



Белорусско-Российский университет

Приборы и методы акустического контроля

1. Акустические методы контроля

Кафедра «Физические методы контроля»



1.1 Классификация методов



Акустические методы

Это методы, основанные на применении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля.

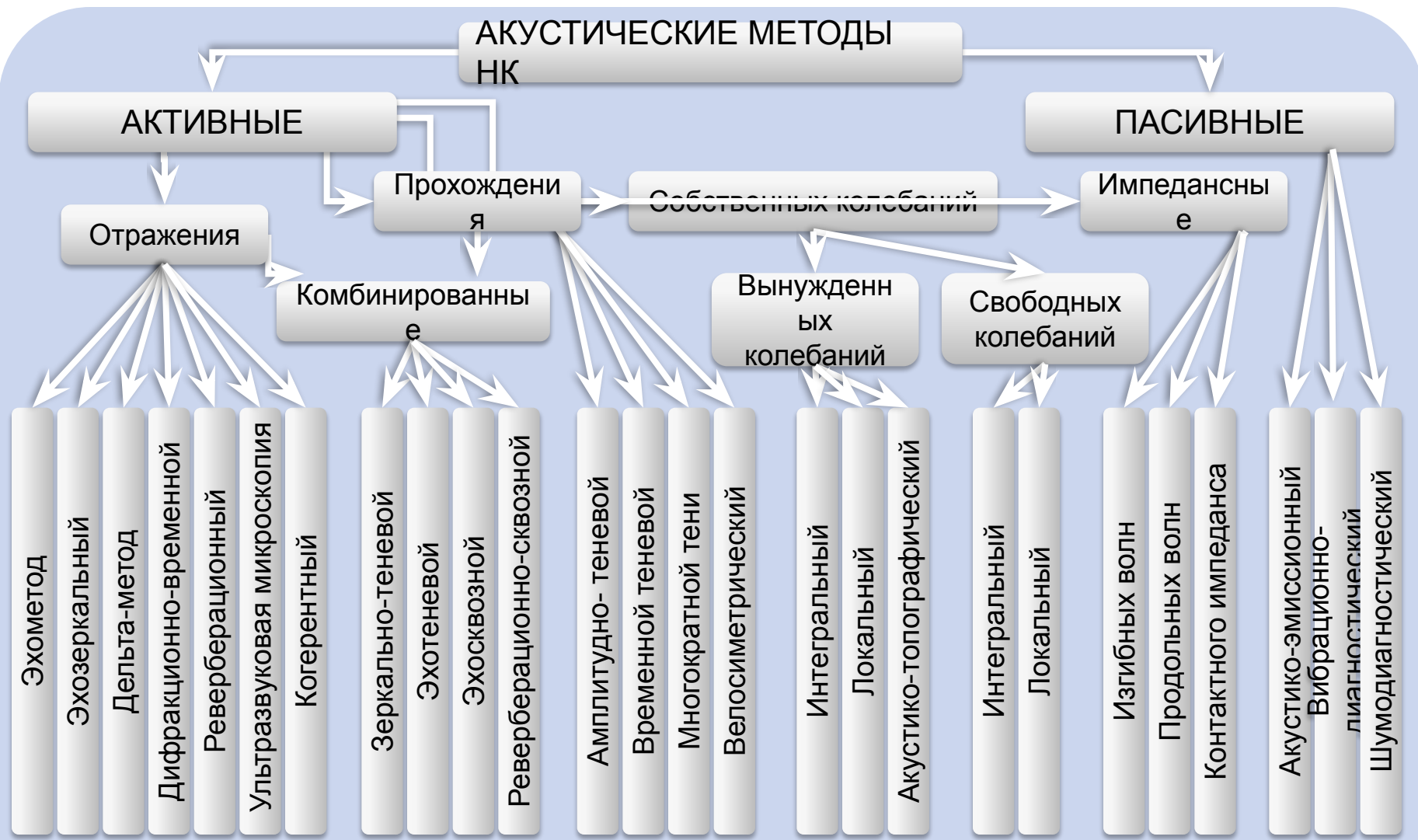
Их делят на две большие группы:

Активные методы

- используют излучение и приём акустических колебаний и волн.

Пассивные методы

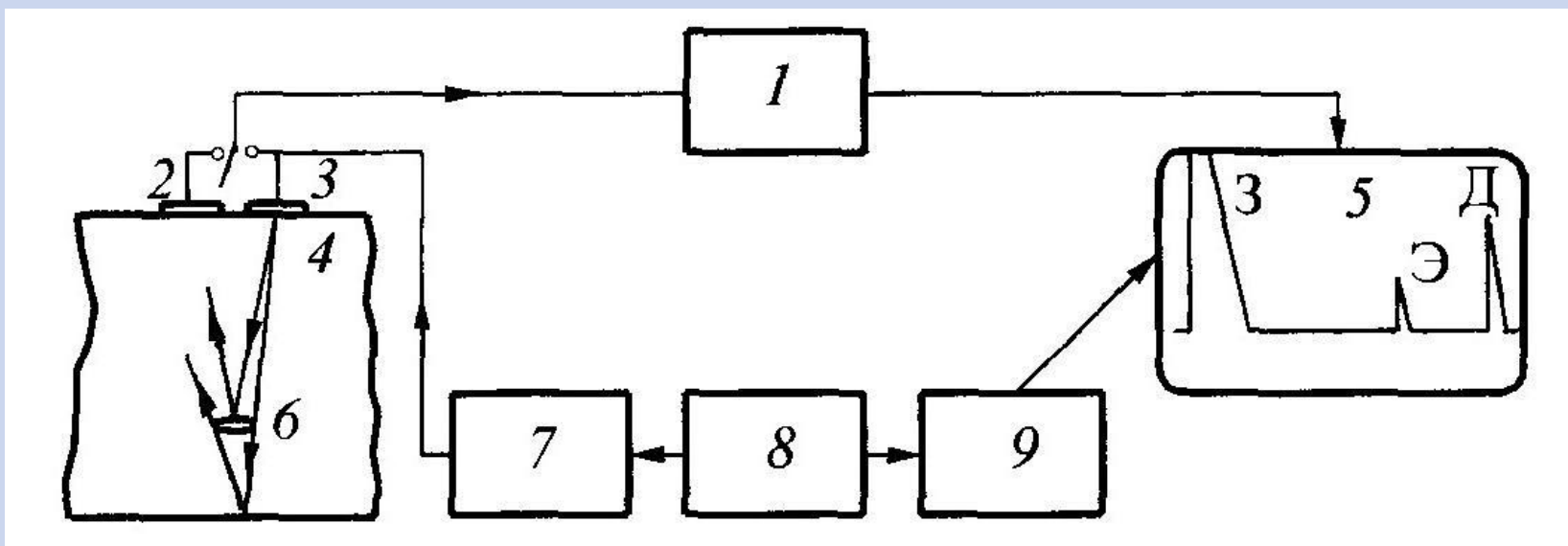
- основаны только на приёме колебаний и волн.





Методы отражения

Реализуются посредством одного или двух преобразователей и основаны на анализе параметров отраженных от поверхности раздела двух сред импульсов акустических волн.



Упрощенная структурная схема эхodefектоскопа

1-усилитель; 2,3-преобразователи; 4-ОК; 5-развертка; 6-дефект; 7-генератор ЗИ; 8-синхронизатор; 9-генератор Р.



Методы отражения

Эхометод

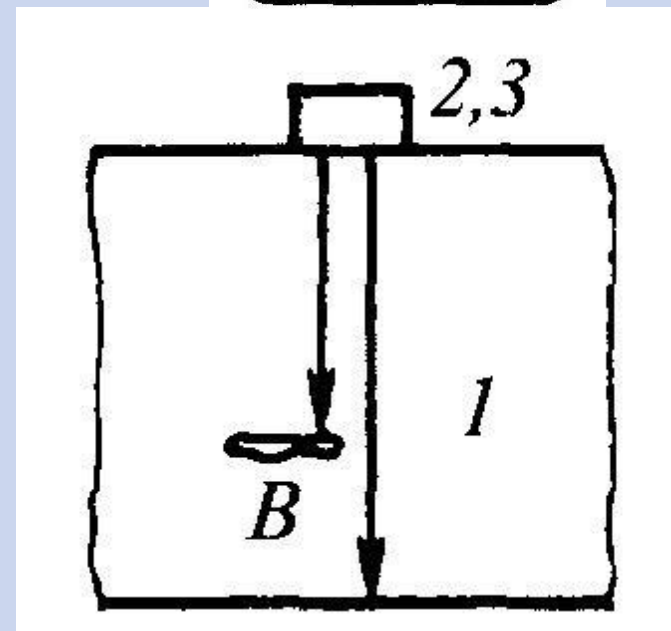
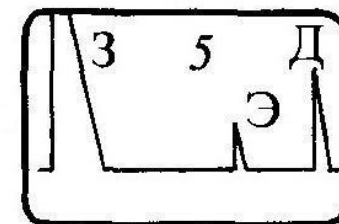
Основан на регистрации эхосигналов от дефектов - несплошностей.

На экране УЗ-дефектоскопа отображается информация двух видов. Горизонтальная линия соответствует времени пробега импульса в ОК, а это время пропорционально пути импульса. Высота пиков (импульсов) пропорциональна амплитудам эхосигналов.

З – зондирующий импульс.

Д – донный сигнал.

Э – эхосигнал от дефекта.



1-ОК; 2-излучатель; 3-приемник.



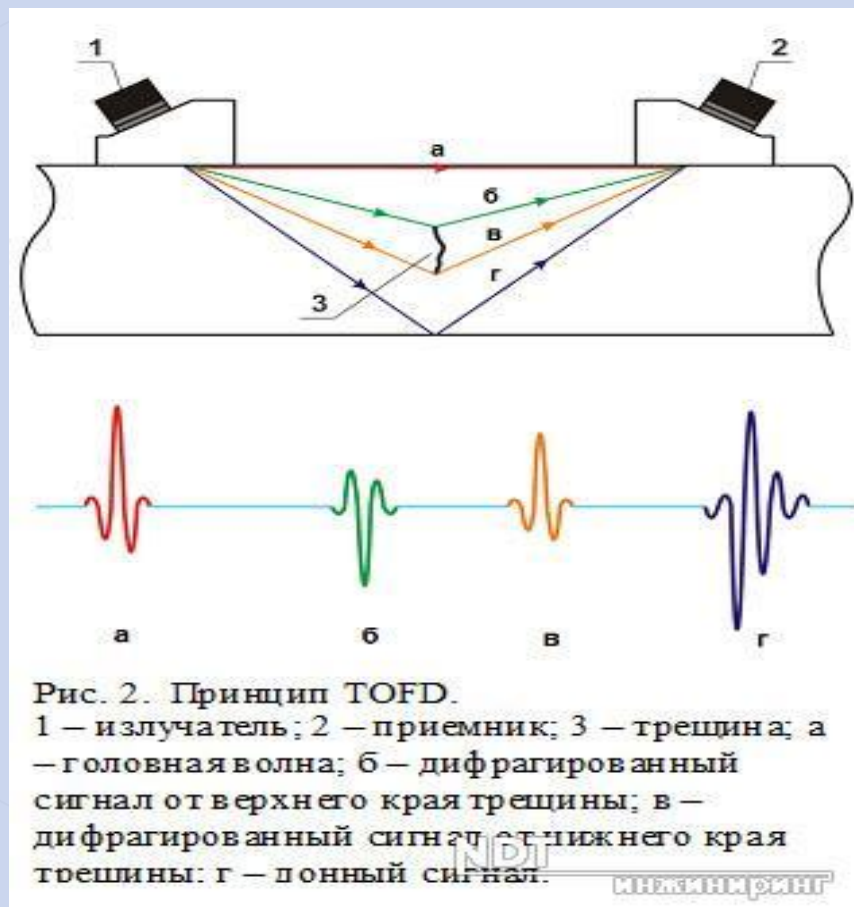
Методы отражения

Дифракционно-временной

Основан на приеме волн, рассеянных на концах дефекта, причем могут излучаться и приниматься как продольные, так и поперечные волны.

Главная информационная характеристика – время прихода сигнала.

Практическое применение получил вариант при котором излучаются и принимаются продольные волны, т. к. они первыми приходят на приемник.





Методы прохождения

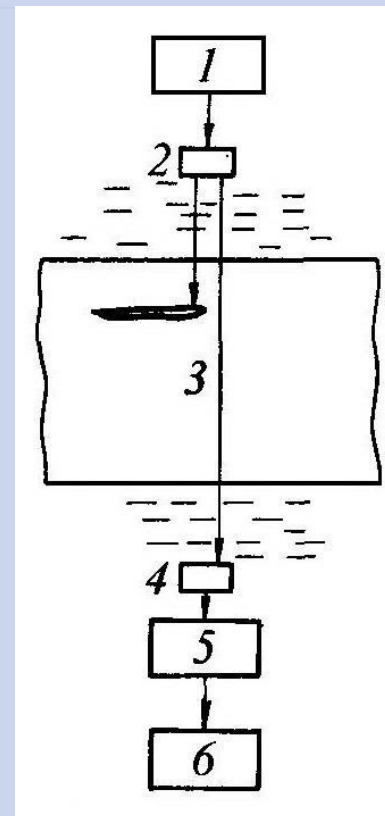
Излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны от ОК или с одной стороны, на определенном расстоянии друг от друга. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала.



Методы прохождения

Амплитудно-теневой

Основан на регистрации уменьшения амплитуды сквозного сигнала под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень.



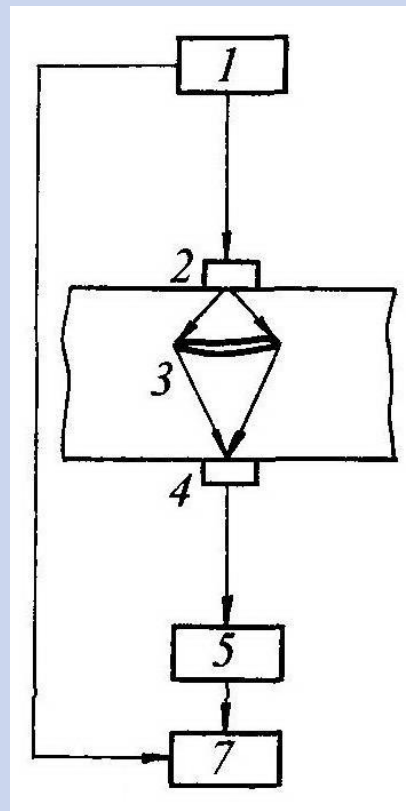
1-генератор, 2-излучатель, 3-ОК, 4-приемник, 5-усилитель, 6-изм. А.



Методы прохождения

Временной теневой

Основан на измерении запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. При этом тип упругой волны не меняется.



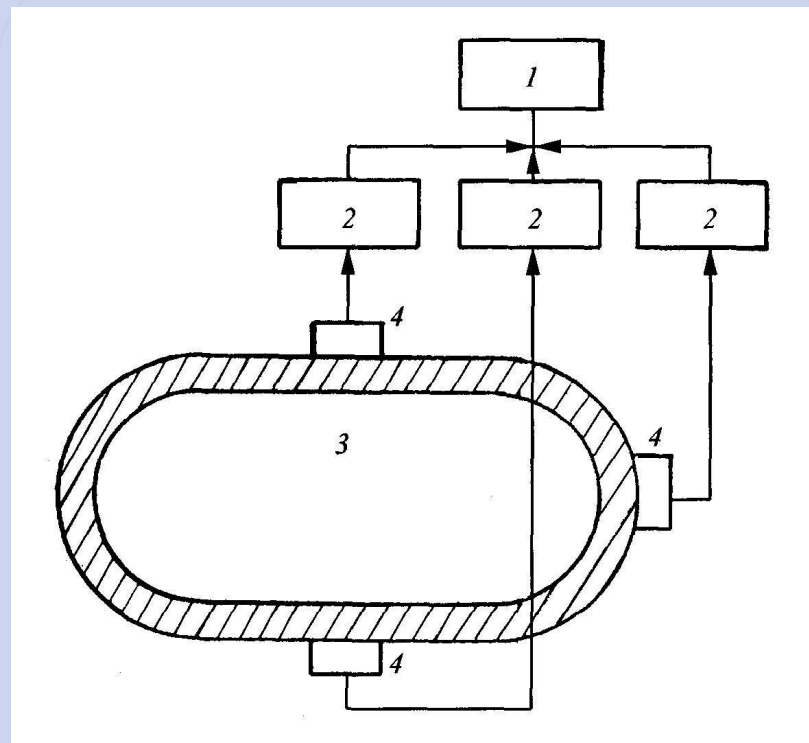
1-генератор, 2-излучатель, 3-ОК, 4-приемник, 5-усилитель, 7-изм. времени прихода импульса.



Пассивные методы

Акустико-эмиссионный

Основан на регистрации упругих волн, возникающих в результате акустической эмиссии. Явление акустической эмиссии заключается в излучении упругих волн самим материалом в результате внутренней динамической перестройки его структуры. Наиболее характерные источники АЭ - это возникновение и развитие трещин, фазовые превращения, движение скоплений дислокаций.



1-блок обработки информации; 2-усилитель;
3-ОК; 4-приемник.



1.2 Классификация акустической аппаратуры НК



По режиму работы:

- Импульсные
- Непрерывные



По назначению:

- Дефектоскопы
- Толщиномеры
- Анализаторы физико-механических характеристик материалов (структуромеры, твердомеры, тензометры, измерители упругих свойств и прочности и др.)



По виду измеряемого параметра:

- Фазометры
- Микросекундомеры
- Частотомеры
- Велосиметры
- Измерители затухания
- Измерители АЭ



По способу ввода и приема колебаний:

- бесконтактные
- контактные
- иммерсионные
- струйные
- с фокусировкой УЗ-луча



По диапазону частот:

- звуковые (20...20000 Гц)
- низких УЗ-частот (20...200кГц)
- средних УЗ-частот (0,2...10 МГц)
- высоких УЗ-частот (10^7 ... 10^9 Гц)
- сверхвысоких УЗ-частот (свыше 10^9 Гц)



По типу преобразователей:

- пьезоэлектрические
- магнитострикционные
- электромагнитно-акустические
- электромеханические
- механические



По типу индикаторного устройства:

- с цифровым отсчётом
- осциллографические
- с механическим отсчётным устройством
- с телевизионным индикатором
- со стрелочным индикатором
- со звуковым или световым сигнализатором
- с визуализатором



В зависимости от степени механизации и автоматизации :

- Ручные
- Механизированные
- Автоматизированные
- С использованием ЭВМ
- С совмещением телевизионной и вычислительной техники



Дефектоскопы





Твердомеры





Толщиномеры



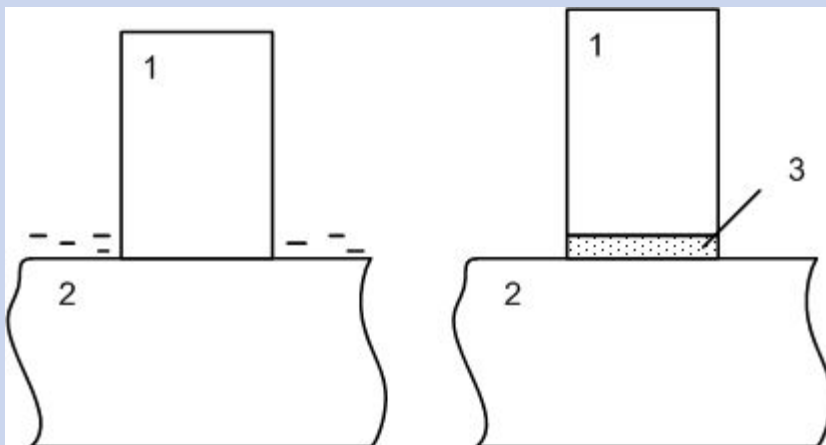


1.3 Способы акустического контакта преобразователя с объектом контроля



Контактный способ

Акустический контакт достигается прижатием преобразователя к поверхности объекта, на которую предварительно наносится слой жидкости толщиной менее длины волны

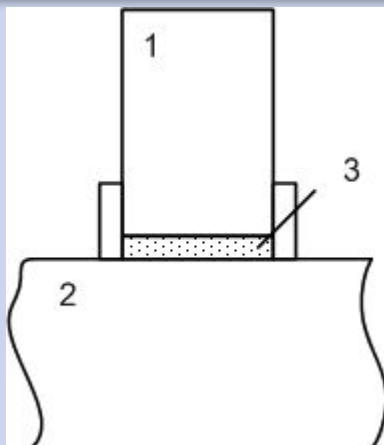


- 1 – преобразователь
- 2 – изделие
- 3 – эластичный протектор



Щелевой способ

Предполагает создание между преобразователем и объектом зазора толщиной порядка длины волны и заполнение его контактной средой. Жидкость в зазоре удерживается силами поверхностного натяжения или подается непрерывно под давлением

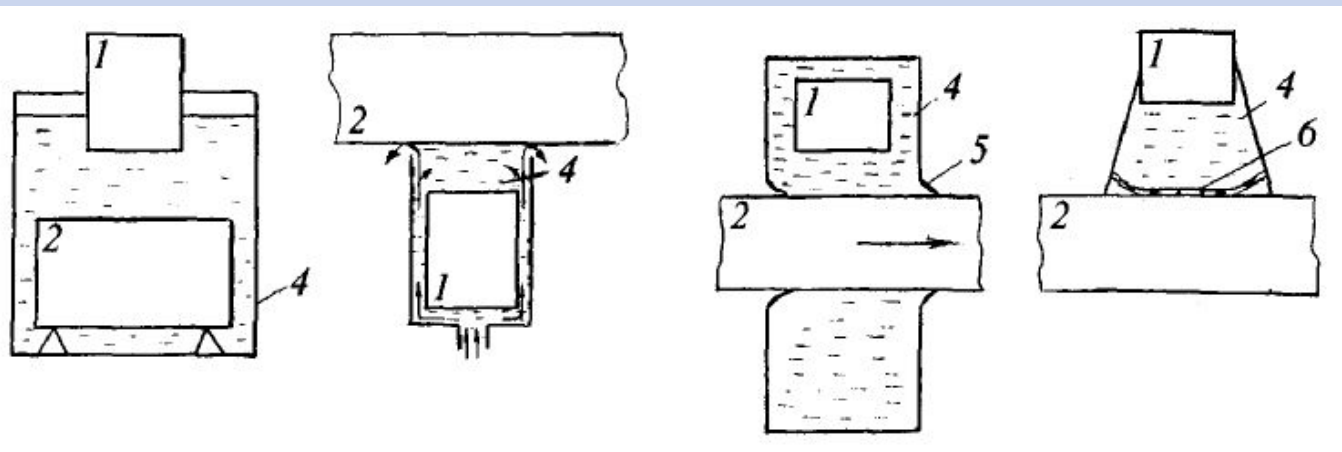


- 1 – преобразователь
- 2 – изделие
- 3 – ограничитель



Иммерсионный способ

Обеспечивает акустический контакт через слой жидкости толщиной больше пространственной длительности акустического импульса для импульсного излучения или нескольких длин волн для непрерывного излучения. Для проведения контроля иммерсионным способом изделие погружают в ванну либо создают локальную ванну в области ввода ультразвуковых волн.

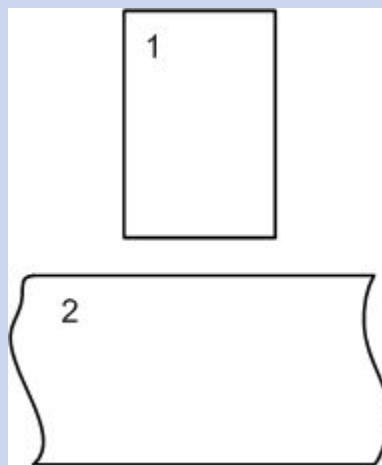


- 1 – преобразователь
- 2 – изделие
- 4 – иммерсионная ванна
- 5 – сольники
- 6 – эластичная мембрана



Бесконтактный способ

Акустические колебания в объекте контроля возбуждаются через слой воздуха (воздушно-акустическая связь) или с помощью электромагнитных, оптико-тепловых и др. явлений.



1 – преобразователь
2 – изделие



1.4 Преимущества и ограничения акустических методов контроля



К преимуществам НК акустическими методами следует отнести:

- высокую чувствительность, позволяющую выявлять мелкие дефекты;
- большую проникающую способность, обеспечивающую обнаружение внутренних дефектов в крупногабаритных изделиях;
- возможность определения координат дефектов;
- практически мгновенную индикацию дефектов, позволяющую автоматизировать контроль;
- простоту и высокую производительность контроля;
- возможность контроля при одностороннем доступе к объекту;
- возможность оперативного контроля без отбора проб с получением результатов анализа в момент измерений;
- почти полную безопасность работы оператора и окружающего персонала;
- возможность контроля и измерения большого числа физических и физико-механических параметров материалов и изделий.



