

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина»

Д.Ю. Бирюков

**РУКОВОДСТВО К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО  
МЕТОДАМ И СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И  
КОНТРОЛЯ**

Учебно-методическое пособие

Научный редактор – проф. д-р техн. наук В.С. Кортон

Екатеринбург  
2012

УДК 620.179.16

ББК 30.607

Б 64

Авторы-составители: Д.Ю. Бирюков.

Рецензенты: кафедра общей и молекулярной физики УрГУ

(зав. каф. проф. д-р физ.-мат. наук С.Ф. Борисов);

д-р физ.-мат. наук А.Б. Ринкевич (ИФМ УрО РАН).

**Б 64 Руководство к выполнению курсовой работы по методам и средствам измерений, испытаний и контроля / Д.Ю. Бирюков.**  
Екатеринбург: ФГАОУ УрФУ, 2012. 28 с.

ISBN 5-321-00333-5

Учебно-методическое пособие по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» рассчитано на студентов специальности 072000 – Стандартизация и сертификация.

В настоящем пособии приводятся основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также описание методов измерений и контроля изделий и материалов. В конце пособия приведен пример расчетов для курсовой работы.

Библиогр.: 4 назв. Табл. 2. Рис. 17.

УДК 620.179.16

ББК 30.607

*Подготовлено кафедрой "Физические методы и приборы контроля качества"..*

ISBN 5-321-00333-5

© ФГАОУ "Уральский федеральный университет – УПИ", 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
1 Основные параметры пьезопреобразователей (ПЭП).....	5
1.1 Частота излучения.....	5
1.2 Коэффициент двойного преобразования.....	5
1.3 Мертвая зона.....	6
2 Типы и поляризация упругих волн.....	7
3 Причины ослабления звуковых волн в среде.....	11
3.1 Причины затухания.....	12
3.2 Способы измерения скорости и коэффициенты затухания.....	14
4 Методы акустического контроля и толщинометрия.....	17
4.1 Ультразвуковая толщинометрия.....	17
4.2 Акустический тракт.....	18
4.3 Определение коэффициента двойного преобразования.....	21
4.4 Определение параметров дефектов.....	21
5 Примеры расчетов в курсовой работе.....	23
Заключение.....	27
Список литературы .....	27

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие содержит основные сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений, а также описание методов измерений и контроля изделий и материалов.

Учебно-методическое пособие рассчитано на студентов специальности 072000 – Стандартизация и сертификация, слушающих курс «Методы и средства измерений, испытаний и контроля».

В конце пособия приведен пример типовой курсовой работы.

Цель выполнения курсовых работ – закрепить и расширить теоретические сведения по физическим принципам и явлениям, положенным в основу различных методов измерений.

Для выполнения своего варианта курсовой работы студент должен знать принцип действия, структуру и особенности приборов контроля; четко представлять физику процессов, происходящих в преобразователях физических величин.

# 1 Основные параметры пьезопреобразователей (ПЭП)

Технические параметры преобразователей регламентируются ГОСТ 14782-86 "Соединения сварные. Методы ультразвуковые" и ГОСТ 26266-90 "Преобразователи ультразвуковые. Общие технические требования". К основным параметрам относят следующие:

## 1.1 Частота излучения

Частота излучения  $f$  зависит от частоты электрических колебаний, которые подаются на ПЭП и от толщины пьезоэлектрической пластины.

$$h = \frac{\lambda n}{2} \quad (1.1)$$

Формула (1) для вычисления толщины пьезопластины.

$$\lambda = c / f \quad (1.2)$$

Формула (2) для вычисления длины волны.

## 1.2 Коэффициент двойного преобразования

а) коэффициент излучения характеризует коэффициент полезного действия обратного пьезоэффекта.

$$K_u = \frac{P_{ак}}{U_{г}} \quad (1.3)$$

где  $P_{ак}$  - давление акустических волн, излученная акустическая мощность

$U_{г}$  – напряжение генератора

б) коэффициент приема характеризует КПД прямого пьезоэффекта.

$$K_n = \frac{U_n}{P_{ак}} \quad (1.4)$$

где  $U_n$  - напряжение принятого сигнала.

