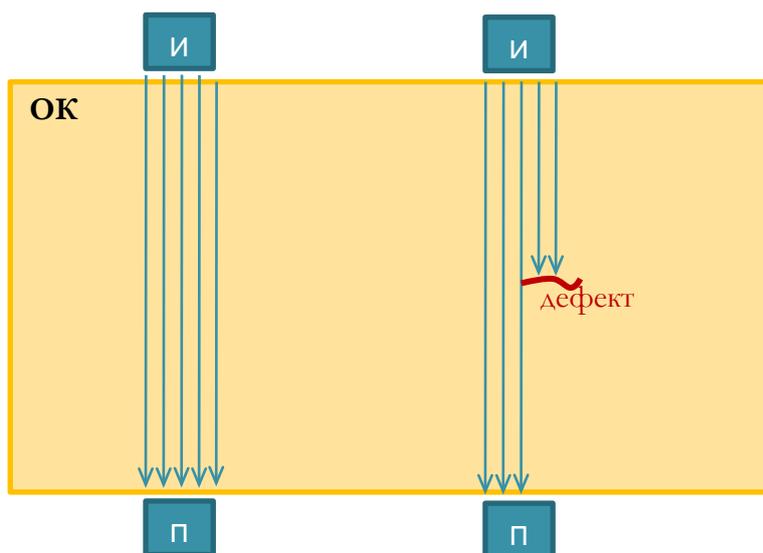
Время ПЭП (рис. 3.9) – это время задержки волны, связанное с распространением волны в призме и протекторе ПЭП. Время ПЭП напрямую влияет на точность определения координат дефектов. Время ПЭП компенсируют при настройке на стандартном образце СО-3 или СО-3Р по боковой цилиндрической поверхности.

Угол ввода (рис. 3.9) – это угол между нормалью к поверхности и линией, соединяющей центр ненаправленного (округлого отражателя) с точкой выхода луча в положении максимальной амплитуды эхо-сигнала от ненаправленного отражателя. Угол ввода указывается в маркировке преобразователя и проверяется при настройке на

стандартном образце СО-2 или СО-3Р по боковому цилиндрическому отверстию диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Угол ввод приблизительно равен углу наклона акустической оси, но всегда меньше его.

4 МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

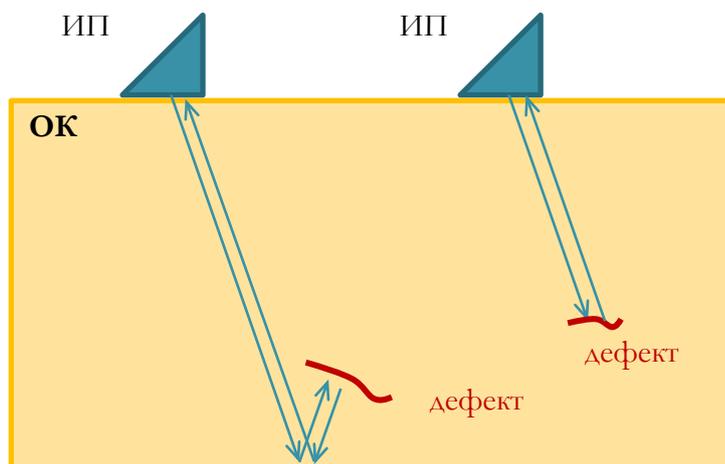
Совокупность приёмов реализации контроля правомерно назвать методом. Методы ультразвукового контроля допустимо разбить на несколько групп, выбранных по единому признаку. К методам прохождения можно отнести методы, основанные на регистрации волн, прошедших в изделии через дефект. Признаком дефекта в этом случае служит уменьшение амплитуды прошедшей волны на приемнике. Как правило, в методах прохождения отсутствует возможность определения глубины залегания дефекта.



И – источник УЗ волн; П – приемник УЗ волн; ОК – объект контроля.

Рис.4.1 – Иллюстрация метода прохождения.

Методы отражения, напротив, основаны на регистрации волн отраженных от дефекта, при этом происходит увеличение амплитуды сигнала воспринимаемого приемником. Этот принцип, положен в основу наиболее популярных методов ультразвукового контроля, поскольку позволяет определять координаты дефекта, и допускает использование одного совмещенного преобразователя.

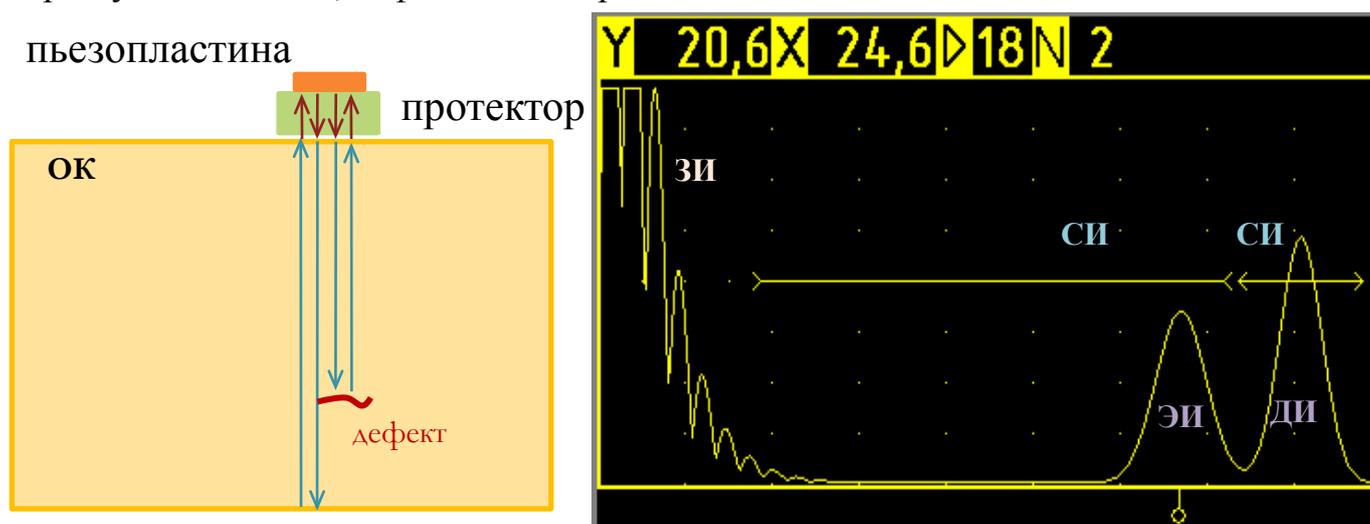


ИП – источник-приемник УЗ волн (совмещенный преобразователь).

Рис.4.2 – Иллюстрация метода прохождения

Сигналы, вырабатываемые и принимаемые дефектоскопом отображаются на его экране в виде А – развертки. В данном типе развертки по оси Y откладывается амплитуда сигнала (в дБ), по оси X – время прохождения волны до отражателя (в мкс). Сигналы, формируемые при реализации метода отражения и прохождения на А-развертке, представлены на рис.4.3.

Электрический сигнал, вырабатываемый дефектоскопом для возбуждения ультразвуковой волны, называется зондирующим импульсом. Его наличие в начале развертки объясняет появление мертвой зоны – области вблизи поверхности ввода ультразвуковой волны, дефекты в которой не выявляются.



ЗИ – зондирующий импульс; ЭИ – эхо-импульс; СИ – строб-импульс; ДИ - донный импульс.

Рис.4.3 – Формирование А-развертки в общем случае

Результат формирования эхо-импульсов – это волны, пришедшие на приемный ПЭП, отразившись от дефектов, конструктивных отражателей (галтелей, отверстий и т.д.). Сигнал, отраженный от дна изделия называется донный импульс. Для выделения интервала времени, в котором дефектоскоп анализирует амплитуду эхо- импульсов по критериям эхо-метода и зеркально-теневого метода (ЗТМ) служит строб-импульс.

На рисунке 4.4 изображены схемы реализации методов прохождения: теневого и зеркально-теневого (ЗТМ), в первом излучатель и приемник находятся на противоположных сторонах, во втором излучатель и приемник находятся на одной поверхности.

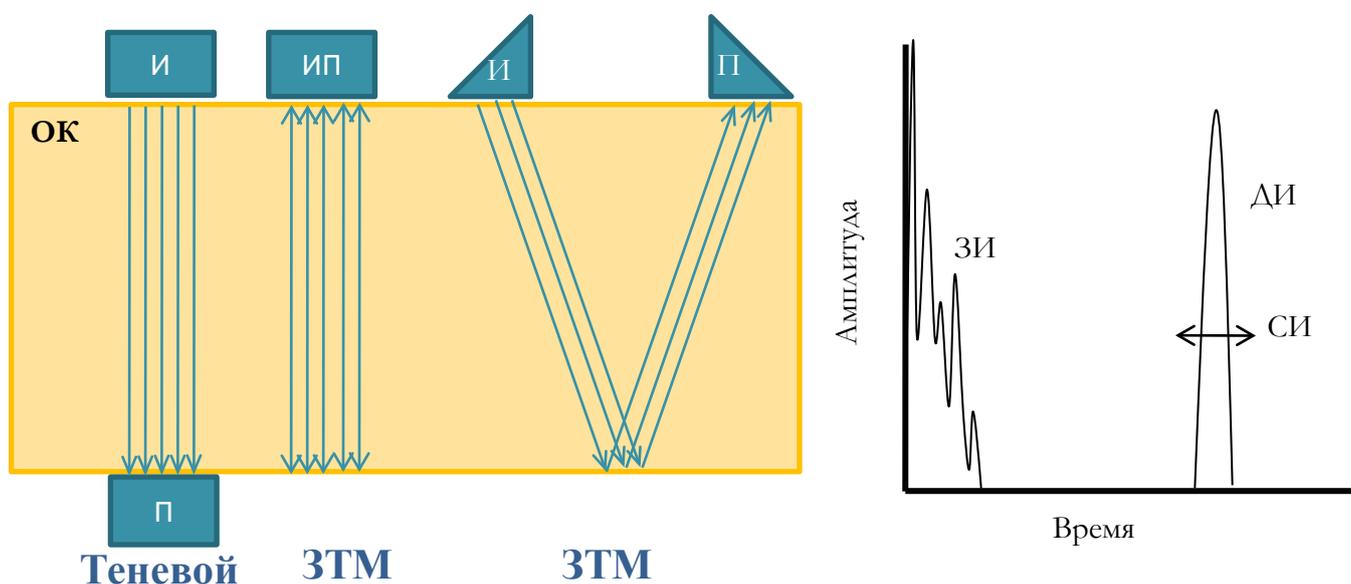


Рис.4.4 – Формирование А-развертки для теневого и зеркально-теневого метода на бездефектном участке

В ЗТМ возможно использовать прямые и наклонные ПЭП, необходимым при этом является условие отражения излученного сигнала от донной поверхности на приемник. В случае отсутствия дефектов пришедшая на приемник излученная волна формирует донный импульс, который превышает пороговый уровень.