Применение акустического контроля ограничивают следующие факторы:

- неоднородность внутренней структуры материала, что вызывает сильное рассеяние ультразвуковых волн, ослабляет полезный сигнал и приводит к появлению шумов;

- сложность формы и малые размеры изделий, что затрудняет ввод УЗ-волн и требует разработки специальных методик контроля;

- грубая поверхность объекта, которая снижает чувствительность контроля и затрудняет стабилизацию контакта;

- наличие элемента субъективности при оценке размеров и характера выявленных дефектов



Основными параметрами ультразвуковой волны являются:

u - смещение частиц относительно положения равновесия;

v - колебательная скорость частиц;

φ - фаза;

f - частота колебаний частиц в волне;

T - период колебаний;

λ - длина волны;

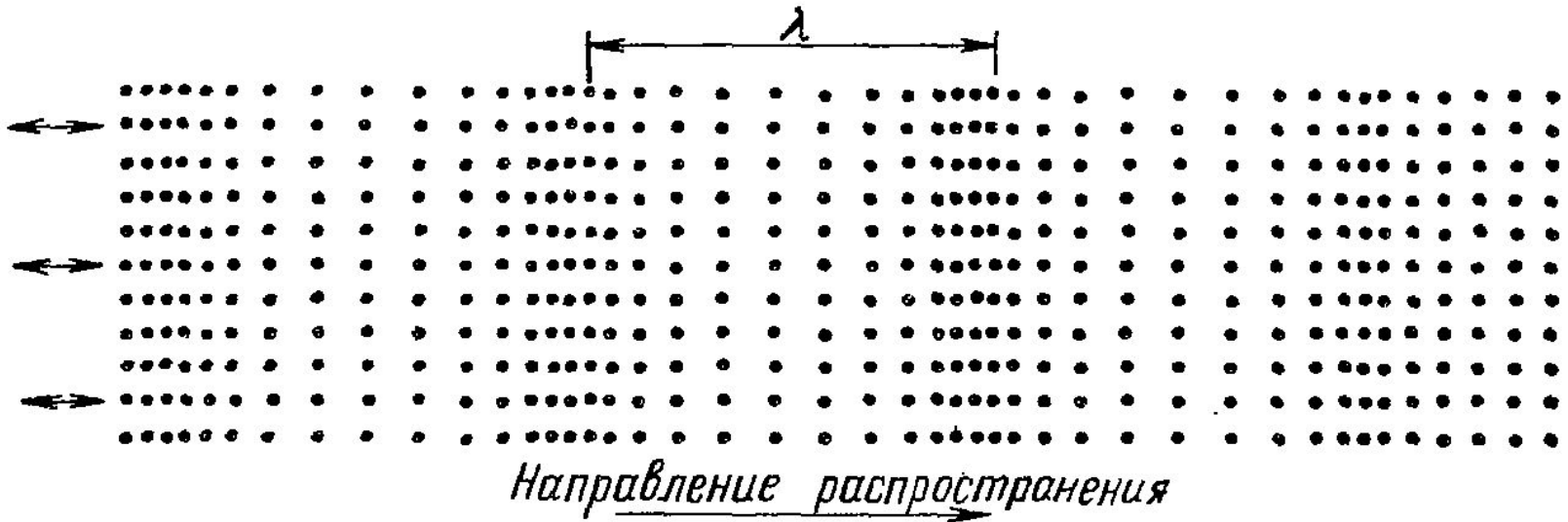
c - скорость волны в среде (скорости различных типов волн различны);

p - давление в звуковой волне;

w - плотность потока энергии;

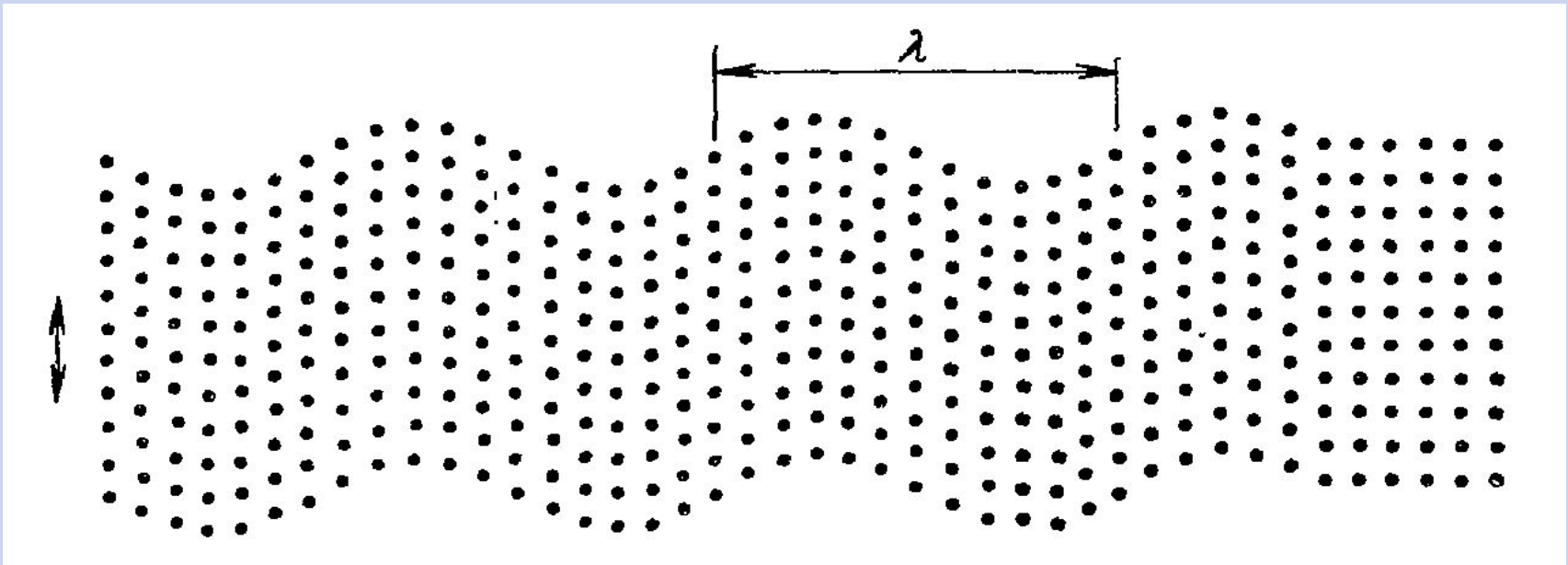


В жидкостях и газах, которые не обладают упругостью формы, могут распространяться только *продольные волны* (растяжения - сжатия). Колебания частиц происходят в направлении распространения волны.





В неограниченных изотропных твердых телах существует два типа волн: волны *расширения* или *продольные* и волны *сдвига* или *поперечные*. В сдвиговых волнах движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны, а деформация является чистым сдвигом.





Для безграничной среды скорости распространения продольной и поперечной волн определяются упругими постоянными:

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

Отношение скоростей этих волн зависит только от значения *коэффициента Пуассона* среды ν - отношение сжатия к удлинению растягиваемого стержня.

$$\nu = \frac{\Lambda}{2(\Lambda + \mu)} = \frac{E}{2G}.$$

где Λ и μ – *константы Ламэ*, E и G – *модуль нормальной упругости и сдвига*.

Продольные и поперечные волны (объемные волны) наиболее широко используются для НК материалов и изделий. Эти волны лучше всего выявляют дефекты при нормальном падении на их поверхность.

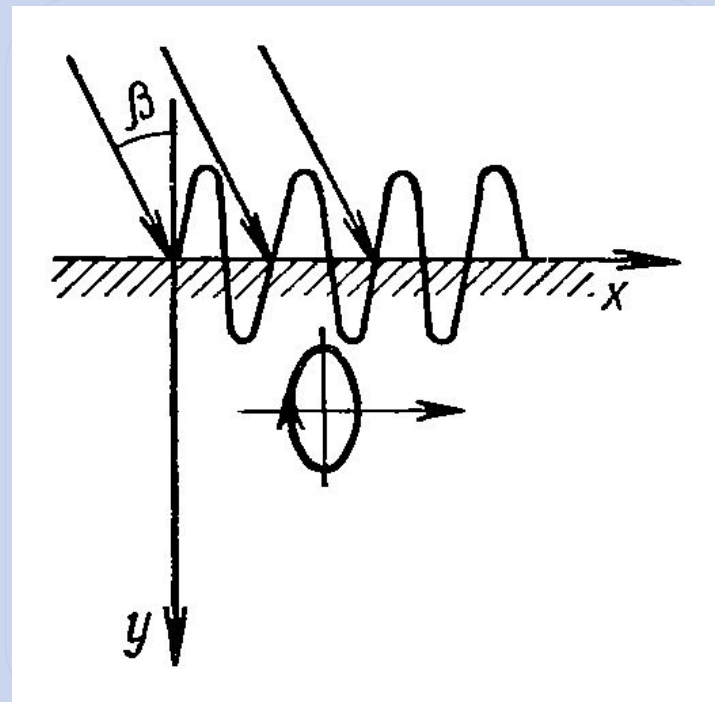
В ограниченных твердых телах кроме объемных существуют другие типы волн. Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться *поверхностные* и *головные* волны.



Поверхностные волны.

Волны Рэлея.

Упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной (или слабо нагруженной) границы твердого тела и быстро затухающие с глубиной. На глубине длины волны λ_s интенсивность составляет около 5% интенсивности на поверхности тела. При распространении поверхностной волны частицы тела движутся, вращаясь по эллипсам с большой осью, перпендикулярной границе. Вытянутость эллипса с глубиной увеличивается. Волна, подобная рэлеевской (квазирэлеевская), может распространяться и вдоль искривленной поверхности, но с большим затуханием.



$$c_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



2.4 Акустические свойства сред



Скорость распространения волны

Скорость продольной волны в жидкостях и газах:

$$c = \sqrt{L/\rho}$$

где L – модуль всестороннего сжатия

Скорость продольной волны в твёрдом теле, размеры которого в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны, много больше длины волны :

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

где E – модуль нормальной упругости

Скорость поперечной волны:

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

где G – модуль сдвига

Скорость определяется физическими свойствами среды и не зависит от частоты или амплитуды волн



Удельное волновое сопротивление среды (характеристический импеданс)

Поскольку в металлах $\nu=0.3$, то между продольной и поперечной волной существует соотношение

$$C_t = 0.55 \cdot C_l$$

Представляет собой отношение акустического давления к колебательной скорости в бегущей волне:

$$z = \sqrt{\rho/\nu}$$

В большинстве случаев её можно считать действительной величиной и численно равной произведению плотности на скорость звука:

$$z = \rho \cdot c \quad [\text{Дж} \cdot \text{с} / \text{м}^3]$$

Волновое сопротивление определяется только свойствами среды



Коэффициент затухания:

Характеризует ослабление волны в следствие необратимых потерь при её распространении в среде. Коэффициент затухания складывается из коэффициента поглощения и коэффициента рассеяния:

$$\delta = \delta_i + \delta_\delta$$

Изменение коэффициента затухания с изменением температуры:

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

Для газов и большинства жидкостей не засорённых пылью, пузырьками, рассеяние отсутствует, а коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты:

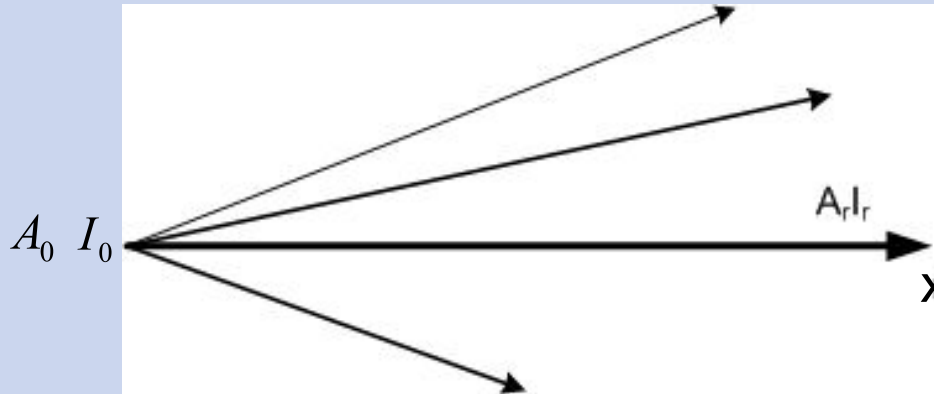
$$\delta = \delta' \cdot f^2$$

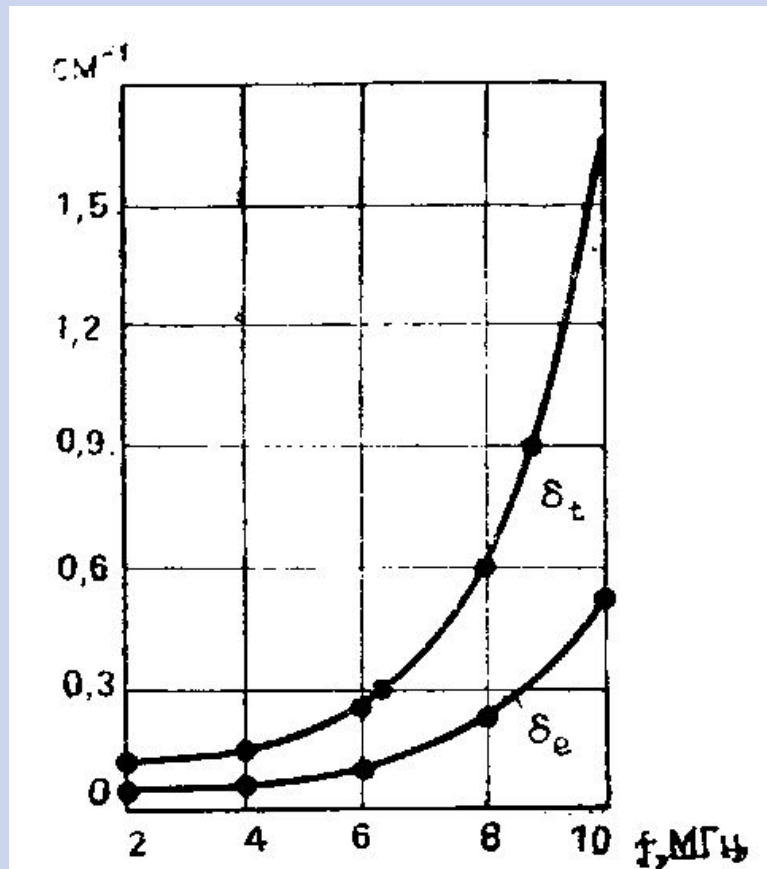


Зная коэффициент затухания, можно определить амплитуду смещения и интенсивность колебаний в любом сечении :

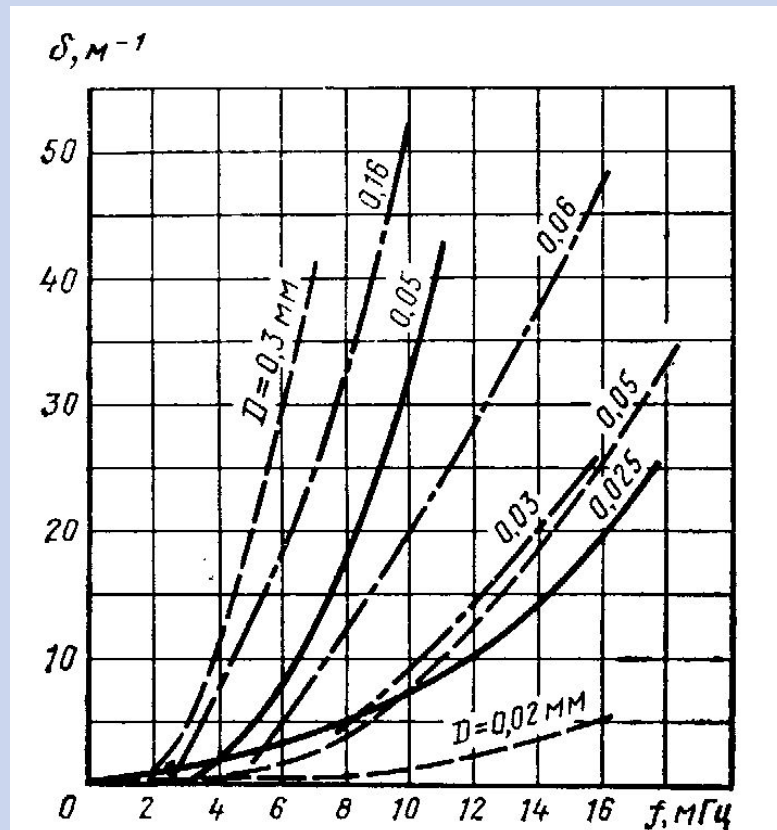
$$A_x = A_0 e^{-\delta x}; \quad I_x = I_0 e^{-2\delta x};$$

где A_0 и A_x - амплитуды смещения, а I_0 и I_x - интенсивность колебаний в сечениях x_0 и x соответственно.





Зависимость коэффициента отражения продольной и поперечной волн в железе от частоты.



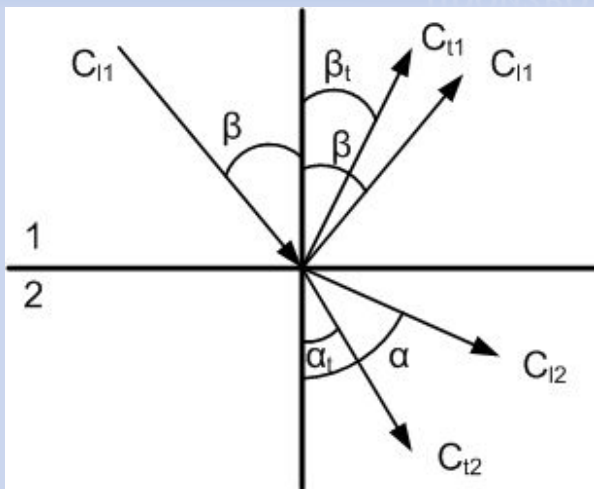
Зависимость коэффициента затухания продольных волн в сталях 15 (сплошные) и 40 (штриховые) от частоты



2.5 Отражение и преломление акустических волн на границе раздела двух сред



Случай, когда плоская упругая волна, распространяясь в среде 1, падает под произвольным углом β на границу раздела.



Волна частично проходит через границу, а частично отражается от нее. Необходимо принять во внимание не три, а пять волн: падающую, поперечную и продольную отраженные и поперечную и продольную преломленные. Если одна из сред является жидкостью или газом, поперечные волны в ней отсутствуют и общее число волн сокращается.

В случае продольной падающей волны выполнение граничных условий эквивалентно следующему (закон Снеллиуса):

$$\frac{1}{c_{11}} \sin \beta = \frac{1}{c_{11}} \sin \beta_t = \frac{1}{c_{t1}} \sin \beta_t = \frac{1}{c_{t2}} \sin \alpha = \frac{1}{c_{12}} \sin \alpha_1,$$

где c_{11} , c_{12} , c_{t1} , c_{t2} - скорости распространения продольных и поперечных волн в верхней и нижней средах



Коэффициент отражения R определяется как отношение амплитуды отражённой волны и падающей волны :

$$R = \frac{A_{i\delta\delta}}{A_{i\delta\delta}}$$

Коэффициент прозрачности D - это отношение амплитуд прошедшей и падающей волн:

$$D = \frac{A_{i\delta\delta}}{A_{i\delta\delta}}$$

Коэффициенты отражения и прохождения по амплитуде при нормальном падении волны

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}; D = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1};$$

На практике чаще используются коэффициенты по энергии

$$\tilde{R} = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2; \tilde{D} = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}; \tilde{R} + \tilde{D} = 1.$$



При наклонном падении продольной волны на границу:

$$\tilde{R} = \left(\frac{Z_t \cos^2 2\alpha + Z_1 \sin^2 2\alpha - Z_1}{Z_t \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1} \right)^2; \quad \tilde{D}'_1 = \frac{4Z_t Z_1 \cos^2 2\alpha}{(Z_t \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1)^2}; \quad \tilde{D}_t = \frac{4Z_t Z_1 \cos^2 2\alpha}{(Z_t \cos^2 2\alpha + Z_t \sin^2 2\alpha + Z_1)^2}$$

Коэффициент прохождения (отражения) по энергии определяется произведением соответствующих коэффициентов прохождения (отражения) по амплитуде в прямом и обратном направлениях через границу

$$\tilde{D}_{tt} = D_{tt} \cdot D'_{tt},$$

где D_{tt} - коэффициент прохождения по амплитуде для падающей продольной и преломленной поперечной волн;
 D'_{tt} - коэффициент прохождения по амплитуде для падающей поперечной и преломленной в верхнюю среду продольной волн, проходящих через границу в обратном направлении

Сумма всех коэффициентов отражения и прохождения по энергии равна единице из закона сохранения энергии. Например, при падении продольной волны на границу двух твердых тел

$$\tilde{R}_{\parallel} + \tilde{R}_{tt} + \tilde{D}_{\parallel} + \tilde{D}_{tt} = 1.$$



Критические углы

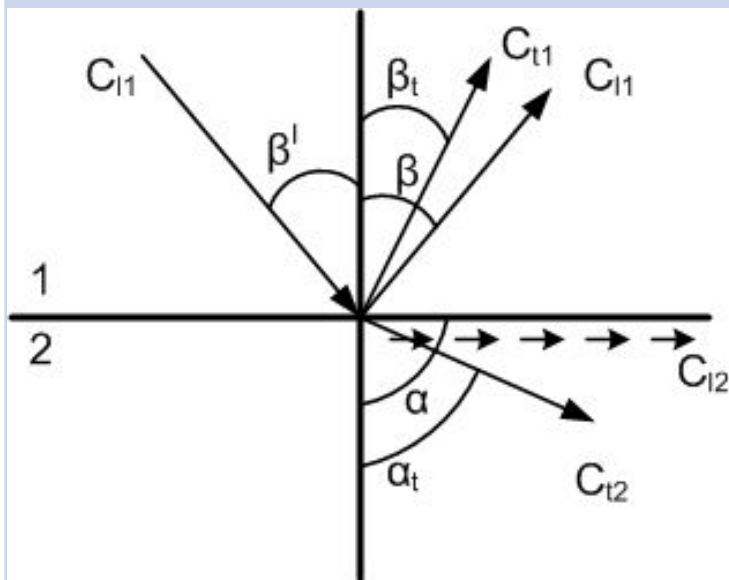
В случае, когда скорость распространения падающей волны меньше, чем скорость распространения какой-либо преломленной (или отраженной) волны, то существует критическое значение угла падения, при котором соответствующая преломленная (или отраженная) волна превращается в неоднородную волну, т.е. концентрируется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

Рассмотрим условия существования критических углов. Если первой и второй средой являются твердые тела, то из закона синусов вытекает возможность существования целого ряда критических углов.



Первый критический угол β^l

При падении продольной волны существует при условии $c_{11} < c_{12}$. Он соответствует условию слияния продольной преломленной волны с поверхностью;



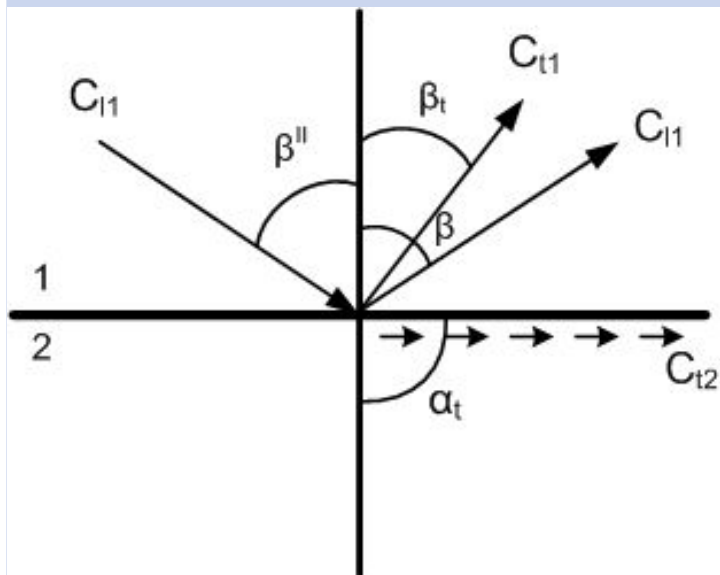
$$\beta^l = \arcsin \frac{c_{11}}{c_{12}}.$$

Распространяющаяся вдоль границы неоднородная волна, называемая *головной*, используется в дефектоскопии. Максимальное значение напряжения головная волна имеет под поверхностью объекта и с ее помощью удастся обнаруживать подповерхностные дефекты.



Второй критический угол β''

Существует при условии $c_{11} < c_{t2}$ (падает продольная волна) и он соответствует условию слияния с поверхностью преломленной поперечной волны;



$$\beta'' = \arcsin \frac{c_{11}}{c_{t2}}.$$

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

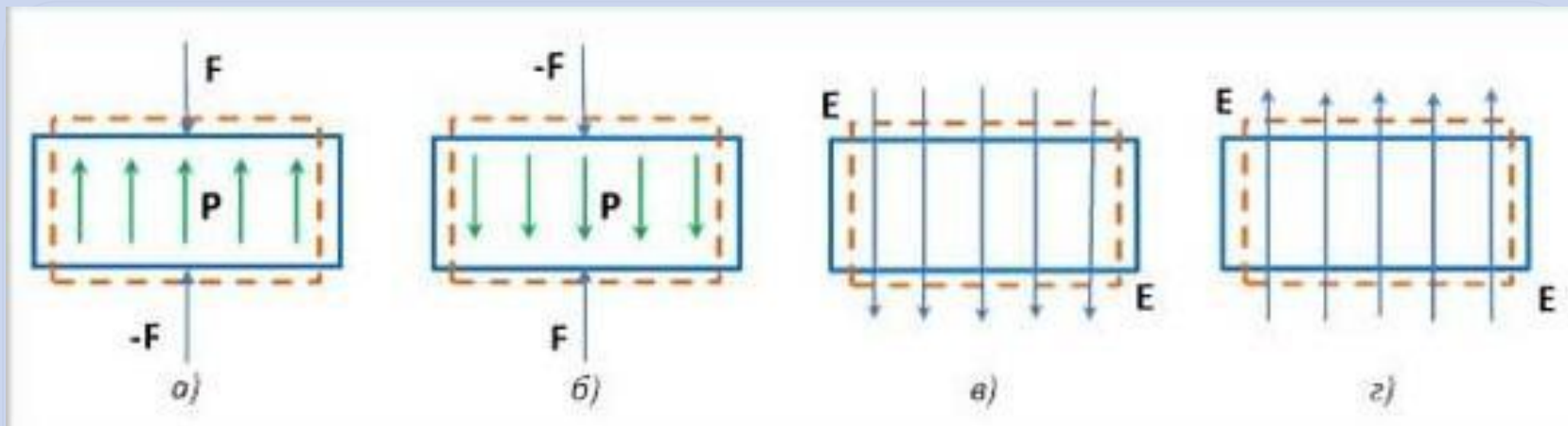


3.1 Пьезоэффект и свойства пьезоматериалов



Пьезоэффект - связь между электрической поляризацией (индукцией) или электрическим полем и механическим напряжением или деформацией, которая наблюдается у некоторых диэлектриков и полупроводников.

