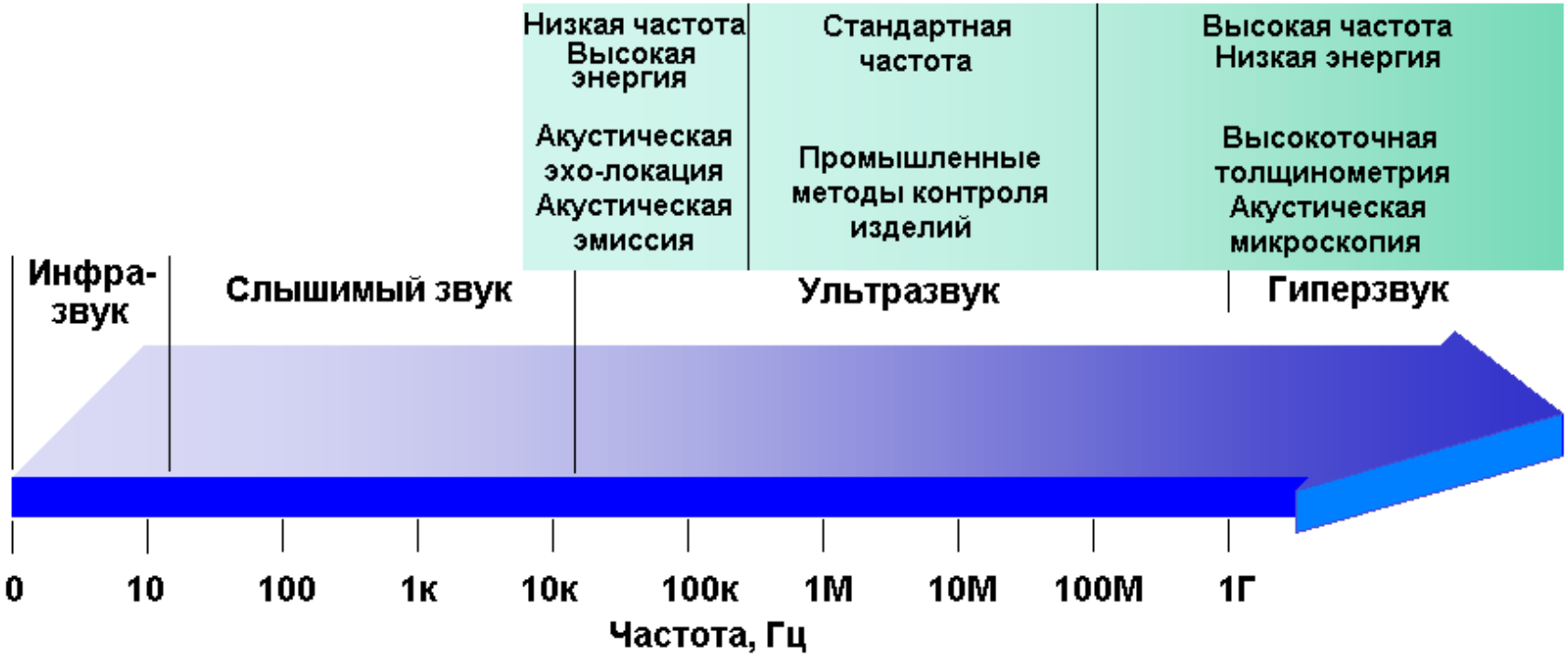
Ультразвуковой контроль

Теория и практика

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

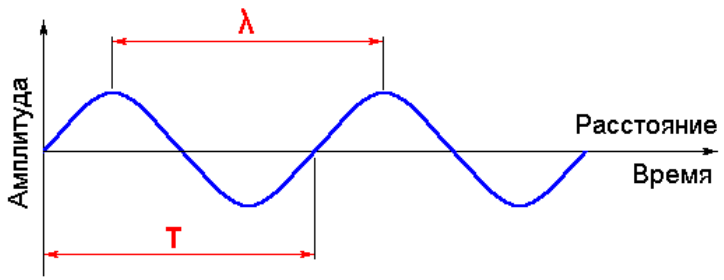
ЧТО ТАКОЕ УЛЬТРАЗВУК

Звук, сгенерированный выше области слышимости человека (примерно 20 кГц), называется **ультразвуком**. Тем не менее, диапазон частот для ультразвуковой дефектоскопии и толщинометрии составляет от 200 кГц до 100 МГц. При увеличении частоты длина волны ультразвуковых колебаний уменьшается. Поэтому ультразвуковые волны могут отражаться от более маленьких поверхностей, таких как дефекты в материалах. Это позволяет использовать ультразвук для поиска дефектов с очень малыми размерами.



ЧАСТОТА, ПЕРИОД И ДЛИНА ВОЛНЫ

Ультразвуковые колебания распространяются в виде волн, но в отличии от световых волн, которые могут распространяться в вакууме, ультразвук требует наличия упругой среды, например, жидкости или твердых веществ. На рисунке показаны основные параметры незатухающей звуковой волны: **длина волны** (λ) и **период** (T) полного колебания. Количество полных колебаний в единицу времени называется **частота** (f) и измеряется в Герцах (Гц); если имеем одно полное колебание в секунду, частота равна 1 Гц; 1000 колебаний в секунду - 1 килогерц (1кГц); один миллион колебаний в секунду - 1 мегагерц (1МГц). Время завершения полного колебания называется **период** (T) и измеряется в секундах. Отношение между частотой и периодом в непрерывной волне приведено в уравнении



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

СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА И ДЛИНА ВОЛНЫ

Скорость ультразвука (C) для абсолютно упругого материала при данной температуре и внутренних напряжениях является его **константой**. Отношение между скоростью звука, частотой, длиной волны и периодом колебаний приведено ниже.

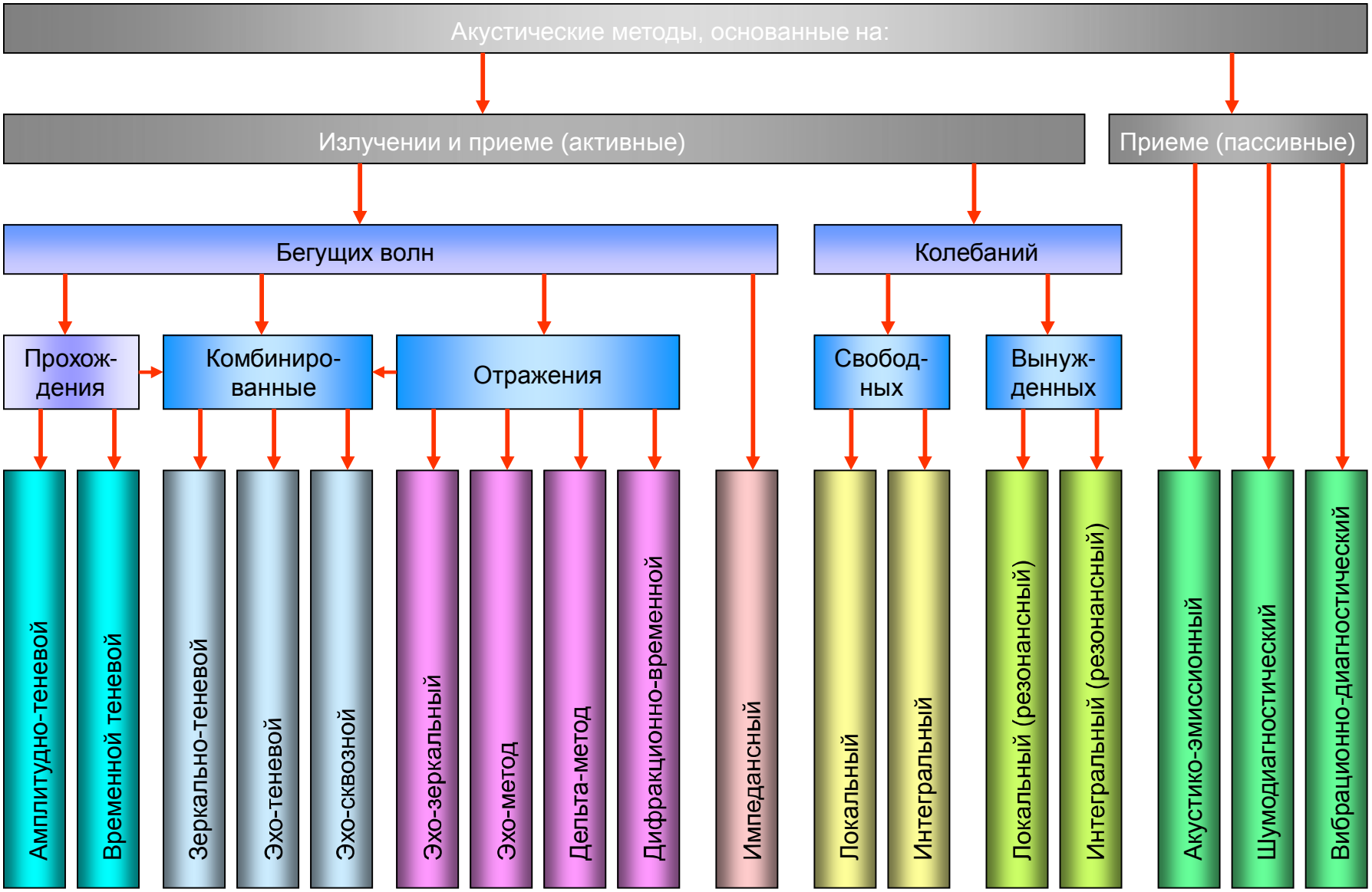
$$\lambda = c\,T$$

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

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

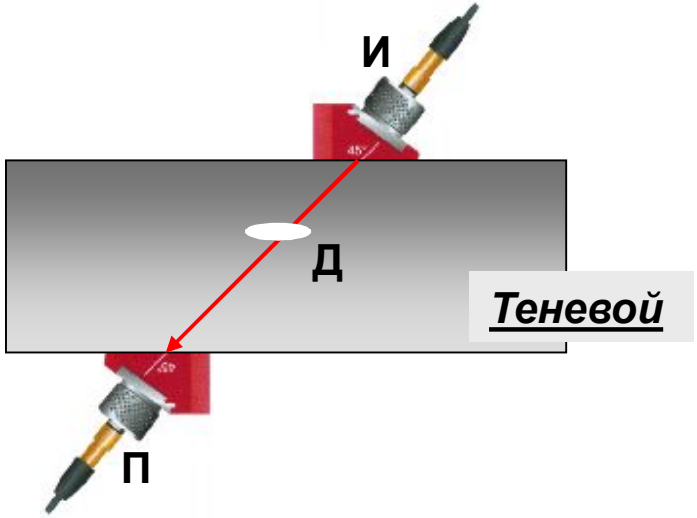
Материал	Скорость распространения волн, м/с		
	продольных	поперечных	поверхностных
Алюминий	6320	3130	2900
Бериллий	12900	8800	7870
Бронза	3800	2500	2300
Вода (при 20^0C)	1480	-	-
Вольфрам	5180	2870	2650
Глицерин	1920	-	-
Золото	3240	1200	1120
Латунь	4430	2120	1950
Масло моторное (SAE20 или 30)	1740	-	-
Марганец	4660	2350	2210
Медь	4660	2260	2160
Молибден	6250	3350	3110
Никель чистый	5630	2960	2640
Олово	3320	1670	1560
Платина	3960	1670	1570
Поливинилхлорид (ПВХ) твердый	2395	1060	1020
Резина акриловая	2730	1430	-
Ртуть	1450	-	-
Свинец	2160	850	790
Серебро	3600	1590	1480
Сталь углеродистая	5890	3240	3000
Сталь низколегированная	5850	3240	3050
Сталь нержавеющая	5740	3090	3050
Стекло органическое	2700	1125	1050
Титан	6100	3120	2910
Уран	3370	-	-
Фторопласт	1350	-	-
Цинк	4170	2410	2220
Цирконий	4650	2250	2180
Чугун	5900	3230	-

КЛАССИФИКАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ



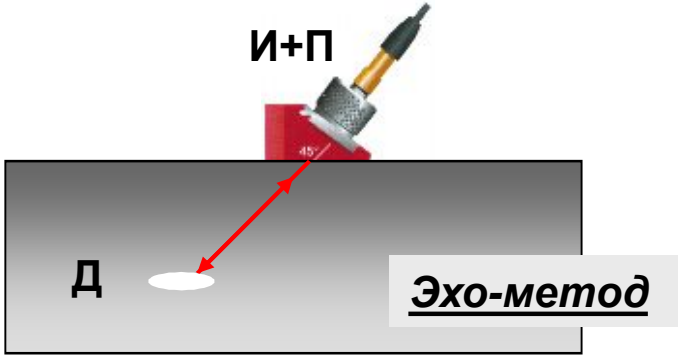
МЕТОДЫ И СХЕМЫ КОНТРОЛЯ

ПРОХОЖДЕНИЯ

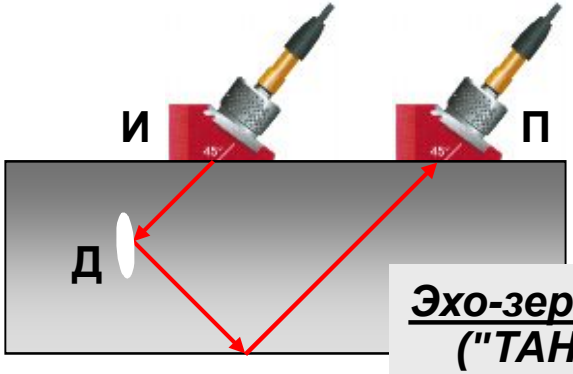


Теневой

ОТРАЖЕНИЯ

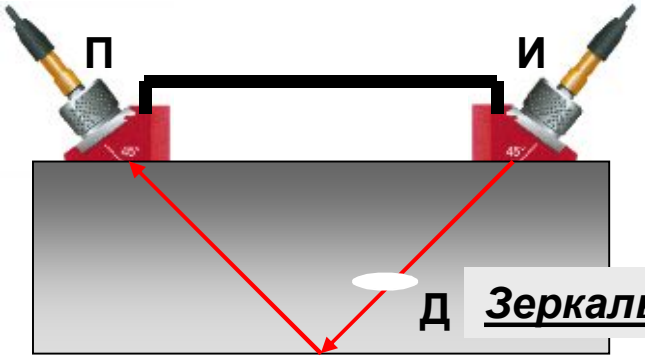


Эхо-метод



Эхо-зеркальный ("ТАНДЕМ")