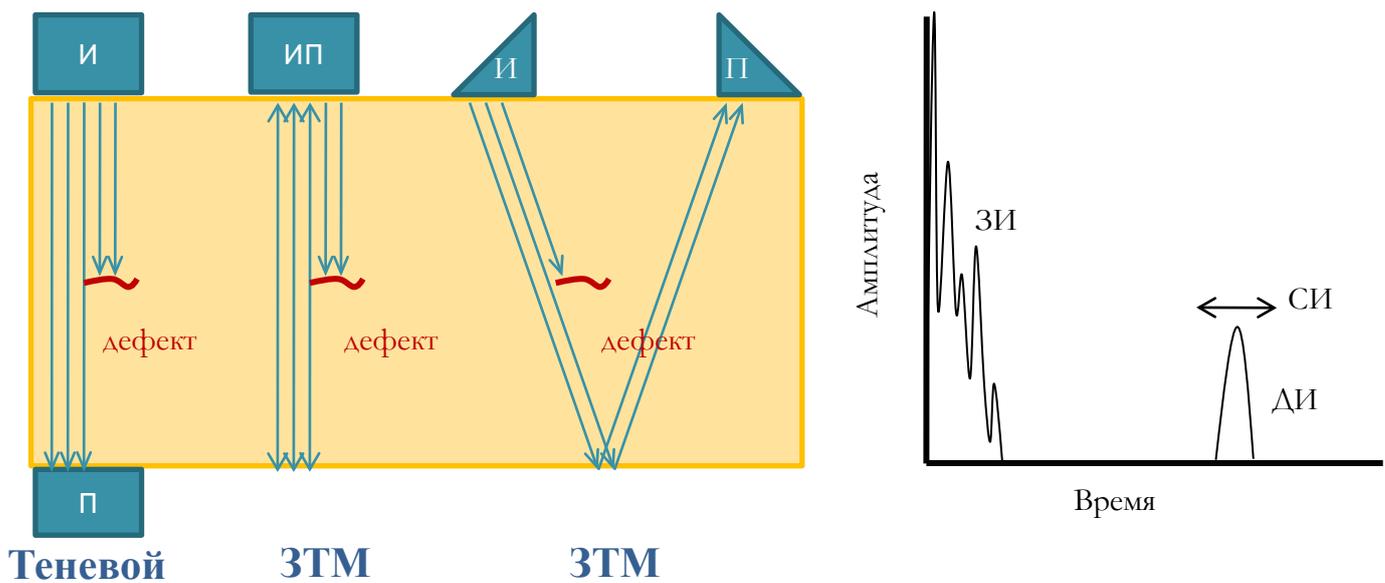


Рис.4.5 - Формирование А-развертки для теневого и зеркально-теневого метода на дефектном участке

Появление дефекта на пути излученной волны значительно ослабляет ее, поэтому при формировании донного сигнала происходит уменьшение его амплитуды. Изменение донного сигнала ниже порогового уровня свидетельствует о наличии дефекта.

Коэффициент выявляемости ЗТМ - показывает, на сколько децибел (во сколько раз) снижается амплитуда донного над дефектом относительно амплитуды донного на бездефектном участке.

$$K_{\text{ЗТМ}} = \frac{\text{А донного над дефектом}}{\text{А донного на бездефектном участке}}$$

При использовании методов прохождения необходимо учитывать множество причин ложного срабатывания дефектов, наиболее весомые из них это:

- отсутствие акустического контакта между ПЭП и поверхностью;
- не параллельность поверхности ввода и донной поверхности;
- изменение толщины изделия;
- состояние донной поверхности;
- затухание.

Методы отражения считаются более совершенными и подходящими для различных

задач диагностики. Поэтому эхо-метод используется практически в 90% случаях применения ультразвукового контроля.

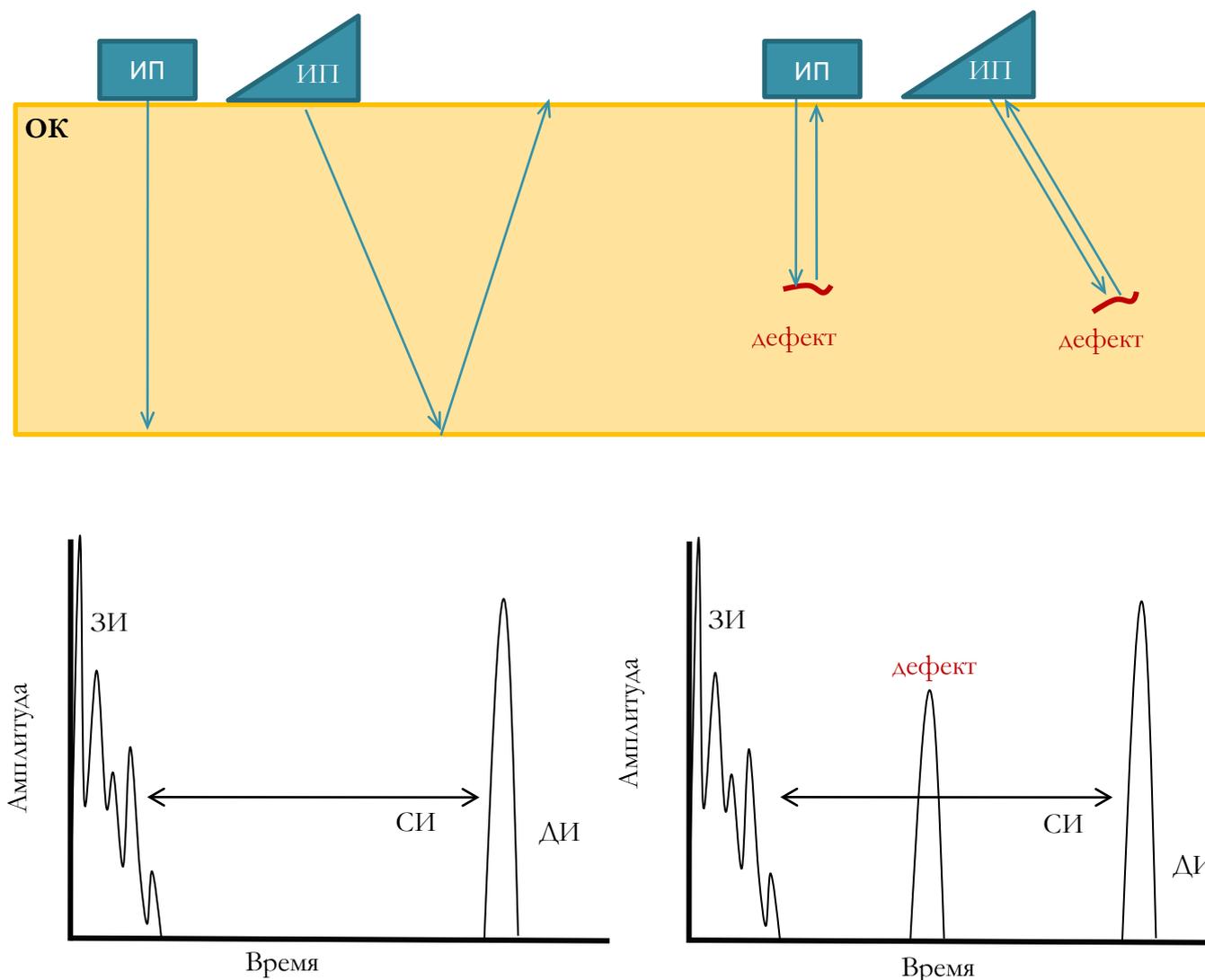


Рис.4.6 – Формирование А-развертки эхо-метода на бездефектном и дефектном участке

Коэффициент выявляемости эхо-метода – показывает, на сколько децибел (во сколько раз) амплитуда эхо-импульса от дефекта превышает амплитуду эхо-импульса от эталонного отражателя.

$$K_d = \frac{\text{А эхо – импульса от дефекта}}{\text{А эхо – импульса от эталонного отражателя}}$$

На амплитуду эхо-сигнала от дефекта и соответственно на возможность его выявления влияет затухание в материале ОК, акустический контакт, а так же размер, форма и ориентация дефекта.

При сравнении зеркально-теневого метода и эхо-метода можно выделить ряд

особенностей составляющих, как достоинства, так и ограничения каждого из них. Поэтому при использовании их совместно значительно повышается эффективность и достоверность контроля. Зеркально-теневой метод позволяет выявить дефекты независимо от их формы и ориентации по всей толщине изделия, а при потере акустического контакта сигнализирует об этом исчезновением донного сигнала. Эхо-метод в отличие от ЗТМ позволяет определить глубину залегания отражателя и оценить его форму и ориентацию. Минимально выявляемый размер дефекта при применении эхо-метода ограничивается длиной волны.

5 ИЗМЕРЯЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ

После выявления дефекта дефектоскопист должен принять решения о браковке либо годности изделия к дальнейшей эксплуатации. Для обоснованного вынесения этого решения необходимо определить измеряемые характеристики дефекта и сопоставить их с указанными в нормативной документации значениями. В большинстве случаев в качестве критерия браковки используют одну или несколько измеряемых характеристик, выступая в этом качестве, их допустимо называть главными измеряемыми характеристиками.

Совокупность всех измеряемых характеристик дефекта сведена в Таблице 6.1

Таблица 6.1 – Изменяемые характеристики дефекта

Координаты дефекта	Глубина залегания дефекта, Y , мм Расстояние до дефекта по поверхности ввода, X , мм Расстояние до дефекта по лучу, R , мм
Амплитудные характеристики	Амплитуда, N , дБ Коэффициент выявляемости, K_d , дБ Эквивалентная площадь, $S_{\text{Э}}$, мм ²
Условные размеры	Условная граница дефекта Условная ширина, ΔX , мм Условная протяженность, ΔL , мм Условная высота, ΔY , мм
Форма дефекта	Коэффициент формы дефекта, K_d Компактный и протяженный Округлый и плоскостной

5.1 Координаты дефекта

Для определения координат дефекта, дефектоскоп использует измерение времени между моментом генерации зондирующего импульса и моментом прихода эхо-импульса ($T_{\text{ЭХО}}$), как следствие отражения от дефекта. Расстояние до дефекта по лучу (R) вычисляется как отрезок линии совпадающей с акустической осью и соединяющий центр отражателя с точкой выхода луча, поэтому время затраченное волной при преодолении призмы ПЭП в прямом и обратном направлении, так называемое – время задержки в призме ($2T_{\text{ПЭП}}$) необходимо исключить.

Расстояние до дефекта по лучу можно рассчитать по формуле:

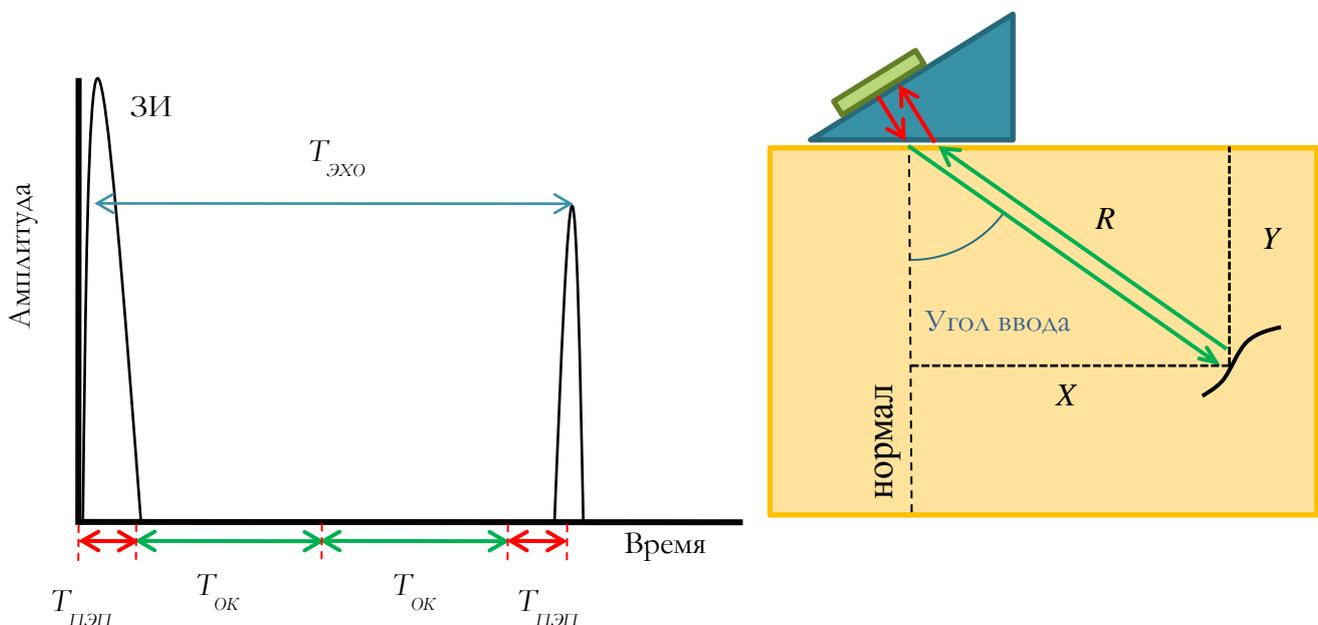
$$R = \frac{C \cdot (T_{\text{ЭХО}} - 2 \cdot T_{\text{ПЭП}})}{2}$$

, где c – скорость волны в материале ОК, м/с

Для нахождения глубины залегания и расстояния до дефекта по поверхности ввода необходимо воспользоваться значением угла ввода (α):

$$Y = R \cdot \cos(\alpha) = \frac{C \cdot (T_{\text{ЭХО}} - 2 \cdot T_{\text{ПЭП}})}{2} \cdot \cos(\alpha)$$

$$X = R \cdot \sin(\alpha) = \frac{C \cdot (T_{\text{ЭХО}} - 2 \cdot T_{\text{ПЭП}})}{2} \cdot \sin(\alpha)$$



Y - глубина залегания дефекта; X - расстояние до дефекта по поверхности ввода; R - расстояние до дефекта по лучу.