Различают **прямой пьезоэффект** (рис. а,б) - возникновение поляризации под действием механических напряжений и **обратный пьезоэффект** (рис. в,г) - зависимость деформации пьезоэлектриков от электрического поля.



Стрелками F и E изображены внешние воздействия - механическая сила и напряженность электрического поля. Штриховыми линиями показаны контуры пьезоэлектрика до внешнего воздействия, сплошными линиями - контуры деформации пьезоэлектрика; P - вектор поляризации.

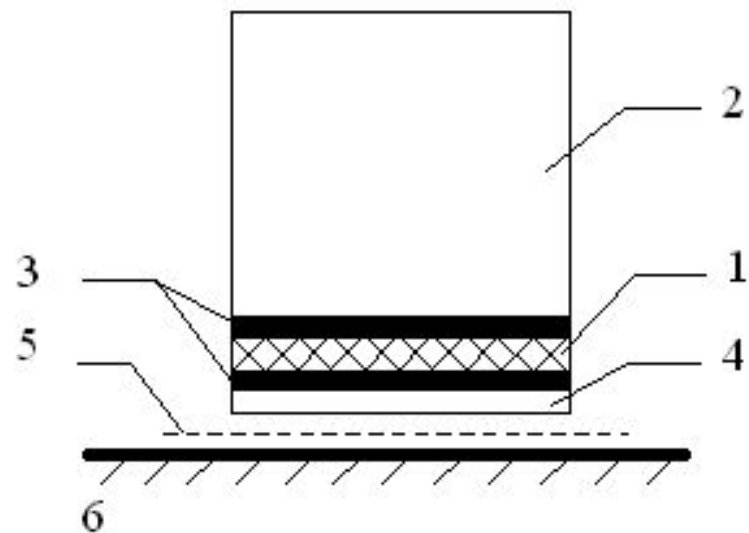


3.2 Основные соотношения, определяющие работу пьезопреобразователей



Пьезоэлектрические преобразователи представляют собой устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии в акустическую и наоборот. Принцип их действия основан на использовании пьезоэффекта.

Чувствительным элементом является пьезопластина 1, поляризованная по толщине. Ее плоскости покрыты серебряными электродами 3. Одна плоскость пьезопластины приклеивается к демпферу 2. Между пластиной и средой 6, в которую излучается ультразвук, располагается несколько тонких слоев: электрод, протектор 4, защищающий пластину от повреждений, и прослойка смазки 5.



**Прямой контактный
пьезопреобразователь**



ПЭП классифицируются по следующим признакам:

По типу волны, возбуждаемой в ОК, различают преобразователи продольных, сдвиговых, головных, поверхностных или других типов волн;

По углу ввода колебаний в изделие различают:

- прямые преобразователи, которые вводят и/или принимают колебания по нормали к поверхности ОК в точке ввода;
- наклонные преобразователи, которые вводят и/или принимают колебания в направлениях, отличных от нормали к поверхности ОК;



По способу размещения функций излучения и приема различают:

- совмещенные ПЭП, у которых один и тот же пьезоэлемент работает как в режиме излучения, так и в режиме приема;
- раздельно-совмещенные (РС) ПЭП, у которых в одном корпусе размещены два или более пьезоэлемента, одни из которых работают только в режиме излучения, а другие - только в режиме приема упругих колебаний;

По способу осуществления акустического контакта:

- контактные ПЭП, рабочая поверхность которых соприкасается с поверхностью ОК или находится от нее на расстоянии меньше половины длины волны в контактной жидкости;
- иммерсионные ПЭП, которые работают при наличии между поверхностями преобразователя и ОК слоя жидкости толщиной больше пространственной протяженности акустического импульса.

Особую группу составляют фокусирующие ПЭП, обеспечивающие фокусировку акустической энергии в определенной области пространства.



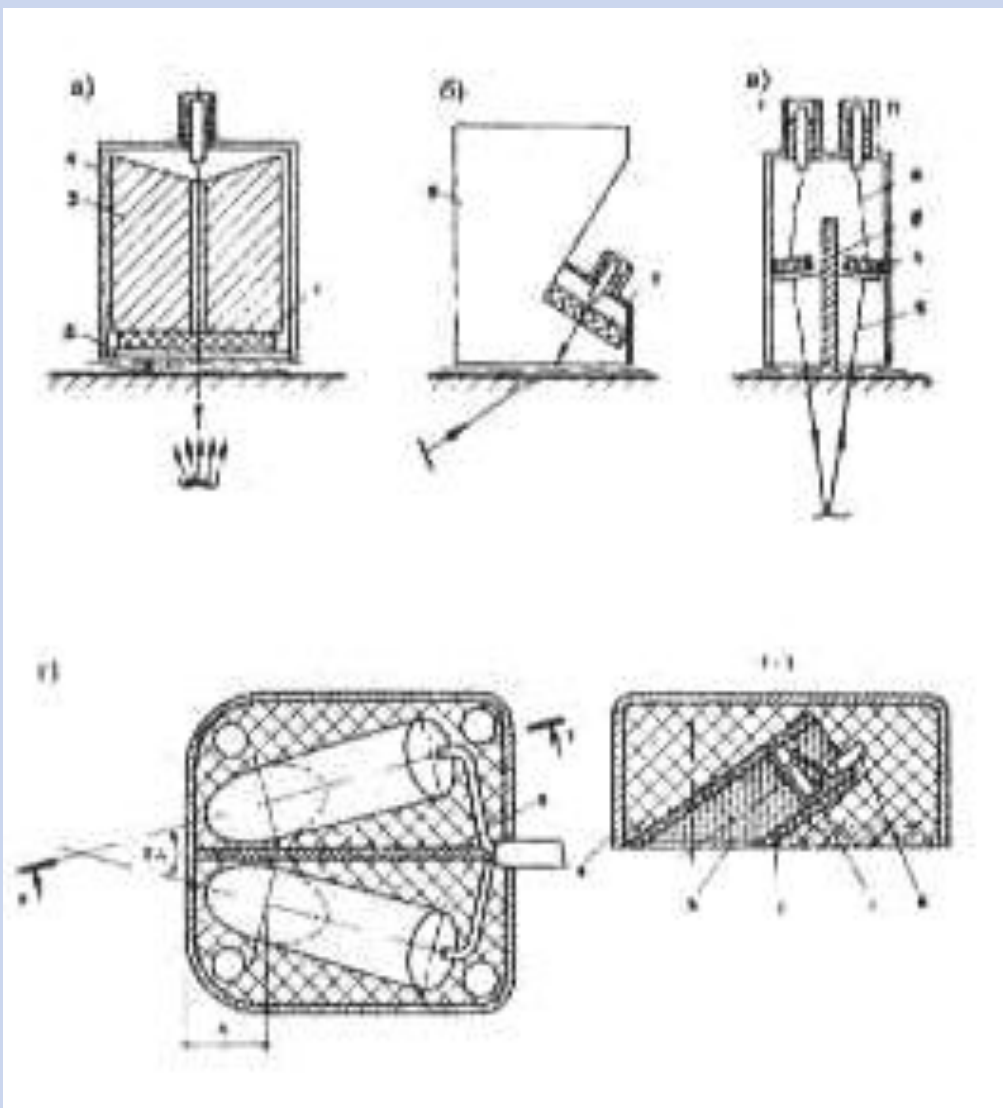
Для основных типов ПЭП в России принято буквенно-цифровое обозначение, которое формируется следующим образом:

- *первый знак - буква: П - преобразователь;*
- *второй знак - первая цифра: 1 - контактный; 2 - иммерсионный; 3 - контактно-иммерсионный;*
- *третий знак - вторая цифра: 1 - прямой; 2 - наклонный;*
- *четвертый знак - третья цифра: 1 - совмещенный; 2 - отдельно-совмещенный; 3 - отдельный.*

Некоторые российские фирмы вместо указанного обозначения применяют аббревиатуру, отражающую тип преобразователя и фирму-изготовителя. Далее могут быть указаны основные технические параметры - частота, угол ввода (в сталь), размер пьезоэлемента. Каждый современный преобразователь имеет индивидуальный номер.

Пример:

- П121-2,5-40° № 38: контактный наклонный совмещенный преобразователь с частотой 2,5 МГц и углом ввода 40°, индивидуальный номер 38.





3.5 Акустическое поле преобразователя



Определения

Акустическое поле

- Область пространства, в которое преобразователь излучает и из которого может принимать волны.

Поле излучения преобразователя

- зависимость амплитуды излучения от положения исследуемой точки B в пространстве.

Поле приема

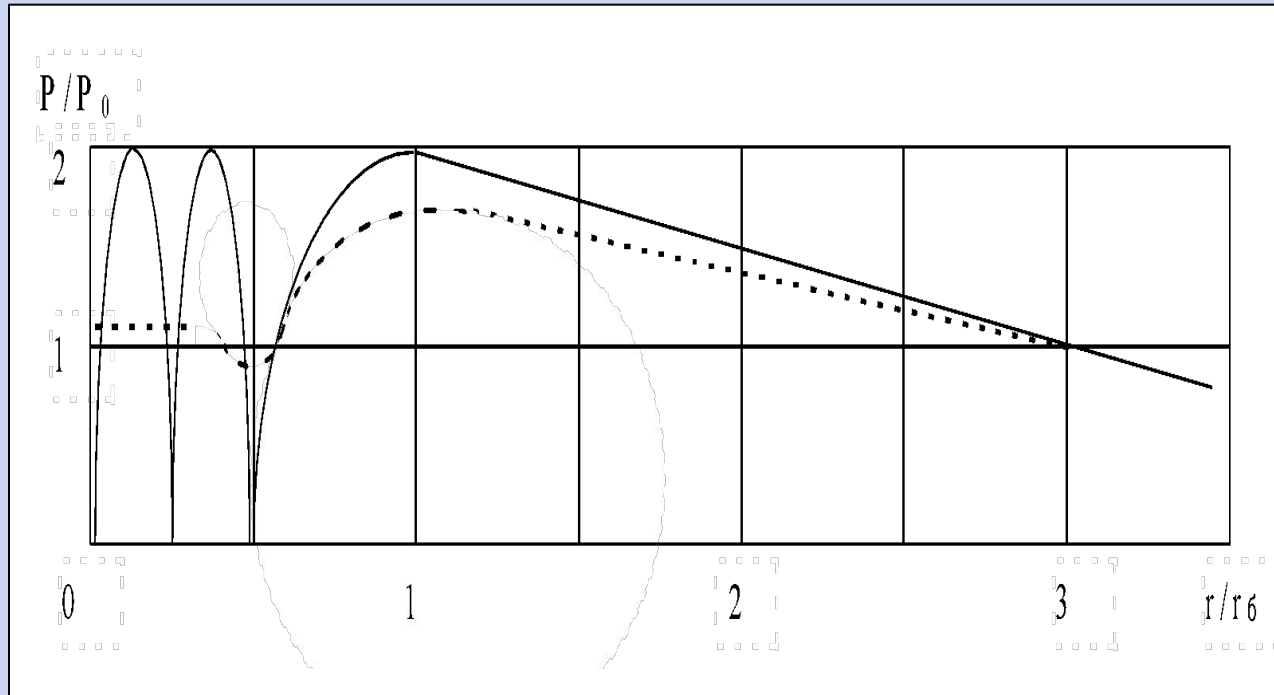
- зависимость амплитуды принятого преобразователем сигнала от положения в пространстве точечного источника B излучения.

Поле излучения-приема

- зависимость амплитуды принятого сигнала от положения в пространстве точечного отражателя B , рассеивающего одинаково по всем направлениям и облучаемого тем же преобразователем.



Поле прямого контактного преобразователя



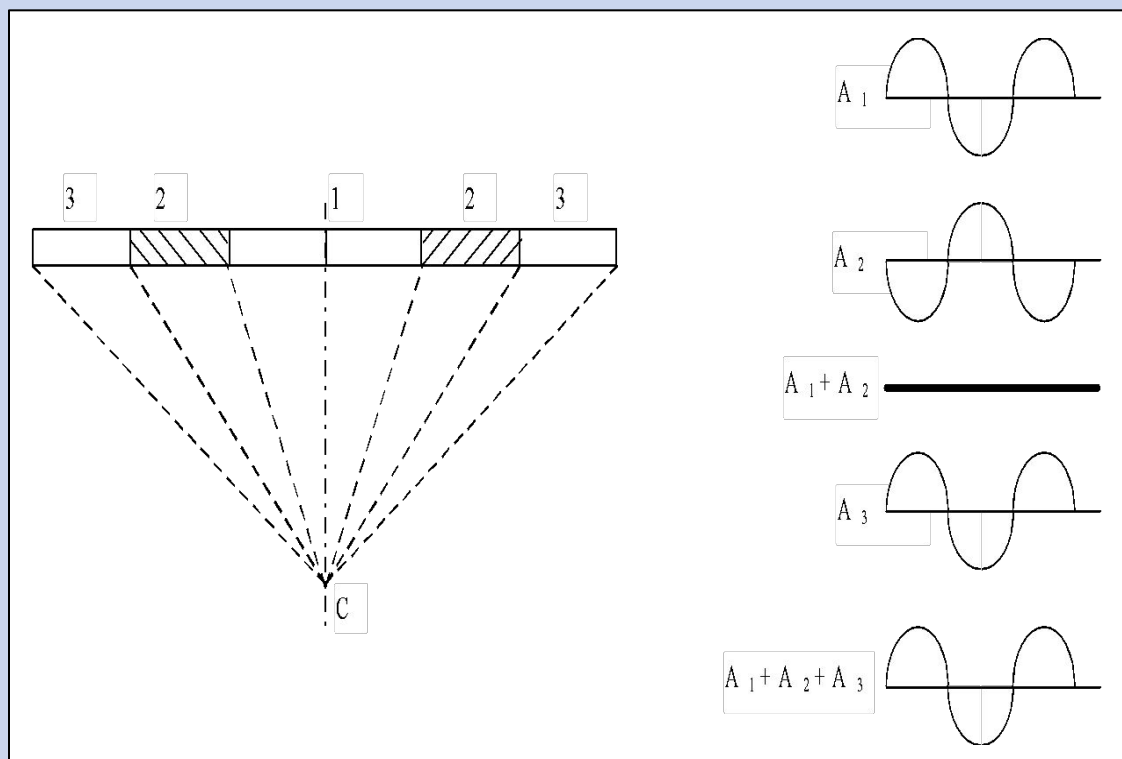
Акустическое поле на оси дискового преобразователя



Приборы и методы акустического контроля

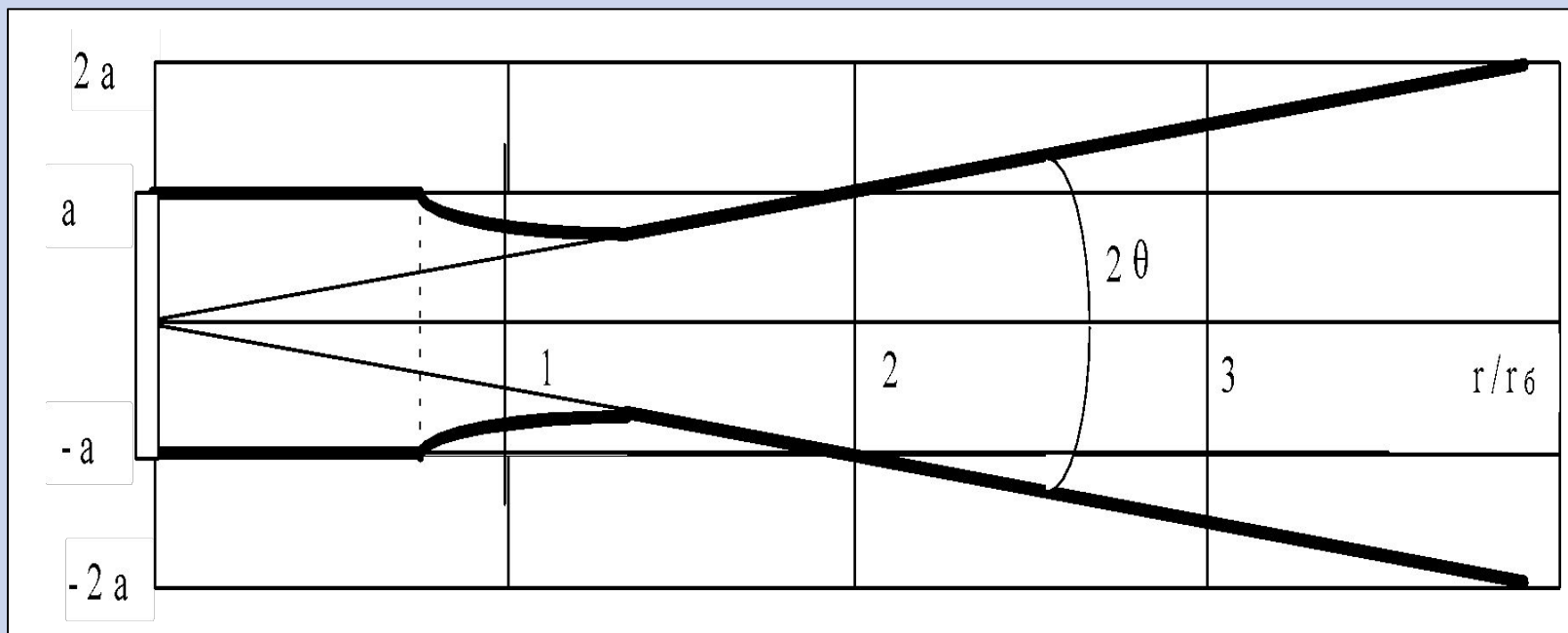
Преобразователи для акустического контроля.

Образование максимумов и минимумов в ближней зоне объясняется разницей путей от различных точек преобразователя до исследуемой точки и связанной с этим разностью фаз приходящих сигналов





Схематическое изображение акустического поля





Поле на акустической оси преобразователя при непрерывном излучении звука определяется зависимостью

$$\frac{P}{P_0} \approx 2 \left| \sin \frac{\pi a^2}{2\lambda r} \right|,$$

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

Приведенная функция имеет максимумы при

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

и минимумы при

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

Последнего максимума функция достигает при

$$r = r_6 = \frac{a^2}{\lambda}.$$



Диаграмма направленности в дальней зоне определяется выражением

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

где J_1 - функция Бесселя первого порядка; θ - угол между направлением луча и акустической осью

Раскрытие основного лепестка определяется выражением

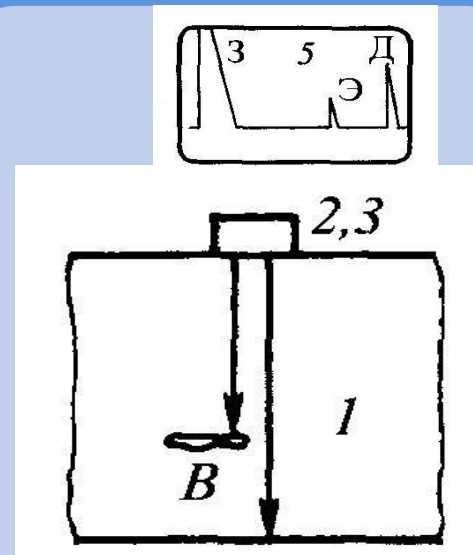
$$\theta' = \arcsin 0,61 \frac{\lambda}{a}.$$



4.1 Ультразвуковой дефектоскоп



Импульсный эхо-метод является в настоящее время наиболее распространенным методом ультразвуковой дефектоскопии, применяемым для контроля различных изделий, в том числе крупногабаритных и сложной формы. Эхо-метод позволяет обнаруживать неоднородности в изделии, определить их координаты, размеры и характер.



1-ОК; 2-излучатель; 3-приемник.

Ультразвуковой дефектоскоп - это электронно-акустическое устройство, предназначенное для возбуждения-приема ультразвуковых колебаний с целью обнаружения нарушений сплошности или однородности материалов и измерения их характеристик.



В зависимости от функционального назначения дефектоскопы подразделяют на следующие группы:

1. Для обнаружения дефектов (пороговые дефектоскопы, обычно вместо экрана имеют светодиодный индикатор, показывающий факт превышения сигналом порогового уровня);
2. Для обнаружения дефектов, измерения глубин их залегания и измерения отношения амплитуд сигналов от дефектов;
3. Для обнаружения дефектов, измерения глубин их залегания и измерения эквивалентной площади дефектов по их отражающей способности или условных размеров дефектов;
4. Для обнаружения дефектов, распознавания их форм или ориентации, для измерения размеров дефектов или их условных размеров.

По конструктивному исполнению дефектоскопы подразделяются на стационарные, переносные и портативные.

По степени участия дефектоскописта в процессе контроля различают ручные, механизированные и автоматизированные дефектоскопы.

Условное буквенно-цифровое обозначение отечественных дефектоскопов состоит из букв УД (для дефектоскопов общего назначения) или УДС (для УЗДС), номера группы назначения и порядкового номера модели. Например: УД2-12 относится ко второй группе, а УД3-103 «Пеленг» – к третьей.



Приборы и методы акустического контроля

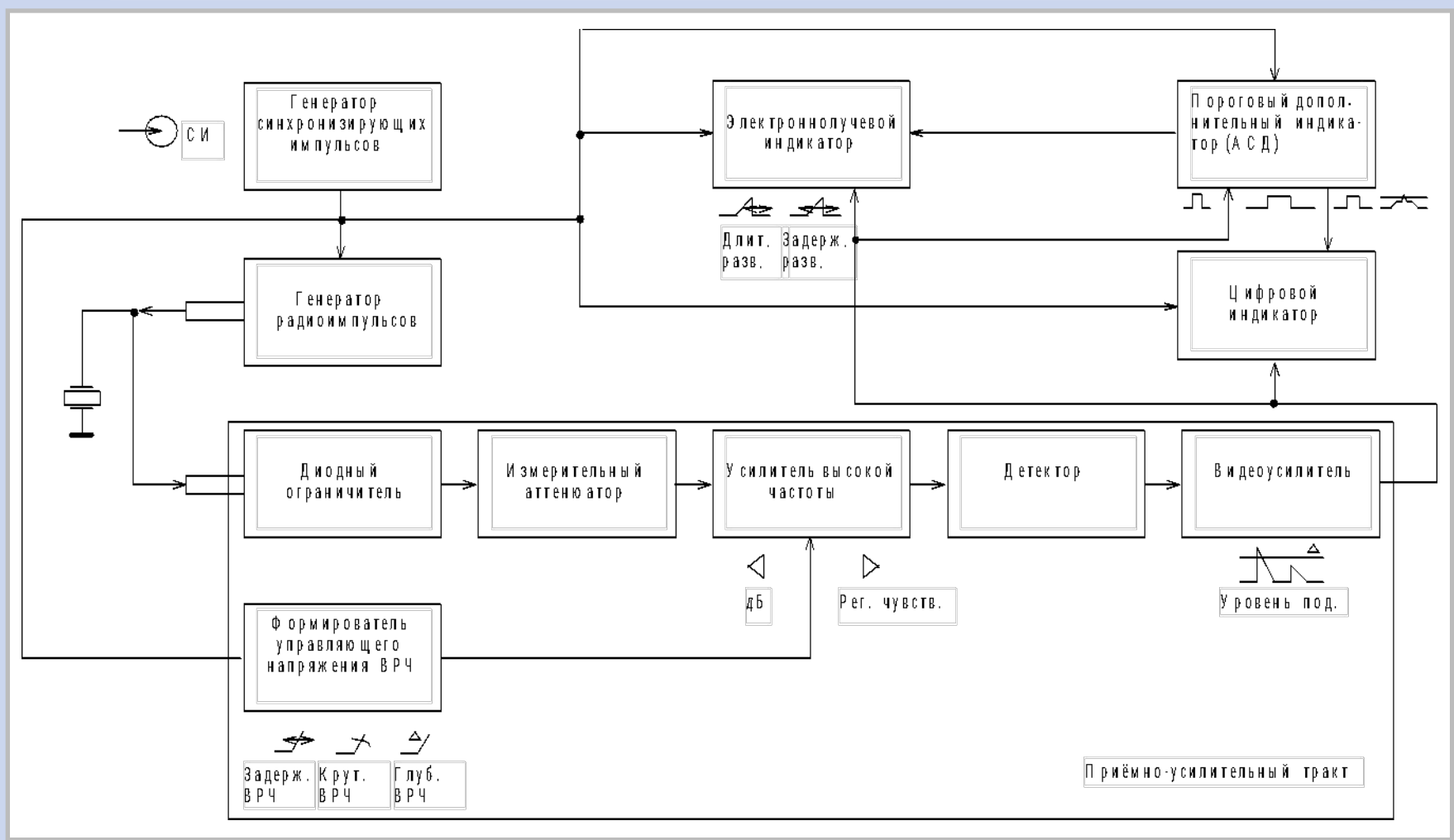
Физические основы АМК. Основные акустические величины.