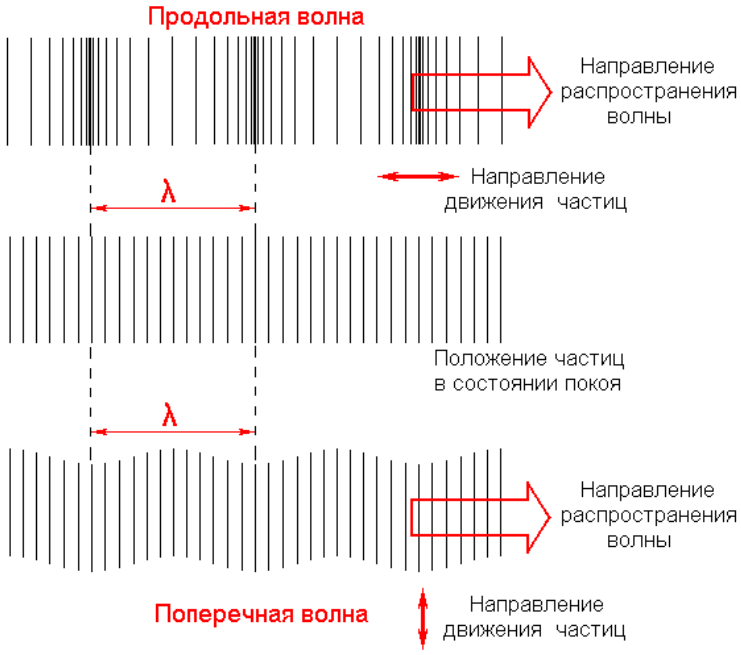
КОМБИНИРОВАННЫЕ

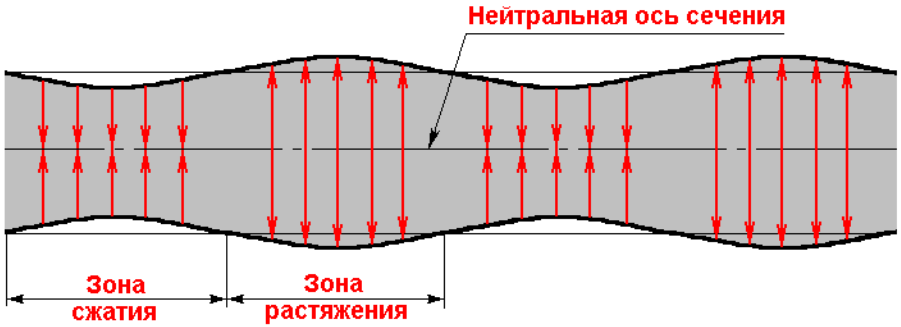


Зеркально-теневой

ТИПЫ ВОЛН И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Наиболее общие методы ультразвукового контроля используют продольные и поперечные волны. **Продольная волна** - волна сжатия, в которой движение частиц происходит в направлении распространения волны. **Поперечная волна** - волна сдвига - волновое движение, в котором направление движения частиц перпендикулярно направлению распространения волны. Существуют и другие типы распространения ультразвуковых волн, такие как **головные** волны, **поверхностные** волны (волны **Рэлея**), волны **Лэмба** и волны **Порхгаммера**. Головная волна - продольная, не чувствительна к поверхностным дефектам (на глубине не более 0,5 мм) и имеет максимум чувствительности на глубине 4...10 мм в зависимости от расстояния от преобразователя (10…50 мм). Рэлеевская волна рассеивается на неровностях поверхности, хорошо выявляет дефекты на самой поверхности, чувствительность быстро убывает с глубиной. Скорость распространения волн Рэлея составляет примерно 90% от скорости поперечных волн, глубина проникновения соизмерима с длиной волны.



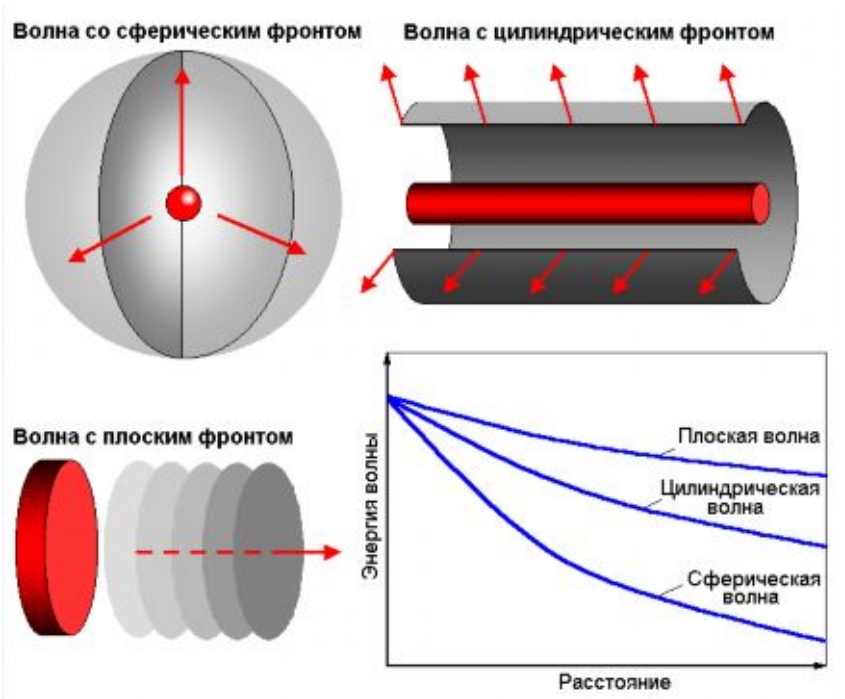


Волны Лэмба (волны в пластинах) и Порхгаммера (волны в стержнях) - нормальные волны, колебания охватывают всё сечение пластины или стержня. Скорость распространения этих волн зависит от частоты колебаний, упругих свойств материала и геометрических размеров изделия.

ТИПЫ ВОЛН И ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

(продолжение)

При распространении акустических волн их амплитуда уменьшается – происходит ослабление волны. Главные причины ослабления – **расхождение** и **затухание**. В зависимости от формы источника звуковых колебаний могут образовываться акустические волны с различной формой фронта волны – сферические, цилиндрические и плоские. Сферическая волна распространяется в двух плоскостях, поэтому ослабление для такой волны максимально. Волна с цилиндрическим фронтом распространяется в одной плоскости, вследствие чего ее ослабление несколько меньше. Для плоской волны расхождение лучей отсутствует и ее ослабление обусловлено только затуханием. Величина ослабления от затухания пропорциональна множителю $e^{-\delta x}$. Здесь e - число Непера (e=2,73…), δ - коэффициент затухания, x – расстояние, проходимое волной.



ПРИНЦИПЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля основан на введении в тестируемый объект высокочастотной волны для получения информации о его состоянии. Существует два основных принципа при использовании ультразвука.

Первый основан на измерении времени пробега ультразвука в изделии, второй - на измерении амплитуды отраженного сигнала. Зная время пробега (t_s) и скорость ультразвука (C), можно вычислить толщину материала (S) по следующей зависимости:

$$S = 0{,}5 \cdot C \cdot t_S$$

Измерение относительного изменения амплитуды сигнала может быть использовано для измерения размеров дефектов или оценки ослабления сигнала в данном материале. Относительное изменение амплитуды сигнала обычно измеряется в децибелах. Величина изменения амплитуды сигнала в децибелах равна отношению амплитуда сигнала на входе в объект контроля (A_1) к амплитуде сигнала, полученного после отражения от дефекта или дна изделия (A_2). Она может быть вычислена по следующей зависимости:

$$dB = 20 \cdot \log_{10}(A_1 / A_2)$$

Наиболее часто используемые отношения амплитуд

A_1 / A_2	Отношение	dB
100% / 70,71%	1,4142	3
100% / 50%	2	6
100% / 25%	4	12
100% / 10%	10	20
100% / 1%	100	40

АКУСТИЧЕСКИЙ ИМПЕДАНС
КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОЗРАЧНОСТИ

Акустическое сопротивление материала характеризуется величиной **акустического импеданса** (Z), равного произведению скорости звука в материале (C) на плотность материала (ρ).

$$Z = C\rho$$

Поскольку скорости распространения продольных волн больше, чем поперечных, то для них акустическое сопротивление выше. Именно этим объясняется тот факт, что ультразвуковую дефектоскопию главным образом проводят с использованием поперечных волн.

Граница между двумя материалами с различными акустическими импедансами называется акустическим интерфейсом. При нормальном (перпендикулярном) падении ультразвука на акустический интерфейс часть акустической энергии отражается, а другая часть проходит через границу раздела. Если контактирующие материалы имеют акустические импедансы Z_1 и Z_2, доля энергии, прошедшей через границу раздела, может быть определена через коэффициент прозрачности D, а доля отраженной энергии - через коэффициент отражения R.

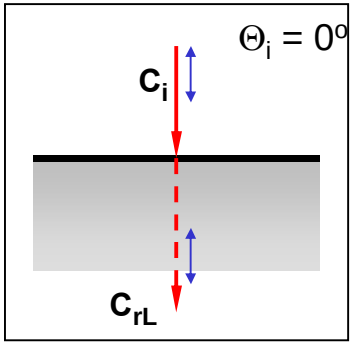
$$D = \left[\frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_1+Z_2)^2}\right] \qquad R = \left[\frac{(Z_2-Z_1)}{(Z_1+Z_2)}\right] \qquad D + R^2 = 1$$

Если отражение не является главным фактором затухания ультразвука, то причинами ослабления ультразвука в материале являются: **дифракция**, **рассеяние** и **поглощение**. Ослабление ультразвука в материале может играть важную роль при выборе преобразователей для проведения контроля изделий.

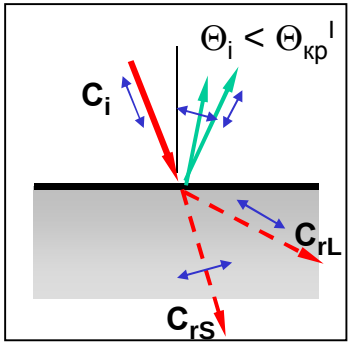
При наличии слоя контактной жидкости на границе раздела происходит интерференционное переотражение ультразвуковой волны. Если акустический импеданс промежуточного слоя лежит в интервале между Z_1 и Z_2, то при определенной толщине промежуточного слоя имеет место "**просветление границы раздела**". Максимальная прозрачность (D=1) достигается при толщине слоя, равной **одной четверти** длины волны ультразвука в слое.

ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

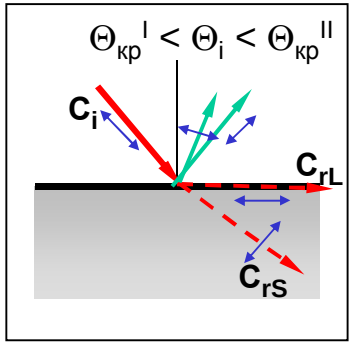
При падении упругой волны на границу раздела двух сред волна частично проходит во вторую среду и частично отражается от границы раздела. Если нижняя среда – твердое тело, то в ней при падении продольной волны возникает сразу две волны – продольная и поперечная. Явление превращения одного типа волн в другой называется **трансформацией волн**.



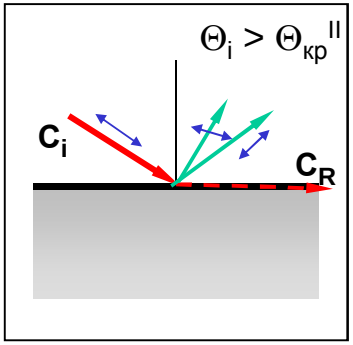
При нормальном падении продольной волны во второй среде будет распространяться также продольная волна (трасформации волн не будет).



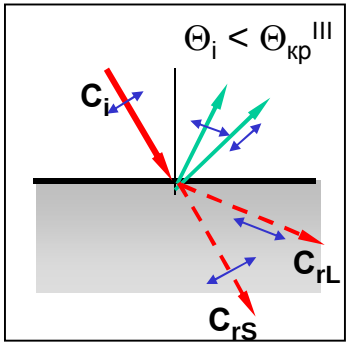
По мере увеличения угла падения продольная волна будет трансформироваться (образуются продольная и поперечная волны в обоих средах).



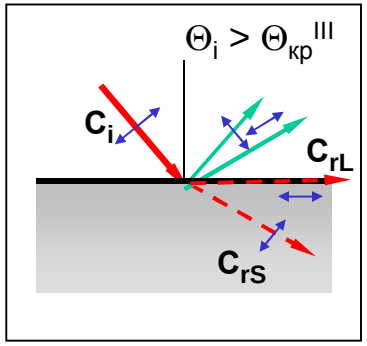
При некотором угле падения продольной волнынаступает явление, при котором продольная преломленная волна пойдет по поверхности раздела. Образуется головная поверхностная волна. Этот угол падения называется **первым критическим**.



При дальнейшем увеличении угла падения продольной волны во второй среде объемные волны не возбуждаются. Здесь образуется поверхностная Рэлеевская волна, скорость которой несколько меньше скорости для поперечных волн. Этот угол падения - **второй критический**.



Если на границу раздела двух сред падает поперечная волна, явление трансформации волн также имеет место.



По мере увеличения угла падения поперечной волны продольная преломленная волна будет распространяться по поверхности раздела. Этот угол падения называется **третьим критическим**.

ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

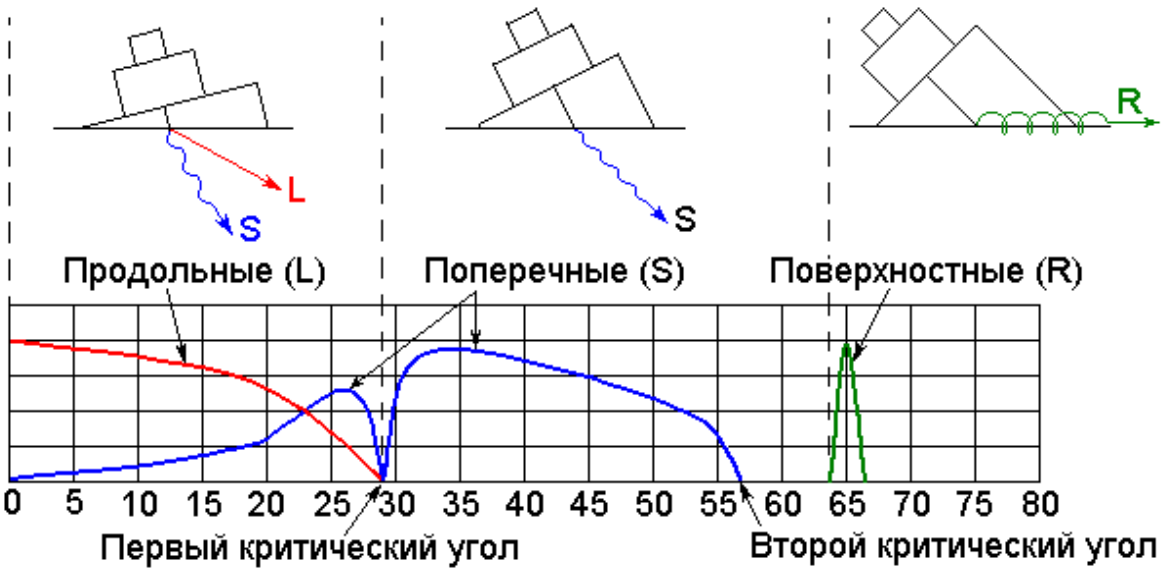
(продолжение)

Угол падения и углы преломления и отражения связаны между собой соотношением по закону Снеллиуса:

$$\frac{\sin\theta_i}{C_i} = \frac{\sin\theta_{rL}}{C_{rL}} = \frac{\sin\theta_{rS}}{C_{rS}}$$

Здесь: Θ_i - угол падения; Θ_r - угол преломления продольной (индекс L-Longitudinal) и поперечной (индекс S-Shear) волн; C_i - скорость продольной волны в материале призмы; C_r - скорость преломленной продольной (индекс L) и поперечной (индекс S) волн.

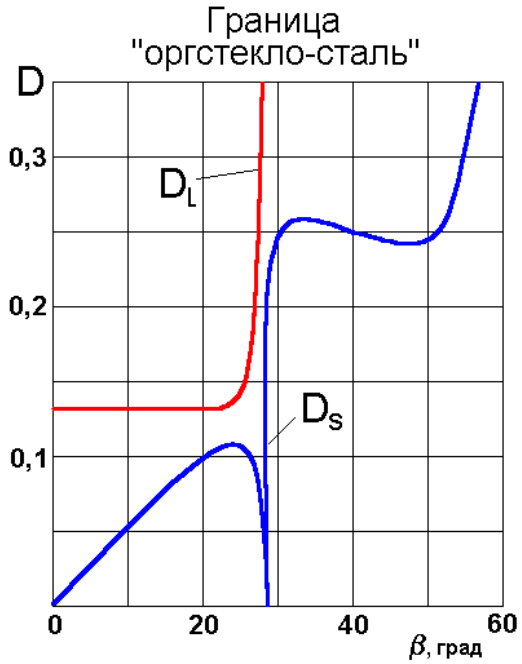
На рисунке показана связь между углом ввода луча и относительными амплитудами преломленных волн (продольной, поперечной и поверхностной) для границы раздела "оргстекло - сталь". Для границы раздела "оргстекло - сталь" значения первого и второго критических углов примерно равны 28° и 57°. Третий критический угол в данном случае составляет примерно 33°.