Рис.6.1 – Определение координат дефекта

При вычислении X и Y , могут возникнуть некоторые погрешности связанные в первую очередь с определением скорости волны в изделии, угла ввода (α) и времени задержки в призме, поскольку значения этих параметров определяются оператором при настройке дефектоскопа. Расчет координат дефекта так же может быть не достоверным, если использовать ошибочное определение точки выхода луча или за максимальный эхо-сигнал принять сигнал, полученный от дефекта боковым лучом (рис 6.2).

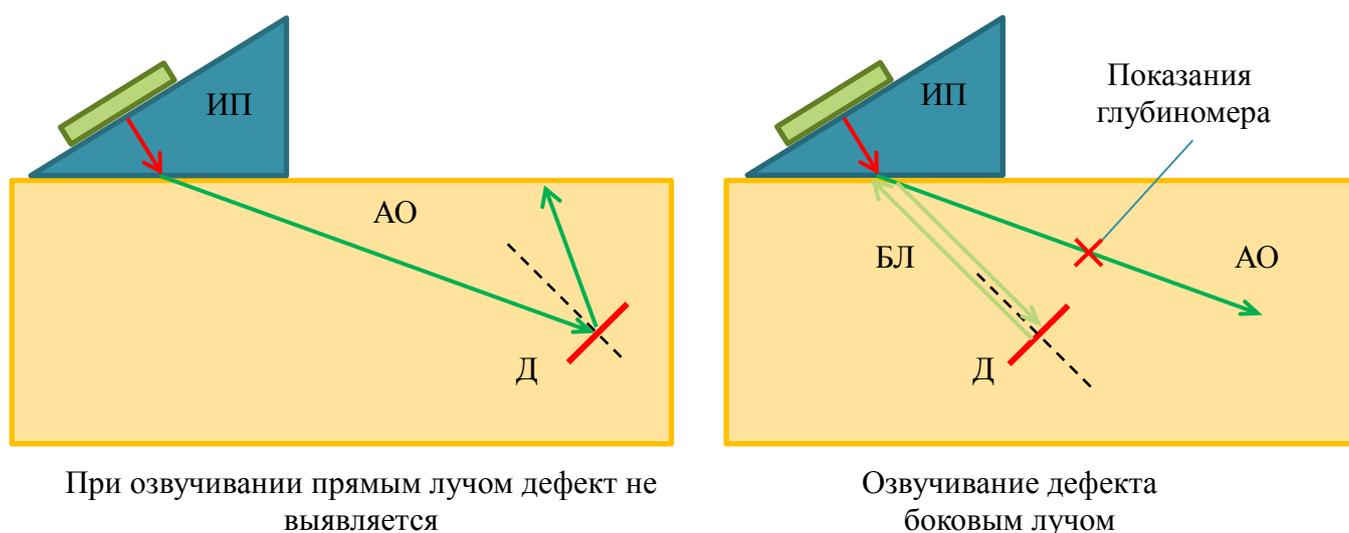


Рис.6.2 – Иллюстрация одной из причин появления погрешности определения координат

5.2 Амплитудные характеристики

Величина дефекта в тех случаях, когда она не превышает ширины диаграммы направленности, во многом определяет амплитуду эхо-сигнала. По этой причине амплитудные характеристики часто используются в качестве критериев браковки изделия.

Амплитуда (N) – это превышение эхо-импульсом порогового уровня дефектоскопа.

Коэффициент выявляемости (K_D) – это отношение амплитуд эхо-импульсов дефекта и эталонного отражателя. Коэффициент выявляемости может выражаться как в безразмерных относительных единицах, так и в децибелах. В качестве эталонного используется ненаправленный отражатель – это засверловка диаметром 6 мм.

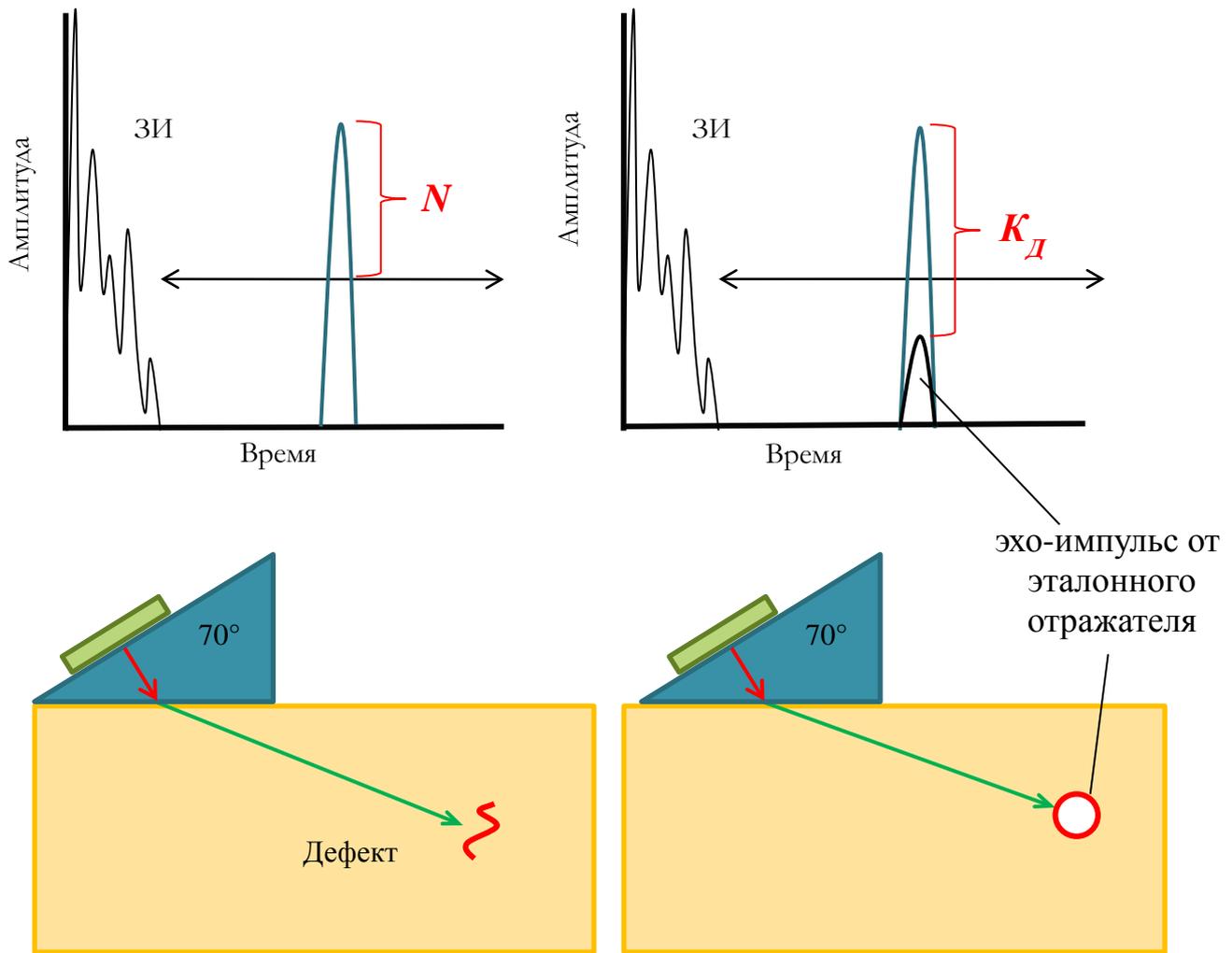


Рис.6.3 – Определение амплитуды и коэффициента выявляемости

Положительный коэффициент выявляемости выраженный в децибелах указывает на превышение величины сигнала от дефекта над сигналом от эталонного отражателя, отрицательный, напротив, говорит о том, что сигнал от дефекта меньше, чем сигнал от эталонного отражателя.

Величина отраженного сигнала зависит не только от величины дефекта, но и от ориентации его по направлению к оси диаграммы направленности.

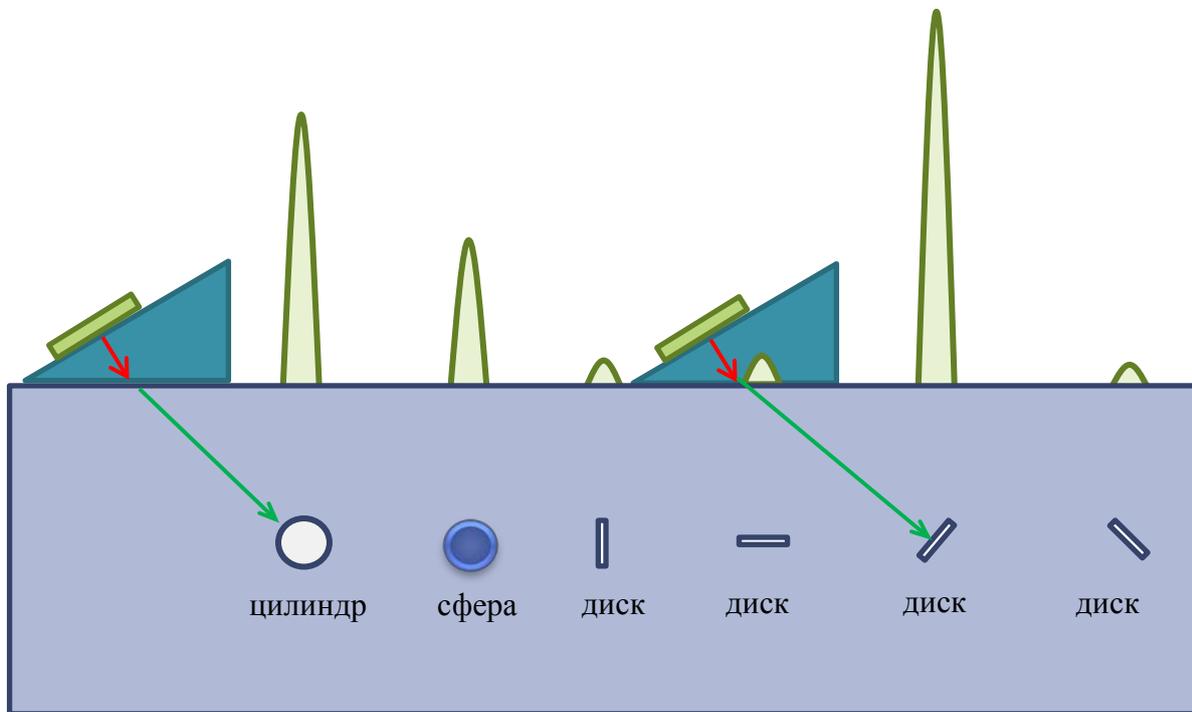


Рис.6.4 – Связь амплитуды и коэффициента выявляемости с формой дефекта

Характеристика дефекта, объединяющая в себе два параметра, а именно амплитуду дефекта и глубину его залегания именуется эквивалентной площадью дефекта.

Эквивалентная площадь – это площадь идеального отражателя (плоскодонный диск перпендикулярный акустической оси) глубина залегания и амплитуда сигнала которого, совпадают по величине с глубиной залегания и амплитудой сигнала от дефекта (рис.6.5).