Дефектоскопы УД2-12, УД2-70, УД3-103, УД4-76



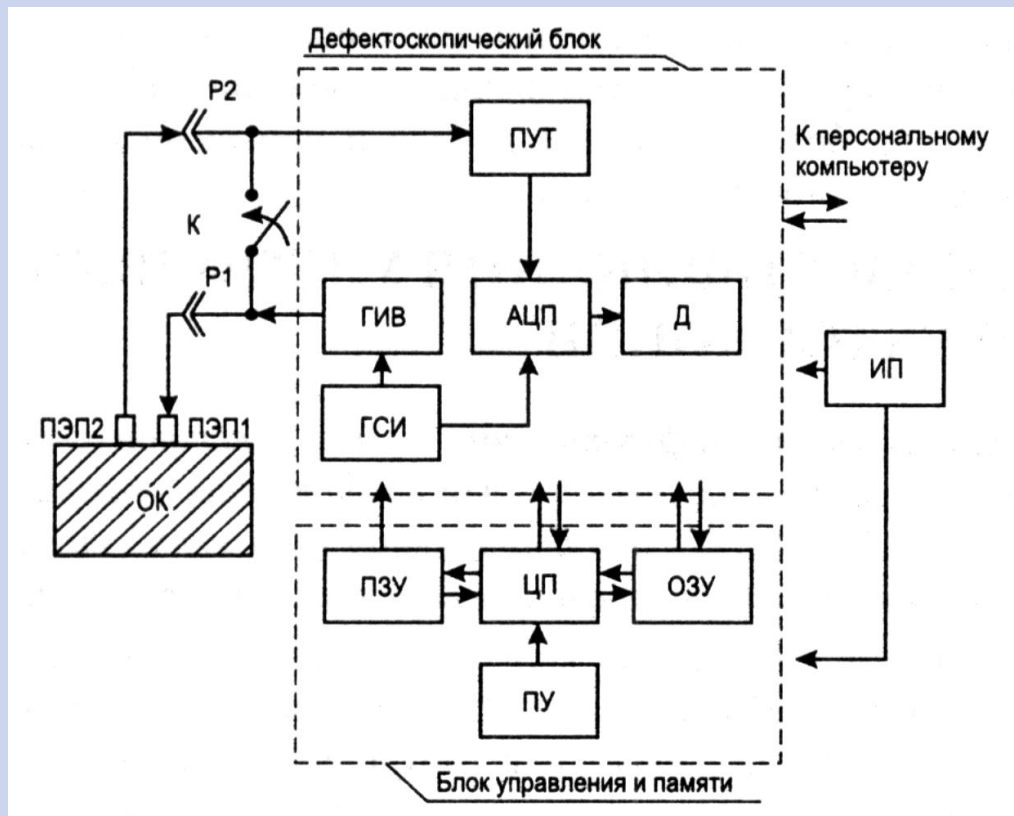


Структурная схема аналогового эходефектоскопа





Функциональная схема цифрового микропроцессорного дефектоскопа

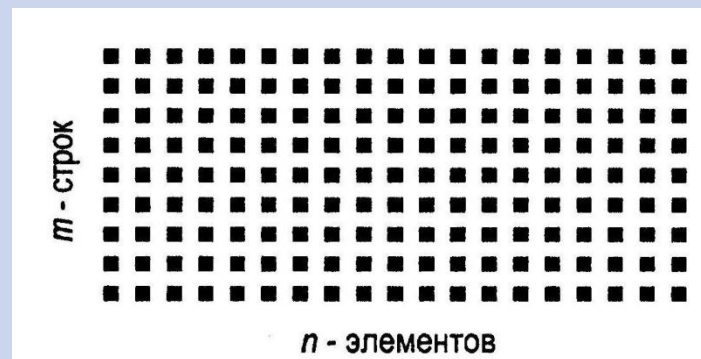


ПУ – пульт управления, ЦП – центральный процессор, ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, ГСИ – генератор синхронизирующих импульсов, ГИВ – генератор импульсов возбуждения, АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь, Д – дисплей, ПУТ – приемно-усилительный тракт, P1 и P2 – разъемы, ИП – источник питания.



Дисплей - это устройство в виде плоского экрана, предназначенное для отображения видео- и буквенно-цифровой информации. Дисплей представляет собой прямоугольное поле, на котором размещено m горизонтальных строк, содержащих по n элементов.

По принципу действия различают жидкокристаллические (ЖКИ), электролюминесцентные (ЭЛИ) или другие индикаторы.

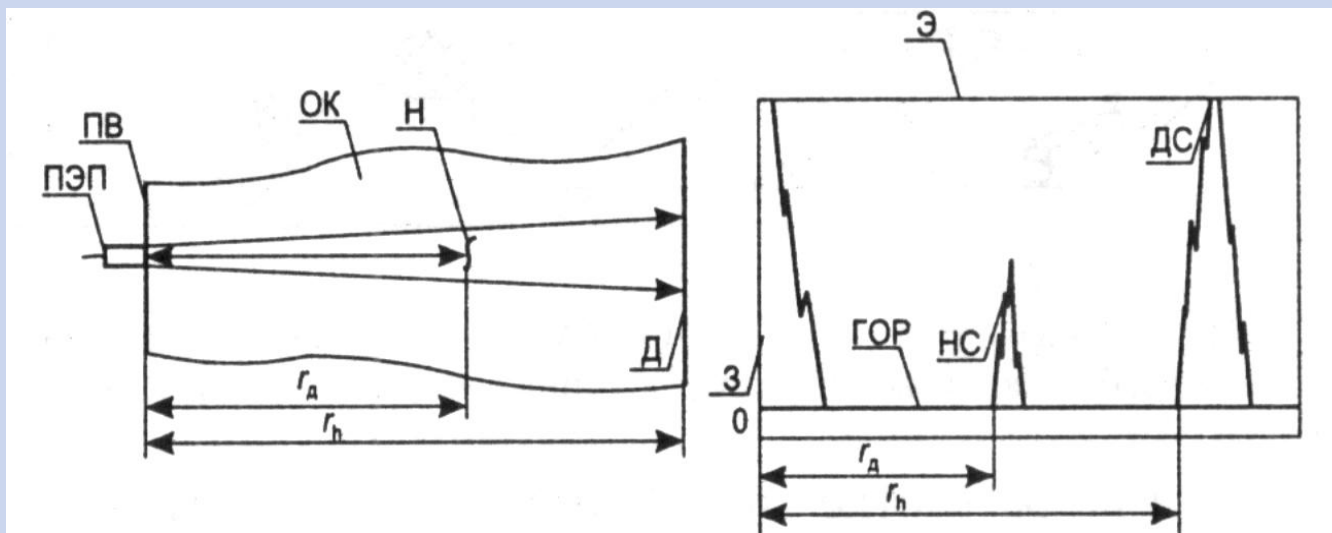


Процесс озвучивания контролируемого объема называется сканированием.

Синхронно с пробегом ультразвукового импульса на экран дисплея выводится информация об озвучиваемом (сканируемом) объеме ОК В связи с этим *отображение информации, получаемой в процессе контроля, на экране по установленному закону называется разверткой или сканом.*



Развертка, на которой высота отображаемого импульса пропорциональна амплитуде принятого сигнала, а его положение на горизонтальной линии пропорционально времени прохождения ультразвуковым импульсом акустического тракта, называется разверткой типа А или А-сканом

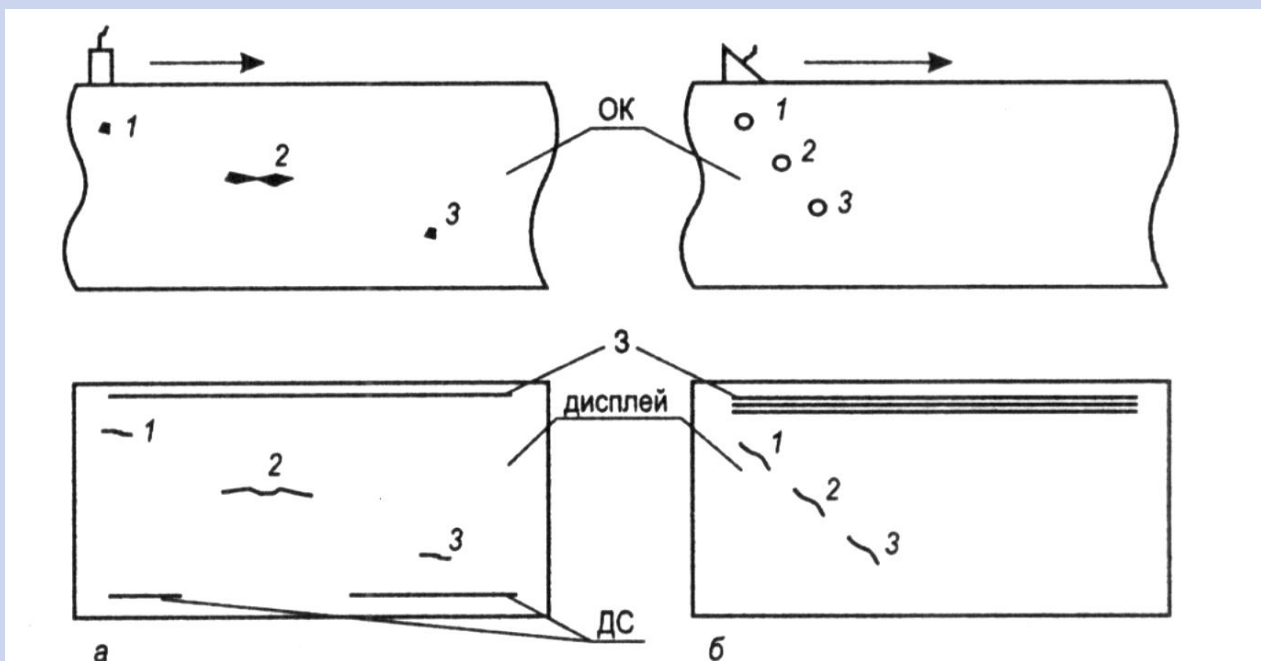


Развертка типа А при эхо-импульсном методе контроля: ПВ – поверхность ввода колебаний в ОК; Н – несплошность; Д – донная поверхность ОК; Э – экран; ГОР – горизонтальная ось развертки; З – зондирующий импульс; НС – эхо-сигнал от несплошности; ДС – эхо-сигнал от донной поверхности (донный сигнал); 0 – точка на горизонтальной оси развертки, соответствующая моменту ввода колебаний в ОК



Развертка, на которой принимаемые сигналы отображаются в некотором масштабе в виде точек на поперечном сечении ОК, перпендикулярном поверхности сканирования и параллельном направлению прозвучивания (акустической оси звукового пучка), называется разверткой типа В или В-сканом

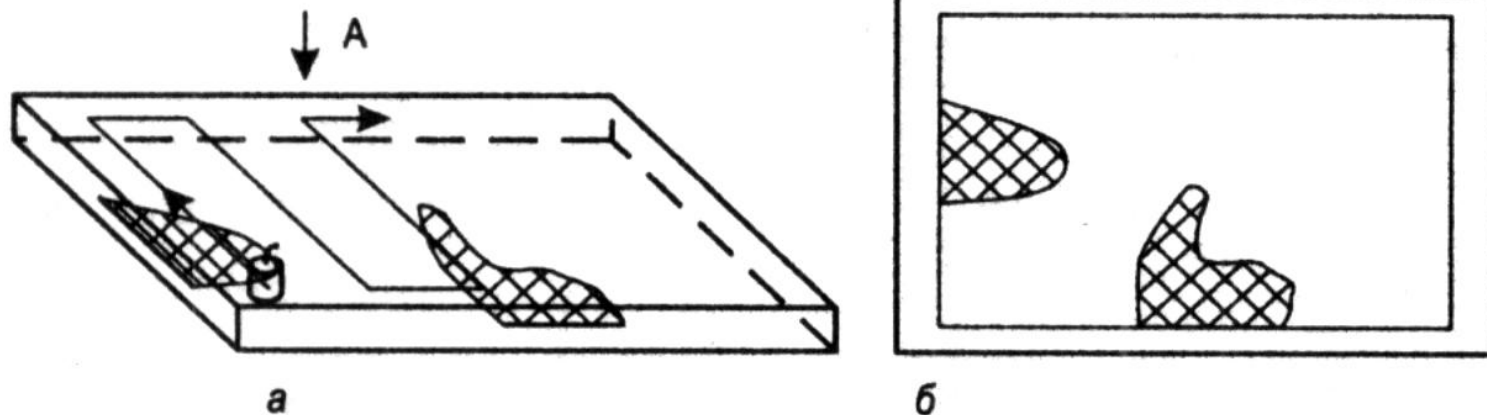
Различная амплитуда сигналов на развертке типа В отображается точками различной яркости или различного цвета.



Развертка типа В при контроле прямым (а) и наклонным (б) ПЭП: 1, 2, 3 – несплошности и их изображение на экране; 3 – изображение зондирующего импульса; ДС – изображение донного сигнала



Развертка, на которой в некотором масштабе отображается проекция контролируемого объема ОК на поверхность сканирования, называется разверткой типа С или С-сканом

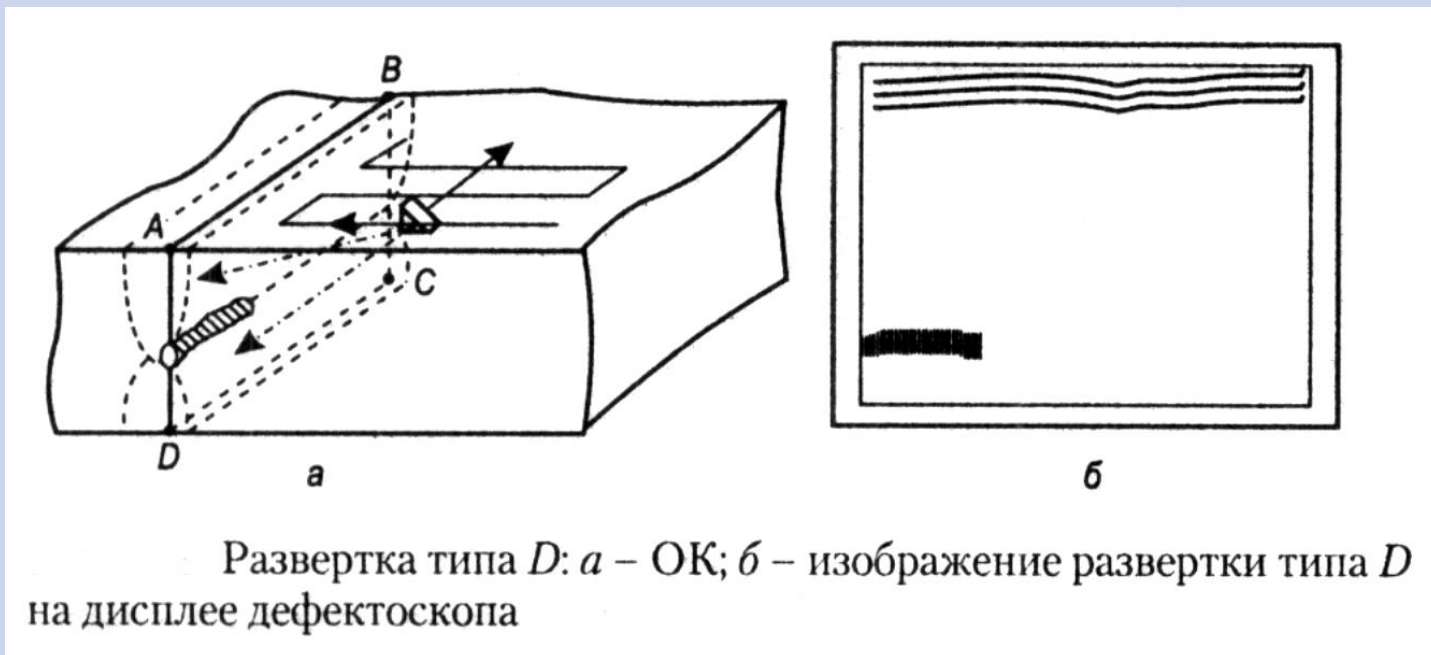


Развертка типа С: а – ОК (А – вид на поверхность сканирования); б – изображение развертки типа С на дисплее дефектоскопа



Развертка, на которой принимаемые сигналы отображаются в некотором масштабе в виде точек на продольном сечении ОК, перпендикулярном поверхности сканирования и перпендикулярном направлению прозвучивания (акустической оси звукового пучка), называется разверткой типа *D* или *D*-сканом.

Сечение показано как плоскость ABCD. Различная амплитуда сигналов на развертке типа *D* отображается точками различной яркости или различного цвета.





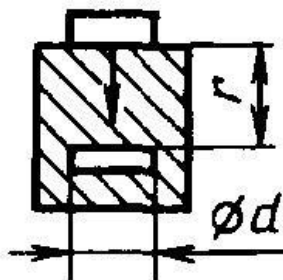
4.2 Акустический тракт дефектоскопа



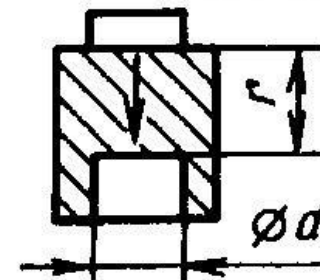
Акустическим трактом называют путь ультразвука от излучателя до объекта, отражающего или рассеивающего ультразвук, и затем к приемнику колебаний. Формулы акустического тракта определяют ослабление амплитуды сигнала на этом пути.

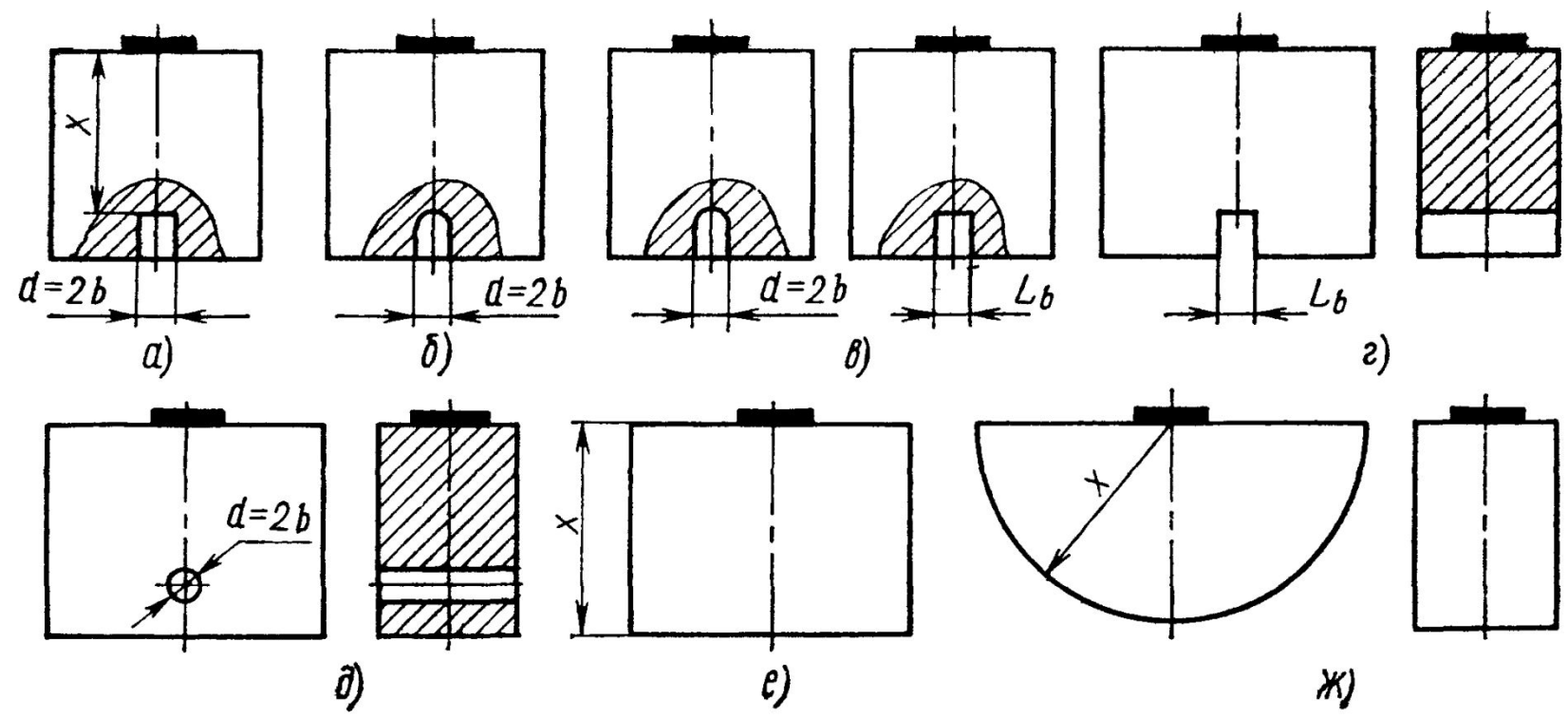
Реальные дефекты могут иметь самую разнообразную форму, ориентацию и акустические свойства, которые заранее неизвестны, поэтому формулы акустического тракта выводятся обычно для моделей дефектов в виде полых отражателей простой формы. Трудность практического исполнения подобных отражателей вынуждает заменять их искусственными отражателями: например, диск - плоскостонным отверстием, сферу - отверстием со сферическим дном и т.д.

Тонкий
диск, пло-
щадь s , диа-
метр d



Плоско-
донное от-
верстие

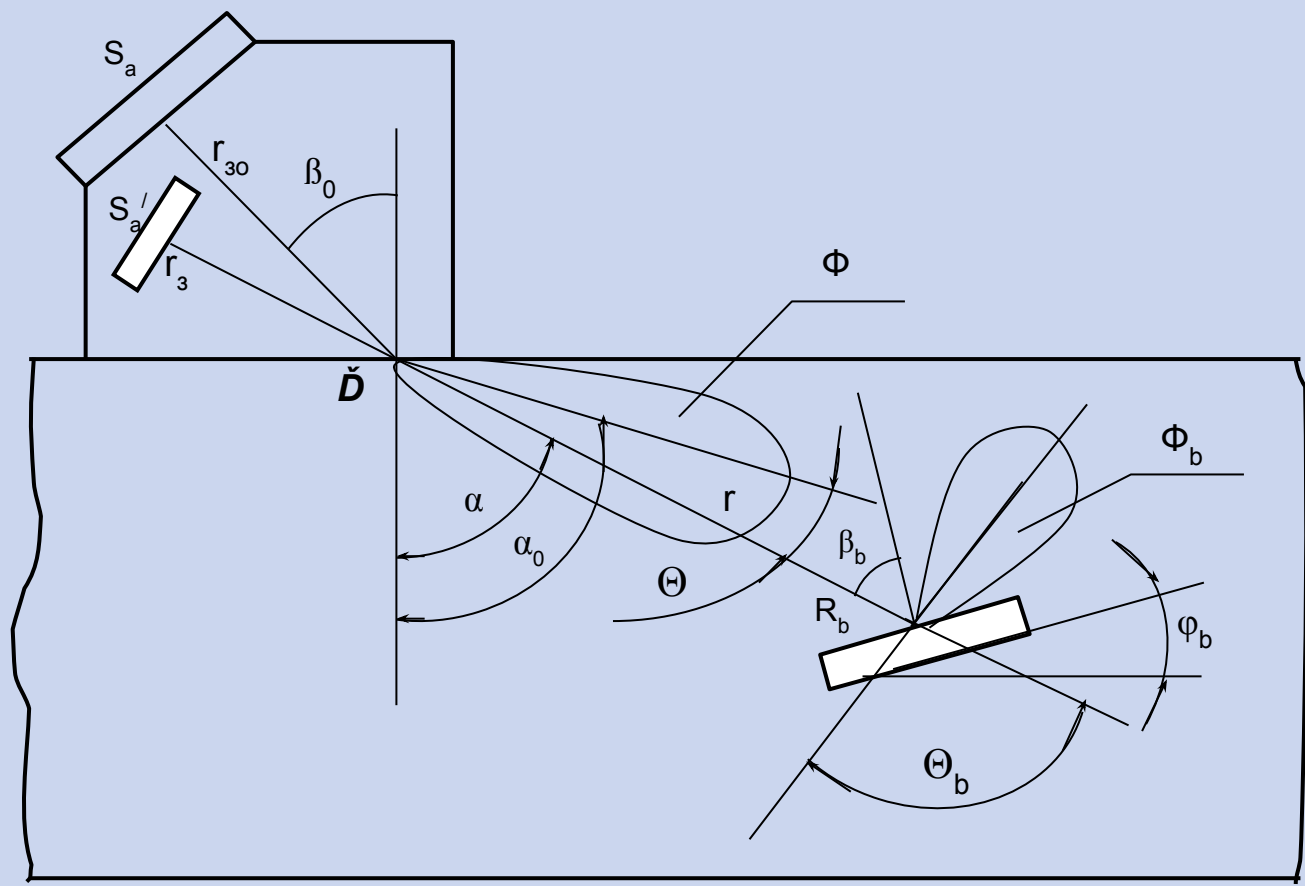




а, б, в - отверстия с плоским, сферическим и цилиндрическим дном, г - паз с плоским дном; д - цилиндрическое отверстие, е - плоскость, ж - фокусирующая поверхность.



Схема акустического тракта наклонного совмещенного преобразователя





Зондирующий сигнал с начальной амплитудой давления P_0 , дойдя до дефекта, имеет амплитуду

$$P_b = \kappa_1 P_0,$$

где $\kappa_1 < 1$ – коэффициент ослабления в поле излучателя (приемника).

Сигнал, падающий на дефект с амплитудой P_b , создает новое (вторичное) поле, ослабляющееся на пути до приемника по законам рассеяния. Дефект в этом случае играет роль независимого излучателя, возбуждающего новый зондирующий сигнал. На приемник приходит акустический сигнал с амплитудой:

$$P = \kappa_b \cdot \kappa_2 \cdot P_b,$$

где $\kappa_b < 1$ – коэффициент ослабления в рассеянном поле;

κ_2 – коэффициент, учитывающий ослабление амплитуды сигнала в поле приемника, $\kappa_2 < 1$.