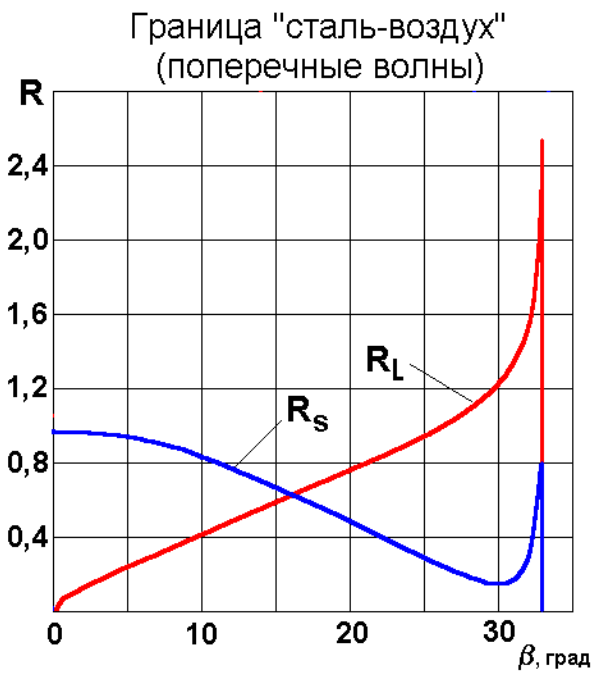


ПРОХОЖДЕНИЕ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

(продолжение)

При наклонном падении ультразвуковой волны на границу раздела величина коэффициентов прозрачности и отражения определяется другими зависимостями, чем при нормальном (учитывается угол падения). Ниже показаны графики коэффициентов прозрачности (D) и отражения (R) для различных границ раздела.

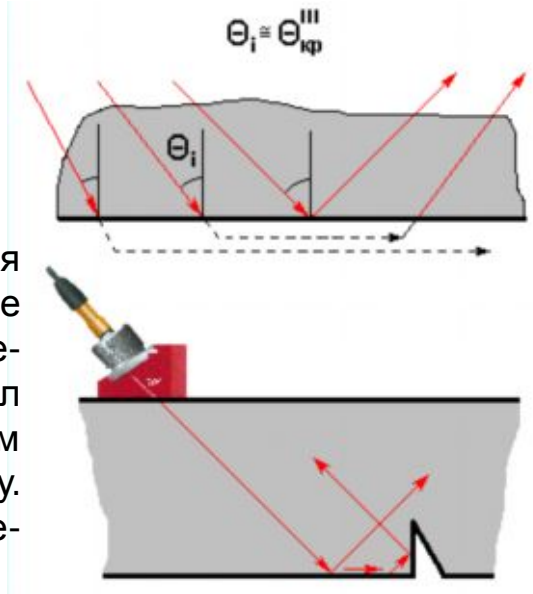




$$R=\left[\frac{Z_L\cos^2 2\Theta_{rL}+Z_s\sin^2 2\Theta_{rs}-Z}{Z_L\cos^2 2\Theta_{rL}+Z_s\sin^2 2\Theta_{rs}+Z}\right]^2$$

$$D_L=\frac{4Z_L Z\cos^2 2\Theta_{rL}}{\left[Z_L\cos^2 2\Theta_{rL}+Z_s\sin^2 2\Theta_{rs}+Z\right]^2}$$

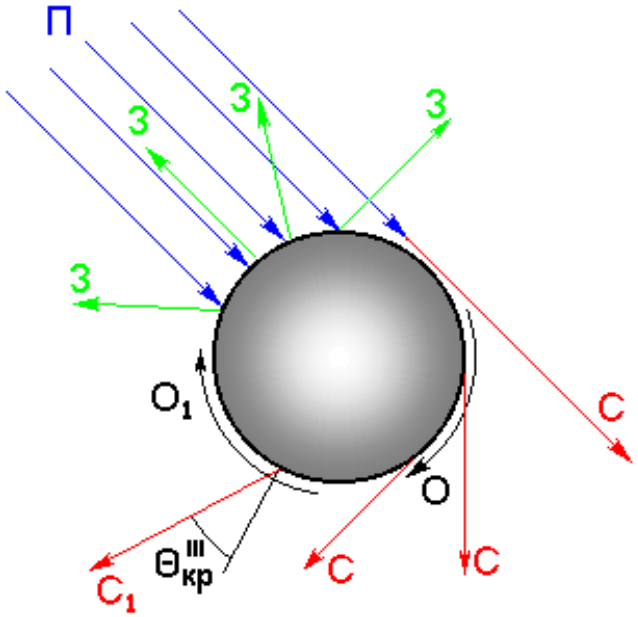
$$D_s=\frac{4Z_s Z\sin^2 2\Theta_{rL}}{\left[Z_L\cos^2 2\Theta_{rL}+Z_s\sin^2 2\Theta_{rs}+Z\right]^2}$$

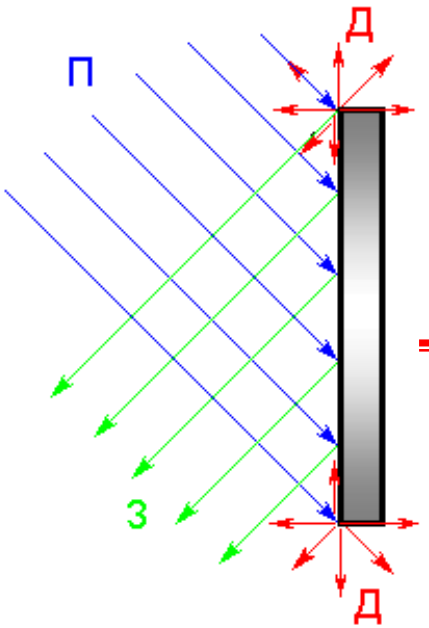


При падении поперечной волны на границу раздела при угле падения вблизи третьего критического угла имеет место незеркальное отражение – происходит **смещение** отраженных лучей вдоль поверхности из-за переноса энергии головной волной. Это явление тем заметнее, чем угол падения ближе к третьему критическому углу. Величина смещения тем больше, чем больше произведение радиуса пьезоэлемента на частоту. Она может достигать до 5…8 мм, а это приводит к ошибочному определению координат расположения выявленного дефекта.

ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ ВОЛН НА НЕСПЛОШНОСТЯХ

Если звуковая волна попадает на несплошность (поперечная волна **П**), в общем случае возникают явления отражения (волны **З**) и рассеяния (волны **С**, **О** и **Д**). Явление отражения описывается геометрическими законами распространения волн, которые были рассмотрены выше. Рассеянные волны или волны **дифракции** распространяются по законам, отличным от геометрических.При дифракции на объемных дефектах, особенно цилиндрических, волны рассеяния обегают несплошность и соскальзывают с неё. При диаметре цилиндра порядка длины волны основной тип вол обегания **О** – рэлеевская, а волн соскальзывания **С** – поперечная, направленная по касательной к поверхности. При диаметре цилиндра, значительно большем длины волны, возникает головная волна $\mathbf{O_1}$. Волна соскальзывания $\mathbf{C_1}$ при этом распространяется под углом к поверхности, равным третьему критическому углу $\Theta_{кр}^{III}$. При дифракции на плоской несплошности волны рассеяния имеют вид расходящихся лучей от каждой точки её края или ребра (волны **Д**). По типу – это продольные и поперечные волны в зависимости от угла преломления. Такие точки называются **"блестящими"**. Здесь также имеет место взаимное сложение волн отражения (волны **З**) и волн дифракционных с учетом их фаз – происходит **интерференция**.



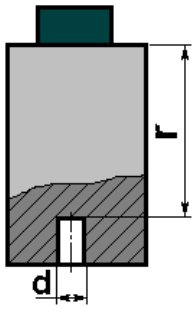


Если в различных зонах материала скорость распространения звука изменяется (например, ферритная фаза в аустенитном сварном шве или поверхностные закаленные слои), имеет место преломление волн на таких границах – **рефракция**.

АКУСТИЧЕСКИЙ ТРАКТ

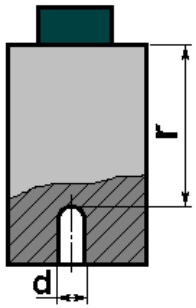
Путь ультразвука от излучателя до дефекта и обратно называется **акустическим трактом**. Формулы для расчета акустического тракта определяют ослабление сигнала на этом пути. Амплитуда отраженного эхо-сигнала уменьшается с увеличением расстояния до дефекта и уменьшением размеров дефекта. Это справедливо и для сквозного сигнала при теневом методе контроля. Для расчета акустического тракта используются искусственные отражатели.

Диск или отверстие с плоским дном



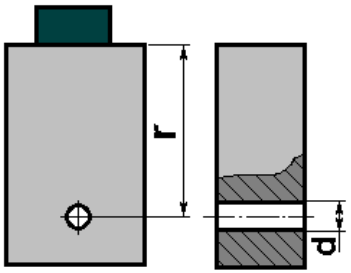
$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S d^2}{4 r^2 \lambda^2} e^{-2\delta r}$$

Сфера или отверстие со сферическим дном



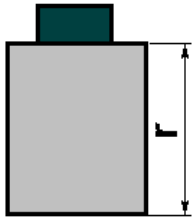
$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S d^2}{4 r^2 \lambda} e^{-2\delta r}$$

Боковая поверхность цилиндрического отверстия



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

Донный сигнал



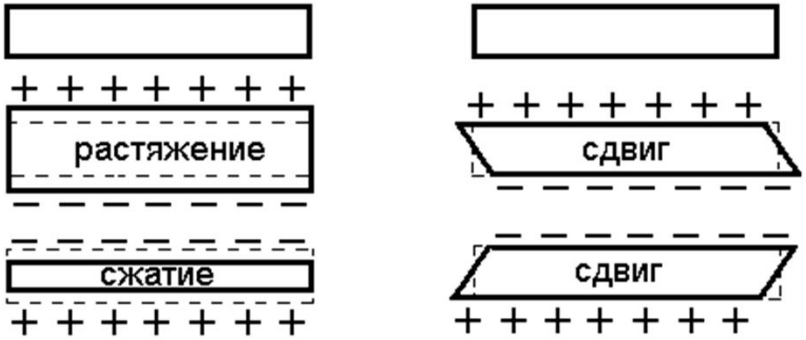
$$\frac{A'}{A_0} = \frac{S}{2 r \lambda} e^{-2\delta r}$$

В приведенных формулах для учета диаграммы направленности преобразователя в числителе введена площадь преобразователя S, а в знаменателе – длина волны ультразвука. Из формул видно, что донный сигнал ослабевает медленнее, чем эхо-сигнал от диска или сферы. Следует отметить, что эти формулы справедливы, когда диаметр отражателя больше половины длины волны. При уменьшении размеров дефекта начинает сказываться дифракционное рассеяние ультразвука. Поэтому дефекты меньше длины волны выявляются плохо. Для отражателя любых размеров служат АРД-диаграммы, которые рассмотрены ниже.

Для наклонного преобразователя справедливы те же зависимости, но размер пьезопластины считают уменьшенным в ($\cos\alpha/\cos\beta$) раз, где β – угол призмы, а α – угол ввода.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Возбуждение и прием упругих волн осуществляется путем преобразования электрических колебаний в акустические, а затем обратно акустических в электрические с помощью специальных устройств – пьезоэлектрических преобразователей, имеющих чувствительный элемент - пьезопластину. Если упруго деформировать пьезопластину , то на ее поверхности возникает разность потенциалов, изменение во времени и величина которых пропорциональны такому внешнему механическому воздействию. Это-**прямой пьезоэффект**. При подаче электрического сигнала (импульса) на поверхности пьезопластины происходит ее упругая деформация (**обратный пьезоэффект**). Смещение граней пьезопластины весьма мало и не превышает 10^{-4}мм.



Если колебания в пьезопластине возбудить электрическим импульсом, а затем предоставить ей возможность свободно колебаться, то колебания будут происходить на собственной частоте f_0, пропорциональной скорости звука в материале пьезопластины **C** и ее толщине **h**.

$$f_0 = \frac{C}{2h}$$

Из формулы видно, что чем тоньше пьезопластина, тем выше ее собственная частота. Например, для пластины из наиболее широко используемого пьезоматериала – цирконата-титаната свинца (ЦТС), скорость звука в котором C=3300 м/с при толщине 0,660 мм собственная частота $\mathbf{f_0}$ будет равна 2,5 МГц, а при толщине 0,33 мм - $\mathbf{f_0}$ = 5 МГц.

На практике под влиянием конструктивных элементов пьезоэлектрического преобразователя, непосредственно контактирующих с пьезопластиной собственная частота немного изменяется. Частоту, которую возбуждает преобразователь, называют **рабочей частотой**.

ФОРМА И СПЕКТР УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА

Основные параметры, описывающие форму и спектр ультразвукового сигнала, следующие:

- Частота в Мегагерцах (МГц);
- Длительность импульса в микросекундах (мкс);
- Пиковая амплитуда в децибелах (дБ).

Схема определения длительности импульса на уровне –14 дБ или 20%-ного отношения пиковой амплитуды показана на рис.1. На рис.2 показана амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ультразвукового преобразователя. Полоса пропускания для данного преобразователя лежит между нижней и верхней границами по частотам, определяемым требуемым отношением амплитуд (в данном случае это отношение соответствует –6 дБ).

На рис.3 показан недетектированный эхо-сигнал от дефекта.

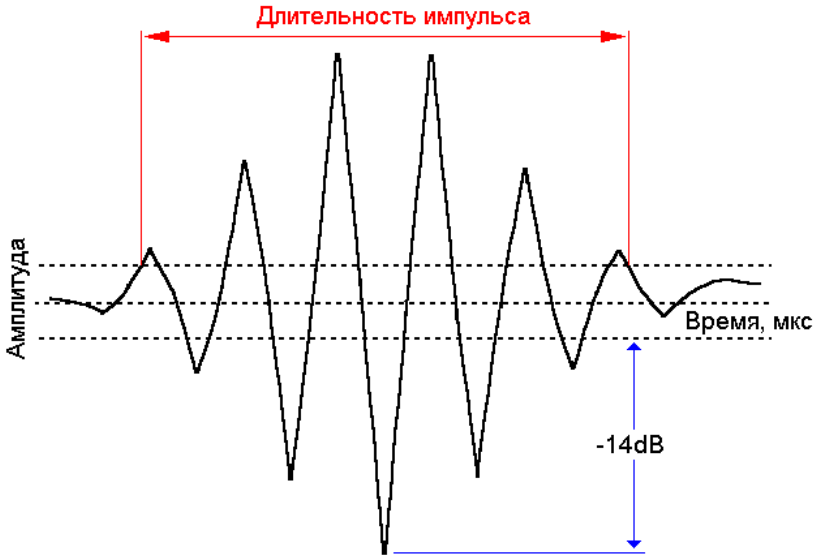


Рис.1

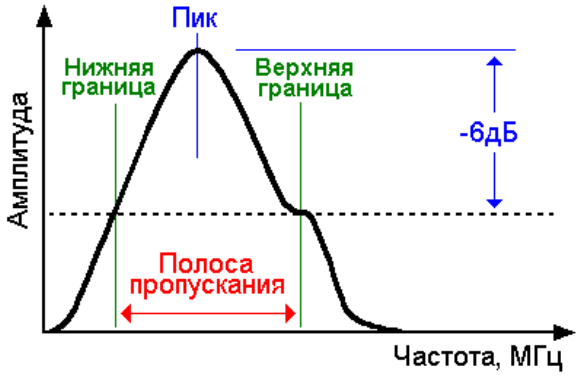


Рис.2

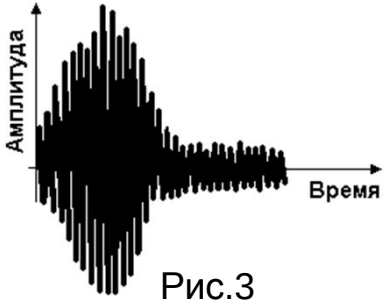
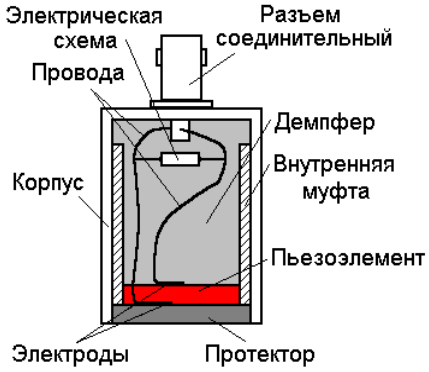


Рис.3

ЧТО ТАКОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) предназначен для генерирования и регистрации высокочастотных ультразвуковых колебаний. Его основными элементами являются: **активный элемент (пьезоэлемент), демпфер и протектор**.