в) коэффициент двойного преобразования характеризует работу преобразователя в совмещенном режиме.

$$K_{ии} = K_u K_n = \frac{U_n}{U_{г}} \quad (1.5)$$

Параметр  $U_{г}$  определяется без акустической нагрузки.

### 1.3 Мертвая зона

Мертвая зона – участки вблизи поверхности ввода и донной поверхности, дефекты в которых не могут быть выявлены эхо-импульсным методом при данных параметрах контроля.

Эхо-импульс от отражателя, расположенного в мертвой зоне вблизи поверхности ввода, попадает в область зондирующего сигнала и последующих шумовых и реверберационных сигналов. Размер мертвой зоны зависит от длительности зондирующего импульса  $\tau_u$  и длительности переходных процессов  $\tau_c$ , происходящих из-за недостаточного демпфирования и отражений в призме.

Время прохождения волны до дефекта и обратно вычисляется по формуле:

$$t_g = \frac{2h_g}{C} \quad (1.6)$$

$h_g$  – глубина залегания дефекта.

Дефект не регистрируется, если  $\tau_u + \tau_b \geq t_b$ ,  $\tau_u$  – время импульса,  $\tau_b$  – время восстановления.

Если  $\tau_u + \tau_b = t_b$ , то  $h_b = H_m$  – размер мертвой зоны.

$$H_m = \frac{(\tau_u + \tau_b)C}{2} \quad (1.7)$$

Часть мертвой зоны наклонного ПЭП приходится на призму. С увеличением угла призмы наклонного ПЭП мертвая зона уменьшается. Для уменьшения мертвой зоны нужно повышать частоту УЗВ, что дает возможность сократить длительность зондирующего импульса при том же числе периодов колебаний в импульсе.

Мертвая зона вблизи донной поверхности образуется ввиду того, что сильный донный сигнал мешает выявлению относительно слабого отражения от дефекта. Для наклонного преобразователя мертвая зона вблизи донной поверхности, как правило, не возникает.

## 2 Типы и поляризация упругих волн

Все упругие волны различаются по типу на *объемные*, то есть распространяющиеся в объеме тела, *поверхностные*, бегущие вдоль поверхности раздела двух сред, и *водны в ограниченных телах*. Поляризацией волны называется *траектория и направление движения частиц упругой среды по отношению к направлению распространения*. В общем случае монохроматическая волна имеет эллиптическую поляризацию. Это означает, что частицы совершают движение по эллипсу. В частном случае эллипс вырождается в линию, см. рисунок 2.1.