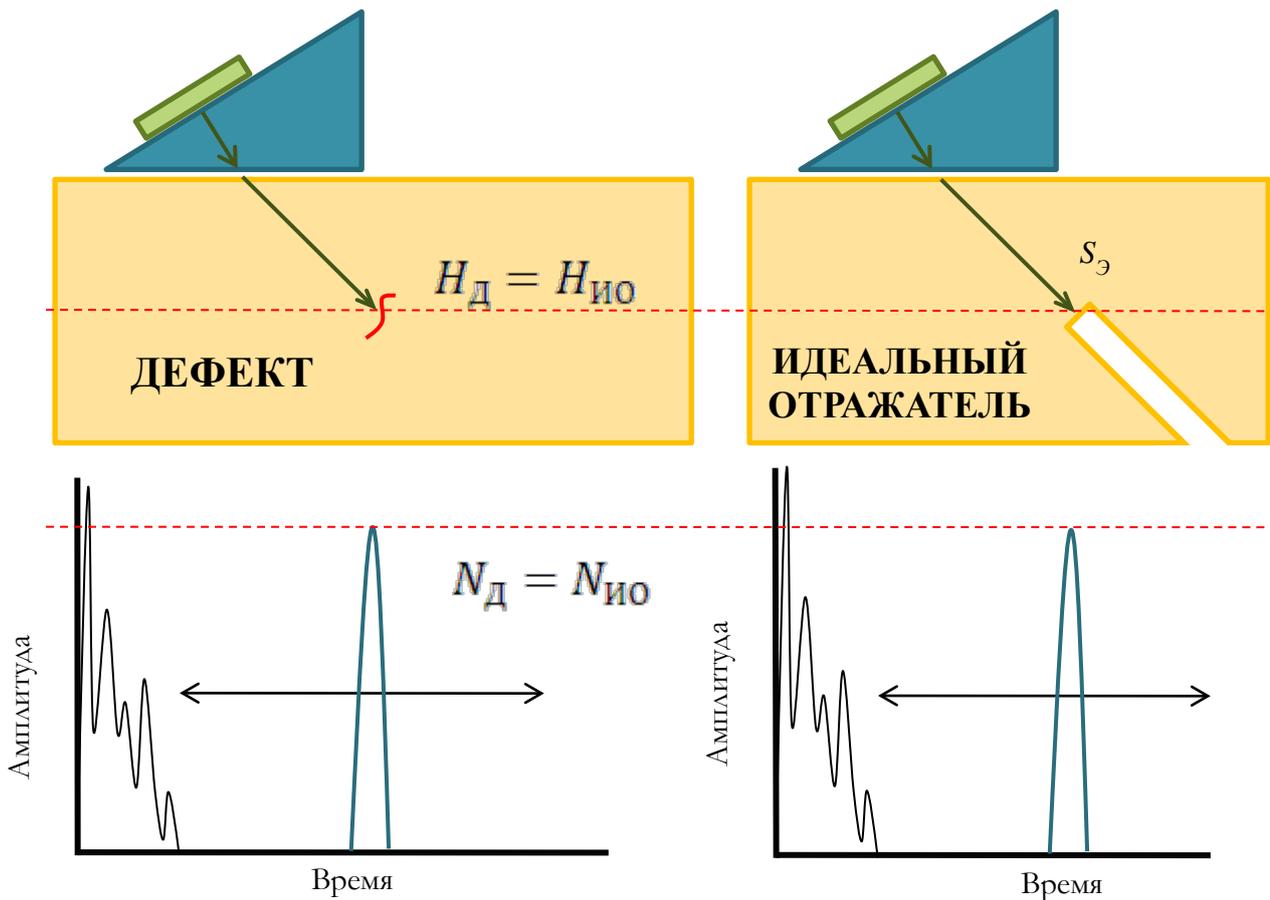


Рис.6.5 – Определение эквивалентной площади дефекта

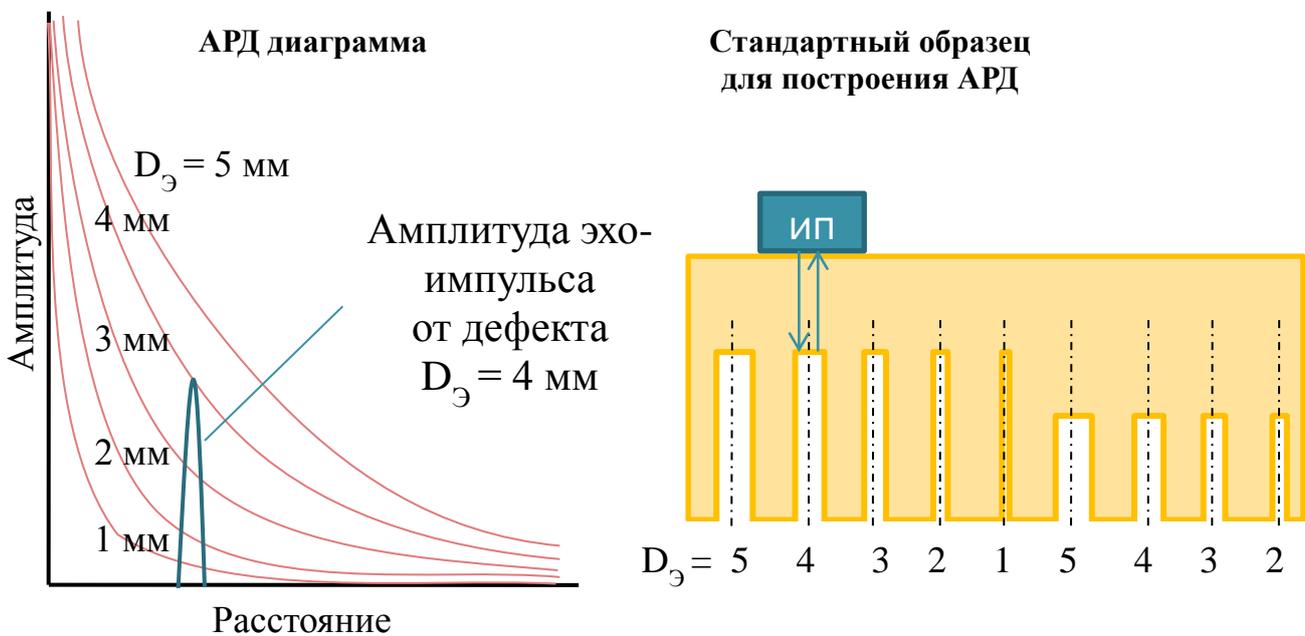


Рис.6.6 – Построение ARD - диаграммы

Для определения эквивалентной площади дефектов и настройки на предельную чувствительность используют ARD – диаграммы и SKH – диаграммы. ARD – диаграмма связывает между собой Амплитуду – Расстояние – Диаметр эквивалентный (рис 6.6).

Эквивалентный диаметр это диаметр идеального отражателя. SKH – диаграмма связывает параметры Эквивалентная площадь - Коэффициент выявляемости – Глубина.

5.3 Условные размеры

Измерение дефекта при помощи ультразвуковых методов контроля можно произвести с ограниченной точностью, поэтому определение высоты, ширины и протяженности дефекта носит условный характер. Границы условного размера дефекта определяют по пересечению порога амплитудой эхо-сигнала (рис.6.7).

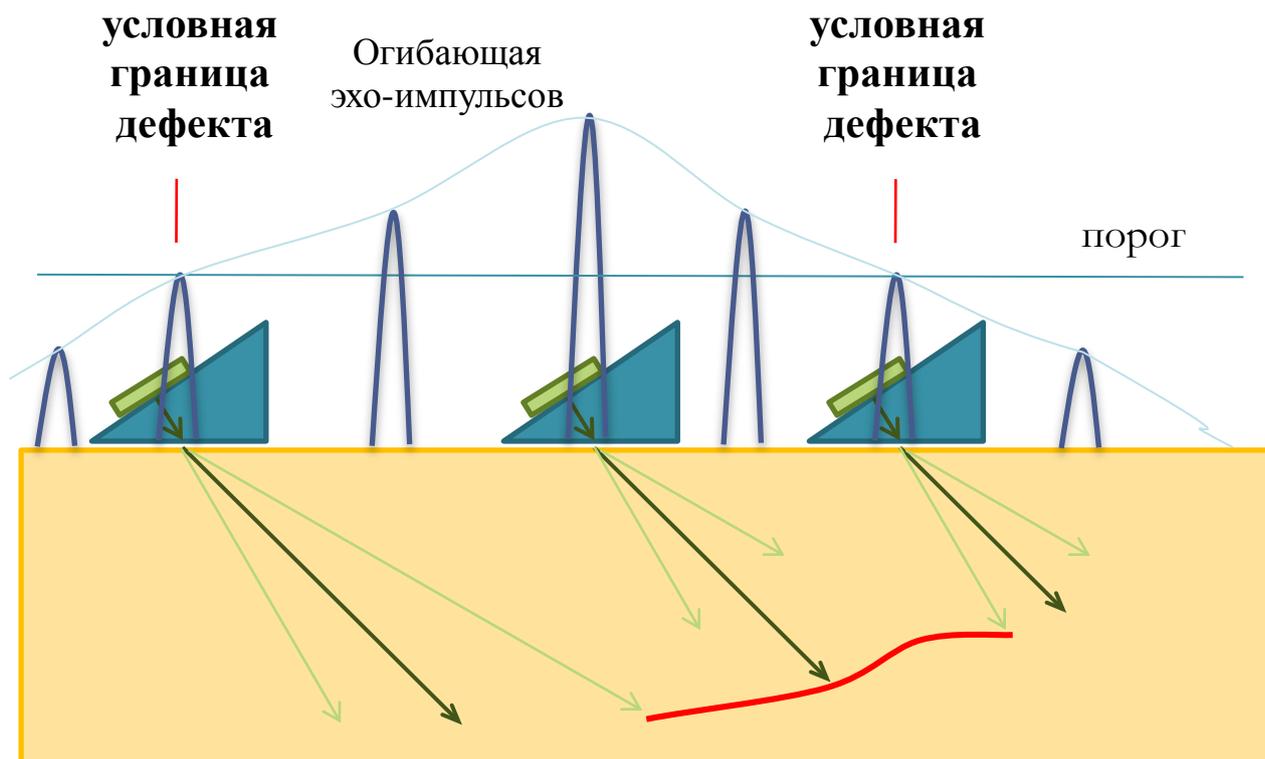


Рис.6.7 – Определение условных размеров

Условная ширина (ΔX) – расстояние между условными границами в плоскости падения волны.

Условная протяженность (ΔL) – расстояние между условными границами перпендикулярно плоскости падения волны.

Условная высота (ΔH) – разность показаний глубиномера на условных границах.

$$\Delta H = \max(H1, H2, H3, H4) - \min(H1, H2, H3, H4)$$

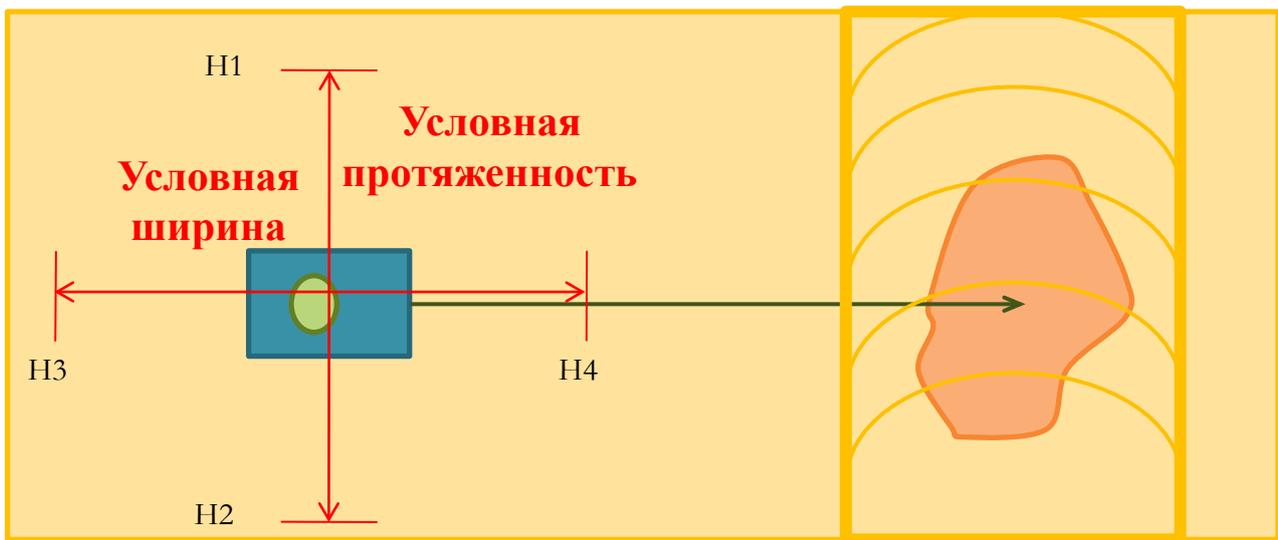


Рис.6.8 – Измерение условной ширины и протяженности дефекта

Условный размер дефекта можно представить, как сумму реального размера и ширины пучка на той высоте, где он расположен. При измерении дефектов одинакового реального размера, но расположенных на разных высотах, условные размеры дефектов будут отличаться.