Зависимость амплитуды акустического давления на приемнике от амплитуды акустического давления зондирующего сигнала:

$$P = \kappa_1 \kappa_2 \kappa_b P_0 = \kappa P_0,$$

где $\kappa < 1$ – коэффициент общего ослабления сигнала на пути излучатель-дефект-приемник.



Считая влияние отдельных факторов на амплитуду сигнала независимым, а дефект достаточно большим, согласно коротковолновому приближению Кирхгофа, в общем виде выражения для коэффициентов ослабления сигнала в акустическом тракте:

$$K_1 = D_1 Q_1 \Phi_1 \Psi_1;$$

$$K_b = R_b Q_b \Phi_b \Psi_b;$$

$$K_2 = D_2 \Phi_2,$$

где D_1 и D_2 - коэффициенты прозрачности на границе раздела сред призма-объект контроля и объект контроля - призма соответственно;

Q_1 и Q_2 - функции, описывающие ослабление сигнала на оси поля вдоль пути r от излучателя до отражателя и назад соответственно;

Φ_1 и Φ_b - функции (диаграммы) направленности полей излучателя и приемника соответственно;

Ψ - функция, описывающая затухание УЗ-колебаний;

R_b - коэффициент отражения сигнала от дефекта.



Отражение от диска или отверстия с плоским дном. В данном случае можно представить каждую точку диска, совпадающего с плоским дном отверстия, вторичным источником ультразвука с амплитудой, равной амплитуде падающей волны, умноженной на коэффициент отражения R . При этом будем считать, что точки плоскости вне диска не излучают ультразвук. Тогда выражение для давления на приемнике будет иметь вид

$$P = \frac{P_0}{S_a} \int_{S_b} R I^2 dS_b,$$

где S_a - площадь преобразователя; S_b - площадь дна отверстия.

Для границы с воздухом $R \approx -1$. В случае небольших размеров дефекта, но превосходящих длину волны λ , функцию I^2 на дефекте можно считать постоянной, тогда

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = |I|^2 \frac{S_b}{S_a} = |I|^2 A_d \lambda / S_a,$$

где $A_d = S_b / \lambda^2$ - коэффициент формы дефекта.



В ближней зоне преобразователя $|I|^2$ меняется от 1 до 4, поэтому

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = (1 \div 4) S_b / S_a,$$

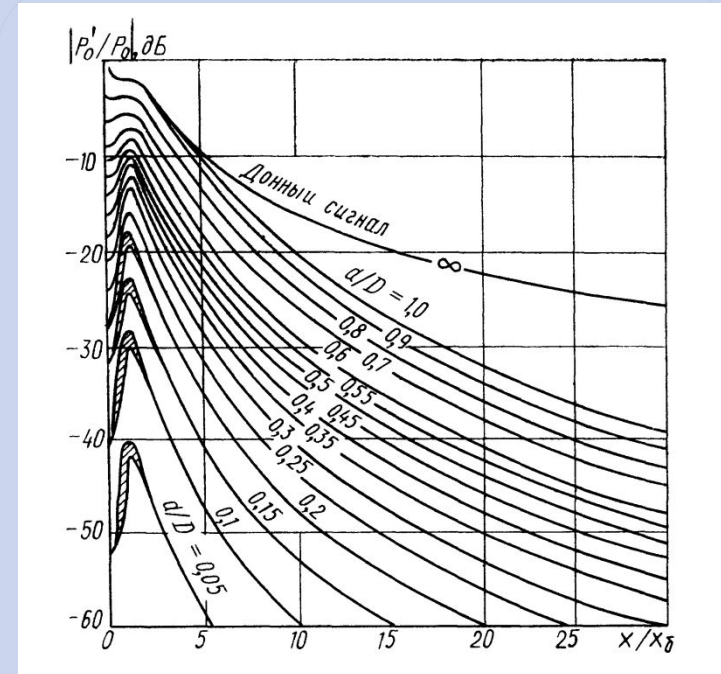
В дальней зоне на оси преобразователя $I = S_a / \lambda r$, тогда

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 r^2},$$

Видно, что *амплитуда отраженной волны от небольшого плоского дефекта не зависит от его формы и пропорциональна его площади*. Следует отметить, что если размер дефекта меньше λ , то описанное выше приближение (Кирхгофа) оказывается неверным, т.е. в этом случае амплитуда отражения убывает с уменьшением отношения b/λ (b - радиус отражателя) намного быстрее, чем при $b \geq \lambda$.



Величину $|P/P_0|$ можно представить как функцию двух безразмерных параметров: отношения диаметра диска к диаметру преобразователя ($2b/2a$) и отношения расстояния от преобразователя до отражателя к длине ближней зоны преобразователя (r/r_0). На основе этого ослабление амплитуды сигнала в широком диапазоне диаметров плоского отражателя и расстояний до него находят по безразмерной диаграмме амплитуда - расстояние - диаметр, так называемой *АРД-диаграмме*. По ней определяют максимальную амплитуду эхосигнала от диска, расположенного на данной глубине. Затухание ультразвука в данной диаграмме не учтено.



Номограмма амплитуда — расстояние — диаметр (АРД-диаграмма) для эхо-метода



4.3 Основные характеристики эхо-метода УЗ-контроля



Предельная чувствительность

Определяется минимальными размерами искусственного, оптимального по выявляемости отражателя, который еще обнаруживается при данной настройке прибора. При этом мерой ее служит площадь S отверстия с плоским дном, перпендикулярным акустической оси, выполненным в тест-образце из контролируемого материала.

Наибольшие реальная и предельная чувствительности ограничиваются, т.к. отраженный от дефекта эхо-сигнал P должен быть больше P_{\min} , определяемого максимальной акустической чувствительностью, и больше уровня шумов

$$P \geq P_{\min} ; P \geq P_{\text{п}}$$

где P_{\min} - наименьший акустический сигнал, регистрируемый аппаратурой;
 $P_{\text{п}}$ - средний уровень помех

С учетом амплитуды зондирующего импульса

$$\frac{P}{P_0} \geq \frac{P_{\min}}{P_0}$$

где P_{\min}/P_0 - максимальная акустическая чувствительность прибора



Связь акустической и электрической чувствительностей может быть описана зависимостью

$$\frac{P_{\min}}{P_0} = \frac{1}{K_{UU}} \frac{U_{\min}}{U_0}$$

Для преобразователя с акустической задержкой

$$\frac{P_{\min}}{P_0} = \frac{1}{K_{UU} \tilde{D}} e^{2\delta_1 r_1} \frac{U_{\min}}{U_0}$$

где D - коэффициент прозрачности по энергии для границы между задержкой и объектом контроля; δ_1 и r_1 - затухание и средний путь ультразвука в задержке

Оценка предельной чувствительности (для преобразователей без акустической задержки):

$$\frac{S_a \cdot S_b}{\lambda^2 r^2} e^{-2\delta r} \geq \frac{P_{\min}}{P_0}$$

Здесь r равно толщине изделия, длина волны λ и коэффициент затухания δ зависят от материала изделия и частоты f . Отсюда видно, что для достижения минимального значения S_b можно варьировать два параметра - S_a и f



Максимальная глубина прозвучивания r_{\max}

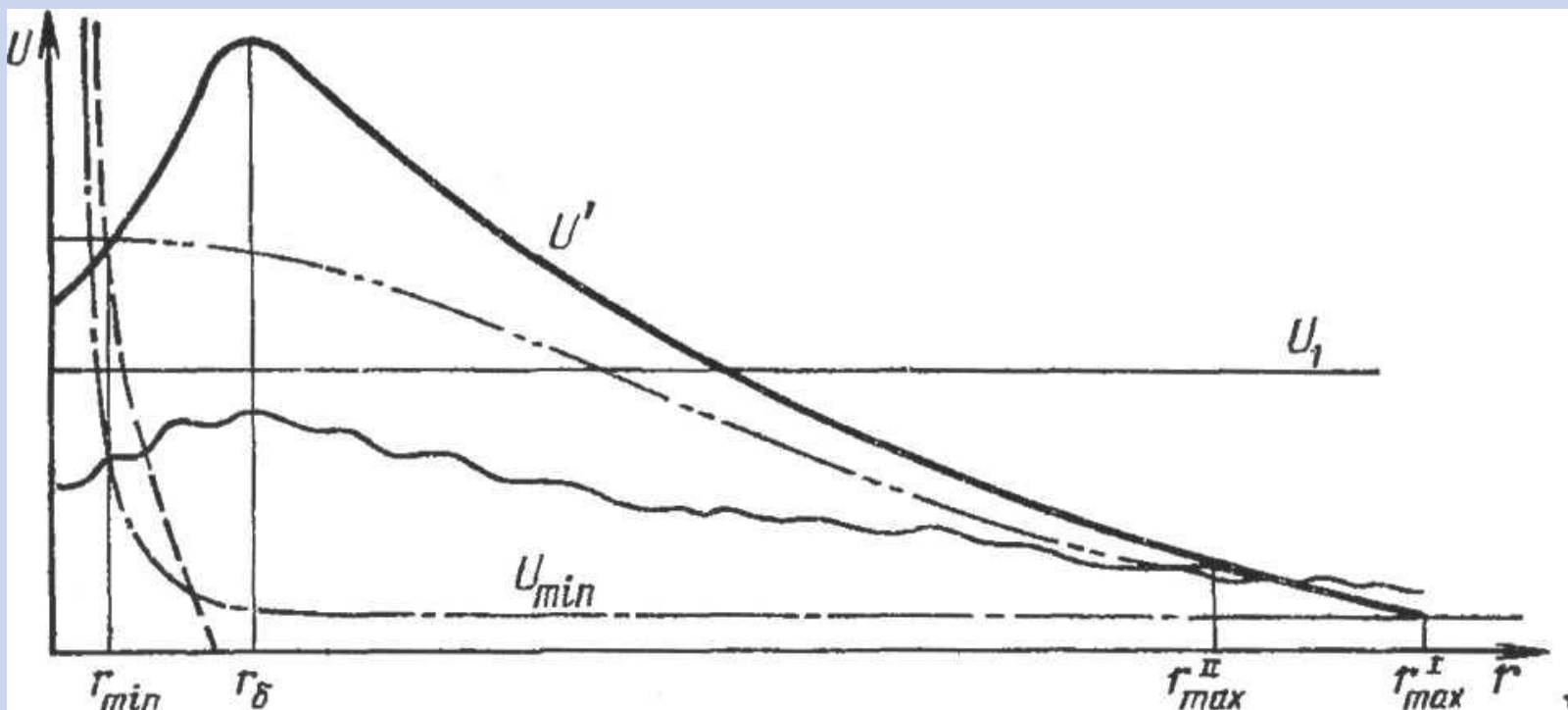
Наибольшая глубина, на которой выявляется дефект заданного размера

Дополнительным фактором, ограничивающим глубину прозвучивания, является максимальный диапазон развертки прибора t_{\max} .

$$r_{\max} \leq \frac{ct_{\max}}{2}$$

При отсутствии явных структурных помех для повышения чувствительности и r_{\max} следует:

- увеличить до максимума чувствительность прибора;
- изменить конструкцию преобразователя, увеличив его площадь, применив более высокочувствительные пьезоматериалы, просветляющие протекторы, уменьшив сопротивление демпфера;
- выбрать оптимальную частоту.



Максимальная и минимальная глубина прозвучивания

Для того чтобы структурные помехи не появлялись на экране во всем диапазоне развертки, чувствительность дефектоскопа регулируют и устанавливают некоторое ее пороговое значение U_1 . Это приводит к дополнительному ограничению максимальной глубины прозвучивания. Применяя систему ВРЧ, добиваются изменения порогового значения по кривой, показанной штрихпунктирной линией с двумя точками, что снимает это ограничение.



Минимальная глубина прозвучивания r_{\min}

Минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта, надежно выявляемого при контроле

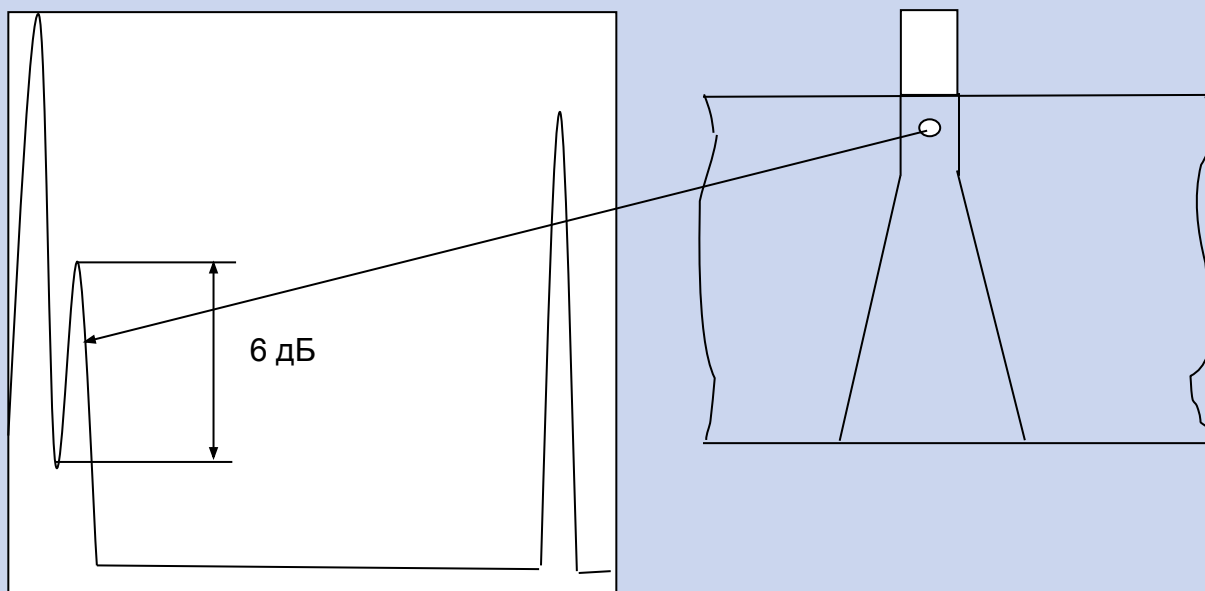
Согласно ГОСТ мертвая зона определяется по отражению ультразвука от искусственного дефекта типа цилиндра диаметром 2 мм, выполненного в образце из контролируемого материала.

При контроле по совмещенной схеме величина r_{\min} ограничивается длительностью τ зондирующего импульса, временем τ_B восстановления чувствительности усилителя после воздействия зондирующего импульса и длительностью τ_p реверберационных шумов преобразователя.

$$r_{\min} \approx \frac{c(\tau + \tau_p)}{2}$$



При экспериментальном определении мертвой зоны дефект считается выявленным, если впадина между зондирующим импульсом и эхо-импульсом от дефекта составляет не менее 6 дБ





Для наклонных преобразователей с учетом наклонного падения лучей

$$h_{\min} = r_{\min} \cos\alpha \approx \frac{\alpha(\tau + \tau_p)}{2} \cos\alpha.$$

Уменьшение мертвой зоны достигается повышением частоты колебаний, т.к при этом сокращается τ . Использование ВРЧ сводит к минимуму $\tau_{\text{в}}$. Практически рациональным выбором толщины призм, углов наклона и расстояния между преобразователями можно довести величину r_{\min} до 0,5 мм.



Разрешающая способность

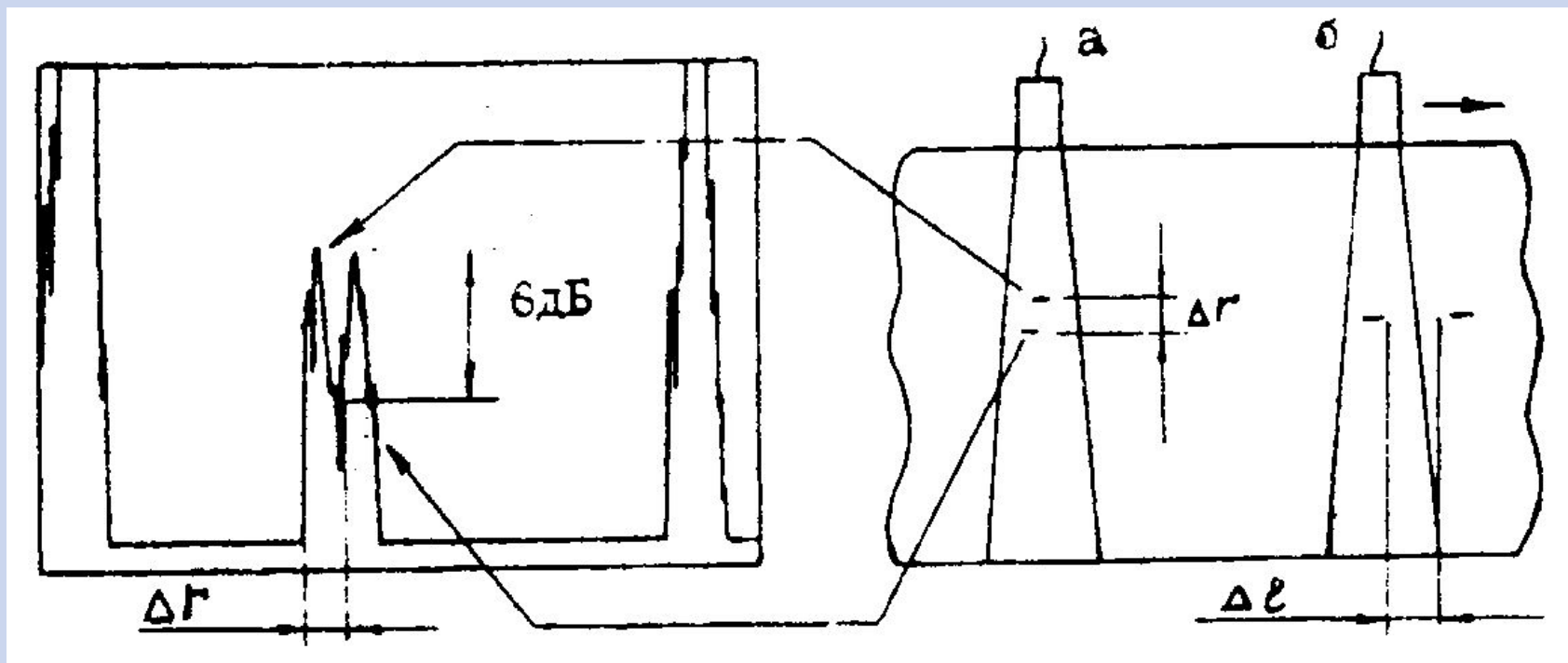
Определяется минимальным расстоянием между двумя одинаковыми дефектами, при котором эти дефекты фиксируются отдельно

Различают *лучевую* Δr и *фронтальную* Δl разрешающие способности. Первая определяется минимальным расстоянием Δr между двумя отдельно выявляемыми дефектами, расположенным в направлении хода луча вдоль акустической оси преобразователя.

Значение Δr зависит от частоты, длительности τ излучаемого импульса, максимальной скорости развертки и составляет обычно $\Delta r = 2\lambda$. При оценке Δr в изделии требуется пересчет

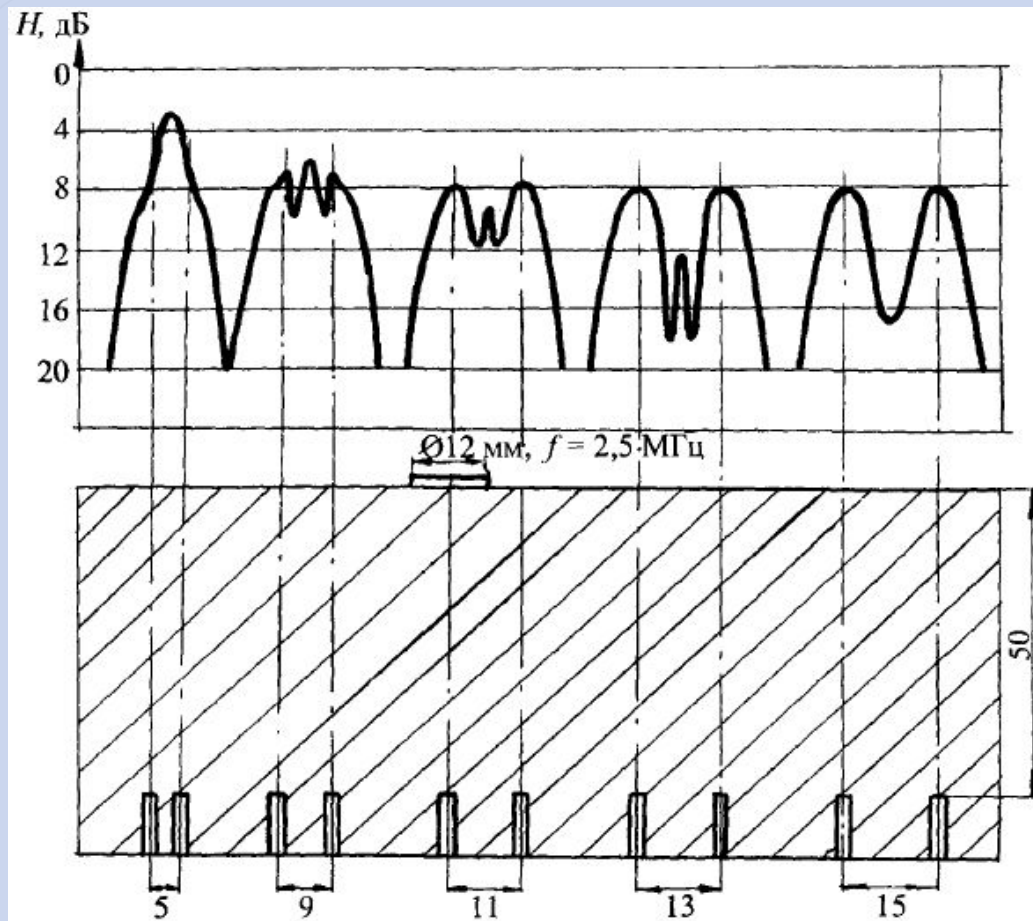
$$\Delta r = \Delta r_{\text{э}} \cdot c / c_{\text{э}}$$

где $\Delta r_{\text{э}}$ и $c_{\text{э}}$ - разрешающая способность и скорость звука в оргстекле





Экспериментальная оценка фронтальной разрешающей способности для прямого преобразователя диаметром 12 мм, $\lambda = 2,3$ мм, $z = 50$ мм





11.5 Образцы для ультразвукового контроля



Образцом называют средство ультразвукового контроля в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения физических величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых при настройке параметров приборов и преобразователей.

В ряду «Объект контроля» - «Методика проведения контроля» - «Стандартный образец» - «Дефектоскоп + преобразователь» - «Оператор-дефектоскопист» функциональное назначение стандартного образца - **это обеспечение единства измерений и однозначность трактовки результатов контроля.**

От свойств образца во многом зависят последующие выводы: «ГОДЕН» - «НЕГОДЕН», - то, ради чего и проводится ультразвуковой контроль.



Различают стандартные образцы (СО) стандартные образцы предприятия (СОП), которые утверждаются соответственно государственными стандартами, отраслевыми стандартами и стандартами предприятий.