Активный элемент

Активный элемент (пьезоэлемент), изготавливаемый из пьезо- или сегнетоэлектрических материалов, преобразовывает электрическую энергию, подаваемую на него в виде электрического импульса возбуждения от генератора, в энергию ультразвуковых колебаний (**обратный пьезоэффект**). Он также обеспечивает обратное преобразование энергии ультразвуковых колебаний в электрическую (**прямой пьезоэффект**). Для изготовления активных элементов зачастую используются поляризуемые керамические материалы, которые возбуждают волны различного типа (зачастую - продольные).

Демпфер

Демпфер изготавливается из материала с высоким акустическим сопротивлением. Вследствие этого преобразователь имеет высокое внутреннее затухание и основная часть энергии излучается в направлении прозвучивания. За счет этого повышается разрешающая способность при некотором снижении амплитуды выходного сигнала. Если демпфер и активный элемент имеют близкие значения акустических импедансов, в объект контроля будет излучаться только небольшая часть энергии и преобразователь будет иметь низкую разрешающую способность, а амплитуда излучаемого сигнала будет несколько выше.

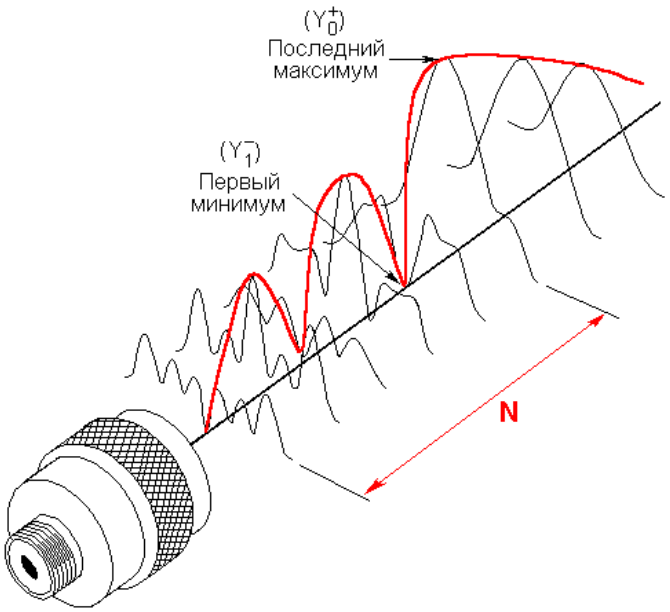
Протектор

Протектор служит для защиты активного элемента от истирания. Для преобразователей контактного типа протектор должен изготавливаться из материала с высокой коррозионной и эрозионной стойкостью.Для иммерсионных, наклонных преобразователей и преобразователей с задержкой протектор дополнительно служит в качестве акустического трансформатора между активным элементом с высоким акустическим импедансом и водой, угловой призмой или линией задержки, имеющими низкий акустическое сопротивление. Это условие выполняется путем обеспечения толщины протектора, равной примерно 1/4 длины волны ультразвука, и соответствующим значением акустического импеданса (активный элемент обычно имеет толщину, равную примерно 1/2 длины волны) . Выбор толщины протектора основывается на идеи конструктивной интерференции, что допускает прохождение волны, генерируемой активным элементом, так, чтобы она была в фазе с волной, переотраженной в протекторе.

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Область излучения акустического преобразователя (акустическое поле) разделяется на две зоны: ближнюю и дальнюю. **Ближняя зона** располагается непосредственно перед преобразователем и в ней амплитуда сигнала изменяется немонотонно. Более 80% энергии находится в пределах цилиндра, ограниченного краями пьезопластины, однако по сечению цилиндра энергия распределена неравномерно. Длина ближней зоны является функцией частоты преобразователя (**f**), диаметра пьезопластины (**D**) и скорости звука (**C**) в исследуемом материале для данного типа волн:

$$N = \frac{D^2 f}{4C}$$



Ближняя зона является физическим фокусом преобразователя. В ней производятся измерения толщины изделий и иногда дефектоскопия.

В таблице приведены значения ближней зоны в стали для стандартных преобразователей.

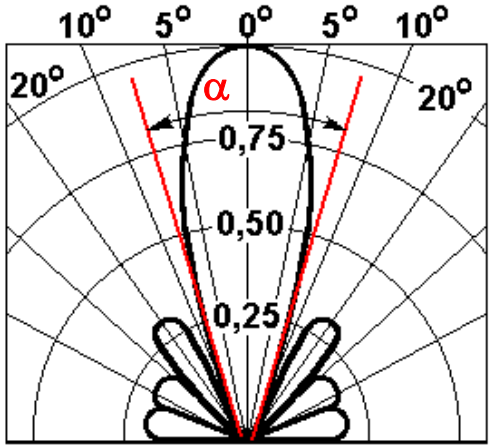
Частота, МГц	Диаметр, мм	Ближняя зона, мм, для волн	
		продольных	поперечных
2,25	18,8 12,5	33,75 14,92	61,36 27,13
5,00	18,8 12,5	75,01 33,16	136,36 60,28
7,50	18,8 12,5	112,51 49,74	204,54 90,42

Дальняя зона - область акустического излучения, в которой акустическое давление постепенно падает до нуля. В дальней зоне снимается диаграмма направленности преобразователя, по которой возможно рассчитать параметры проведения ультразвуковой дефектоскопии, особенно в случае использования наклонных преобразователей.

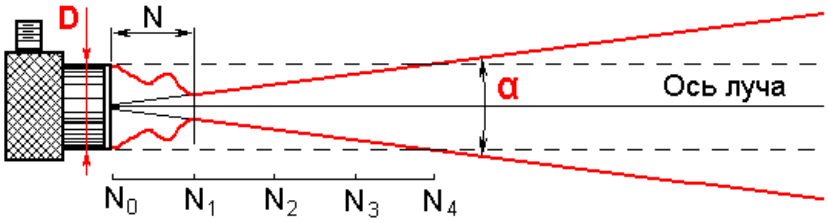
АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

(продолжение)

Акустическое поле преобразователя в общем случае можно представить в виде расходящихся конусом лучей. Амплитуда вдоль оси луча уменьшается. Для луча под некоторым углом к оси амплитуда также уменьшается. Зависимость амплитуды излучения от угла между лучом и осью называется **диаграммой направленности**.



Угол, при котором амплитуда сигнала становится равной нулю, называется **углом раскрытия**. Чем меньше угол раскрытия диаграммы направленности, тем выше **направленность поля** преобразователя. Высокая направленность поля позволяет снизить погрешность измерений, обусловленную геометрическими характеристиками объекта контроля (переотражения от стенок и углов), вызывающими случайные сигналы, сопоставимые с сигналами от дефектов. Ниже показана схема распространения луча для нефокусированного преобразователя, согласно которой угол раскрытия рассчитывается по следующей зависимости (для случая круглой пьезопластины):

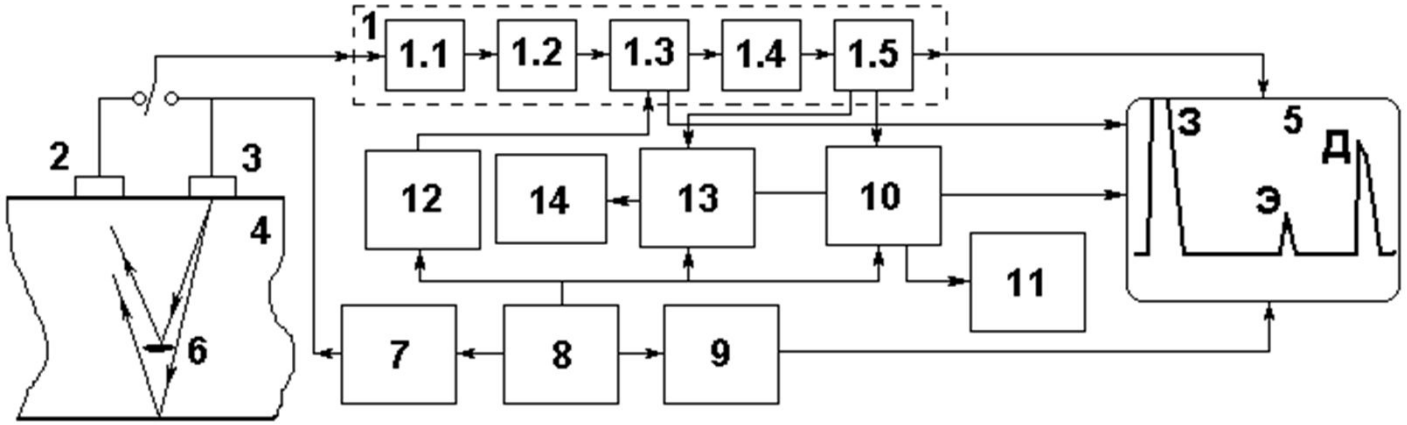


$$\alpha = 2 \times \arcSin\left[\frac{0{,}514 \times C}{f \times D}\right]$$

Здесь: C - скорость звука в материале (для прямого преобразователя - продольных волн, для наклонного - поперечных волн); f - частота; D - диаметр пьезопластины.

Как видно из зависимости, для увеличения направленности излучения следует увеличить частоту и/или размеры пьезопластины. Для наклонного преобразователя направленность поля выше, чем для прямого (скорость поперечных волн меньше, чем продольных).

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА



1 – усилитель [1.1- предусилитель; 1.2 – аттенюатор (калиброванный ослабитель сигнала); 1.3 - усилитель высокой частоты (основной); 1.4 – детектор (выпрямитель сигнала и фильтр высокой частоты); 1.5 – видеоусилитель (усилитель выпрямленного сигнала)

2 – приемник сигнала
3 – излучатель

Совмещенный или раздельно-совмещенный преобразователь

4 – объект контроля
5 – экран дефектоскопа
6 – дефект
7 – генератор электрических импульсов
8 – синхронизатор
9 – генератор развертки
10 – автоматический сигнализатор дефектов (АСД)
11 – внешний световой или звуковой сигнализатор
12 – блок временной регулировки чувствительности
13 – глубиномер
14 – блок цифровой обработки (БЦО)

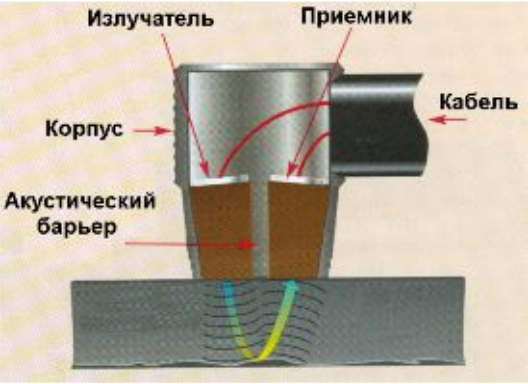
Обозначения на экране:

З – зондирующий импульс; **Э**- эхо-сигнал от дефекта; **Д**-донный сигнал.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

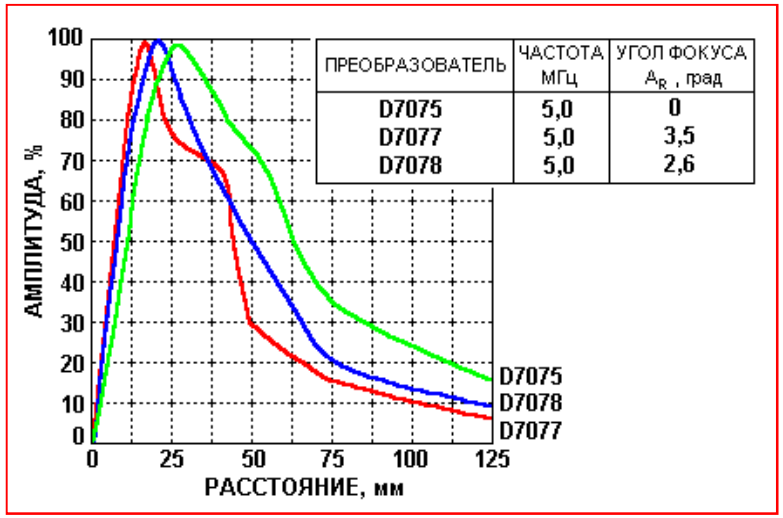
Все пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) можно классифицировать на типы по следующим принципам.

Принцип	По углу ввода	По конструкции	По типу ввода
Тип ПЭП	ПРЯМОЙ НАКЛОННЫЙ	СОВМЕЩЕННЫЙ РАЗДЕЛЬНО-СОВМЕЩЕННЫЙ	КОНТАКТНЫЙ БЕЗКОНТАКТНЫЙ



Раздельно-совмещенные преобразователи

Раздельно-совмещенный преобразователь (РС-преобразователь) состоит из элементов в едином корпусе. Один пьезоэлемент является излучателем ультразвука, другой – приемником. Эти два элемента разделены между собой перегородкой и имеют временную задержку. Для создания сфокусированного ультразвукового луча элементы располагаются под углом друг к другу. Такая конфигурация обеспечивает лучшее разрешение вблизи наружной поверхности, а также дает возможность проведения контроля на поверхностях с высокой шероховатостью и при контроле внутренних поверхностей, подвергнутых воздействию коррозии. Кроме того, наличие пересекающегося луча обеспечивает возникновение псевдо-фокуса, который усиливает чувствительность измерений при наличии отражений на нерегулярных поверхностях, например при наличии сплошной или язвенной коррозии.



ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	ЧАСТОТА МГц	УГОЛ ФОКУСА A_R, град
D7075	5,0	0
D7077	5,0	3,5
D7078	5,0	2,6

Еще одно преимущество РС-преобразователей - наличие четко выраженного пика на кривой "амплитуда - расстояние". Здесь следует учесть, что уменьшение угла псевдо-фокуса (A_R) или увеличение размера пьезоэлемента приведет к увеличению фокусного расстояния и, как следствие, к увеличению глубины надежных измерений.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

(продолжение)

Совмещенные преобразователи

Совмещенный преобразователь (С-преобразователь) имеет один пьезоэлемент, который может в режиме временной задержки работать как излучатель ультразвука, так и приемник. С-преобразователи позволяют проводить контроль продольными, поперечными волнами и их комбинацией. Совмещенный преобразователь поперечных волн (СП-преобразователь) является уникальным, поскольку позволяет вводить в контролируемый объект сдвиговые (поперечные) волны без использования наклонных призм. СП-преобразователи служат не только для проведения контроля, но и в исследованиях, связанных с измерением скорости поперечных волн, определения коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига, изучения структуры зернистых материалов.