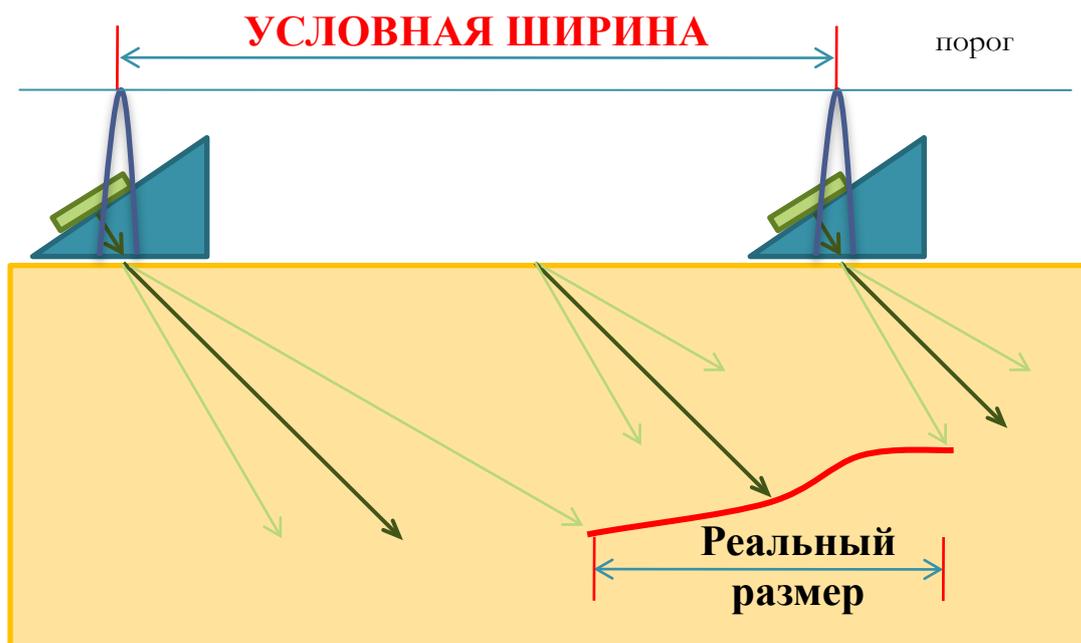


Рис.6.9 – Соотношение реального и условного размера дефекта

Определение условных размеров дефекта можно провести двумя способами: абсолютным и относительным. В каждом из способов заложен определенный порядок действий.

Для абсолютного:

1. – Найти положение максимальной амплитуды эхо-импульса;
2. – Установить на дефектоскопе чувствительность Оценки (Браковки);
3. – Определить условные размеры по граничным положениям ПЭП;

Для относительного:

1. – Найти положение максимальной амплитуды эхо-импульса;
2. – Усилением довести амплитуду до порога;
3. – Увеличить усиление на заданное количество дБ (6...12);
4. – Определить условные размеры по граничным положениям ПЭП;

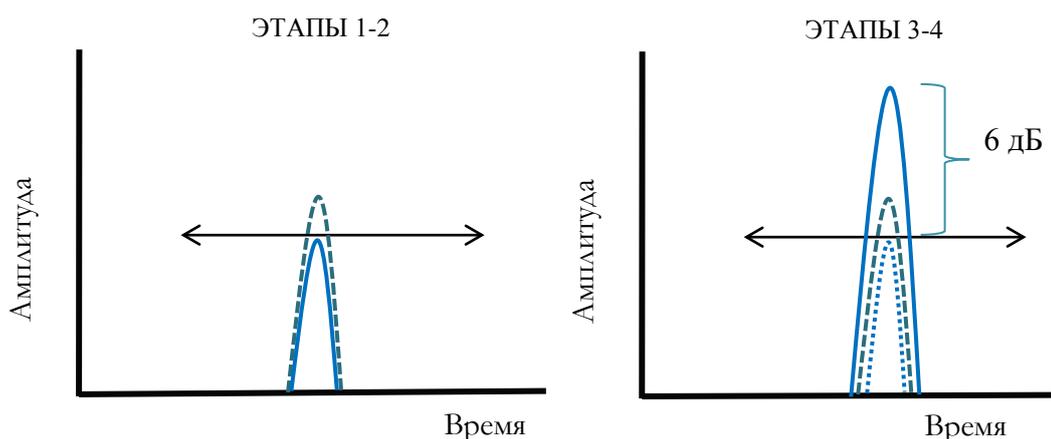


Рис.6.10 – Иллюстрация относительного способа измерения

5.4 Форма дефекта

Дефекты по форме могут значительно различаться друг от друга. Для задач ультразвукового контроля все разнообразие форм дефекта можно классифицировать на несколько групп. Дефекты могут быть компактными и протяженными, округлыми и плоскостными.

Для отнесения дефекта к округлым или плоскостным, используют коэффициент формы дефекта (K_{Φ}). Его определяют как отношение двух сигналов направленных с разных сторон на дефект. В случае округлого дефекта эти сигналы приблизительно равны, поэтому коэффициент формы стремится к единице. Для плоскостного дефекта

один из сигналов всегда будет значительно меньше другого.

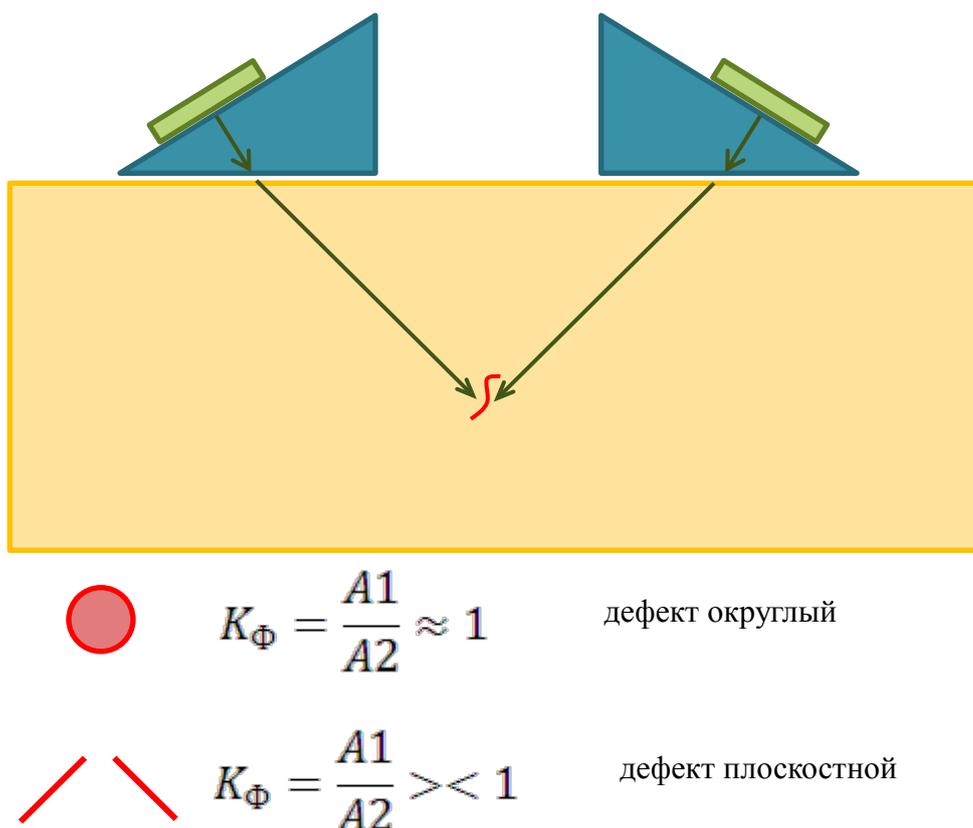


Рис.6.11 – Определение коэффициента формы дефекта

Компактным называется дефект, если любой из его размеров меньше ширины диаграммы направленности. Протяженный дефект, тот у которого хотя бы один из размеров превышает ширину диаграммы направленности.

6 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТРОЛЯ

Параметры контроля включают в себе параметры метода и аппаратуры, определяющие достоверность результатов контроля. Под мерой достоверности понимается степень ошибки в определении различного рода измеряемых характеристик дефекта. Безграмотный выбор значений параметров контроля, в свою очередь, ведет к ошибочным результатам контроля и пропуску браковочного изделия к эксплуатации.

Параметры аппаратуры – зависят от характеристик дефектоскопа, преобразователя, сканирующего устройства.

Параметры метода – зависят от свойств объекта контроля.

Аппаратуры	Метода
Частота, МГц	<ul style="list-style-type: none"> - Длина волны, мм - Скорость волны, м/с
<p>Размеры ПЭП:</p> <ul style="list-style-type: none"> - точка выхода луча; - время волны в ПЭП; - размеры ПЭП: <p>угол призмы, радиус ПЭП.</p>	<p>Диаграмма направленности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - угол наклона АО; - угол раскрытия ДН; - угол ввода; - граница ближней зоны.
Погрешность глубиномера	Погрешность определения координат отражателей
<p>Зоны временной селекции:</p> <ul style="list-style-type: none"> - начало строба; - длительность (конец) строба; - метод: эхо, теневой 	Зоны контроля
Чувствительность	
Условная	<ul style="list-style-type: none"> - Реальная - Предельная - Эквивалентная
<ul style="list-style-type: none"> - Длительность зондирующего импульса; - Длительность собственных колебаний пьезопластины 	Мертвая зона

Параметры сканирования: - шаг; - пределы перемещения ПЭП; - скорость сканирования; - чувствительность поиска.	Минимальный условный размер фиксируемого дефекта
- Частота повторения зондирующих импульсов; - Время инерции и индикатора дефекта	Минимальный условный размер фиксируемого дефекта
Разрешающая способность аппаратуры	- Разрешающая способность по дальности (лучевая); - Фронтальная разрешающая способность

6.1 Первая группа параметров: частота – длина волны

Частота – количество колебаний за единицу времени. Именно частота определяет затухание волны в объекте контроля, чем выше частота, тем больше затухание.

Длина волны зависит от частоты и скорости волны в объекте контроля, чем меньше длина волны, тем меньший по размеру дефект поддается выявлению. В силу разности скоростей продольных и поперечных волн отличаются и их длины, длина продольной волны (2,36 мм) превосходит длину поперечной (1,3 мм).

6.2 Вторая группа параметров: размеры ПЭП – диаграмма направленности

Точка выхода луча - это точка, на преобразователе через которую выходит акустическая ось. Определяется по стандартному образцу СО-3 или СО-3Р, используя выкружку, в положении ПЭП с максимальной амплитудой. В этом случае центр выкружки, указывает на точку выхода луча.

Время волны в ПЭП (время задержки) – регулировка данного параметра позволяет

настроить глубиномер дефектоскопа, выставить истинные значения: X, Y, R.

Угол призмы (β) напрямую влияет на угол ввода, если заведомо известно для какого материала применяется ПЭП, то угол призмы выполняют таким, что бы добиться одного из стандартных значений углов ввода: 40° , 45° , 50° , 60° , 65° , 70° .

Радиус пьезопластины (a) определяет параметры диаграммы направленности, такие как: угол раскрытия, границу ближней зоны.

Выше перечисленные параметры ПЭП не зависят от свойств материала и относятся к параметрам аппаратуры. Но в свою очередь они наряду со скоростью в материале определяют характеристики диаграммы направленности.

Угол раскрытия диаграммы направленности равен:

$$\varphi = \arcsin\left(n \cdot \frac{c}{f \cdot a}\right),$$

где n – коэффициент учитывающий форму пьезопластины

(0,61 – для круглых; 0,5 – для прямоугольных); c – скорость волны в среде; f – частота; a – радиус пьезопластины.