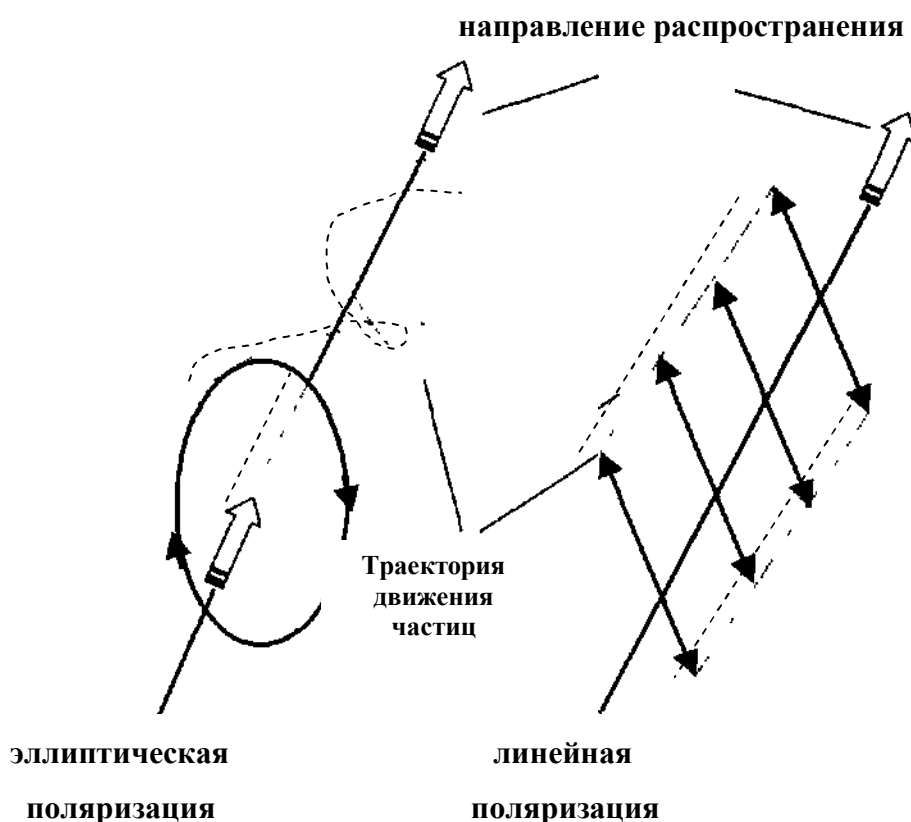


Рисунок 2.1- Эллиптическая и линейная поляризация

Говорят, что такие волны имеют линейную поляризацию, они относятся к объемным волнам. Среди объемных различают продольные и поперечные волны.

*Продольной* называется такая волна, у которой *направление движения частиц происходит в том же направлении, в котором распространяется волна*. При распространении продольной волны в среде образуются области растяжения и сжатия. Продольные волны могут распространяться как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Значения скоростей продольных волн приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Скорости продольных и поперечных волн

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорости упругих волн, м/с		Характеристический импеданс, 10 <sup>6</sup> г/см-с		Длина волны при f=2,5 МГц, мм	
	$\rho$	$C_l$	$C_t$	$Z_1$	$Z_2$	прод.	попер.
Дюралюминий	2,7	6260	3100	1,69	0,84	2,5	1,24
Вода	1,0	1490	-	0,15	-	0,6	-
Воздух	0,0013	330	-	4-10 <sup>-1</sup>	-	0,13	-
Масло	0,90	1380	-	0,90	-	0,55	-
Медь	8,9	4660	2260	4,15	2,01	1,9	0,9
Оргстекло	1,18	2670	1121	0,32	0,13	1,1	0,45
Сталь углеродистая	7,8	5900	3260	4,6	2,54	2,4	1,3
Сталь коррозион- нотстойкая	8,0	5660	3120	4,54	2,51	2,3	1,25