Эти механические свойства могут быть вычислены по следующим формулам. Здесь: μ - коэффициент Пуассона; ρ - плотность материала; C_S – скорость поперечных волн; C_L – скорость продольных волн; E – модуль упругости; G - модуль сдвига.

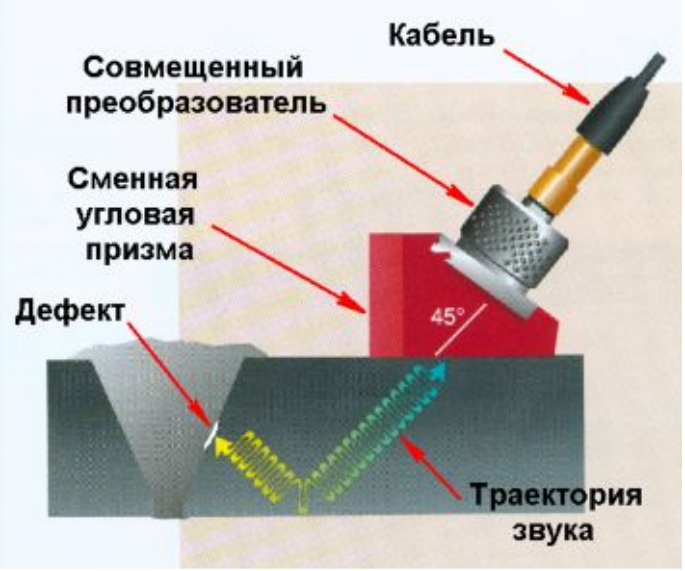
$$\mu = \frac{1-2(C_S/C_L)^2}{2-2(C_S/C_L)^2}$$

$$E = C_L^2 \times \rho \times \frac{(1+\mu)\times(1-2\times\mu)}{(1-\mu)}$$

$$G = C_S^2 \times \rho$$

Наклонные преобразователи

Принцип работы наклонных преобразователей основан на использовании преломления и преобразования продольной волны при ее падении на границу раздела двух сред с различными акустическими свойствами. При этом в исследуемом материале в зависимости от угла ввода акустического луча возникают продольные, поперечные или поверхностные волны.

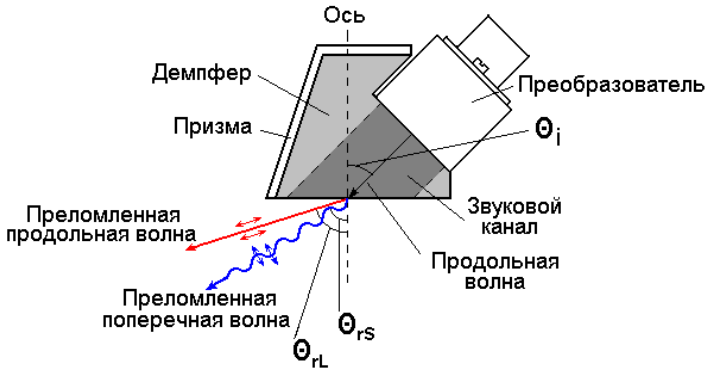


КЛАССИФИКАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

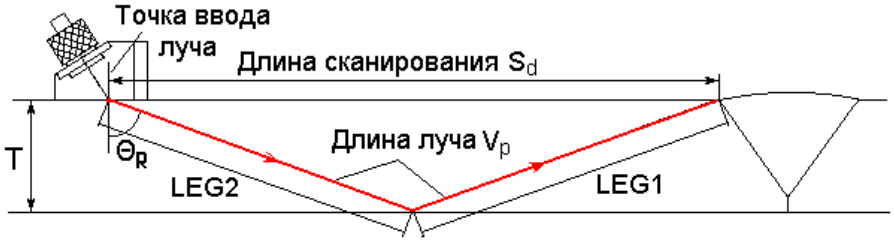
(продолжение)

Наклонные преобразователи

Принцип работы наклонных преобразователей основан на использовании преломления и преобразования продольной волны при ее падении на границу раздела двух сред с различными акустическими свойствами. При этом в исследуемом материале в зависимости от угла ввода акустического луча возникают продольные, поперечные или поверхностные волны.



Наклонные преобразователи используются для поиска и измерения дефектов, ориентированных не параллельно контролируемой поверхности. Большинство методов ультразвукового контроля основано на использовании преломленных поперечных волн. Однако крупнозернистые материалы, такие как чугун и нержавеющие аустенитные стали лучше всего контролировать продольными волнами или использовать специальные наклонные преобразователи.



Θ_R- угол ввода луча
T - толщина детали

Для прямого луча $D = S_p \times \cos\Theta_R$

Для отраженного луча $D = 2T - [S_p \times \cos\Theta_R]$

$S_d = 2T \times \tan\Theta_R$ $\quad LEG = \dfrac{T}{\cos\Theta_R}$

$S_s = S_p \times \sin\Theta_R$ $\quad V_p = \dfrac{2T}{\cos\Theta_R}$

На рисунке справа приведены основные зависимости и схемы контроля при применении наклонных преобразователей. Здесь использована схема контроля однократно отраженным (сверху) и прямым (снизу) лучом.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

(продолжение)

Преобразователи с линией задержки

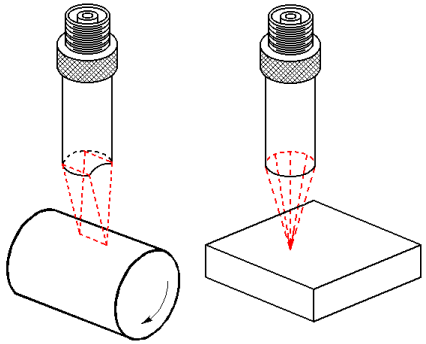
Преобразователи с линией задержки - это соединение простого совмещенного преобразователя с демонтируемой линией задержки. Линия задержки представляет из себя съемный элемент, изготавливаемый из акустически прозрачного материала со скоростью продольных волн в пределах 2600м/с ± 130м/с (например, прочный полиамид).

Основное назначение линии задержки - повышение разрешающей способности вблизи поверхности (за счет минимальной протяженности мертвой зоны). Это достигается тем, что в линии задержки происходит полное гашение вибрации элементов преобразователя еще до момента регистрации отраженного сигнала за счет многочисленных переотражений эхо-сигналов от конца линии задержки. Такими преобразователями можно контролировать тонкие изделия при высокой точности измерений. Другое назначение преобразователей с линией задержки – проведение измерений при высоких температурах объекта контроля (до 480°С), когда требуется предотвратить нагрев пьезопластины для сохранения ее свойств.

Иммерсионные преобразователи

Иммерсионные (бесконтактные) преобразователи (преобразователи погружения) обладают тремя специфически-ми преимуществами по сравнению с контактными преобразователями:

- обеспечение однородности связи между преобразователем и контролируемым изделием снижает изменение чувствительности;
- возможность проведения контроля с высокой скоростью за счет автоматизации процесса;
- повышение разрешающей способности контроля, благодаря фокусировке.



Иммерсионные преобразователи имеют **три типа фокусировки**: нефокусированные (тип "**ПЛОСКОСТЬ**"), цилиндрически фокусированные (тип "**ЛИНИЯ**"), сферически фокусированные (тип "**ПЯТНО**"). Нефокусированные преобразователи используются для контроля "толстых" конструкций. Цилиндрически фокусированные - для контроля труб и круглых деталей. Сферически фокусированные обладают высокой чувствительностью на наличие малых дефектов и применяются для контроля "тонких" деталей.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭХО-МЕТОДА

Основные параметры определяют достоверность контроля. Их нужно выбрать так, чтобы с минимальной ошибкой оценить качество изделия. Различают основные параметры аппаратуры и метода контроля. Первые зависят только от преобразователя и дефектоскопа, вторые – от аппаратуры и контролируемого материала.

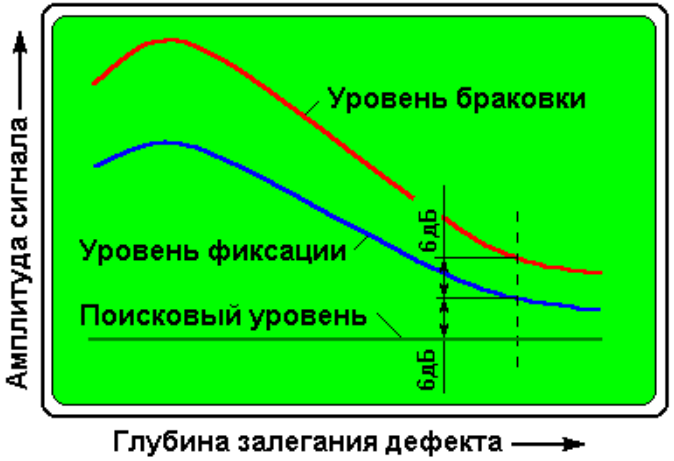
Параметры аппаратуры	Параметры метода
Частота, Мгц	Длина волны, мм
Чувствительность условная, мм или дБ	Чувствительность: - реальная - предельная, мм^2 - уровень фиксации - эквивалентная, мм^2
Размеры преобразователя, мм	Направленность поля преобразователя, град Фронтальная разрешающая способность, мм
Угол призмы, град	Угол ввода, град
Погрешность глубиномера, %	Точность измерения координат дефекта
Длительность: - зондирующего импульса, мкс - помех преобразователя, мкс	Мертвая зона, мм Лучевая разрешающая способность, мм
Параметры сканирования: - шаг, мм - скорость, мм/с	Плотность сканирования (неравномерность чувствительности по поверхности изделия)
Дисперсия опорного сигнала	Стабильность акустического контакта

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

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Предельная чувствительность – площадь минимального диска плоскодонного отражателя, обнаруживаемого дефектоскопом при заданной его настройке в изделии на определенной глубине. **Условная чувствительность** – глубина залегания наиболее удаленного выявляемого отверстия в миллиметрах при заданной настройке дефектоскопа. Обычно в качестве отражателя используют боковые сверления диаметром 2 мм в стандартном образце СО-1. Иногда настройку условной чувствительности проводят по отверстию диаметром 6 мм в образце СО-2 или вогнутую поверхность образца СО-3. В этом случае условная чувствительность – число децибел, показывающее на сколько нужно изменить чувствительность от настройки по СО, чтобы получить заданную предельную чувствительность.

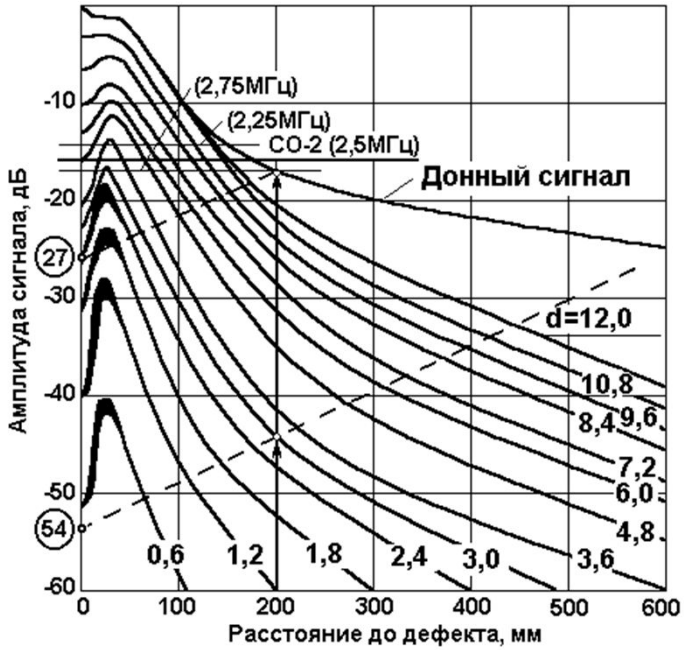
В практике контроля используется понятие **уровня фиксации** (контрольного уровня или уровня оценки).Это предельная чувствительность для всего объема контролируемого изделия. Если сигнал от реального дефекта превосходит уровень фиксации, то такой дефект должен быть зафиксирован и должна быть выполнена оценка его допустимости. Допустимость дефекта определяется на **уровне браковки** – уровне чувствительности для выявления допустимого дефекта, расположенного на заданной глубине. Обычно уровень браковки на 6 дБ ниже уровня фиксации. Для ускорения процесса поиска дефектов используется **поисковый уровень** чувствительности, который обычно на 6 дБ выше уровня фиксации



Способы увеличения чувствительности

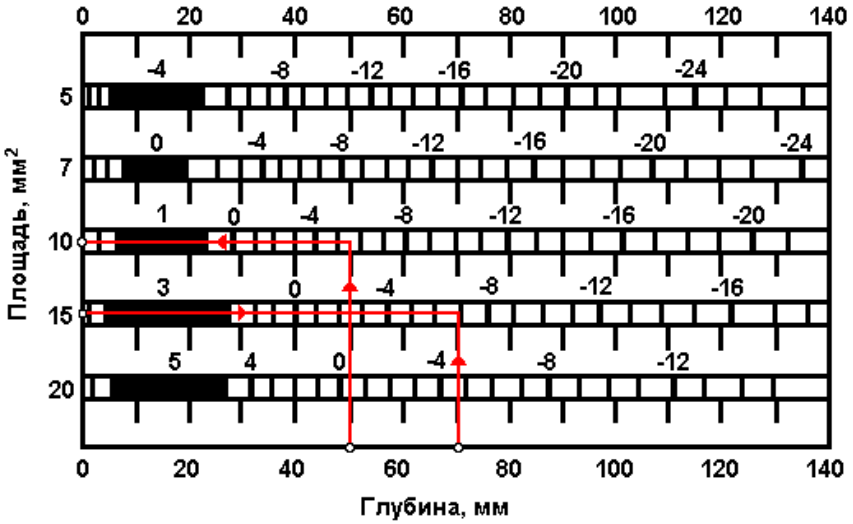
- увеличение амплитуды зондирующего импульса;
- локализация зоны озвучивания за счет уменьшения длительности импульса, уменьшения диаметра (размеров) преобразователя или применение фокусированных преобразователей;
- приеменение РС-преобразователей
- выбор оптимальной частоты с учетом затухания (чем выше акустический импеданс, тем ниже частота).

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ
(продолжение)



Настройку чувствительности можно провести по АРД-диаграмме (Амплитуда-Расстояние-Диаметр). На рисунке показана размерная диаграмма для конкретного преобразователя. Например, нужно обеспечить настройку по величине донного сигнала на уровень фиксации 7 мм^2, что соответствует диаметру плоскодонного отверстия 3 мм, на глубине 200 мм. Для донного сигнала на линии учета затухания (пунктирная линии) находим величину ослабления, равного 27 дБ. Уровню фиксации 7 мм^2 в этом случае соответствует ослабление 54 дБ. Донный сигнал выводится на экране дефектоскопа на уровень 50% шкалы. Для установки уровня фиксации необходимо увеличить усиление на 54-27=27 дБ. Увеличив усиление на 6 дБ, получаем уровень поисковой чувствительности, а снизив на 6 дБ – браковочный уровень.Установленный уровень фиксации соответствует максимальной глубине залегания дефекта. Если не ввести режим ВРЧ (временная регулировка чувствительности), то для меньших толщин уровень фиксации будет несколько завышен, т.е. будут выявляться более мелкие дефекты.