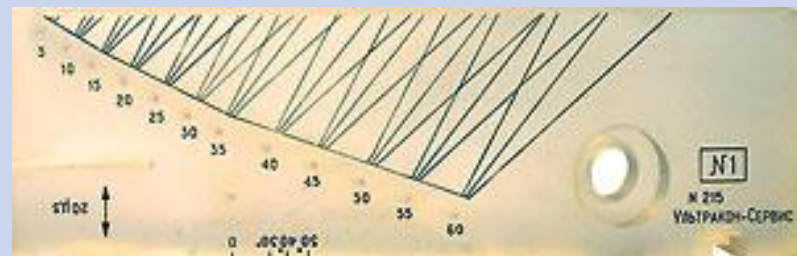
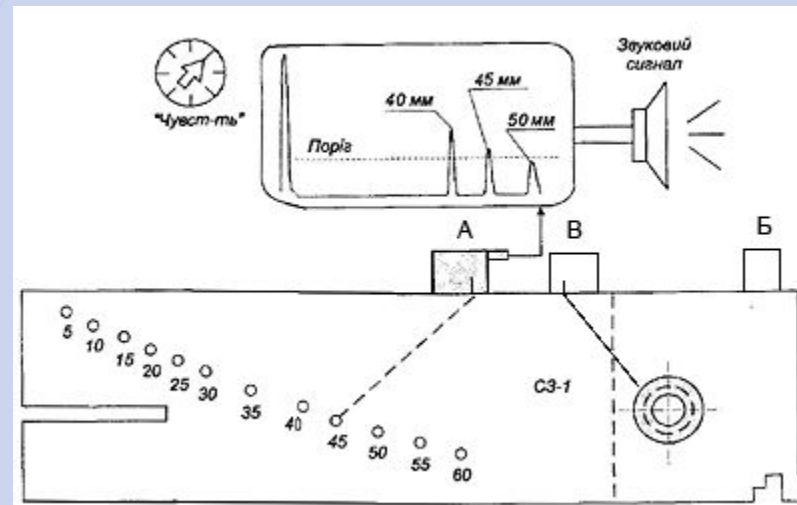


Стандартный образец СО-1 применяют для:

определения условной чувствительности в мм глубины залегания цилиндрического отверстия и настройки на заданную условную чувствительность эхоимпульсных ультразвуковых дефектоскопов с пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) на частоту $1,25 \div 5$ МГц (ПЭП в положении А);

оценки лучевой разрешающей способности прямых ПЭП (прямой ПЭП в положении над пазами 5 и 2,5 мм). При этом если все три отражателя разрешаются, то на экране дефектоскопа наблюдается три импульса: донный, от ступенек глубиной 5 мм и 2,5 мм. Расстояние между которыми (импульсами) соответствует по стали: (1-2) - 5,5мм; (2-3) - 11 мм (ПЭП в положении Б);

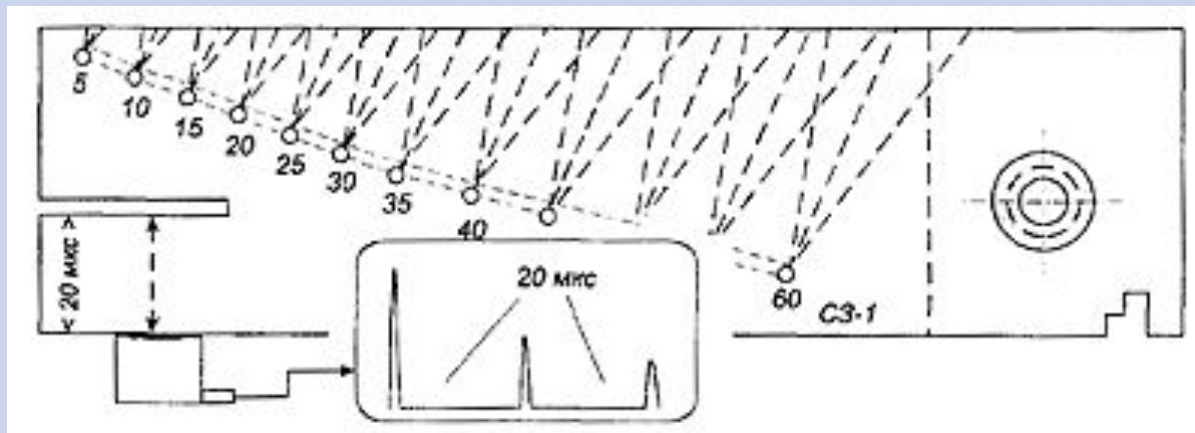
оценки лучевой разрешающей способности наклонных ПЭП (наклонный ПЭП ориентирован в сторону цилиндрических отверстий $\varnothing 15, 20, 30$ мм). При этом если все три отражателя разрешаются, то на экране дефектоскопа наблюдается три импульса от поверхностей цилиндров, расстояния, между которыми соответствует по стали: (1-2) - 5,5мм; (2-3) - 11 мм (ПЭП в положении В).





Стандартный образец СО-1 применяют для:

оценки точности глубиномера (прямой ПЭП в положении над пропилом). Для дефектоскопов с калибровкой глубиномера в единицах времени - время прохождения ультразвуковых колебаний от поверхности на которую установлен ПЭП до пропила и обратно составляет 20 с; по стали это соответствует 59 мм.;





Стандартные образцы СО-2, СО-3, СО-4 изготавливают из малоуглеродистой стали перлитного класса с мелкозернистой структурой марки 20 по ГОСТ 1050, или марки 3 по ГОСТ 14637. Скорость распространения продольной ультразвуковой волны в образцах при температуре 20 С должна быть равна 5900 ± 59 м/с. Стандартные образцы СО-2А, СО-3А идентичны СО-2, СО-3, но их изготавливают из контролируемого материала, если этот материал по акустическим свойствам существенно отличается от указанных марок стали.

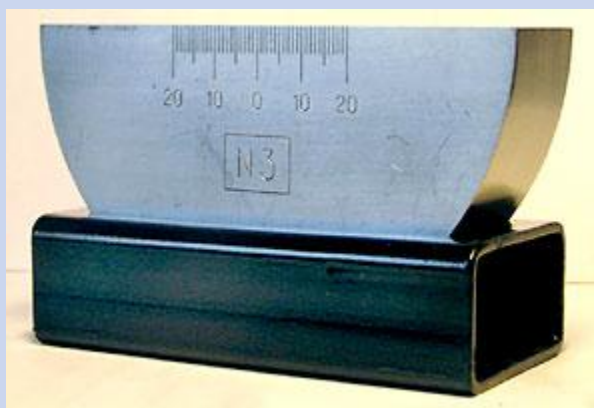
СО-2



СО-4



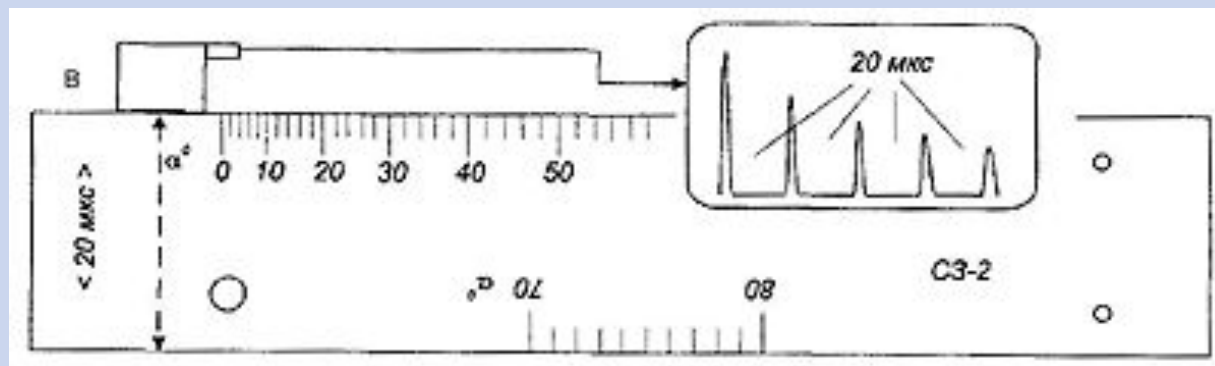
СО-3





Стандартный образец СО-2 применяют для:

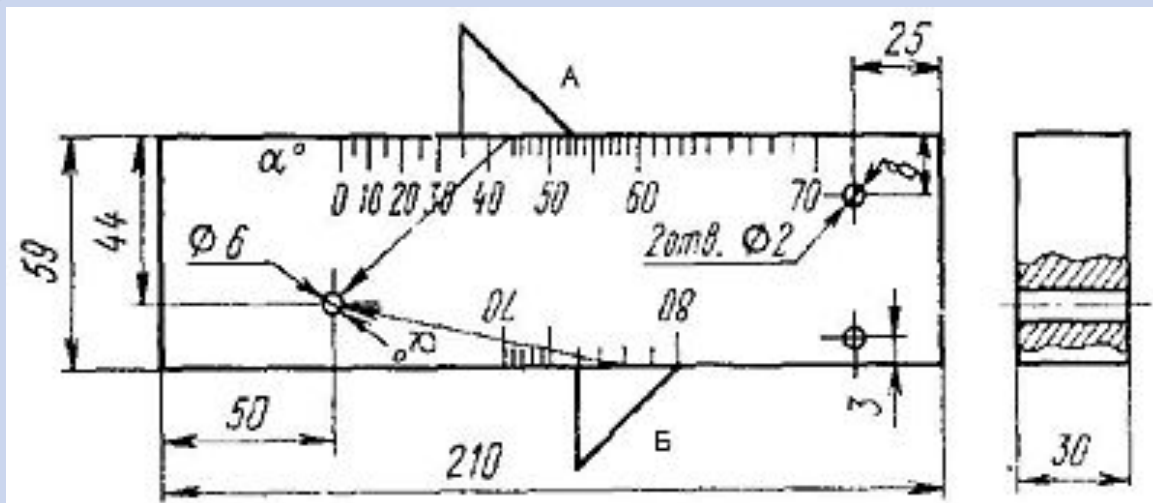
определения погрешности глубиномера. Для дефектоскопов с калибровкой глубиномера в единицах времени - время прохождения ультразвуковых колебаний от поверхности, на которую установлен ПЭП до дна и обратно составляет 20 мс;





Стандартный образец СО-2 применяют для:

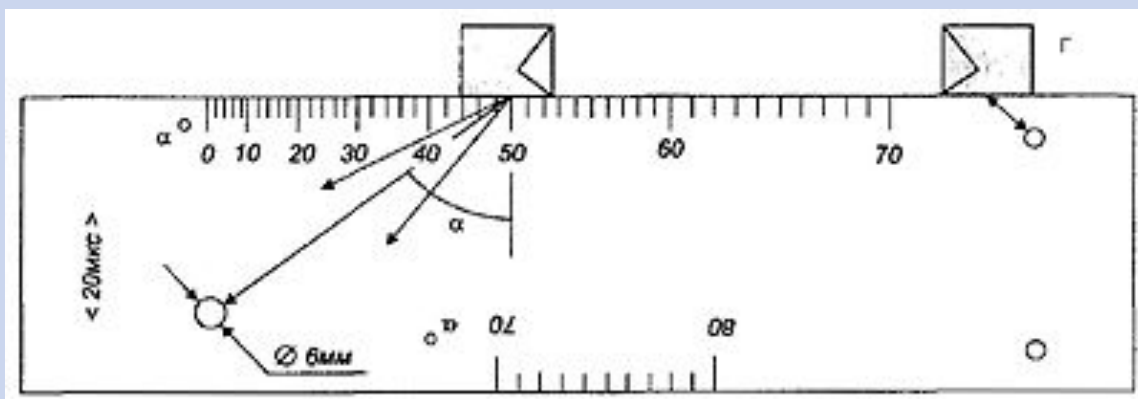
- измерения угла ввода луча (наклонный ПЭП в положении А, или Б). Перемещением наклонных ПЭП около этих положений добиваются получения максимального эхо-сигнала от отражателя (цилиндрическое отверстие $\varnothing 6$ мм. расположенное на глубине 44 мм или 15мм для различных положений ПЭП). Величину угла считывают по риску угловой шкалы напротив точки выхода УЗ луча;
- определения ширины основного лепестка диаграммы направленности (перемещая ПЭП около положения А, Б).
- настройка чувствительности дефектоскопа с использованием опорного сигнала от отражателя (цилиндрическое отверстие 6 мм расположенное на глубине 44 мм или 15 мм для различных положений ПЭП);





Стандартный образец СО-2 применяют для:

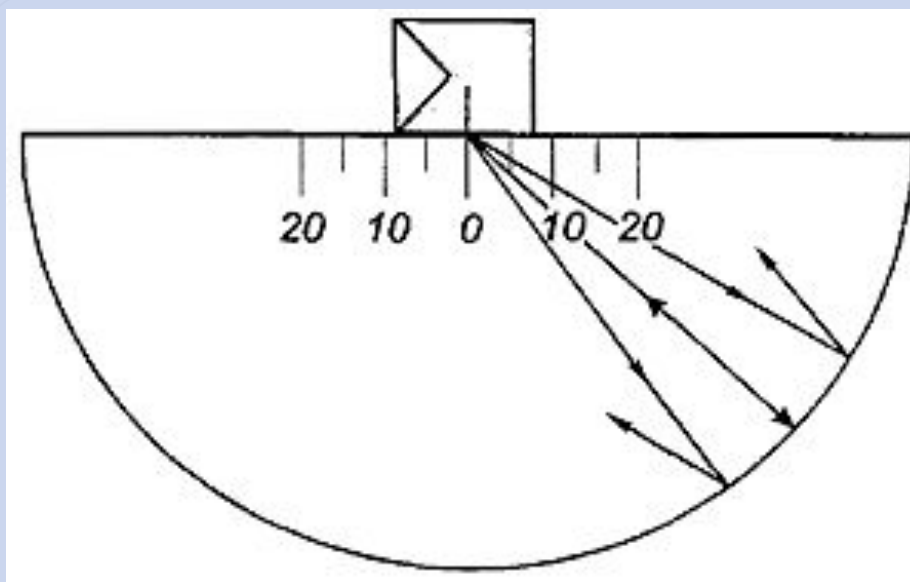
проверки **минимальной глубины прозвучивания**, «мертвой» зоны, преобразователем (ПЭП в положении Г) проводят по отражателям отв. 2 мм расположенным на глубине 3 мм и 8 мм с противоположных сторон образца;





Стандартный образец СО-3 применяют для:

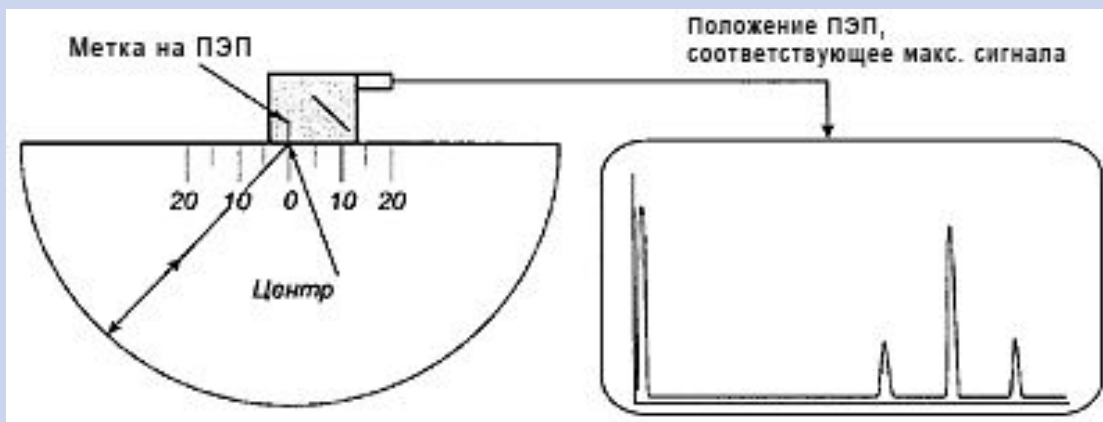
- определения **точки выхода** 0 ультразвукового луча. Для этого наклонный ПЭП устанавливают над центральной риской «0» (рис. 8) и небольшим перемещением находят положение соответствующее максимальному эхо-сигналу. Точка выхода расположена точно над центральной риской образца;
- определения стрелы «n» преобразователя в миллиметрах. Данный параметр определяется как расстояние от точки выхода ультразвукового луча до торца ПЭП в направлении прозвучивания (измеряется по боковой шкале, отградуированной в миллиметрах);





Стандартный образец СО-3 применяют для:

- определение чувствительности для наклонного ПЭП
- настройки глубиномера для наклонного ПЭП.



Допускается применение стандартного образца для определения времени распространения ультразвуковых колебаний в призме преобразователя.

Все указанные операции выполняют в положении наклонного ПЭП, когда точка выхода УЗК совпадает с центром «0» образца.



12.1 Общие положения



Все операции по УЗ контролю можно разбить на семь этапов:

- 1) изучение объекта контроля, подготовка его к работе;
- 2) разработка или выбор из имеющегося банка нужного технологического процесса (карты контроля) с указанием основных параметров контроля и схемы прозвучивания;
- 3) проверка исправности и основных параметров аппаратуры и подготовка ее к работе;
- 4) настройка чувствительности дефектоскопа;
- 5) настройка скорости развертки и глубиномера;
- 6) проведение контроля, измерение координат и величины дефектов и оценка качества шва;
- 7) документальное оформление результатов контроля.



Во многих отраслевых нормативных документах используются понятия **«объем контроля»** и **«объем сканирования»**.

Под термином «объем контроля» понимают протяженность сварных соединений или площадь наплавов.

Объем сканирования определяют как суммарную протяженность контролируемой части соединения вдоль его периметра, отнесенную к полной протяженности сварного соединения.



Ширина подготовленной под контроль зоны с каждой стороны шва должна быть не менее $Htg \alpha + A + B$ - при контроле совмещенными ПЭП прямым лучом и не менее $2Htg \alpha + A + B$ - при контроле однажды отраженным лучом и по схеме «тандем», где H - толщина сварного соединения, A - длина ПЭП, B - ширина околошовной зоны.

Контролируемый шов должен быть замаркирован и разбит на участки.

Основным рабочим документом, на основании которого непосредственно производится неразрушающий контроль, является **технологическая карта**. Для составления карт по конкретному виду контроля необходимо знание как параметров контролируемого изделия, так и технологии, оборудования и нормативно-технической (НТД) и технологической документации, на основании которой должен проводиться контроль.



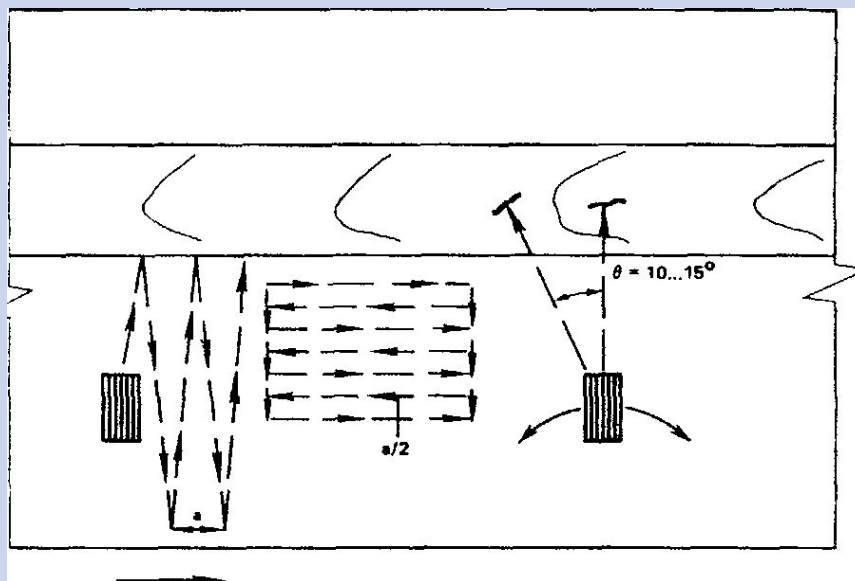
Операции по настройке чувствительности дефектоскопа, ВРЧ и скорости развертки должны производиться в соответствии с рекомендациями нормативно-технических документов.

Перед тем как приступить к контролю, оператор должен проверить работоспособность и параметры аппаратуры (дефектоскопа и ПЭП**). Проверка выполняется на контрольных образцах и на СО №1-3 в соответствии с ГОСТ 14782-86 и требованиями действующих на предприятии правил по метрологической аттестации и поверке.**

Поиск дефектов производится путем продольно-поперечного или поперечно-продольного сканирования (перемещения) ПЭП по всей контролируемой зоне сначала с одной, а затем с другой стороны. В соединениях толщиной более 60-80 мм необходимо проводить контроль с двух поверхностей, если они доступны. Шаг сканирования ПЭП должен быть не более половины диаметра пьезоэлемента.



В процессе сканирования наклонный ПЭП необходимо непрерывно проворачивать вокруг его вертикальной оси на $\pm 15^\circ$, чтобы обнаружить различно ориентированные дефекты.



Для компенсации флуктуаций акустического контакта чувствительность дефектоскопа в режиме поиска должна увеличиваться не менее чем на 6 дБ по отношению к контрольной чувствительности. Чтобы уменьшить вероятность пропуска дефекта целесообразно работать при включенном звуковом индикаторе схемы АСД.



В сварных соединениях УЗ прозвучиванию и оценке подлежит металл шва, зоны сплавления и термического влияния.

При появлении эхо-сигналов на рабочем участке развертки чувствительность снижается до уровня предельной чувствительности, установленной при эталонировании, и если обнаруженный эхо-сигнал превышает этот уровень, то измеряются характеристики несплошности и, если необходимо, тип отражателя - плоскостной он или объемный. Все эти характеристики определяются при контрольной чувствительности дефектоскопа. В швах с толщиной стенки менее 15 мм условная высота обычно не определяется.

В большинстве действующих отраслевых РД для оценки качества используются следующие критерии: амплитуда эхо-сигнала или эквивалентный размер (площадь или диаметр); условная протяженность; условная высота; удельная плотность дефектов на единицу длины контролируемого участка.



Оценка степени допустимости обнаруженной несплошности и перевод ее в разряд дефекта производятся по степени соответствия измеренных характеристик и их совокупности предельно допустимым численным значениям этих же характеристик, заложенным в НТД.

Усиление сварного шва существенно влияет на достоверность контроля. Если усиление велико, то в ряде случаев при контроле швов малых толщин невозможно прозвучить корень шва осью УЗ пучка. В соединениях толщиной 7 мм наличие усиления шва приводит к занижению средней эквивалентной площади дефекта на 2 мм^2 , увеличивает недобраковку в 3,5 раза. Следовательно, или необходимо снимать усиление, или искать нестандартные приемы прозвучивания.



Технология ультразвукового контроля и оценки качества сварных соединений состоит из последовательности следующих операции:

- 1) ознакомление с чертежами на объект контроля (ОК) и технологической картой (технологическим процессом);**
- 2) установление степени контроледоступности и регистрация этого в рабочих документах (журнале, протоколе и т.п.);**
- 3) проверка дефектоскопа и ПЭП и оценка их работоспособности;**
- 4) оценка качества подготовки околошовной зоны под контроль визуально. При некачественной подготовке передача соответствующей информации непосредственному начальнику;**
- 5) осмотр места контроля и готовность ОК к проведению контроля; наличие освещения; доступ ко всем контролируемым швам;**
- 6) оценка на соответствие подготовки к контролю требованиям техники безопасности;**



- 7) оценка шероховатости и волнистости поверхности ОК в нескольких точках с целью определения величины корректирующей поправки;
- 8) настройка чувствительности скорости развертки исходя из толщины сварного соединения;
- 9) настройка чувствительности, ВРЧ, по СО и СОПам или АРД на соответствующие браковочный и контрольный уровни;
- 10) установление порогового уровня звукового и светового индикаторов системы АСД;
- 11) установление уровня поисковой чувствительности;
- 12) покрытие ОК контактной жидкостью;
- 13) в соединениях толщиной более 20-25 мм прозвучивание околошовной зоны основного металла прямым или РС ПЭП. В случае обнаружения в околошовной зоне несплошностей оценить их величину по нормативам для соответствующей зоны, замаркировать их (мелом) и сделать отметку в рабочих документах. Встречающиеся в околошовной зоне расслоения приводят к неверной оценке качества сварного соединения;



- 14) проведение сканирования вдоль оси шва по околошовной зоне и металлу шва (в случае его удаления заподлицо с основным металлом) в двух встречных направлениях; или при ориентации ПЭП под минимальным углом к оси шва при наличии валика усиления для выявления поперечных трещин, если это предписано технологической картой контроля или НТД;**
- 15) проведение сканирования поперек шва наклонным ПЭП с поворотом его на $\pm 15^\circ$ по азимуту для выявления объемных и продольно ориентированных дефектов во всей зоне сварного соединения (т.е. шов и зона термического влияния);**



16) при обнаружении на экране в рабочей зоне сигнала оператор переходит на контрольный уровень чувствительности и меняя положение ПЭП, находит его максимум, измеряет его амплитуду и сравнивает с браковочным и контрольным уровнями;

Если **амплитуда эхо-сигнала меньше контрольного уровня**, то оператор восстанавливает поисковый уровень чувствительности и продолжает сканирование дальше;

Если **амплитуда сигнала превышает контрольный уровень**, то оператор измеряет эквивалентную площадь дефекта, его условные размеры (на контрольном уровне чувствительности или на заданном уровне от максимума сигнала), координаты дефекта и количество дефектов на единицу длины шва и производит предварительную оценку качества;



- 17) если параметры дефекта находятся на грани допустимости, или у оператора возникают какие-либо сомнения в правильности предварительной оценки, или если это предусмотрено технологической картой контроля, то производится дополнительное исследование дефекта ПЭП с другими углами ввода, частотой для измерения отдельных или совокупности информативных признаков;
- 18) если дополнительная информация свидетельствует, что дефект - трещина, например, поперечная, то оператор должен потребовать снять валик усиления заподлицо с основным металлом, прозвучить и провести измерения со всех сторон;



- 19) результаты всех операций и измерений фиксируются, а дефектная зона маркируется на ОК;
- 20) при использовании процессорного дефектоскопа кадры (экрана) с сигналами от дефекта и соответствующими комментариями вводятся в память для последующего архивирования;
- 21) продолжается контроль в заданном объеме;
- 22) по окончании контроля производится окончательная оценка качества ОК в целом с указанием дефектных мест, составляется заключение (протокол) и производится регистрация в журнале.

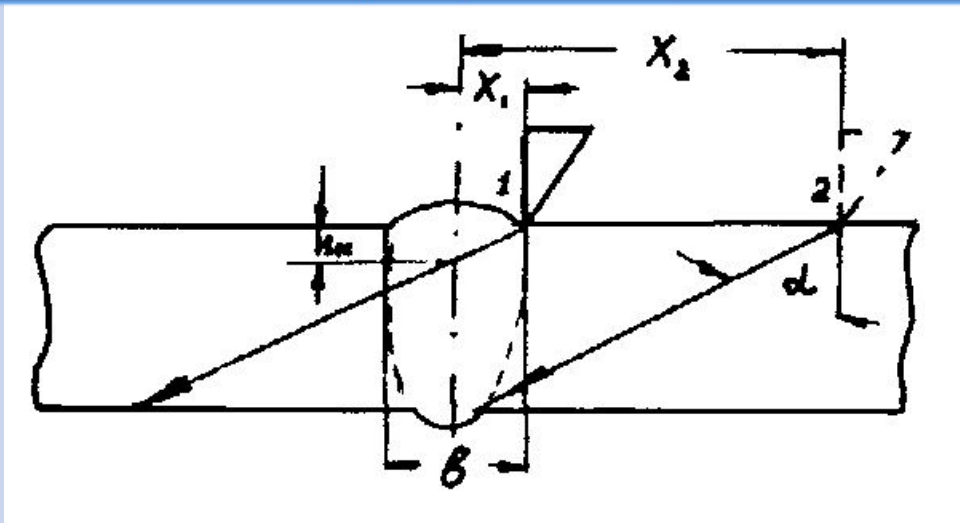


12.2 Основные способы прозвучивания и последовательность технологических операций



Контроль прямым лучом

ПЭП перемещается в околошовной зоне между валиком усиления шва (точка 1) и точкой 2, расположенной от оси шва на расстоянии $x_2 = H \operatorname{tg} \alpha + b/2$. Способ наиболее помехоустойчив, т.е. при его применении наблюдается минимум ложных эхо-сигналов от каких-либо элементов конструкции в зоне соединения. Недостатком его является наличие «мертвой зоны», вызванной тем, что преобразователь упирается в валик усиления шва. Для плоских соединений, условием полного прозвучивания, является: $b/2 < H \operatorname{tg} \alpha - n_0$.