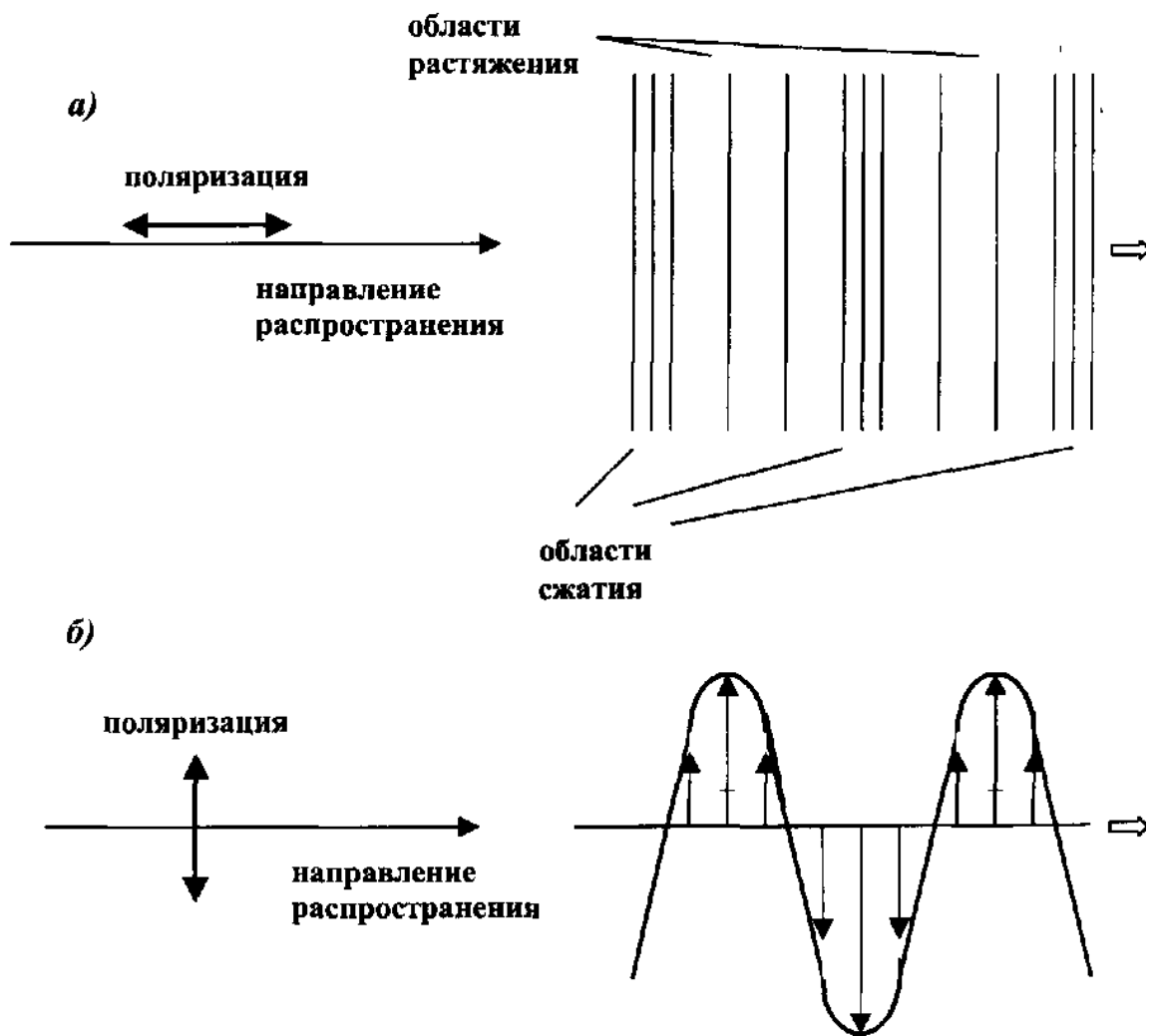


Рисунок 2.2- Продольные (а) и поперечные (б) волны

Скорость продольной волны в изотропной среде можно рассчитать, если известны плотность материала  $\rho$ , модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ . *Модуль Юнга* - это отношение плотности силы к вызываемой этой силой деформации. *Коэффициент Пуассона*  $\nu$  - это отношение изменения ширины стержня к изменению его длины, если растяжение производится по длине, см. рисунок 2.2 а.

$$\nu = \Delta y / \Delta x.$$

Для металлов  $\nu \approx 0,3$ . Скорость распространения продольной волны  $C_l$  определяется выражением

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

в металлах  $C_l \approx 1.16\sqrt{E/\rho}$ .