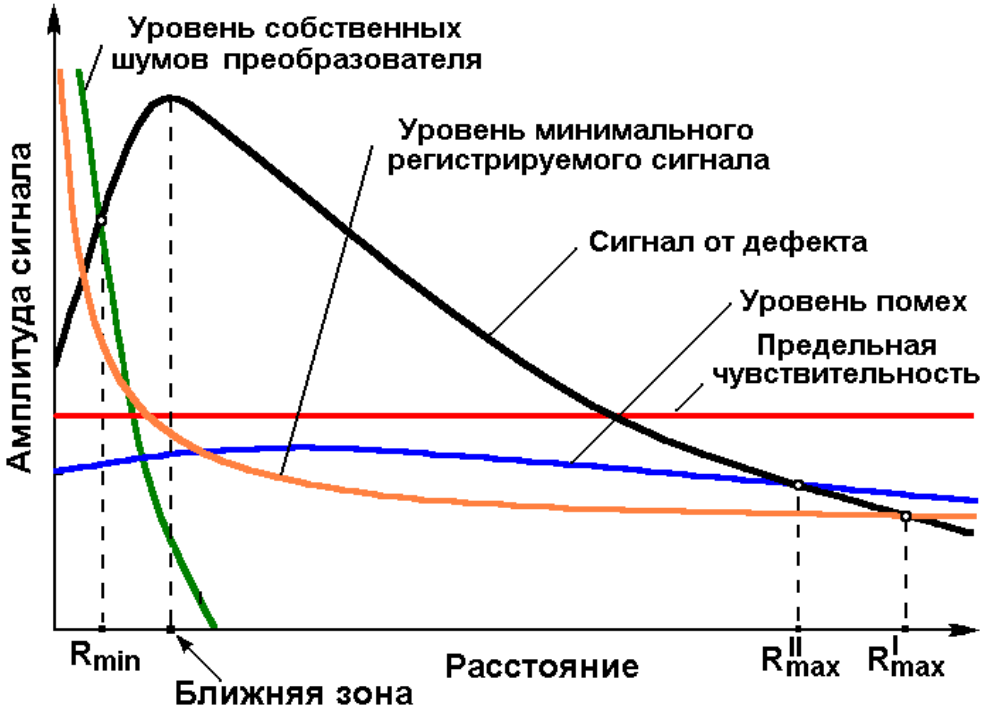
Настройку чувствительности можно провести и по АРД-шкалам, которые также составляются для конкретного преобразователя. В качестве опорного усиления используется эхо-сигнал от отверстия диаметром 6 мм на образце СО-2. Для настройки на конкретные условия контроля на известный уровень фиксации, зная максимально возможную глубину залегания дефекта (равную толщине изделия при контроле прямым лучом и равную двум толщинам при контроле однократно отраженным лучом) находят величину увеличения или снижения опорного усиления (в примере при S=15мм^2 и глубине 70 мм для настройки браковочного уровня увеличивают опорный уровень на 7 дБ). По АРД-шкалам можно также определить фактическую площадь дефекта по величине разности между уровнем фиксации и амплитудой эхо-сигнала.



МАКСИМАЛЬНАЯ И МИНИМАЛЬНАЯ ГЛУБИНА ПРОЗВУЧИВАНИЯ

Максимальная глубина прозвучивания R_{max} – наибольшая глубина, на которой выявляется дефект заданного размера. Она определяется размерами дефекта (уровень сигнала от дефекта), а также уровнем структурных помех (R_{max}^{II}) и возможностями регистрирующей аппаратуры (R_{max}^{I}). Способы увеличения R_{max} аналогичны способам увеличения чувствительности. Для материалов с высоким уровнем структурных помех добиться этого можно за счет применения системы временной регулировки чувствительности (ВРЧ). При отсутствии в дефектоскопе системы ВРЧ для изделий большой толщины проводиться послойный контроль.

Минимальная глубина прозвучивания R_{min} или "мертвая" зона – минимальное расстояние от поверхности изделия до дефекта, надежно выявляемого при контроле.

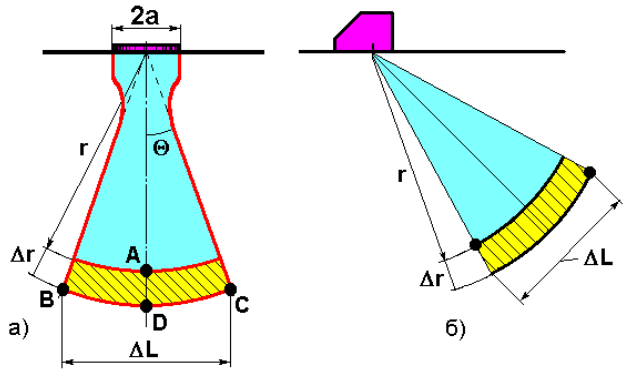


<u>Способы сокращения "мертвой" зоны</u>:

- повышение частоты ультразвука;
- применение преобразователей с минимальным уровнем собственных шумов (РС-преобразователей и широкополосных преобразователей;
- увеличение угла призмы для наклонных преобразователей.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Разрешающая способность – это возможность преобразователя различать два одинаковых дефекта, расположенных в направлении прозвучивания так, что эти дефекты фиксируются, как отдельные. В зависимости от расположения дефектов относительно направления прозвучивания различают разрешающую способность **лучевую** (дефекты расположены по лучу) и **фронтальную** (дефекты расположены перпендикулярно лучу. Лучевая разрешающая способность существует только для эхо-метода, а фронтальная разрешающая способность – для эхо-, теневого и зеркально-теневого методов.



Лучевая **Δr** и фронтальная **ΔL** разрешающие способности могут быть оценены по следующим зависимостям (здесь λ - длина волны; а – радиус или полуширина пьезопластины)):

В дальней зоне

$$\Delta r \geq 3\lambda/2$$

$$\Delta L \geq 3\lambda/a$$

В ближней зоне

$$\Delta L \geq a$$

Способы увеличения лучевой разрешающей способности

• повышение частоты ультразвука (сокращение длительности зондирующего импульса);

• применение преобразователей с минимальным уровнем собственных шумов (РС-преобразователей и широкополосных преобразователей.

Способы увеличения фронтальной разрешающей способности

1. **Дефекты в ближней зоне:**

• применение преобразователей с минимальными размерами;

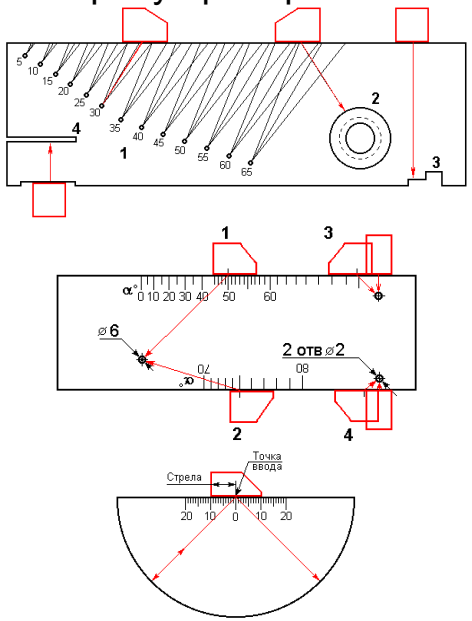
• применение фокусированных преобразователей.

2. **Дефекты в дальней зоне:**

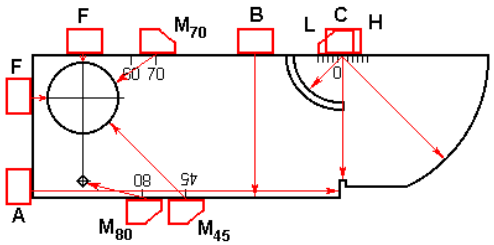
• увеличение направленности излучения (увеличение частоты и/или размеров пьезопластины).

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

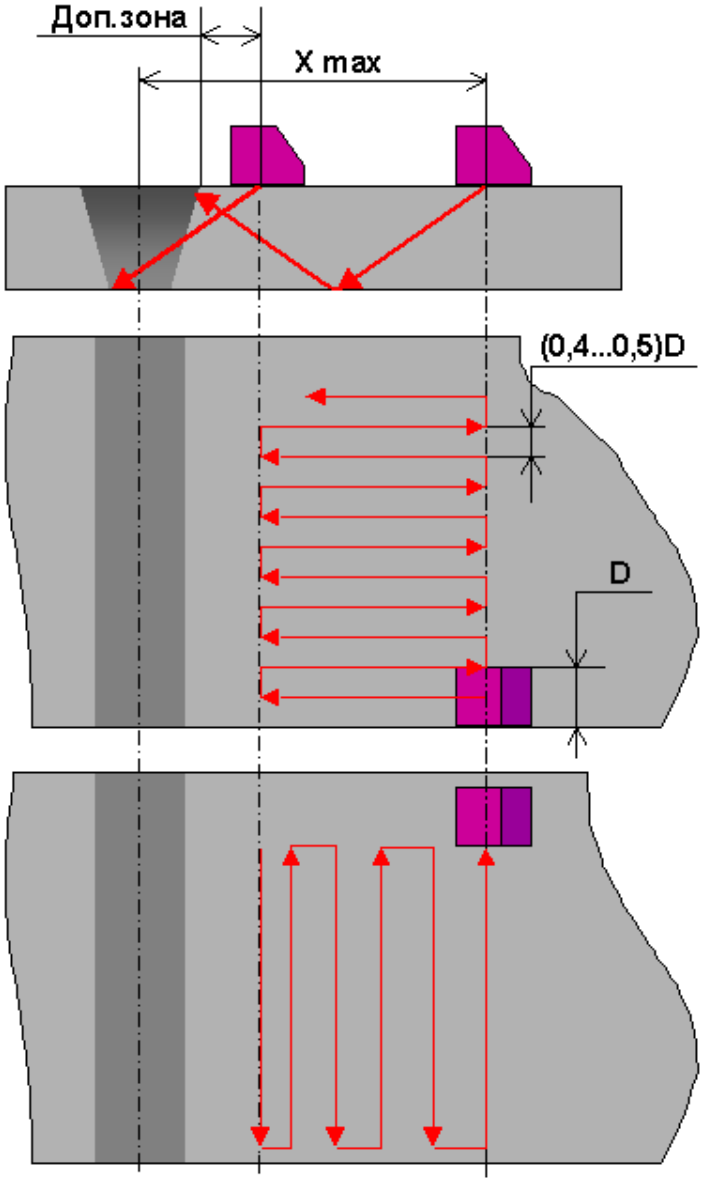
Метрологическое обеспечение аппаратуры подразумевает два класса задач. К первому классу относят необходимость проверки параметров аппаратуры при ее изготовлении, после ремонта и в процессе промежуточных аттестаций (поверок). К задачам второго класса относят повседневную проверку работоспособности аппаратуры и использованием стандартных образцов (СО). Существует два вида СО – государственные (ГСО по ГОСТ 14782) и СО предприятия (СОП). На ГСО проводится проверка основных параметров аппаратуры, а на СОП – настройка аппаратуры для проведения контроля конкретного изделия (настройка чувствительности). Существует три типа ГСО, обозначаемые СО-1, СО-2 и СО-3. Стандартный образец СО-1 изготавливается из органического стекла. На нем определяют условную чувствительность по боковым отверстиям, расположенным на разной глубине (1), лучевую разрешающую способность (по ступенчатому отверстию (2) или ступенчатому пазу (3)), а также настраивают глубиномер по проточке (4). Стандартный образец СО-2 изготавливается из углеродистой стали марок Ст3 или 20. На нем проверяется угол ввода (положения (1) и (2)) и мертвая зона (положение (3) и (4)). На стандартном образце СО-3 проверяют точку ввода, определяют стрелу преобразователя, а также настраивают глубиномер по скорости звука.



Для настройки дефектоскопа или толщиномера также можно использовать образец V-1, рекомендованный Международным институтом сварки (МИС). Положения: A, B, C – настройка глубиномера; L – настройка глубиномера и проверка точки ввода (только для наклонных преобразователей); F и M_{80} – проверка мертвой зоны; H – проверка лучевой разрешающей способности (для прямого преобразователя); M_{45},M_{70}, M_{80} – проверка угла ввода.



СКАНИРОВАНИЕ



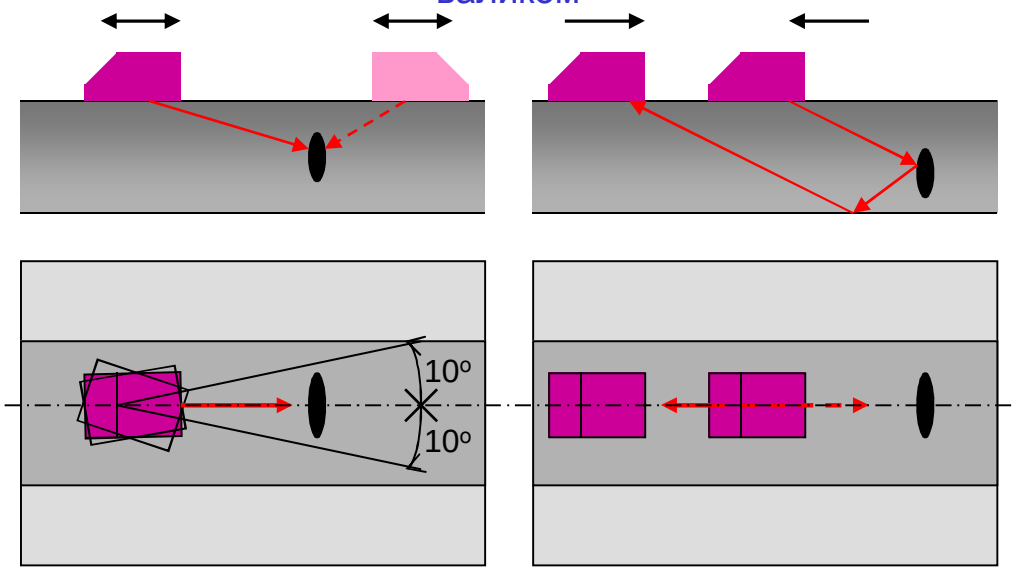
Доп.зона – зона основного металла, оцениваемая, как сварной шов

Сканирование – перемещение преобразователя по поверхности изделия. Преобразователь перемещают с определенной скоростью (**скоростью сканирования**), которая при ручном контроле не должна превышать 150 мм/с. Расстояние между линиями сканирования называется **шагом сканирования**, который не должен быть больше половины диаметра или ширины преобразователя D. При контроле тонких сварных соединений применяется на наличие продольных дефектов поперечно-продольное сканирование, когда преобразователь перемещают перпендикулярно шву. Зона сканирования X_{max} определяется расчетным путем, исходя из геометрических размеров сварного соединения и размеров преобразователя. Каждый контролируемый участок сварного соединения проверяется **трижды**: один раз при положении преобразователя перпендикулярно шву и два раза – с поворотом (покачиванием) вокруг точки ввода влево-вправо на угол 10…15°. При контроле толстых сварных швов применяют продольно-поперечное сканирование, при котором основное направление перемещения преобразователя – вдоль шва. Шаг сканирования в этом случае можно увеличивать по мере удаления от шва, поскольку раскрытие пучка лучей увеличивается по мере увеличения пути ультразвука.

В процессе сканирования необходимо следить за наличием контактной смазки и сохранением акустического контакта за счет постоянного усилия прижатия преобразователя к поверхности изделия.