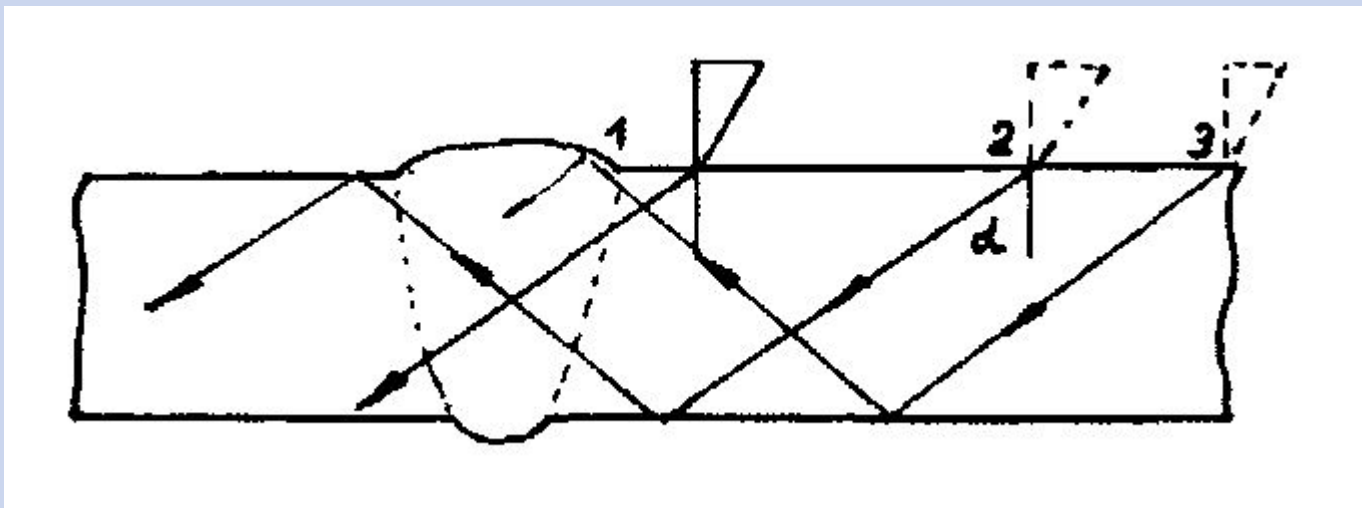




Контроль прямым и однократно отраженным лучом

Осуществляется при перемещении ПЭП между точками 1...3, позволяет вести контроль с одной стороны изделия, а также прозвучивать мертвую зону. ПЭП при прозвучивании прямым и однократно отраженным лучом перемещают вдоль линии, отстоящей от оси шва на расстоянии $X=2Htg\alpha + b/2$.

Недостаток этого способа - зависимость предельной чувствительности к дефектам, берущимся отраженным лучом, от состояния поверхности.

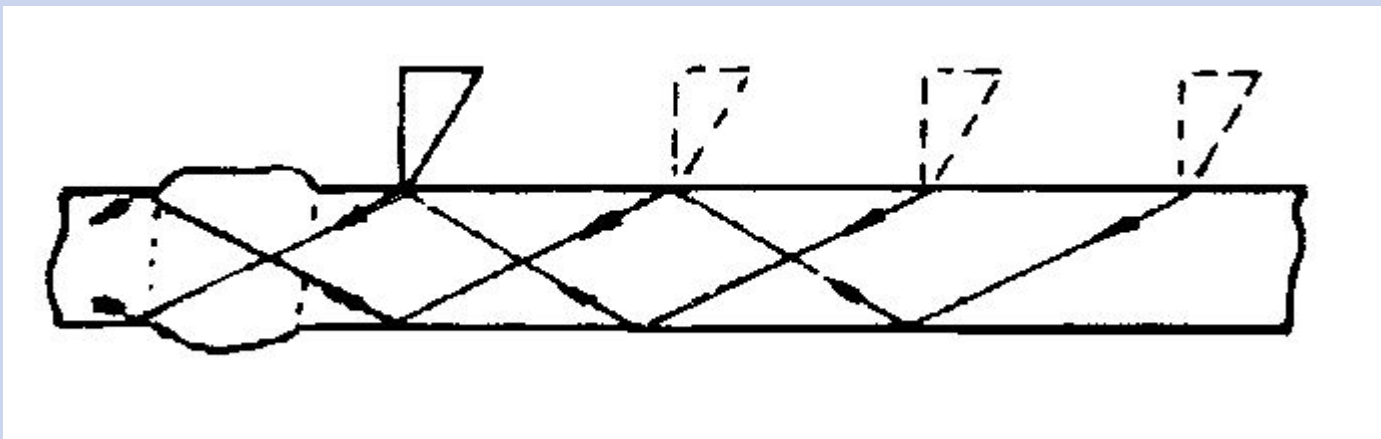




Контроль многократно отраженным лучом

Сопровождается большим числом ложных сигналов от валика усиления шва и является наименее помехоустойчивым.

Применение его ограничивается случаями, когда не имеется доступа непосредственно к шву (например, стыковое соединение с обеих сторон закрыто приварными накладками).

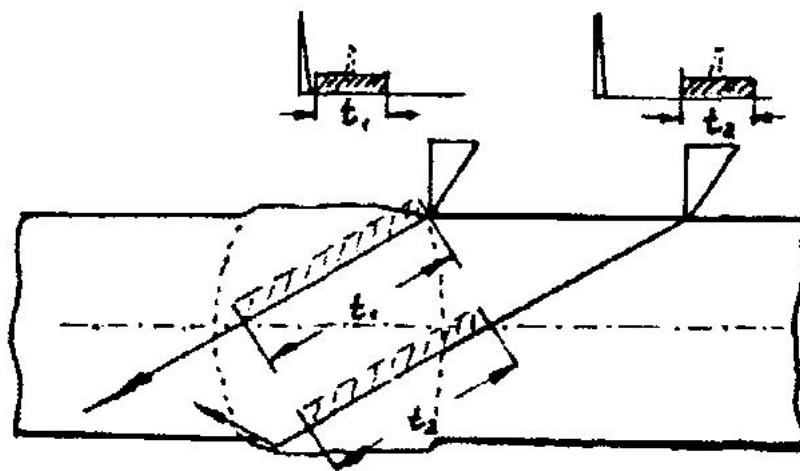




Контроль по слоям

Он заключается в том, что прозвучивание производят любым из перечисленных способов, но эхо-сигналы фиксируют только на определенном рабочем участке развертки, выделяемом путем стробирования. Способ помехоустойчив, позволяет уменьшить ошибки в оценке дефектов благодаря тому, что предельная чувствительность при контроле устанавливается для каждого слоя отдельно.

Обладает наименьшей производительностью, поэтому наиболее эффективно его применение для контроля швов толщиной более 50-60 мм.



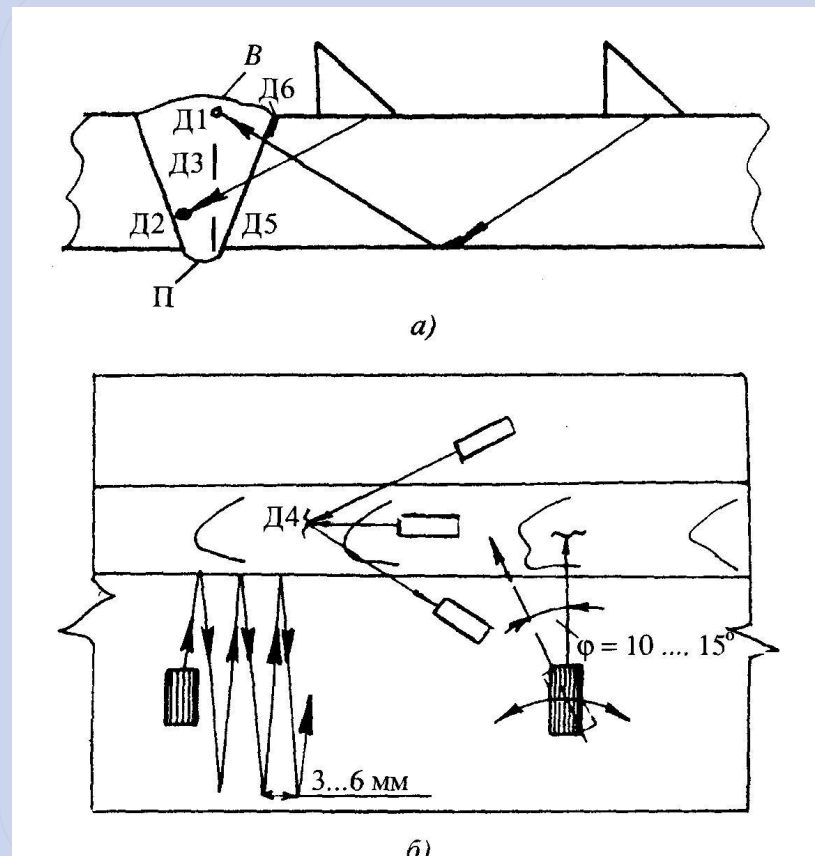


12.3 Контроль стыковых сварных соединений листовых конструкций



Контроль сварных соединений листовых конструкций производится наклонными ПЭП. Дефекты *Д2* и *Д5* в нижней части шва выявляются прямым лучом, а дефекты в верхней части *Д1* и *Д6* выявляются однократно (однажды) отраженным лучом. Дефект в средней части шва *Д3* может быть выявлен как прямым, так и однократно отраженным лучом.

Для проверки всего металла соединения преобразователь перемещают поперек и вдоль шва.





Швы толщиной 3,5-15 мм.

Для сварных швов листовых конструкций, выполненных односторонней электродуговой сваркой или в среде защитных газов, так же как и для трубопроводов, характерно наличие непроваров, провисаний металла и смещения кромок.

В ряде случаев по существующим условиям непровар определенной высоты допускается. Эхо-метод позволяет определять высоту непровара по экспериментально полученным кривым.

Для УЗ контроля сварных швов малых толщин наиболее эффективны РС ПЭП с большими углами ввода (70° - 72°) и малой стрелой. Рабочая частота 4-5 МГц. Прозвучивание производится с одной поверхности.

Важной проблемой при контроле односторонних швов является отстройка от ложных сигналов.



Швы толщиной 16-40 мм.

В швах, выполненных односторонней сваркой, также велико влияние ложных сигналов от провисания в корне.

Если технология сварки такова, что провисания не образуются или они очень малы, то контроль производится одним ПЭП прямым и однократно отраженным лучом за один прием с одной поверхности. Наиболее эффективно здесь применение стандартного ПЭП с углами 60° - 70° и $f = 2,5$ - $4,0$ МГц. Если же ложные сигналы от провисания велики, то для повышения помехоустойчивости контроль целесообразно проводить отдельно в корневой и остальной частях шва. При этом верхнюю часть шва предпочтительнее контролировать ПЭП с углами ввода 45° - 50° .



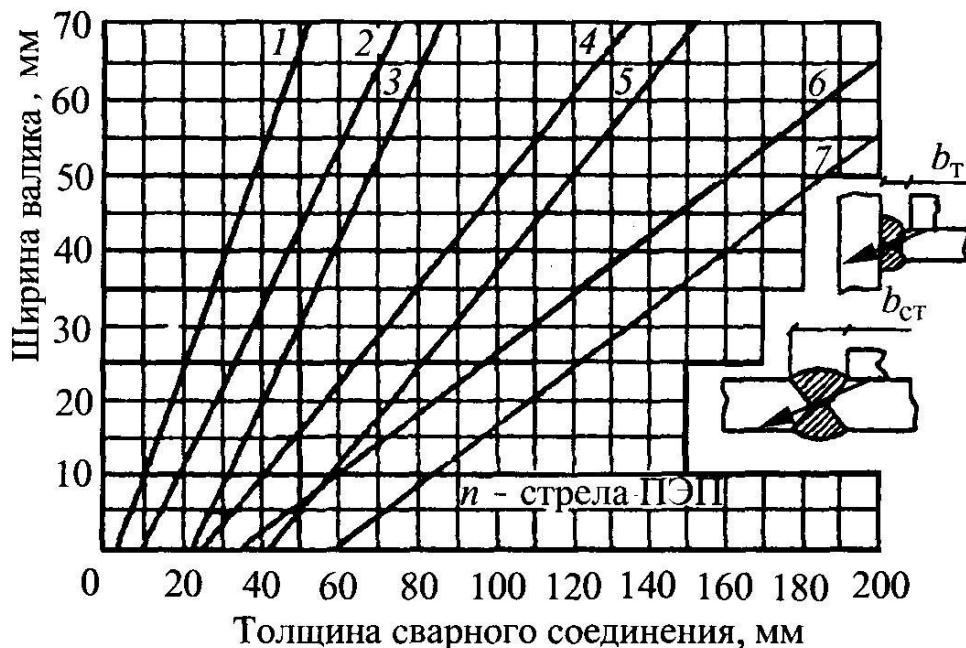
Швы толщиной 41-120 мм. Эти швы выполняются двусторонней сваркой или односторонней сваркой с подваркой корня. Обычно контролируются двумя наклонными ПЭП: корневая часть с углами ввода 45° - 50° и верхняя часть с 60° - 70° на частоту 1,8 и 2,5 МГц только прямыми лучами. Швы сосудов толщиной более 60 мм обычно контролируют с двух поверхностей. Помимо наклонных эти швы также контролируются прямым ПЭП, если в технологии предусмотрено удаление усиления шва, или головными волнами при наличии усиления.

Контроль через антикоррозионную наплавку, если она имеется, не допускается. Особенно важное требование при контроле толстостенных швов - проведение сдаточного контроля только после термообработки.

Наиболее опасные дефекты - стянутые непровары в корне шва и трещины, ориентированные преимущественно в вертикальной плоскости. Такие дефекты, расположенные в сечении шва, плохо выявляются при контроле одним ПЭП. В этом случае рекомендуется завышать чувствительность.



Оптимальные параметры наклонных ПЭП для контроля заданной толщины шва могут быть определены из графиков в зависимости от толщины изделия и ширины валика.



- 1 – $\beta=53^\circ$, $f=5$ МГц, $n=5$ мм; 2 – $\beta=50^\circ$, $f=2,5$ МГц, $n=10$ мм; 3 – $\beta=50^\circ$, $f=2,5$ МГц, $n=23$ мм; 4 – $\beta=40^\circ$, $f=2,5$ МГц, $n=14$ мм; 5 – $\beta=40^\circ$, $f=2,5$ МГц, $n=24$ мм; 6- $\beta=30^\circ$, $f=2,5$ МГц, $n=14$ мм; 7- $\beta=30^\circ$, $f=1,8$ МГц, $n=24$ мм.

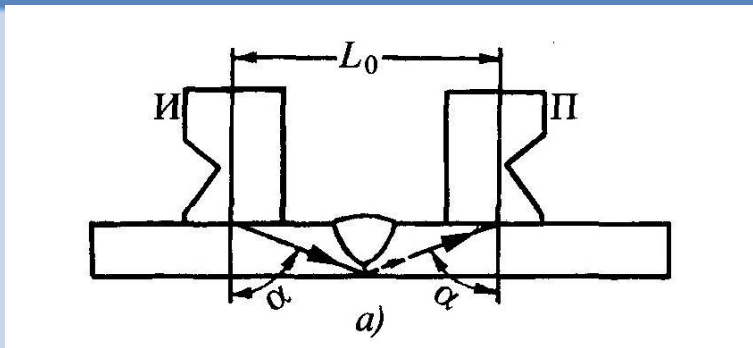


Рекомендуемые параметры дефектоскопа и наклонных преобразователей для контроля стыковых сварных соединений из углеродистых сталей

Номинальная толщина свариваемых элементов, мм	Частота, МГц	Размер пьезопластины, мм	Угол ввода, °	Уровень фиксации, мм ²
2 ... 3,5	10	3 ... 4	70 ... 75	0,5 ... 1
3,5 ... 10	4 ... 5	4 ... 6	60 ... 70	1 ... 2
10 ... 60	2 ... 2,5	10 ... 15	50 ... 70	2 ... 7
60 ... 200	1,5 ... 2	15 ... 20	35 ... 50	7 ... 15
200 ... 2000	1 ... 1,5	30 ... 50	35 ... 45	15 ... 50



Методы выявления дефектов.

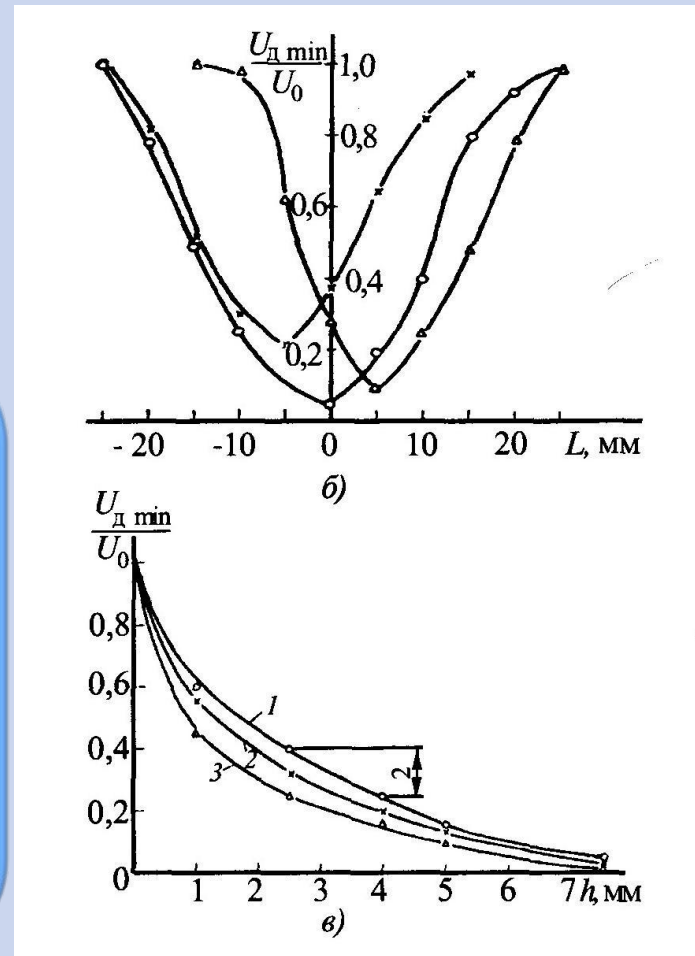


Измерение глубины непровара h зеркально-теньевым методом:

a - схема контроля; b - огибающие донных сигналов U_{amin} / U_0 при перемещении преобразователей;

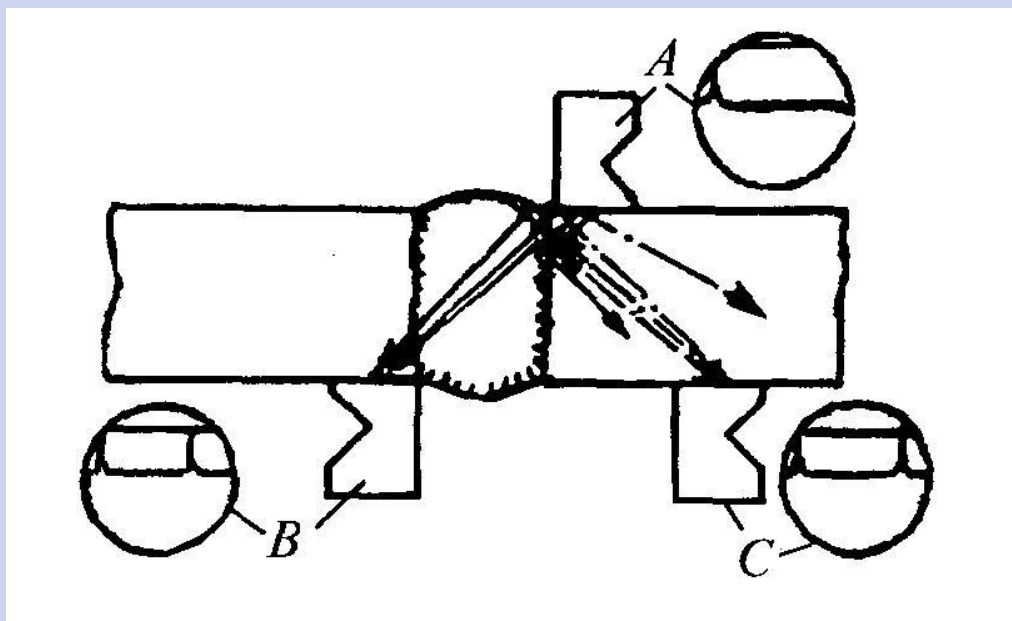
$в$ - минимум донного сигнала для параметров:

- 1 - $f = 5$ МГц, $\alpha = 55^\circ$, $L_0 = 53$ мм;
- 2 - $f = 5$ МГц, $\alpha = 50^\circ$, $L_0 = 38$ мм;
- 3 - $f = 2,5$ МГц, $\alpha = 50^\circ$, $L_0 = 38$ мм.



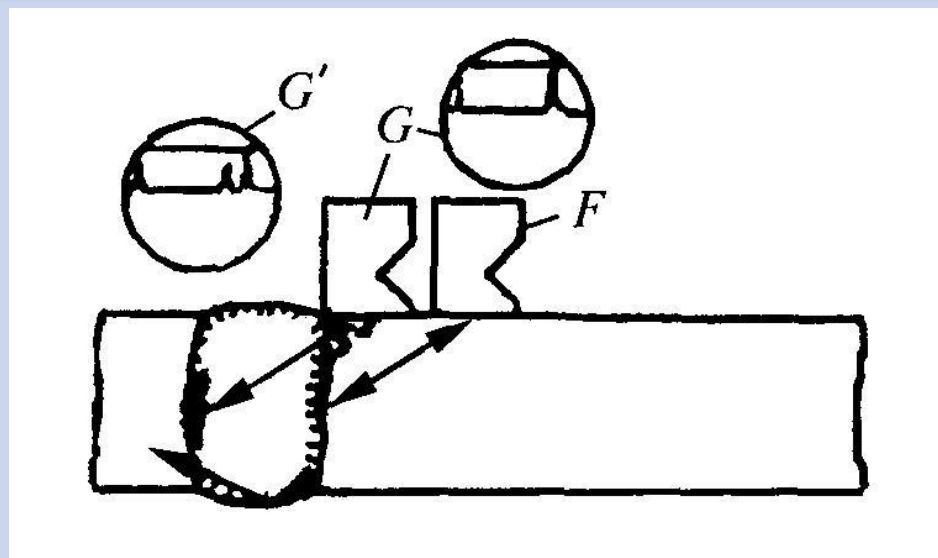


Односторонний неповар вблизи одной из поверхностей изделия наиболее уверенно выявляется при контроле с противоположной стороны изделия (положение преобразователя *C*). В данном случае амплитуда эхосигнала и его пробег по линии развертки будут большими благодаря угловому эффекту. Из положения *B* этот дефект выявляется хуже, так как поверхность наплавленного металла неровная, а из положения *A* - очень плохо.