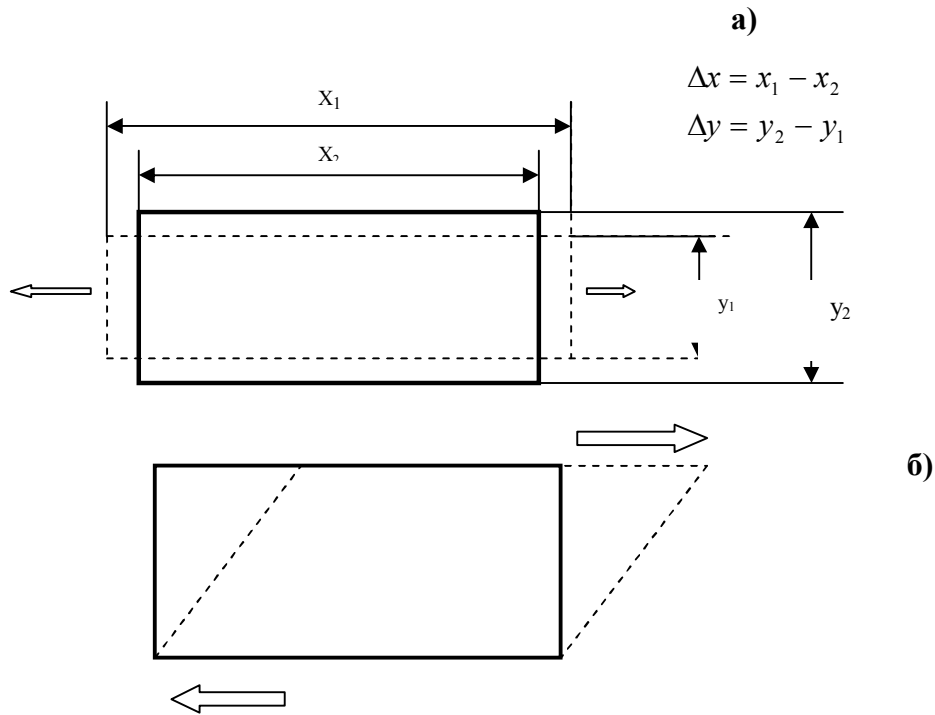


Рисунок 2.3- Деформации растяжения (а) и сдвига (б)

*Поперечной* называют такую волну, *направление колебания частиц в которой перпендикулярно направлению распространения* (рисунок 2.2 б). Поперечную волну также называют *сдвиговой*, поскольку в ней осуществляются деформации сдвига, см. рисунок 2.2б. Поперечные волны могут распространяться в твердых телах, а в жидкостях и газах они очень быстро затухают. Скорость поперечной волны  $C_t$ , определяется модулем сдвига  $G$  и плотностью  $\rho$  :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.2)$$

Для металлов коэффициент Пуассона  $\nu \approx 0,3$ , поэтому

$$C_t \approx 0.55C_l \quad (2.3)$$

Значения скоростей поперечных волн приведены в Таблице 2.1.

Пусть поперечная волна распространяется под некоторым углом к поверхности тела. Если направление колебаний (поляризация волны) параллельно этой поверхности, то волну называют горизонтально поляризованной или SH-волной. Если волна поляризована в плоскости, перпендикулярной поверхности, то волну называют вертикально поляризованной или SV-волной. При возбуждении наклонным пьезоэлектрическим преобразователем в объекте контроля возникает SV - волна. SH -волны возбуждают электромагнитно-акустическим преобразователем или кварцевыми пьезопластинами.

### 3 Причины ослабления звуковых волн в среде

Амплитуда и интенсивность упругих волн уменьшается по мере их распространения. Существуют следующие основные причины ослабления волн: расхождение лучей и затухание. Ослабление из-за *расхождения лучей* происходит потому, что часть лучей пучка не достигает приемника. Ослабление из-за расхождения лучей увеличивается с пройденным волной расстоянием. Уменьшение амплитуды сферических волн пропорционально  $\frac{1}{Z}$ , где  $Z$  - пройденное расстояние, цилиндрических - пропорционально  $\frac{1}{\sqrt{Z}}$ . В плоских волнах расхождения лучей нет.

Ослабление амплитуды волн из-за затухания пропорционально  $e^{-\alpha z}$ , где число  $e \approx 2,73$ ,  $\alpha$  - коэффициент затухания. *Коэффициент затухания* складывается из коэффициента поглощения  $\alpha_n$  и коэффициента рассеяния  $\alpha_p$ :  $\alpha = \alpha_n + \alpha_p$ .

*Поглощение* - это преобразование энергии упругих волн в другие виды энергии, в первую очередь в тепло. *Рассеяние* связано процессами преломления, отражения волн на границах кристаллов, зерен или включений в неоднородных материалов, а также огибанием волнами этих внутренних неоднородностей. Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  измеряются в [ Нп/м и Нп/см ]. В технике часто используют единицы [дБ/м и дБ/см]:

$$\alpha [\text{дБ/см}] = 8,69 \alpha [\text{Нп/см}].$$

В таблице 3.1 сведены формулы для расчета амплитуды  $A(z)$  и мощности  $P(z)$  волны, прошедшей расстояние  $z$ .  $A_0$  и  $P_0$  - начальные амплитуда и мощность.