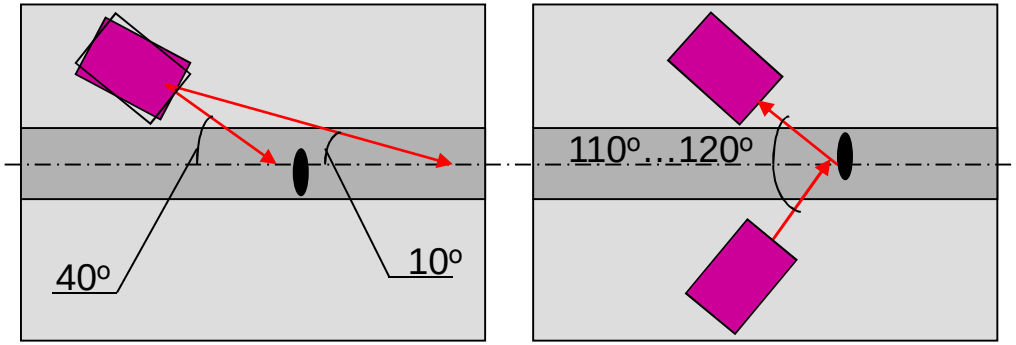
СКАНИРОВАНИЕ
(продолжение)

Сварное соединение с удаленным валиком



В ряде случаев (по требованиям нормативной документации) проводят контроль с целью выявления поперечных трещин. При этом для стыковых соединений с удаленным валиком контроль проводят в двух встречных направлениях совмещенным преобразователем или по схеме "ТАНДЕМ". Совмещенный преобразователь в процессе сканирования поворачивают в секторе от 0 до 10° в обе стороны от оси сварного соединения.

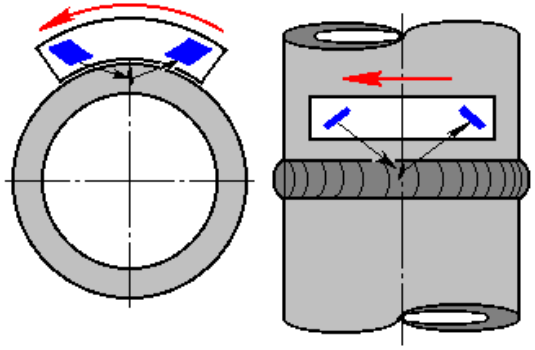
Сварное соединение с неудаленным валиком

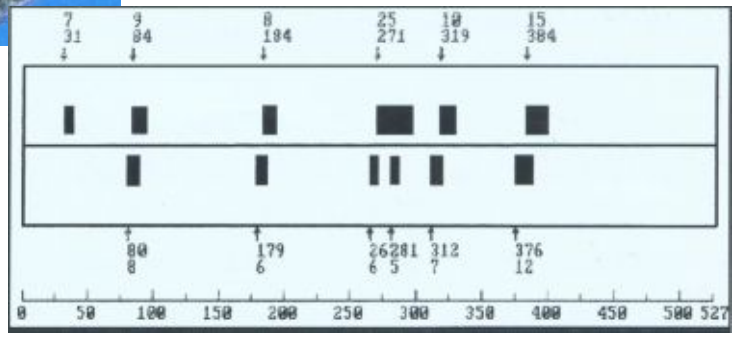


Для стыковых соединений с неудаленным валиком контроль проводят сплошным сканированием наклонным совмещенным преобразователем в двух встречных направлениях в околошовной зоне в секторе от 10 до 40° относительно продольной оси сварного шва или по схеме "СТРЕЛА" (на рисунке справа).

СКАНИРОВАНИЕ
(продолжение)

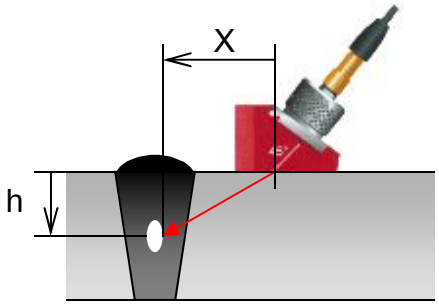
Для контроля сварных соединений трубного проката диаметром от 10 до 529 мм и толщиной стенки до 9 мм целесообразно использовать ультразвуковые хордовые преобразователи раздельно-совмещенного типа. В качестве дефектоскопа в этом случае могут быть применены автоматизированные портативные дефектоскопы серии УД-21, которые обеспечивают индикацию (УД-21И) или регистрацию (УД-21-Р) обнаруженных в процессе контроля дефектов. Регистрация дефектов производится или в виде цифровой индикации амплитуды эхо-сигнала и координат дефекта, или в виде дефектограммы при использовании компьютерной обработки.

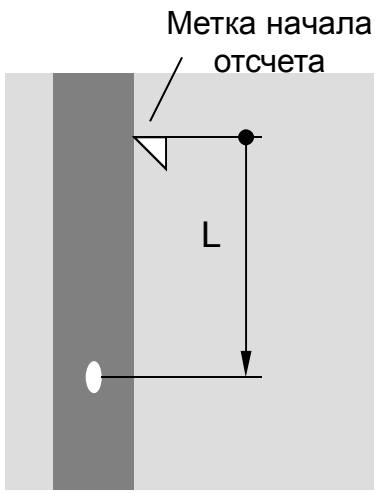




ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ И РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

При обнаружении несплошности с амплитудой эхо-сигнала **равной или большей контрольного уровня** (уровня фиксации) определяются следующие характеристики: координаты несплошности; максимальная амплитуда эхо-сигнала и/или максимальную эквивалентную площадь; условную протяженность вдоль продольной оси шва; количество несплошностей на участке шва длиной 100 мм.





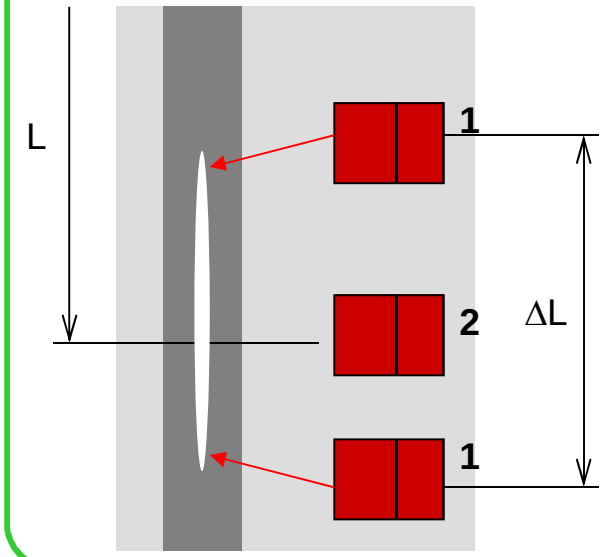
Координаты дефекта:

X – расстояние до дефекта от точки ввода луча;

h – глубина залегания дефекта;

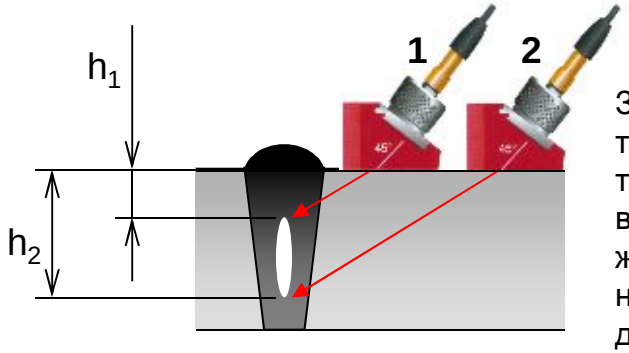
L – расстояние от метки начала отсчета до дефекта.

ИЗМЕРЕНИЕ УСЛОВНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ



За крайние положения преобразователя при определении условной протяженности дефекта принимаются положения, в которых амплитуда эхо-сигнала снижается от максимального значения (положение 2) до уровня фиксации (положения 1). Если несплошности обнаруживают прямым и однажды отраженным лучами, то оценку ΔL производят по результатам контроля прямым лучом. Несплошности в количестве двух и более учитываются раздельно, если эхо-сигналы от них разделяются на линии развертки при уровне фиксации. В противном случае считают, что обнаружена одна несплошность.

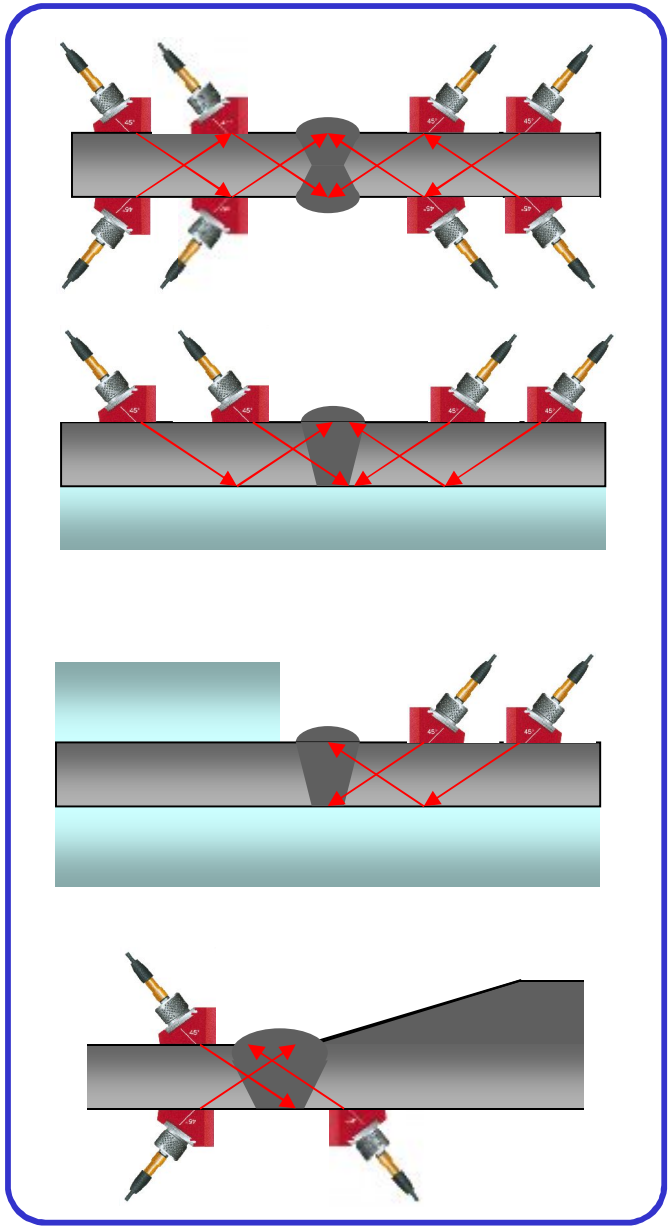
ИЗМЕРЕНИЕ УСЛОВНОЙ ВЫСОТЫ ДЕФЕКТА



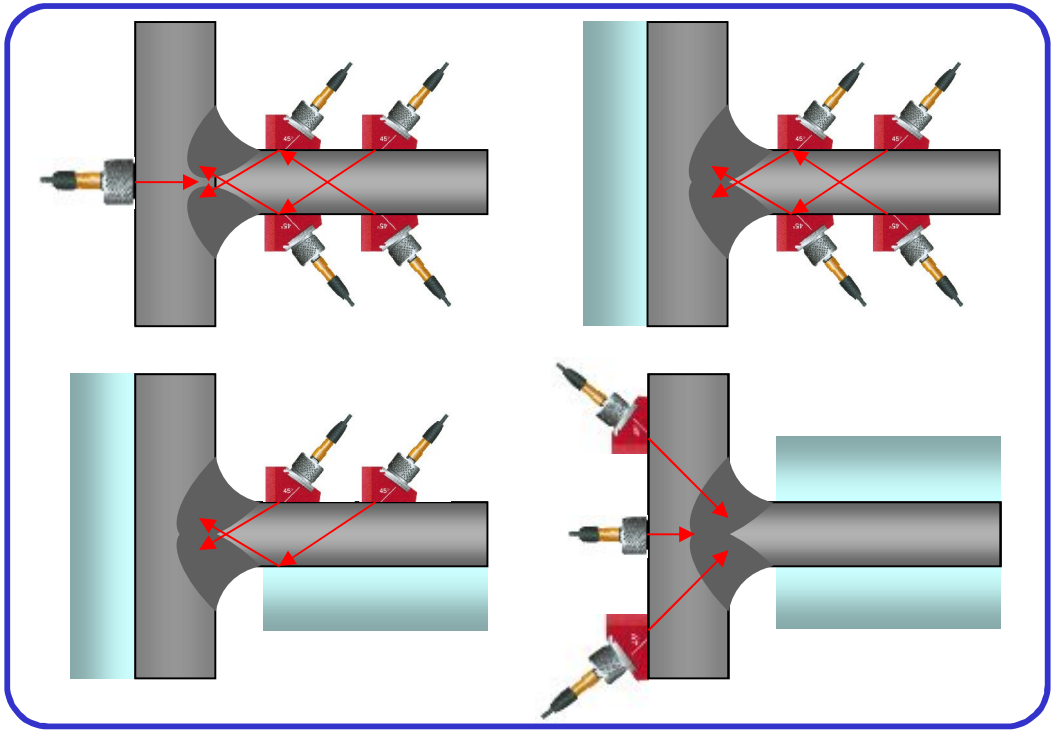
За крайние положения преобразователя при определении условной высоты дефекта принимаются положения, в которых амплитуда эхо-сигнала снижается до уровня фиксации (положения 1 и 2). Тогда условная высота дефекта $\Delta h = h_2 - h_1$.

СХЕМЫ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

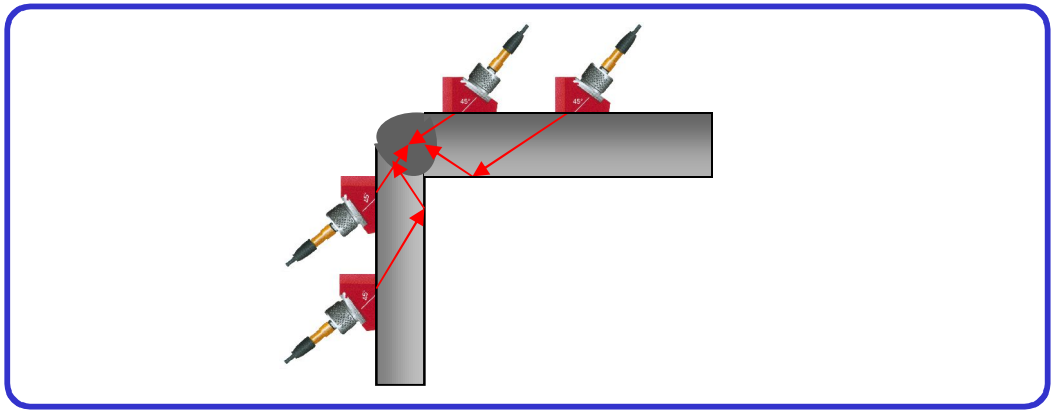
Стаковые соединения



Тавровые соединения

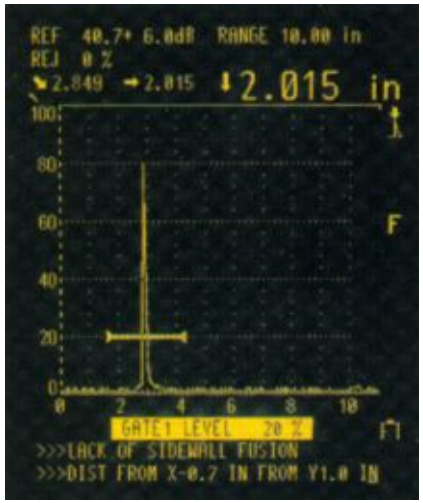


Угловые соединения



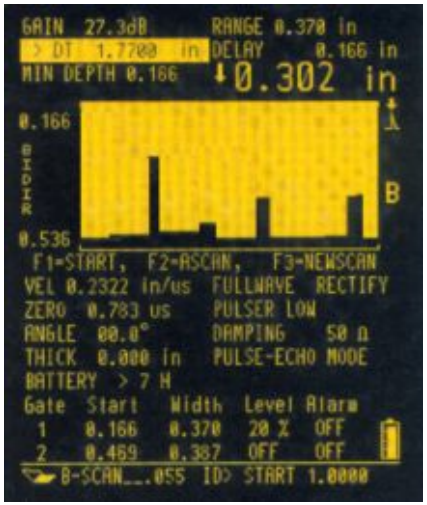
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ (ТИПЫ РАЗВЕРТОК)