Граница ближней зоны диаграммы направленности равна:

$$N = \frac{a^2}{\lambda},$$

где λ - длина волны.

Угол ввода (α) – это угол между нормалью к поверхности ввода и линией соединяющий центр ненаправленного отражателя (засверловка 6 мм в СО) с точкой выхода луча в положении ПЭП с максимальной амплитудой. Угол ввода и угол наклона акустической оси отличаются по своим значениям, причем угол ввода всегда меньше. Это объясняется тем, что в расходящемся пучке лучей, луч с меньшим углом, чем у акустической оси проходит меньший путь, его сигнал меньше ослабляется и именно в этом положении ПЭП амплитуда сигнала максимальна. Чем больше глубина залегания дефекта и выше коэффициент затухания в материале, тем сильнее уменьшается угол ввода относительно угла наклона акустической оси.

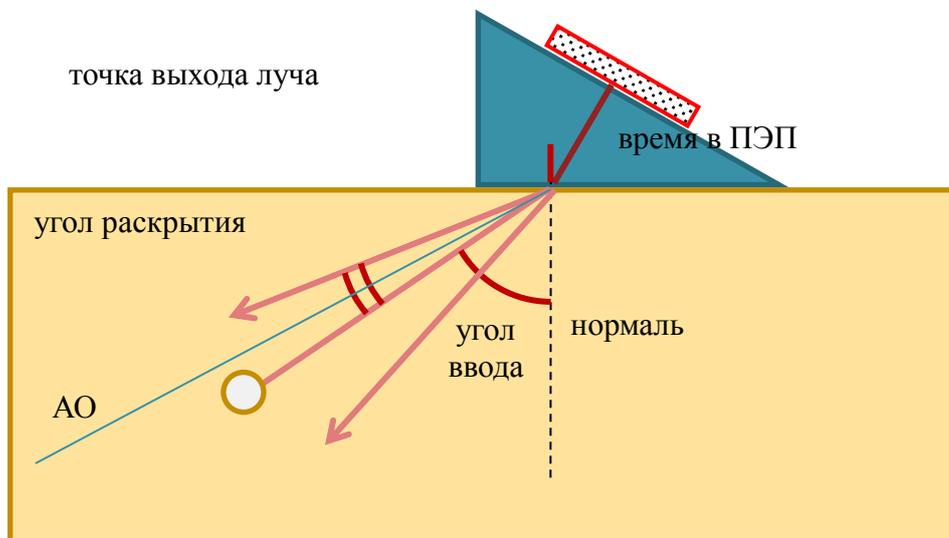


Рис.7.1 – Параметры ПЭП и диаграммы направленности

6.3 Третья группа параметров: погрешность глубиномера – погрешность определения координат дефектов

Погрешность глубиномера дефектоскопа состоит из неточности определения временных интервалов между импульсами, скорости волны, угла ввода, времени задержки в ПЭП.

Погрешность определения координат дефектов связана с погрешностью глубиномера, неточностью установки ПЭП в положение максимальной амплитуды эхо-сигнала.

6.4 Четвертая группа параметров: зона временной селекции – зоны контроля

К параметрам зоны временной селекции (зона ВС или строб ВС) можно отнести начало, длительность и конец. Размерность зоны ВС может быть выражена в трех вариантах: расстояние по лучу (R), высота (Y), время (T). Начало и конец зоны ВС должны соответствовать границам зоны контроля. В зависимости от используемого метода (эхо или зеркально-теневой) зоны ВС могут отличаться. При использовании эхо-метода превышение порога сигналом в стробе будет сопровождаться световой сигнализацией «дефект», для зеркально-теневого метода, наоборот, уменьшение сигнала (донного) покажет «дефект».

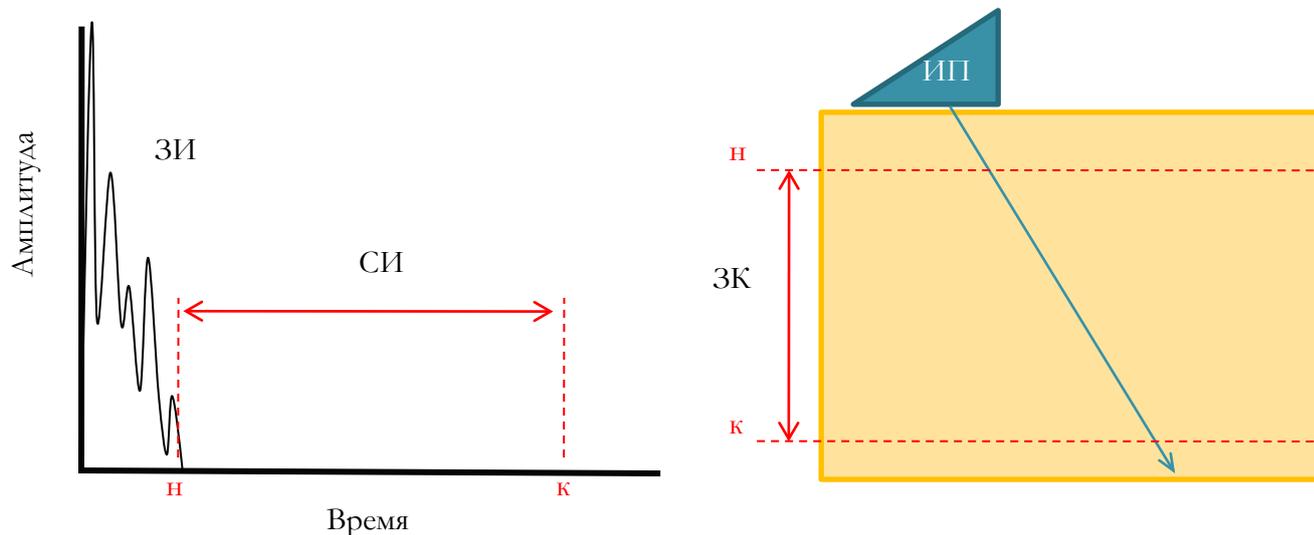


Рис.7.2 – Зона ВС (СИ-строб импульс) и зона контроля (ЗК)

6.5 Пятая группа параметров: чувствительность аппаратуры – чувствительность метода

Чувствительность как параметр аппаратуры измеряется в дБ, поскольку в этом случае она понимается как минимально возможный сигнал, превысивший порог. Условная чувствительность определяется по государственному стандартному образцу СО-2, СО-3Р по амплитуде эхо-импульса от эталонного отражателя (рис.7.3)

Реальная чувствительность – минимальный размер дефекта определенного типа, вида, выявляемого в ОК на заданной глубине.

Предельная чувствительность – это минимальный размер идеального отражателя определенного типа вида, выявляемого в ОК на заданной глубине. Из всех типов чувствительностей минимальным размером обладает именно предельная чувствительность.

Наклонный ПЭП

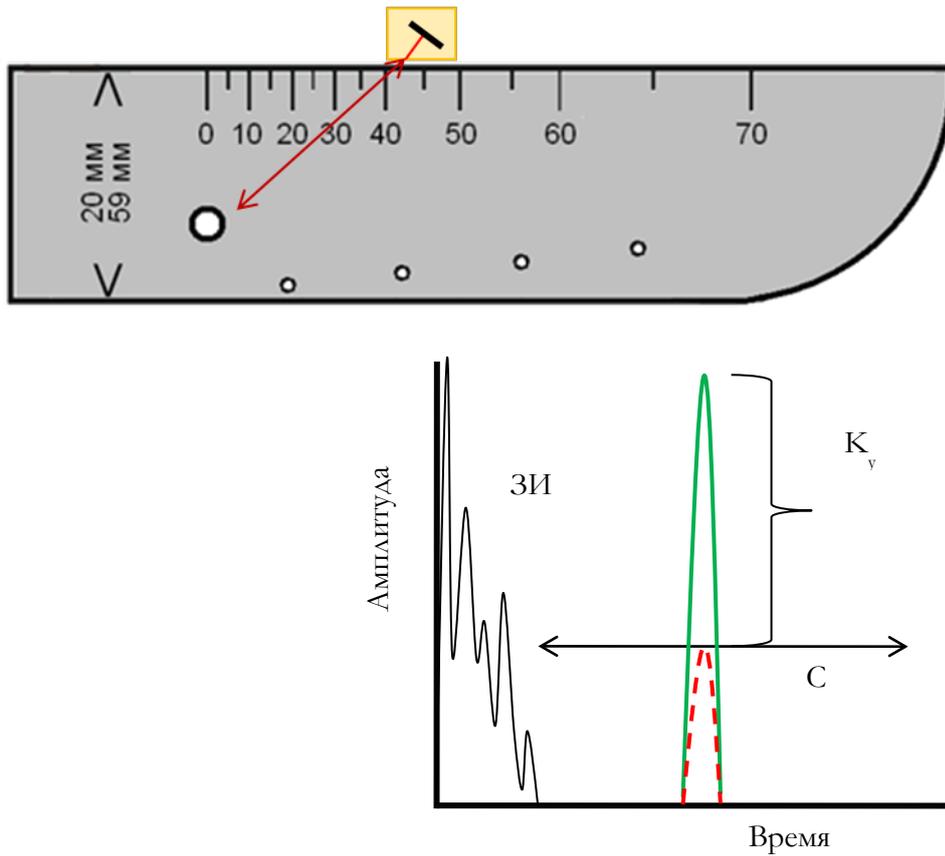


Рис.7.3 – Определение условной чувствительности

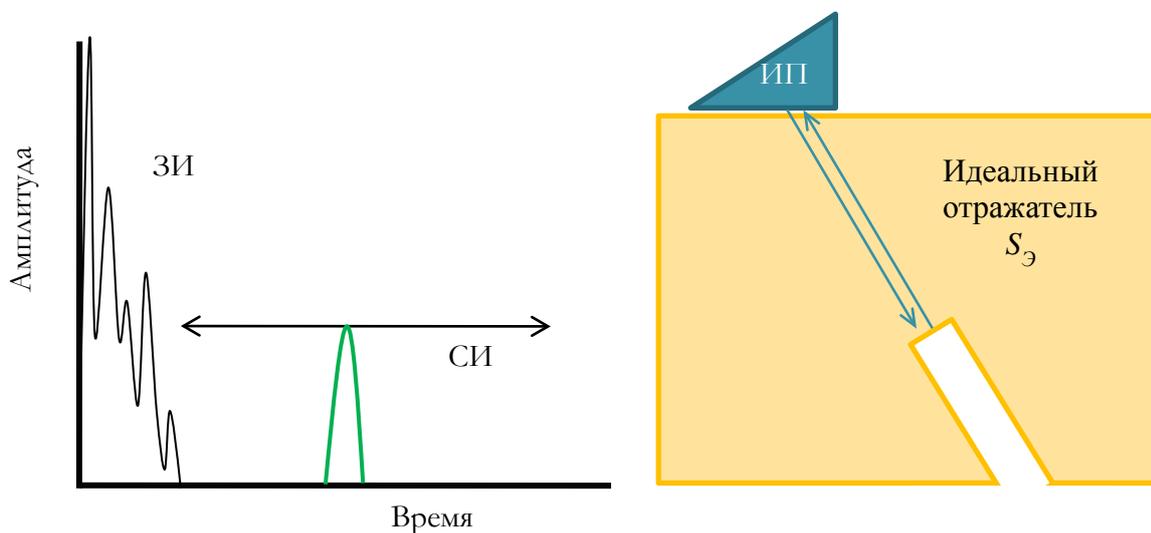


Рис. 7.4 – Определение предельной чувствительности

Эквивалентная чувствительность – это минимальный размер искусственного отражателя или реального дефекта, выявляемого в ОК на заданной глубине. В качестве искусственного отражателя могут использоваться различные модели дефектов: пропил, засверловка, сегмент, зарубка и т.д.