Таблица 3.1 – Формулы для расчета амплитуды и мощности волны

Тип волны	Плоская	Цилиндрическая	Сферическая
Амплитуда	$A(z) = A_0 e^{-\alpha z}$	$A(z) = \frac{A_0}{\sqrt{z}} e^{-\alpha z}$	$A(z) = \frac{A_0}{z} e^{-\alpha z}$
Мощность	$P(z) = P_0 e^{-2\alpha z}$	$P(z) = \frac{P_0}{z} e^{-2\alpha z}$	$P(z) = \frac{P_0}{z^2} e^{-2\alpha z}$

### 3.1 Причины затухания

Затухание ультразвука – это уменьшение амплитуды и, следовательно, интенсивности звуковой волны по мере её распространения в среде. Основными причинами затухания являются:

- убывание амплитуды волны с удалением от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника (расхождение волны);
- рассеяние звука на неоднородностях среды, которое приводит к уменьшению потока звуковой волны в первоначальном направлении;
- необратимый переход энергии звуковой волны в другие формы, в частности в тепло, т.е. поглощение звука.

*Первая из этих причин* связана с тем, что звуковая энергия точечного источника (или любого источника конечных размеров) распределяется при расхождении волны на все увеличивающуюся поверхность волнового фронта, что приводит к уменьшению интенсивности звука.

Волновой фронт – граничная область между средой пространства, вовлеченной в звуковые колебания и средой пространства, находящейся в состоянии покоя.

В области волнового фронта частицы среды колеблются в одинаковой фазе.

Расхождение зависит от формы волнового фронта.

Для сферической волны расхождение происходит в трех измерениях, что обуславливает максимальное ослабление волны.

$A_0 \sim 1/x$ , где  $x$  – расстояние от волнового фронта до источника звуковых волн.

В случае цилиндрической волны расхождение происходит в двух измерениях, что обуславливает меньшее ослабление волны, чем в случае сферической волны.

$$A_0 = 1/\sqrt{x}$$

Плоский волновой фронт – расхождение не происходит, ослабление за счет расхождением отсутствует.

*Рассеяние звука* происходит на границах неоднородностей среды (например, микровключения, кристаллиты в поликристалле), что особенно заметно в случае неоднородностей, размеры которых сравнимы с длиной волны (область Релеевского рассеяния). Здесь затухание ультразвука при неизменной частоте оказывается

пропорционально четвертой степени  $d_{cp}$  (статистический размер зерна). Эта закономерность положена в основу определения структуры поликристаллических металлов и изделий из них. Кроме того, чем больше упругая анизотропия вещества (упругая анизотропия – это различие в скоростях распространения звука в кристалле вдоль различных кристаллографических направлений), тем больше частичное отражение, преломление, трансформация типов волн на границах кристаллит-кристаллит и, следовательно, больше рассеяние.

Так ультразвук сильно затухает в меди, аустенитной коррозионно-стойкой стали. Малой упругой анизотропией характеризуются вольфрам и алюминий. Альфа-железо и углеродистая сталь относятся к промежуточным материалам в отношении величины упругой анизотропии и рассеяния. Материалы, состоящие из разнородных частиц (бетон, гранит, чугун), характеризуются большим рассеянием.

В однородных жидкостях и газах рассеяние отсутствует, а коэффициент поглощения пропорционален квадрату частоты. В аморфных твердых телах (например, стекле) и монокристаллах рассеяние тоже отсутствует. В поликристаллических телах присутствует как поглощение, так и рассеяние.