А-Развертка



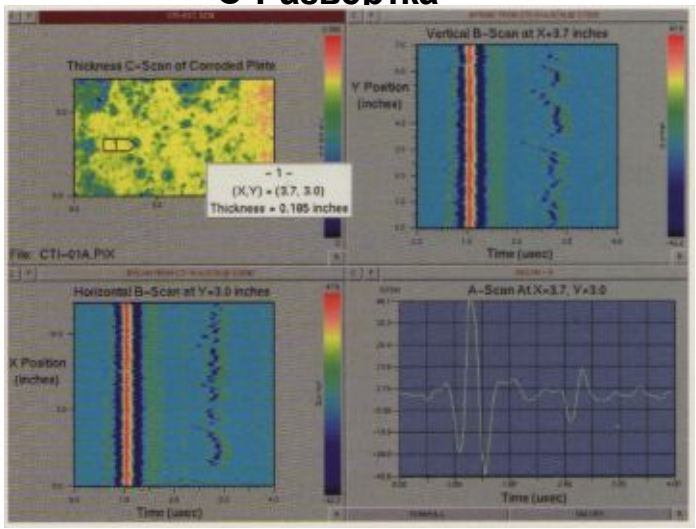
Развертка типа А – это изображение дефектов в направлении распространения ультразвукового луча – одномерное изображение. Здесь по горизонтали – расстояние или время пробега, а по вертикали – амплитуда отраженного сигнала. Высота пиков пропорциональна амплитуде и по ней можно судить о величине обнаруженного дефекта и оценить его допустимость

В-Развертка



Развертка типа В – это двухмерное изображение, подобное секущей плоскости в направлении перемещения преобразователя. Горизонтальная ось – перемещение преобразователя по поверхности объекта контроля. Вертикальная ось пропорциональна глубине (толщине). О наличии и глубине залегания дефектов судят по появлению вертикальных темных полос на развертке. По В-развертке можно судить о состоянии внутренней поверхности объекта.

С-Развертка



Развертка типа С – это трехмерное изображение, получаемое на автоматизированных системах диагностики путем обработки результатов измерения с применением вычислительных комплексов. Развертки такого типа обычно получают при безконтактном (иммерсионном) способе контроля.

ФОРМА ОПИСАНИЯ ОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ

Согласно ГОСТ 14782 "Контроль неразрушающий. Соединения сварные, Методы ультразвуковые" обнаруженные дефекты или группы дефектов описываются в сокращенной форме с использованием приведенных ниже обозначений.

Обозна-чение	Описание дефекта
А	Дефект, эквивалентная площадь (амплитуда эхо-сигнала) и условная протяженность которого не превышает допустимых значений.
Б	Дефект, условная протяженность которого превышает допустимое значение. Цифрами указывается условная протяженность.
Д	Дефект, эквивалентная площадь (амплитуда эхо-сигнала) которого превышает допустимое значение. Цифрами указываются превышение амплитуды сигнала над браковочным уровнем.
Г	Дефект, условная протяженность которого не превышает допустимых значений.
Е	Дефект, условная протяженность которого превышает допустимое значение. Цифрой указывается фактическая условная протяженность.
В	Группа дефектов, отстоящих друг от друга на расстоянии не более допустимой условной протяженности одиночного дефекта.
Т	Дефект, который обнаруживается при расположении преобразователя под углом к оси шва и не обнаруживается при расположении преобразователя перпендикулярно к оси шва – "Поперечная трещина".
О	Дефект с измеренными признаками объемной несплошности.
П	Дефект с измеренными признаками плоскостной несплошности.

Например, обнаружена одиночная несплошность в сварном шве трубопровода, расположенная вдоль шва (продольная) на глубине 12 мм условной протяженностью 40 мм. Амплитуда эхо-сигнала составила 45 дБ при браковочном уровне 37 дБ на глубине 12 мм.

12 - Д(8) - Е(40) - 3.20

Глубина залегания, мм

Дефект типа "Д" (45-37=8 дБ)

Дефект типа "Е" условная протяженность 40 мм

Координата вдоль шва 3 часа 20 минут

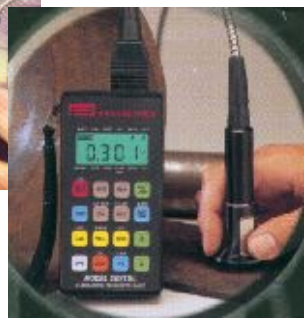
ТОЛЩИНОМЕТРИЯ

Ультразвуковые толщиномеры предназначены для измерения толщины изделий, доступ к которым только с одной стороны. Принципы работы толщиномера и дефектоскопа аналогичны. Отличие лишь в том, что толщиномер должен обеспечить максимально точное измерение времени прихода отраженного (донного) сигнала τ, вычесть из него время пробега импульса в преобразователе, соединительном кабеле и слое контактной жидкости τ_o и вычислить толщину по формуле

$$S = 0.5C(\tau - \tau_0)$$

Как видно из формулы, точность измерения толщины будет определяться точностью установки скорости звука **C** и определения времени пробега τ_o. Отсюда возникает необходимость правильной настройки толщиномера.

Настройку скорости звука проводят на образце известной толщины из того же материала, что и контролируемое изделие при температуре, близкой к температуре изделия. Причем *толщина образца должна быть больше, чем ожидаемая в процессе контроля*. Настройку времени пробега ("нуля преобразователя") проводят *на образце с толщиной меньше, чем ожидаемая*. Следует также помнить, что точность измерения сильно зависит от состояния контактной и донной (отражающей) поверхностей изделия, толщины и вязкости контактной жидкости. Таким образом, другое весьма важное требование при настройке толщиномера – контрольный образец должен иметь ту же шероховатость поверхности, что и изделие, и при контроле должна использоваться та же контактная жидкость. Наличие настройки усилителя в современных толщиномерах позволяет обеспечить надежную регистрацию донного сигнала за счет подавления структурных помех материала контролируемого изделия и собственных шумов преобразователя.



ТОЛЩИНОМЕТРИЯ
(продолжение)

Различают три вида задач при измерении толщины, которым соответствует три группы приборов:

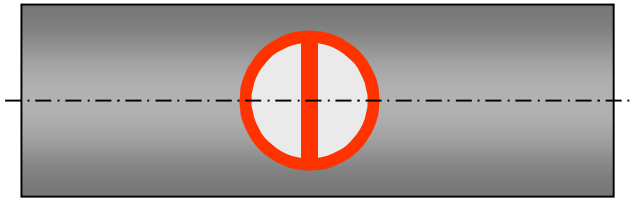
А. Ручной контроль изделий с гладкими параллельными поверхностями

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

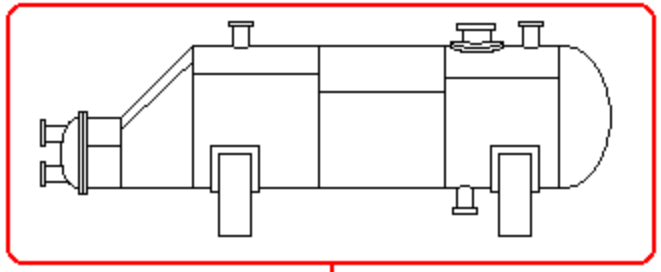
В. Автоматический контроль в потоке (обычно трубного проката).

Для задач А) и В) необходима высокая точность измерения. При решении задачи Б) требования к точности снижены, но нужна высокая чувствительность, чтобы зафиксировать рассеянное отражение от неровной противоположной поверхности. Главная трудность – в снижении минимальной измеряемой толщины, определяемой мертвой зоной. Именно поэтому для толщинометрии применяют РС-преобразователи. Для приборов группы А) и В) минимальная измеряемая толщина составляет 0,1…0,5 мм, а в приборах группы Б) – 0,5…1,0 мм. Здесь следует помнить, что мертвая зона зависит от частоты и размеров преобразователя: *чем выше частота и чем меньше размеры преобразователя, тем меньше мертвая зона*. Максимальная толщина контролируемых изделий физическими причинами не ограничивается, кроме большого затухания ультразвука в некоторых материалах (чугуны, высоколегированные стали, полимеры и др.). Обычно она составляет 200…1000 мм. Ограничивающими факторами также являются большая неровность поверхностей контролируемого изделия, их непараллельность и кривизна поверхности ввода. В некоторых современных толщиномерах для снижения ошибки измерения, обусловленной вышеназванными причинами, имеется возможность переключения частоты измерения. Обычно показания усредняются по 4 измерениям в секунду, но можно провести измерение (особенно в условиях высоких температур) на повышенной частоте (20 измерений в секунду). Важно также обеспечить качественный акустический контакт преобразователя и изделия. Используются специальные контактные жидкости, основное требование к которым – некоррозионность к материалу призмы преобразователя и сохранение требуемой вязкости при изменении температуры изделия.

При измерении толщины на крутоизогнутых поверхностях (например, на трубном прокате) РС-преобразователями его рабочая поверхность должна располагаться так, чтобы акустический барьер был поперек продольной оси трубы.



Измерение толщины стенки при равномерном коррозионно-эрозионном повреждении

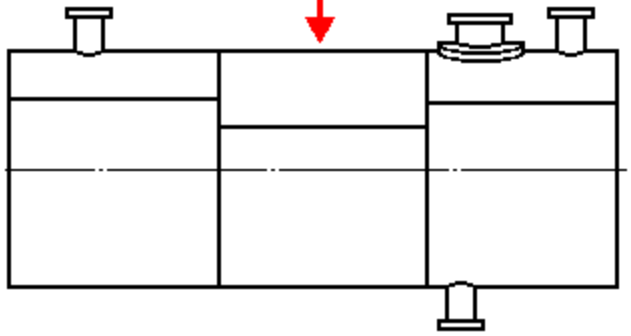


Конструктивные элементы аппарата

Днище камеры

Камера

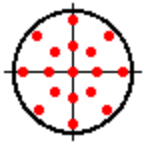
Переход

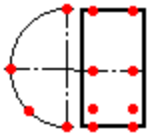


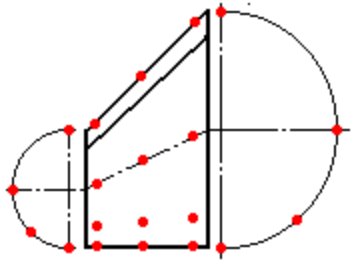
Корпус

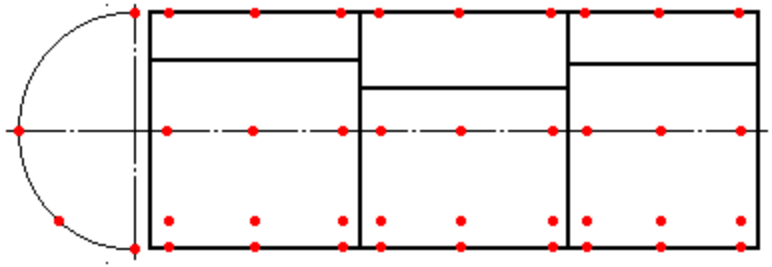
Днище

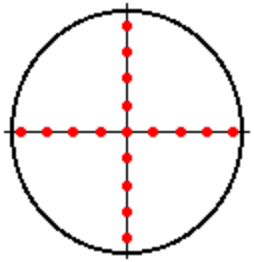
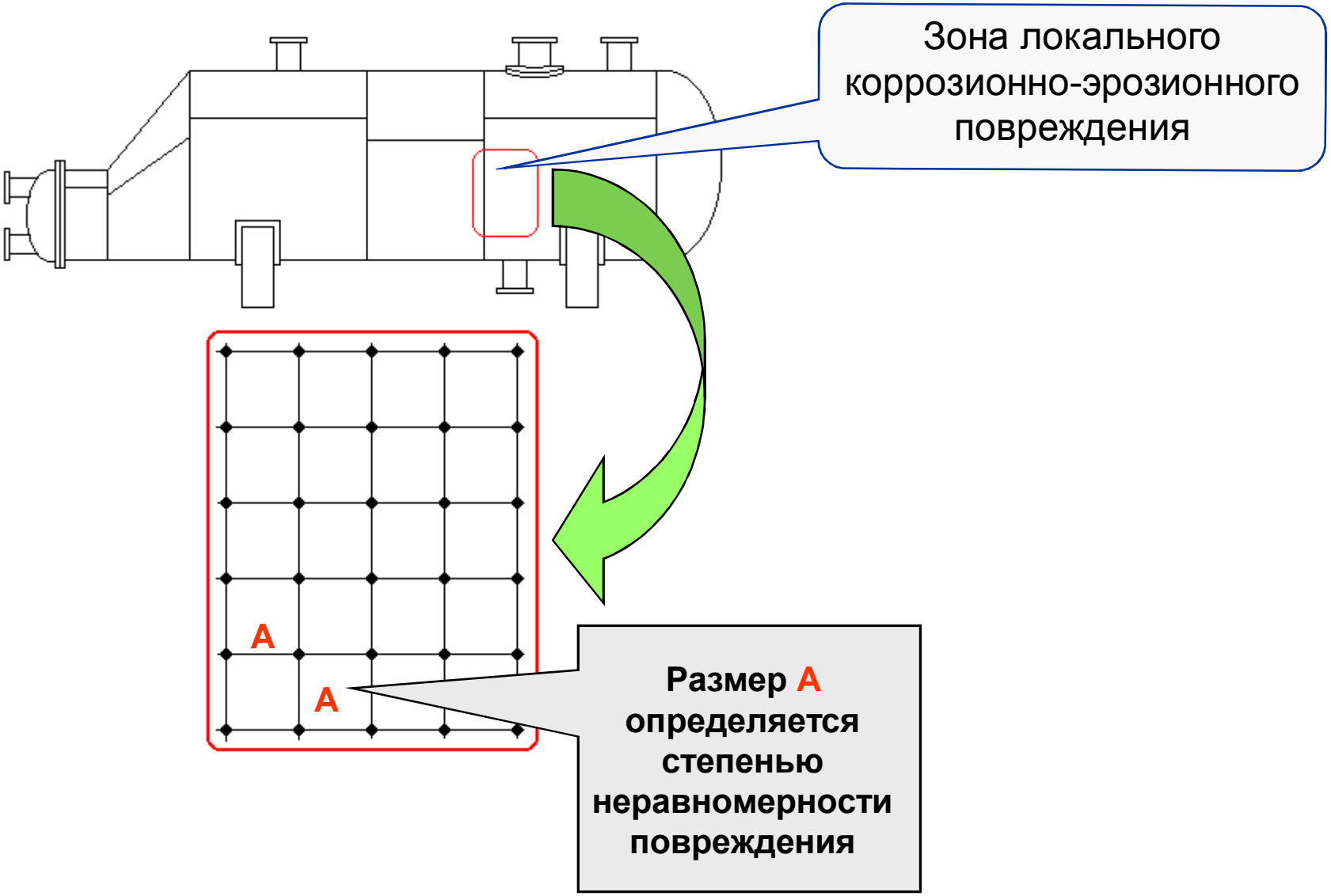
Расположение точек измерения толщины стенки на элементах











Измерение толщины стенки при локальном коррозионно-эрозионном повреждении