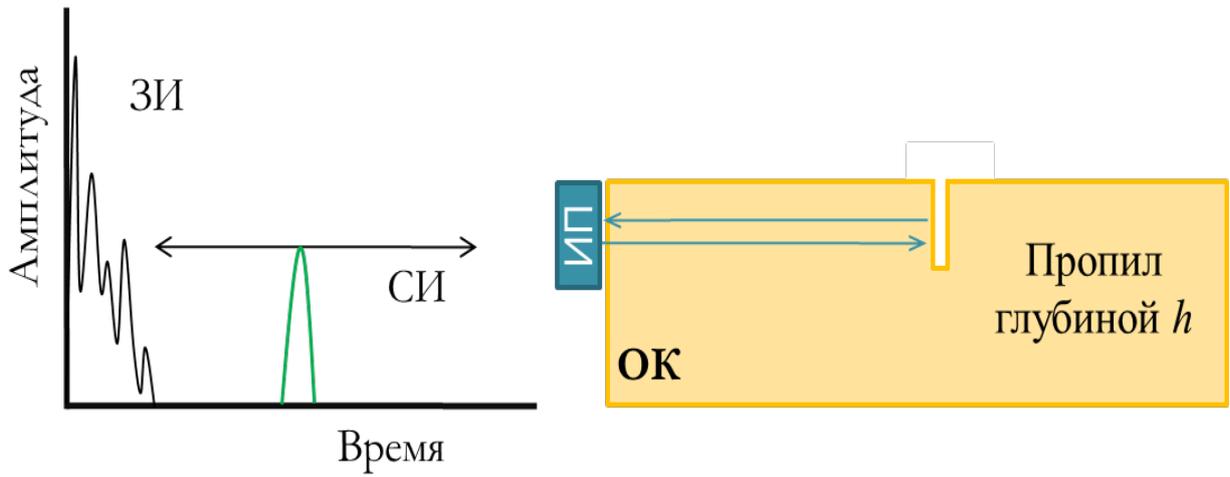


Рис. 7.5 – Определение эквивалентной чувствительности

6.5 Пятая группа параметров: длительность зондирующего импульса и собственных шумов ПЭП – мертвая зона

Мертвая зона – это область объекта контроля вблизи поверхности ввода, в которой дефекты не выявляются эхо-методом.

Она относится к параметрам метода, поскольку при смене материала размер этой зоны определяется по высоте, и зависит от нескольких параметров.

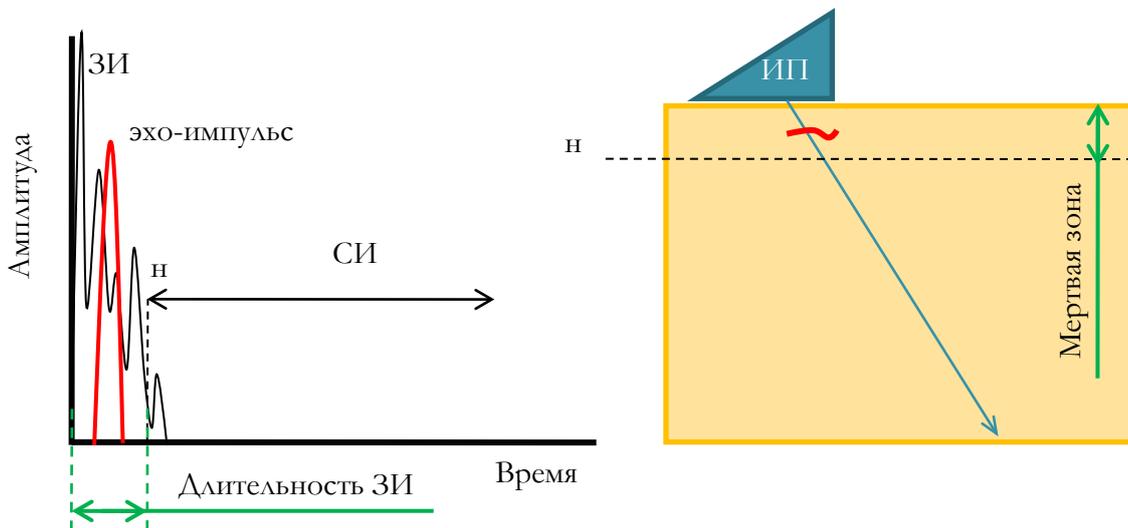


Рис.7.6 – Иллюстрация «мертвой зоны»

Основной причиной появления мертвой зоны является наличие зондирующего импульса в А-развертке, который может содержать в себе от 4 до 12 периодов колебаний. Соответственно чем больше длительность зондирующего импульса и

длительность шумов ПЭП, тем больше и мертвая зона.

Величина мертвой зоны для наклонных преобразователей зависит от угла ввода. Чем больше угол ввода, тем меньше мертвая зона, так как акустическая ось располагается ближе к поверхности.

Расчет мертвой зоны можно провести по формуле:

$$M = \frac{(t_{зи} + t_{ш})}{2} \cdot c \cdot \cos\alpha,$$

где $t_{зи}$ – длительность зондирующего импульса, мкс;

$t_{ш}$ – длительность шумов ПЭП, мкс.

6.6 Шестая группа параметров: разрешающая способность аппаратуры – разрешающая способность по дальности и по фронту

Разрешающая способность аппаратуры – это минимальное время между двумя эхо-сигналами, видимые на А-развертке как отдельные.

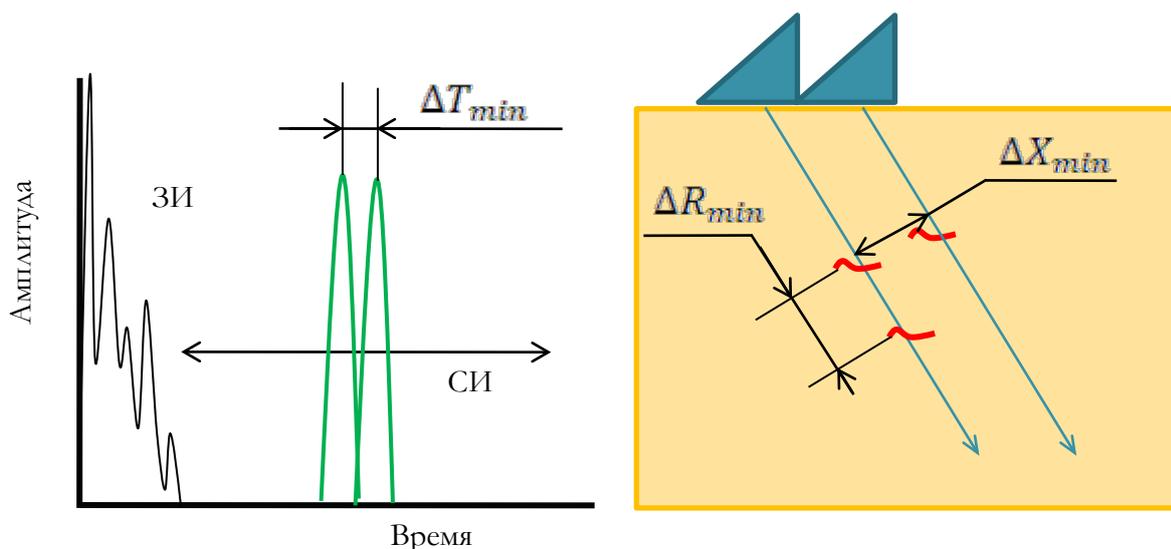


Рис.7.7 – Определение разрешающих способностей: аппаратуры (ΔT_{\min}), по дальности (ΔR_{\min}), по фронту (ΔX_{\min})

Раздельными сигналами признаются два эхо - сигнала, если уровень их слияния находится ниже ближайшего максимума более чем на 6 дБ.

Разрешающая способность по дальности - это минимальное расстояние между двумя отражателями, расположенными на разном расстоянии по лучу сигналы, от которых видятся на А-развертке раздельными.

Разрешающая способность по фронту - это минимальное расстояние между двумя

отражателями, расположенными на разном расстоянии по лучу сигналы, от которых видятся на А-развертке отдельными.

7 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

Для измерения толщины объектов контроля привычно использовать механические средства измерения: штангенциркуль, микрометр, но при определенных условиях измерения они оказываются неприемлемы. В случае измерения толщины стенок сосудов, труб, корпусов протяженных объектов используются ультразвуковые методы.

В зависимости от особенностей объекта измерений их можно разделить на три группы:

1. Изделия с гладкими параллельными поверхностями, подвергаемые ручному контролю толщины.
2. Изделия с грубыми непараллельными плоскостями, подвергаемые ручному контролю толщины.
3. Изделия подверженные поточному автоматизированному контролю (трубы, листы, прокат и т.д.).

Основные требования к используемым средствам и способам измерения по каждой группе изделий существенно отличаются. Для 1 группы необходимо обеспечить высокую точность измерений, для 2 группы основное требование – высокая чувствительность, для 3 группы – достаточная скорость и точность измерений. В силу различных требований различаются и ультразвуковые методы измерения толщины. Единственный метод применимый для всех трех типов изделий – эхо-метод.

7.1 Измерение толщины эхо-методом

Для измерения толщины используется эффект отражения ультразвуковой волны от препятствия (донной поверхности). Применяются прямые раздельно-совмещенные и совмещенные преобразователи. Измерение времени пробега в изделии от преобразователя до препятствия и обратно, при известной скорости позволяет провести расчет толщины:

$$H = \frac{c \cdot (t - t_3)}{2},$$

где c – скорость распространения ультразвуковых волн в ОК;

t – измеряемое при контроле время прохождения волны от пьезоэлемента излучателя до дна ОК и обратно на пьезоэлемент приемника; t_3 – время прохождения импульса в прямом и обратном направлениях через акустические задержки призмы, протектора и контактной жидкости.

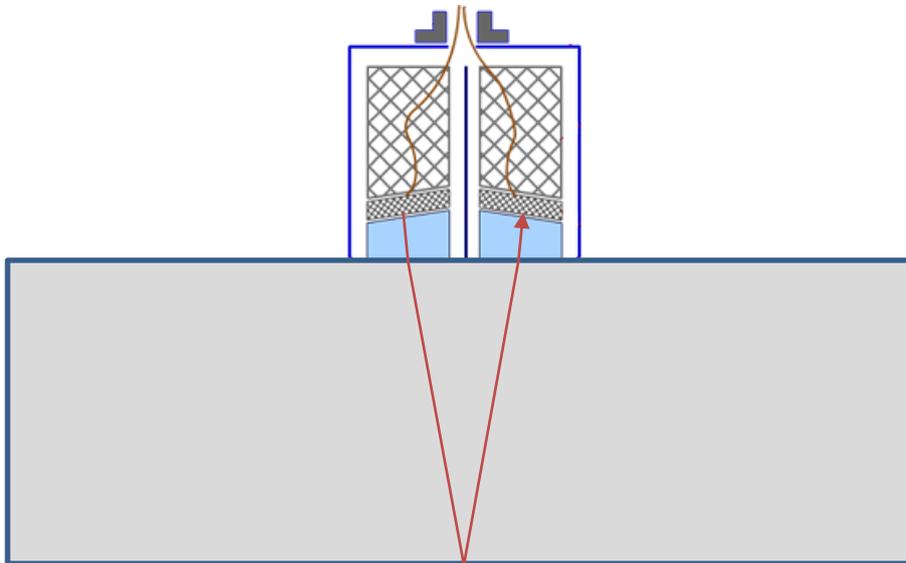


Рис.8.1 – Измерение толщины раздельно-совмещенным (РС) преобразователем.

Одним из недостатков эхо-метода является наличие «мертвой зоны», для ее исключения применяют твердотельную плоскопараллельную акустическую задержку, как дополнительную насадку к преобразователю.

Наличие двух пьезопластин в РС преобразователе сказывается на точности измерений, поскольку в этом случае ультразвуковая волна распространяется под небольшим наклоном (рис.8.1). В результате чего, формулу для расчета толщины приведённой выше можно назвать приближенной. Для уменьшения погрешности измерений цилиндрических объектов, к примеру, труб, РС преобразователь необходимо располагать таким образом, чтобы излучатель и приемник находились вдоль образующей.

Применение прямого совмещенного преобразователя позволяет исключить указанные выше недостатки. Расчет толщины при этом проводят, используя многократное отражение, используя измерение суммарного времени между первым и последующими донными сигналами. Это позволяет исключить время пробега в акустических задержках.

7.2 Проведение толщинометрии боковых рам грузового вагона

При плановых видах ремонта боковых рам тележек модели 18-578 измерение толщины выполняют для внутреннего радиуса R 55, образующего буксовый проем боковой рамы, а также прилегающие поверхности вертикальных стенок. Особенности выполнения толщинометрии, определяются технологической инструкцией по ультразвуковой толщинометрии боковых рам тележек грузовых вагонов (ТИ 07.65-2008).