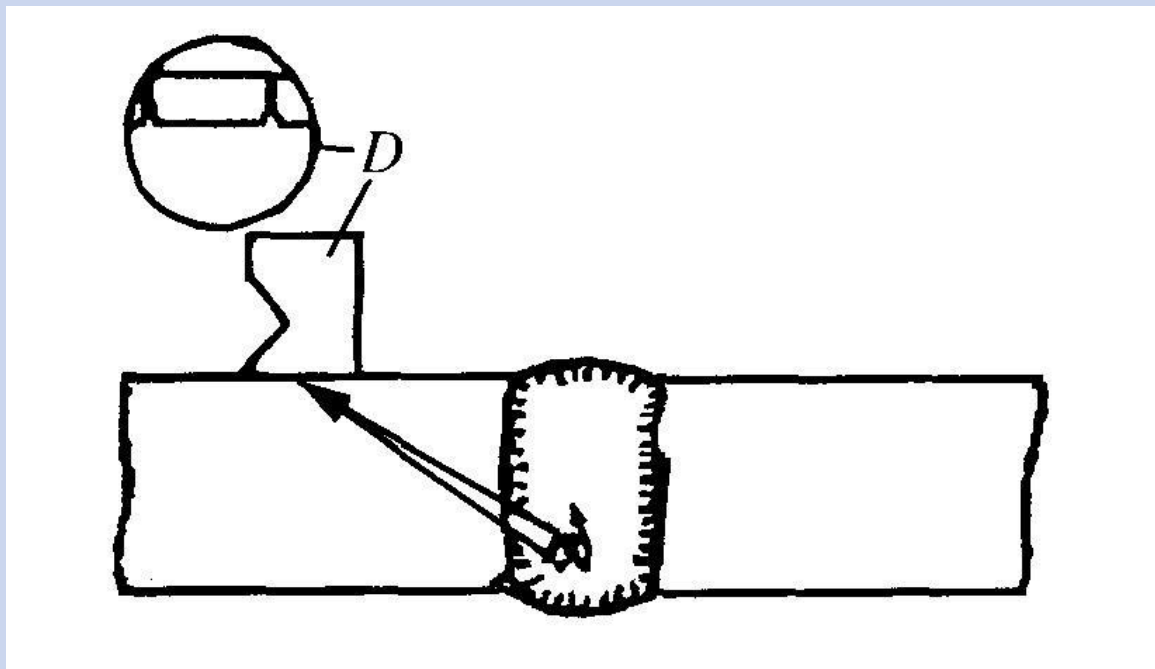


Односторонний непровар в середине шва характеризуется появлением одиночного отраженного сигнала с координатами, соответствующими расположению его по одной из границ поверхностей сплавления шва. Со стороны наплавленного металла (положение G преобразователя) непровар характеризуется значительными неровностями, что способствует формированию эхосигнала большой амплитуды. При прозвучивании со стороны основного металла (положение F) механически обработанная и несплавившаяся кромка основного металла почти зеркально отражает ультразвук





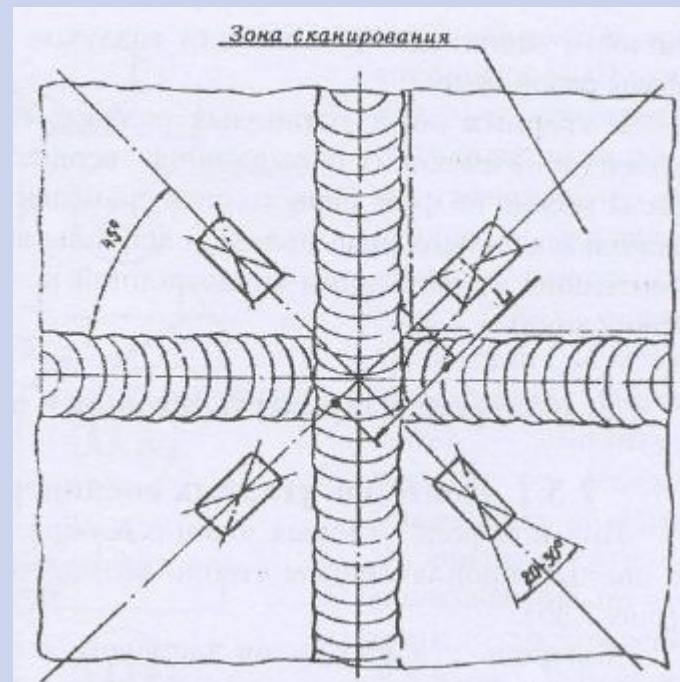
Отличием трещин от непроваров и несплавлений является то, что они располагаются обычно в средней части наплавленного металла (положение D), таким образом, трещины, особенно в швах, выполненных электрошлаковой сваркой, можно квалифицировать путем определения координат.





Контроль мест пересечений швов

Для ответственных объектов (например, в атомной энергетике) пересечения сварных швов с усилением по определению считаются контроле-непригодными. Их контроль может быть осуществлен только при полном удалении валика усиления (выпуклости) заподлицо с основным металлом с обеих поверхностей изделия. В случае изделий менее ответственных, у которых усиление не удаляется, прозвучивание производится прямым лучом с обеих поверхностей изделий по схеме, показанной на рисунок





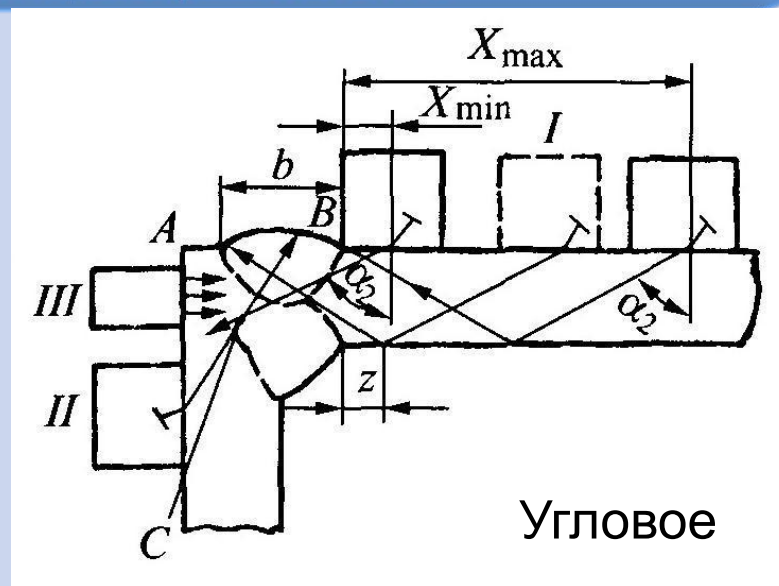
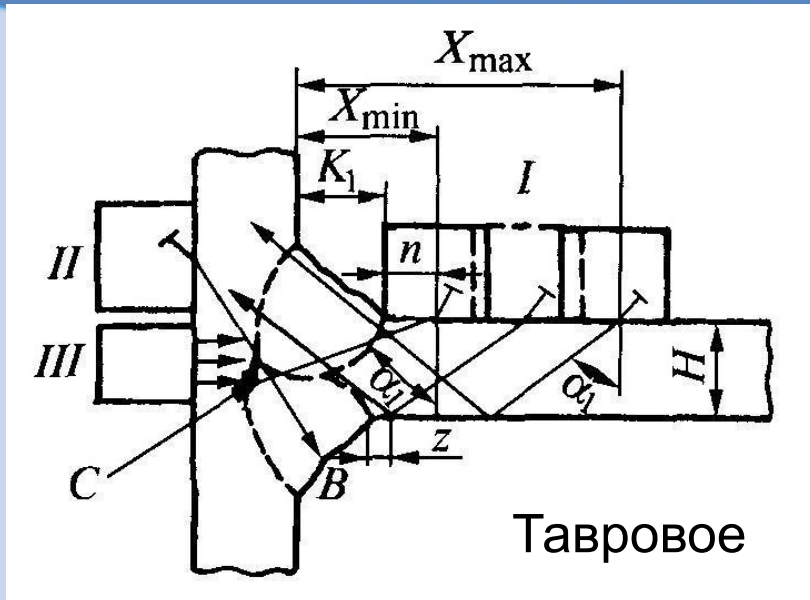
Обычно применяются совмещенные наклонные ПЭП с углом ввода 65° - 70° на частоту 4-5 МГц. Настройка чувствительности и скорости развертки должна производиться по СОП с зарубкой или вертикальным сверлением, расположенными на расстоянии L от передней грани призмы и несколько большими, чем до центра «креста». При таком контроле имеется высокая вероятность появления ложных сигналов от неровностей валиков. В этом случае с поверхности валика в зоне отражения необходимо удалить наплывы, чешуйки, а если это не помогает разобраться, снять валик целиком.

Для повышения достоверности контроля целесообразно использовать наклонные РС ПЭП с углом разворота 90° .



Контроль угловых соединений плоских элементов.

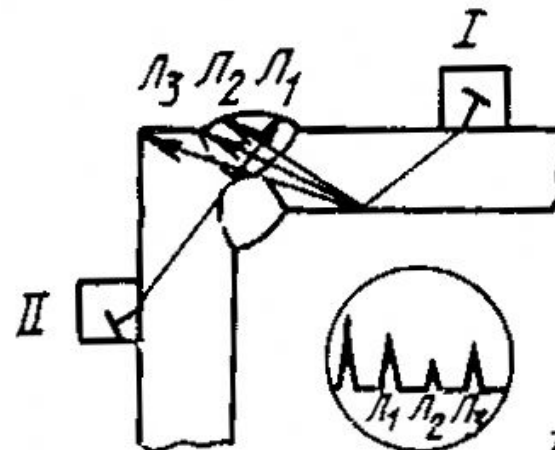
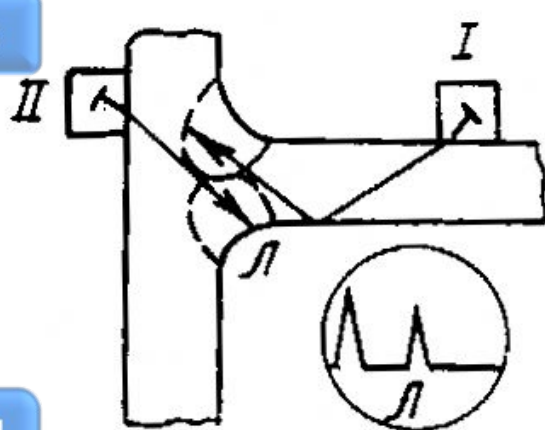
Контроль угловых швов таврового соединения с К-образной разделкой, в которых требуется полный провар корня шва, начинают с поиска непровара в корне шва прямым или однократно отраженным лучом. При отсутствии непровара контролируется часть шва: нижняя - прямым лучом, верхняя - однократно отраженным лучом. Возможно применение трех схем из положений преобразователя.



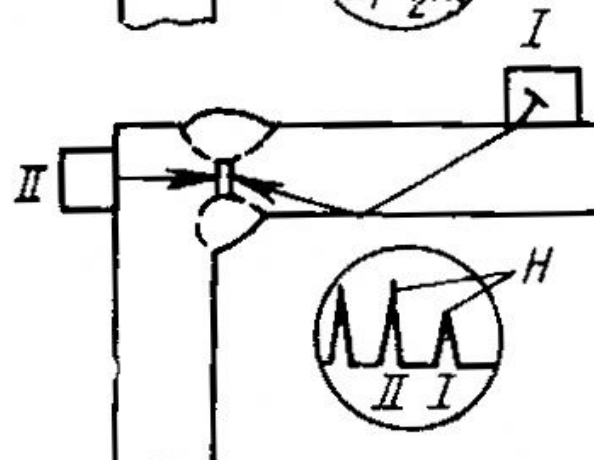
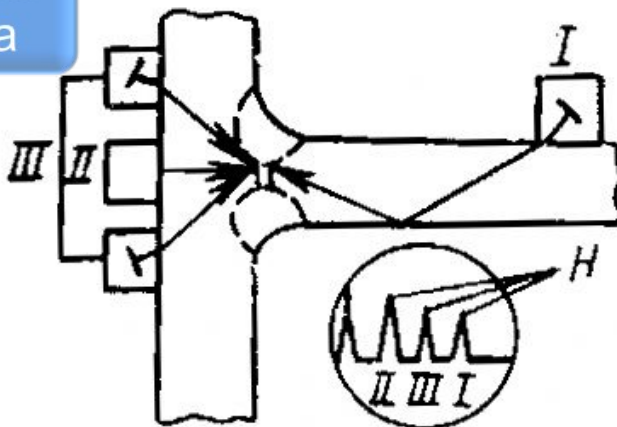


Схемы контроля тавровых и угловых соединений

Без дефектов



С непроваром в корне шва

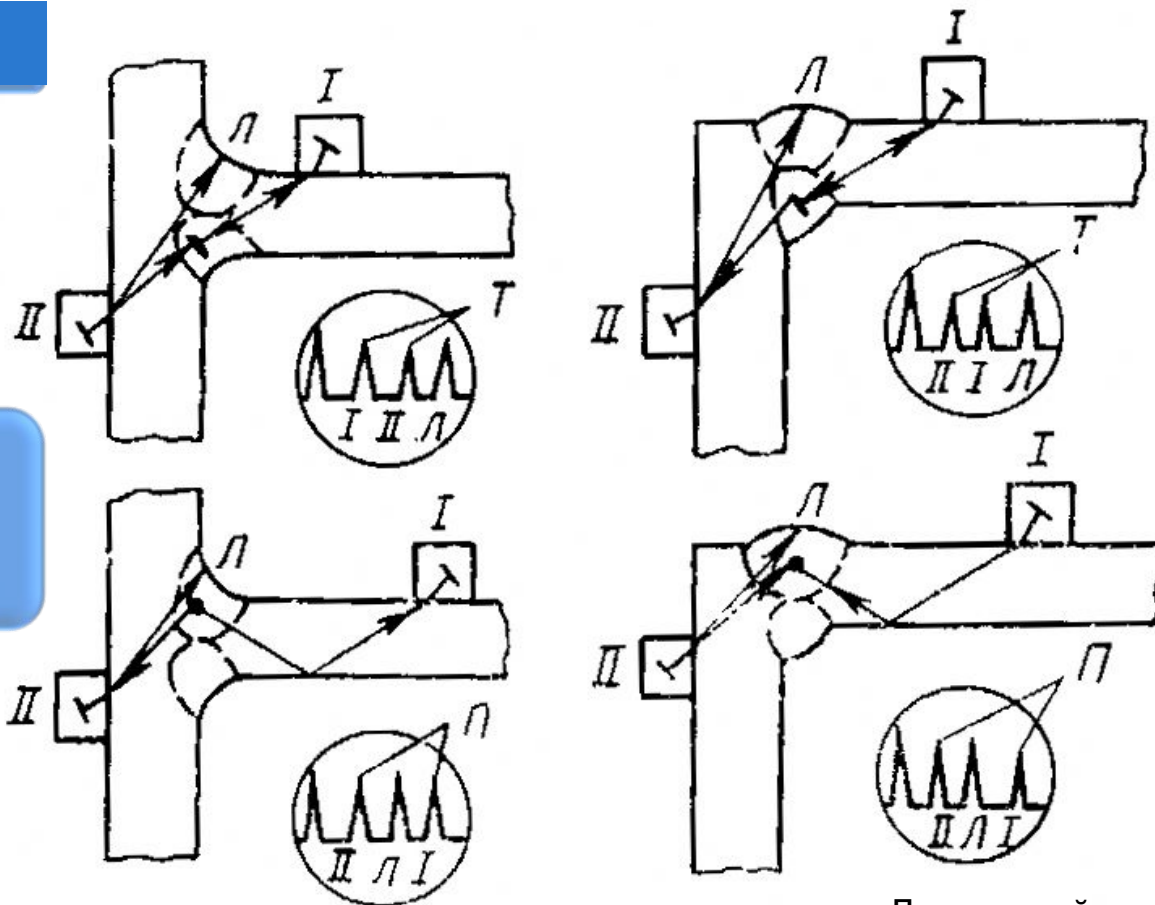


Л, Л₁, Л₂, Л₃ – ложные сигналы



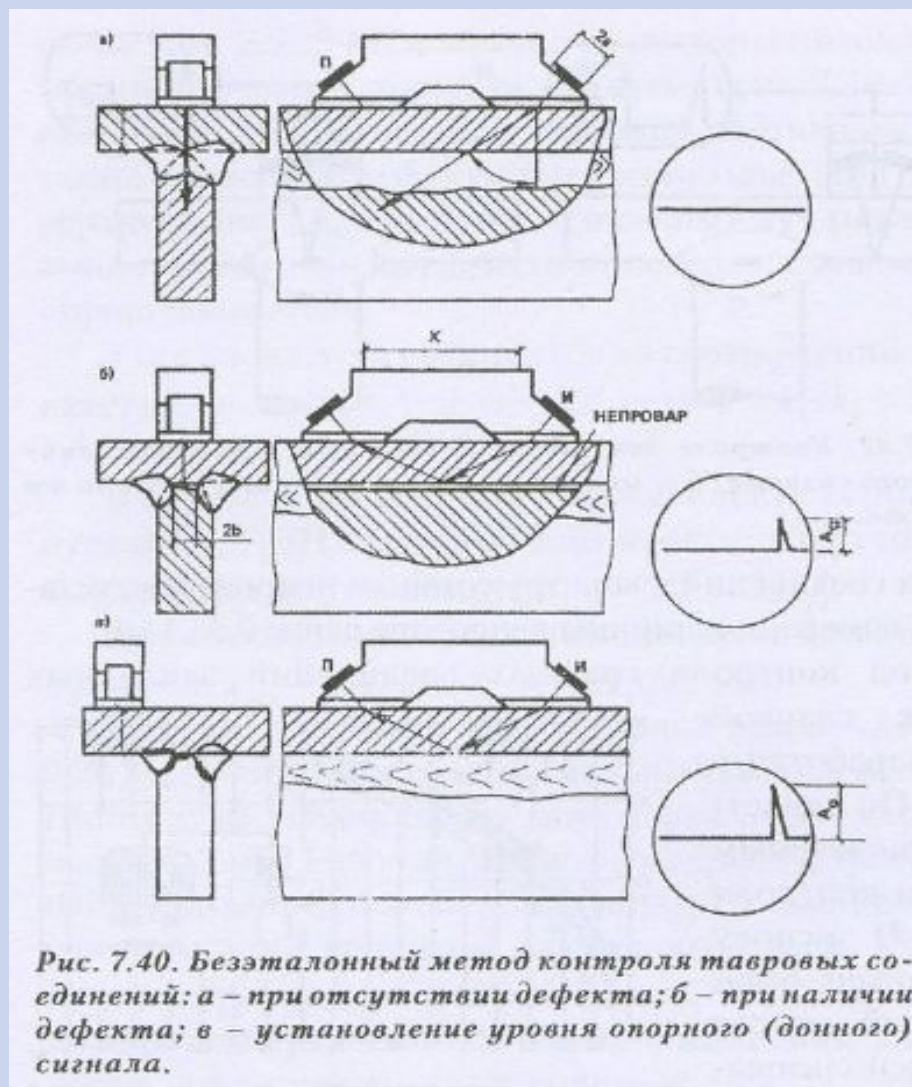
Схемы контроля тавровых и угловых соединений

С трещиной



Л – ложный сигнал

С порой или
шлаковым
включением





Одним из основных условий, обеспечивающих наиболее вероятное выявление дефектов по сечению шва, является необходимость прозвучивания всего сечения шва с равномерной чувствительностью. Целесообразно применять ПЭП с такими углами и стрелой n_0 , при которых обеспечивается контроль нижней части шва прямым, а верхней - однократно отраженным лучом.

При контроле нижней части шва таврового и углового соединения это условие может быть проверено по соотношениям:

$$\alpha_1 \geq \operatorname{arctg} \frac{2k_1 + 2n_0}{H}; \alpha_1 \geq \operatorname{arctg} \frac{e + 2n}{H}.$$



Верхнюю часть шва этих соединений целесообразно проверять преобразователями, обеспечивающими:

$$\alpha_2 \geq \operatorname{arctg} \frac{2k_1 + 2z}{H}; \alpha_2 \geq \operatorname{arctg} \frac{e + 2z}{H}.$$

Наилучшее выявление подповерхностных дефектов (минимальная величина «мертвой зоны») при контроле верхней части тавровых соединений шва достигается в случае:

$$\alpha_2 = 90^\circ - \left[\operatorname{arctg}(k_2 / k_1) + 7^\circ \right]$$

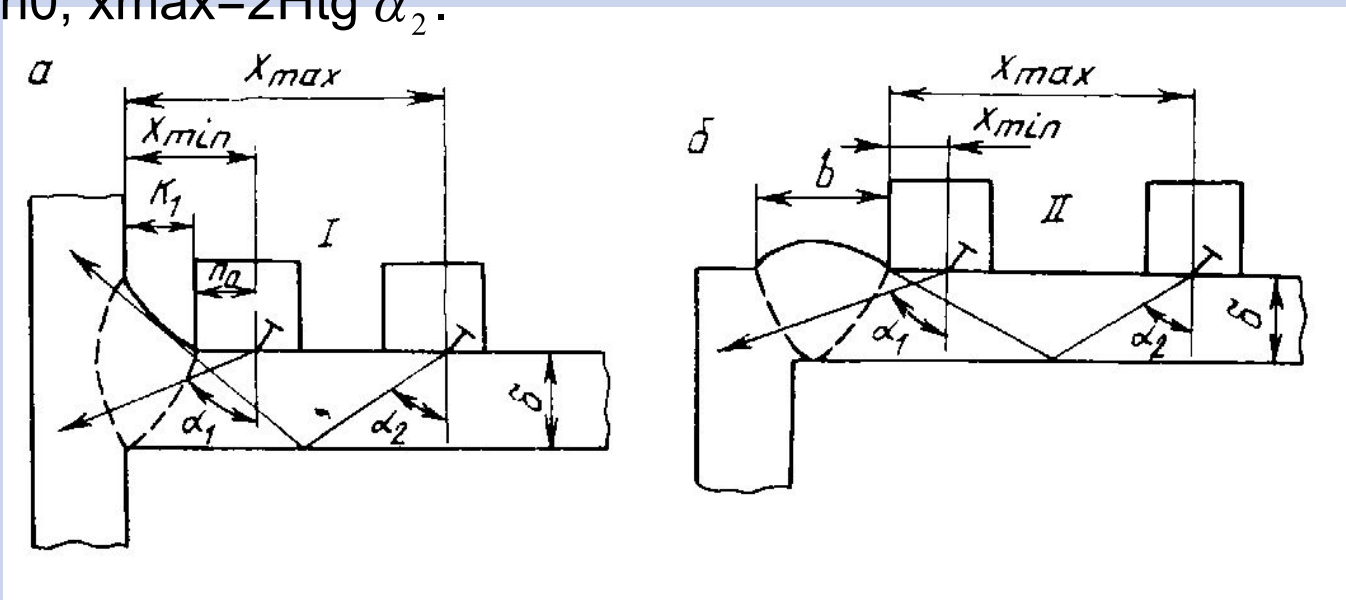
При этом область оптимальных значений z лежит в интервале $0,2H \leq z \leq 0,5H$. Если контроль прямым и однократно отраженным лучом невозможен, то необходимо увеличить угол ввода или, в крайнем случае, производить контроль однократно и двукратно отраженными лучами.



После нахождения оптимальных углов ввода устанавливаются зона перемещения преобразователей x_{min} и x_{max} и соответствующий ей рабочий участок на экране дефектоскопа.

При контроле верхней и нижней частей шва таврового соединения прямым и однократно отраженным лучами ПЭП перемещают в пределах от x_{min} до x_{max} , равных: $x_{min}=k_1+n_0$, $x_{max}=2Htg\alpha_2+k_1$.

Для углового соединения эти значения соответственно равны: $x_{min}=n_0$, $x_{max}=2Htg\alpha_2$.



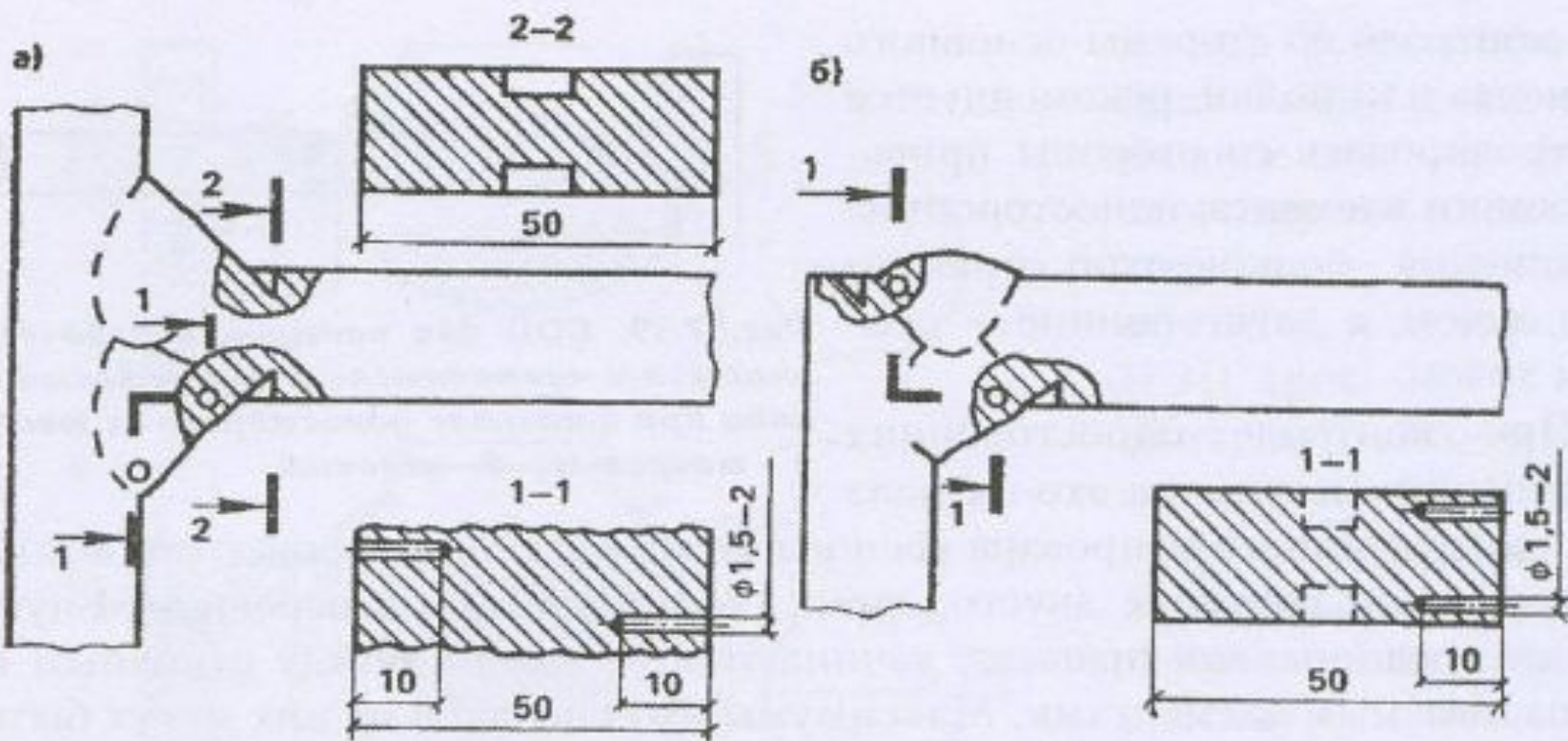


Рис. 7.37. СОП для настройки рабочего участка и чувствительности дефектоскопа при контроле двусторонних швов: а – тавровых; б – угловых.