При настройке и проведении измерений используют ультразвуковой дефектоскоп, раздельно-совмещенный ПЭП, стандартный образец СО-2.

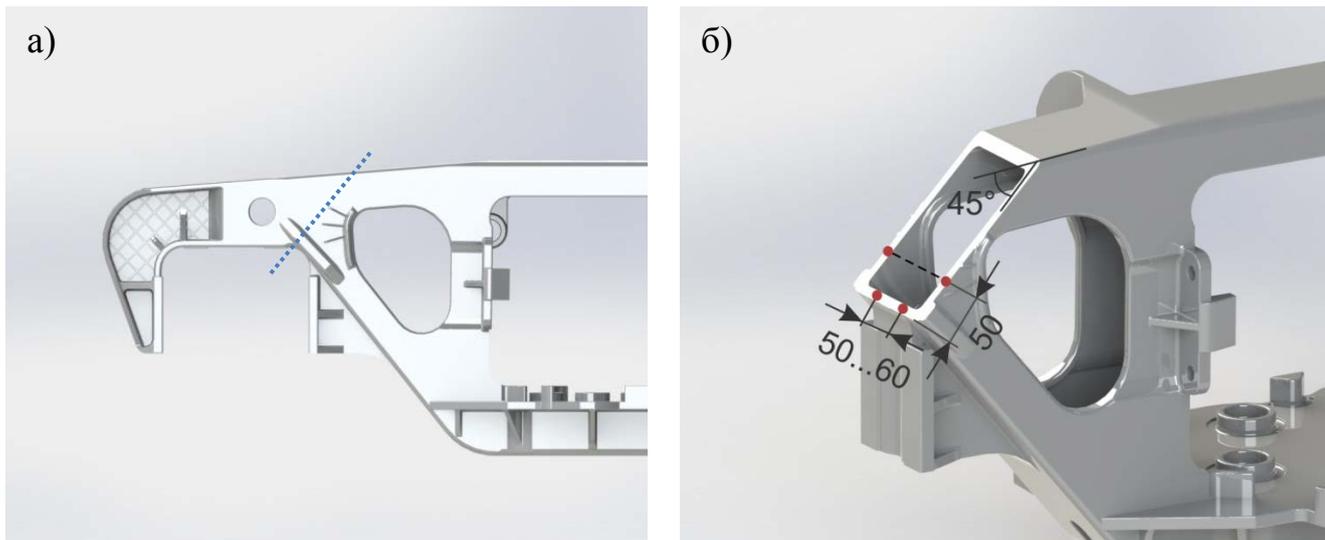
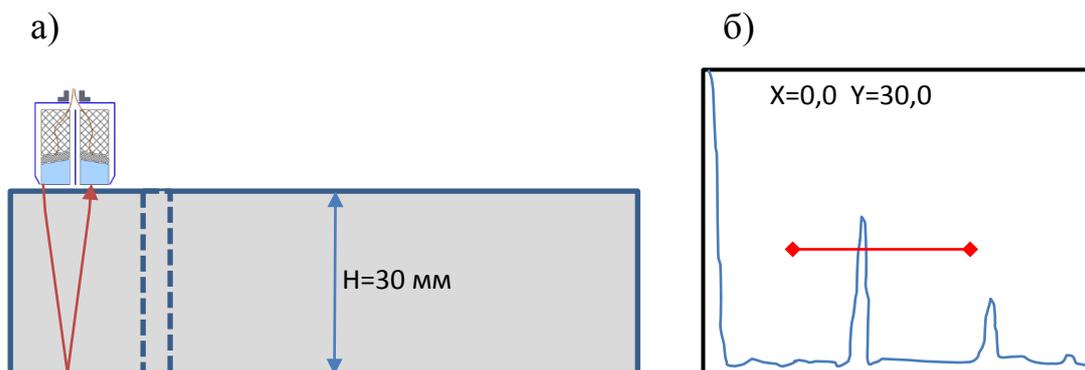


Рис.8.2 – а) - Боковая рама с указанием сечения (пунктирная линия) подверженное толщинометрии; б) – Зоны измерений толщины.

Настройку глубиномера дефектоскопа проводят на стандартном образце СО-2, измеряя расстояние между боковыми поверхностями ($H=30$ мм). После настройки приступают к измерениям на боковой раме места установки ПЭП должны быть зачищены до шероховатости не хуже $Rz 160$.



Наименьшее предельное значение толщины составляет 18 мм. В случае, если в какой либо точке результат измерений окажется менее 18 мм, необходимо дополнительно дважды выполнить измерения в соседних точках на расстоянии 5 мм. За результат принимают среднее арифметическое значение результатов трех измерений.

Боковая рама не соответствует требованиям ультразвукового контроля толщины, если хотя бы в одной из зон измерений (рис.8.2, б) полученное значение толщины менее 18 мм.

ПРОГРАММА ОБЩЕГО ЭКЗАМЕНА ПО УЗК

на II уровень квалификации

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ АКУСТИКИ

1.1 Акустические колебания

- *упругость и инерция* вещества;
- механизм упругих колебаний;
- закономерности изменения положения и скорости *колеблющейся частицы тела*.

1.2 Характеристики акустических колебаний

- *частота* акустических колебаний: определение и классификация акустических волн по частоте.

- *акустические величины*, энергия колебаний

(максимальное смещение от положения равновесия, колебательная скорость, изменение механических напряжений и давления, логарифмические единицы измерения децибелы: построение, таблица значений, преимущества по сравнению с линейной шкалой)

1.3 Акустические волны

- определение;
- бегущие и стоящие волны;
- **бегущие волны:** *скорость распространения, длина волны, связь скорости распространения, длины волны и частоты, связь скорости распространения со свойствами среды*

1.4 Объемные волны

- *продольные волны* (растяжения-сжатия), механизм распространения, среды, основные свойства; связь скоростей распространения с упругими константами материалов;

- *поперечные волны* (сдвиговые), механизм распространения, среды, основные свойства; связь скорости распространения с упругими константами материалов;

- таблица скоростей в различных средах

1.5 Поверхностные волны

- механизм распространения и свойства

1.6 Акустический импеданс (волновое сопротивление)

2 РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

2.1 Затухание акустических волн в материалах

- основные механизмы: *рассеяние и поглощение*
- экспериментальное измерение *коэффициента затухания* в материале
- *зависимость* коэффициента затухания *от частоты волны, размера зерна*
- влияние *термообработки* на затухание

2.2 Фронт волны

- определение
- геометрия источников с различными фронтами волны;
- свойства волн с *плоским, цилиндрическим и сферическим* фронтами;
- волны с различными фронтами в практической деятельности

2.3 Взаимодействие продольной и поперечной волн с границей раздела двух сред

- основные понятия: *нормаль к поверхности*
- основные процессы: *отражение, преломление и трансформация волн*
- практическое применение в УЗК
- закон Снеллиуса и его основные следствия:

2.4 Критические углы

- *первый, второй и третий критические углы*: определение, условия возникновения, вывод значения из закона Снеллиуса
- *коэффициенты отражения и прозрачности*, определения
- зависимость коэффициентов от угла падения ультразвуковой волны, связь графика с I и II критическими углами

2.5 Диффузное, зеркальное и смешанное отражения

2.6 Понятие о дифракции акустических волн, примеры проявлений дифракции в УЗК

3 ВОЗБУЖДЕНИЕ И ПРИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

3.1 Прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты, определение, использование. Пьезоэлектрические материалы

3.2 Конструкция пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП)

3.3 Коэффициент преобразования и коэффициент двойного преобразования, способ экспериментального определения

3.4 Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) преобразователей:

- резонансная частота;

- полоса пропускания;

- добротность;

- типы ПЭП: резонансный, широкополосный.

3.5 Акустическое поле преобразователя в ближней зоне,

- интерференции;

3.6 Акустическое поле преобразователя в дальней зоне,

- дифракция;

- диаграмма направленности: (угол наклона акустической оси, угол раскрытия диаграммы направленности и его связь с геометрией пьезопреобразователя)

3.7 Импульсное излучение ультразвуковых волн, понятия волнового пакета, длительности импульса, частоты заполнения.

4. МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

4.1 Классификация акустических методов контроля (сводная таблица).

4.2 Понятие и примеры пассивных методов контроля: бегущих волн (акустико-эмиссионный) и колебаний (вибрационно-диагностический, шумо-диагностический).

4.3 Понятия и примеры активных методов колебаний: свободных (локальный, интегральный) и вынужденных (локальный-резонансный, интегральный-резонансный).

4.4 Активные методы бегущих волн.

4.4.1 Методы прохождения: *теневого* (амплитудный), *временной теневой*, *велосиметрический*:

- схемы контроля теневого метода, используемые ПЭП;

- путь УЗК волны на бездефектном и дефектном объектах и соответствующие виды экрана дефектоскопа;

- настройка и браковка, коэффициент выявления;
- преимущества и недостатки теневого метода, область применения.

4.4.2 Активные методы бегущих волн – методы отражения: *эхо, эхозеркальный, дельта*, реверберационный:

- схемы контроля эхо-метода, используемые ПЭП;
- путь УЗК волны на бездефектном и дефектном объектах и соответствующие виды экрана дефектоскопа;
- настройка и браковка, коэффициент выявления;
- преимущества и недостатки эхо методов, область применения;

4.4.3 Комбинированные методы: *зеркально-теневой (ЗТМ), эхо-теневой, эхо-сквозной*:

- схемы контроля ЗТМ, используемые ПЭП;
- путь УЗК волны на бездефектном и дефектном объектах и соответствующие виды экрана дефектоскопа;
- настройка и браковка, коэффициент выявления;
- преимущества и недостатки ЗТМ метода, область применения;

4.5 Сканирование объекта контроля, схемы, основные параметры: скорость, шаг, пределы перемещения ПЭП.

4.6 А-, В- и С-развертки.

5 АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ

5.1 Физические процессы, влияющие на распространение акустической волны от ПЭП до отражателя.

6 ИЗМЕРЯЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ

6.1 Обоснование необходимости измерения характеристик дефектов

- зависимость опасности дефекта от его месторасположения;
- возможность устранения дефекта во время ремонта изделия (заварка, обточка);
- внесения изменений в технологический процесс производства, эксплуатации и ремонта, по характеристикам обнаруживаемых дефектов;

6.2 Эквивалентные площади дефектов, различные модели дефектов

- определение эквивалентности двух отражателей;
- эквивалентная площадь дефекта, определяемая по искусственным отражателям;

6.3 Условные размеры – относительный метод

- определение и схема;
- применение;
- основные закономерности от глубины залегания, формы дефектов, параметров ПЭП;

6.4 Условные размеры – абсолютный метод

- определение и схема;
- применение;
- основные закономерности от глубины залегания, формы дефектов, параметров ПЭП;

6.5 Координаты дефекта

- определения координаты в проекции на плоскость сканирования;
- глубина залегания дефекта эхо-методом;
- погрешность определения координат дефектов связанная с работой глубиномера и оператора;

6.6 Форма дефекта: плоскостной, компактный, объемный, линейный.

7 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТРОЛЯ

7.1 Определения и область применения основных параметров контроля, основных параметров метода, основных параметров аппаратуры.

7.2 Длина волны и частота ультразвука

7.3 Угол ввода луча и угол призмы

7.4 Направленность поля ПЭП и размеры ПЭП

7.5 Мертвая зона и длительность зондирующего импульса, длительность реверберационных шумов в призме ПЭП

7.6 Погрешность измерения координат и погрешность глубиномера

7.7 Чувствительность, определения и применение:

- Реальная чувствительность;
- Предельная чувствительность;

-Эквивалентная чувствительность;

-Условная чувствительность;

7.8 Классификация чувствительностей по назначению: поиска, оценки, браковки

7.9 Минимальный условный размер фиксируемого дефекта и скорость сканирования

7.10 Плотность сканирования и шаг сканирования, закон ВРЧ

7.11 Разрешающая способность по дальности и разрешающая способность аппаратуры

7.12 Фронтальная разрешающая способность и угловое поле ПЭП