В большинстве поликристаллических твердых тел основную роль в затухании играет *рассеяние*. Среда содержит зерна или включения, плотность и акустический импеданс которых отличается от окружения. Так, в чугунах содержатся включения графита. В стали зерна сохраняют кристаллическое строение. Скорость УЗВ зависит от направления падающей волны по отношению к осям кристалла. Чем сильнее эта зависимость, то есть упругая анизотропия, тем сильнее влияние рассеяния. Так анизотропия (и рассеяние) велики в медных сплавах (латуни), но значительно меньше в алюминиевых. В сталях рассеяние сильно сказывается на распространении волн в нержавеющей аустенитной стали, в аустенитных сварных швах.

$\lambda \gg d$  – рассеяние отсутствует.

$\lambda \sim d$  – происходит рассеяние.

$\lambda \ll d$  – коэффициент рассеяния максимальный и не изменяется.

*Поглощение звука* – преобразование энергии звуковой волны в другие виды энергии. На пример: в тепло. Может быть обусловлено различными механизмами.

Большую роль играет теплопроводность среды, взаимодействие волны с тепловыми колебаниями решетки и др.

Поглощение появляется тогда, когда среда недостаточно упругая. Оно отсутствовал бы в абсолютно упругой среде.

Абсолютно упругая среда – среда, колеблющаяся без потерь энергии. На самом деле таких сред не существует, поэтому поглощение наблюдается и в этой среде.

Причины потерь энергии – явление трения, пластичной деформации, также сил электромагнитного взаимодействия.

### **3.2 Способы измерения скорости и коэффициента затухания волны**

Измерение скорости и коэффициента затухания упругих волн состоит в измерении времени задержки и амплитуды импульсов, прошедших разное расстояние в объекте контроля. Методики обработки результатов измерения различны, в зависимости от того, какие волны используются, продольные или поперечные и в зависимости от типа волнового фронта.

Рассмотрим сначала методику определения параметров плоских продольных волн. В этом случае используется прямой преобразователь, схема измерения и изображение на экране дефектоскопа показаны на рисунке 3.1.

Скорость звука – расстояние, пройденное волной за единицу времени.

$$C = x/t \quad (3.1)$$

Рассмотрим явление ослабления волны на примере дискообразного излучателя.

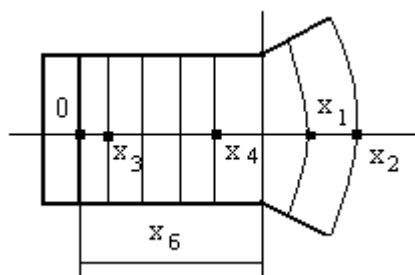


Рисунок 3.2 - Дискообразный излучатель

Плоский фронт – фронт Френеля.

Начиная с некоторого расстояния, волна стремится принять сферическую форму, так как при таком распределении будет минимум потерь энергии в целом.

Сферический фронт – фронт Фраунгофера.

Область, в которой волна имеет сферический волновой фронт – область Фраунгофера или дальняя зона.

Область, в которой волна имеет плоский волновой фронт – область Френеля или ближняя зона.

Размер ближней зоны зависит от диаметра излучателя и его формы.

$$x_0 = \frac{S}{\lambda\pi}$$
$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda}$$

так как для диска  $S = \frac{\pi D^2}{4}$

Для квадратного излучателя

$$x_0 = \frac{a^2}{\pi\lambda}$$

где  $a$ - сторона квадрата.

Рассмотрим явление затухания ближней и дальней зон.

Из таблицы 2 выбираем формулу для ослабления амплитуды плоских волн. Амплитуда импульсов равна

$$A_2 = A_0 e^{-4h\alpha} \text{ (импульс прошел 4 толщины } H \text{)}$$

$$A_1 = A_0 e^{-2h\alpha} \text{ (импульс прошел 2 толщины } H \text{)}$$

Разделим  $A_2$  на  $A_1$  и прологарифмируем. Получаем

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (3.4)$$

Здесь результат получается в Нп/м. В данном случае получена формула коэффициента затухания для ближней зоны, так как  $X_0 \geq h$ .

Если  $X_0 < h$  – дальняя зона, в этом случае коэффициент затухания рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \left( \ln \frac{A_1}{A_2} - \ln \frac{x_2}{x_1} \right) \quad (3.5)$$

## Метод определения скорости звука продольных волн:

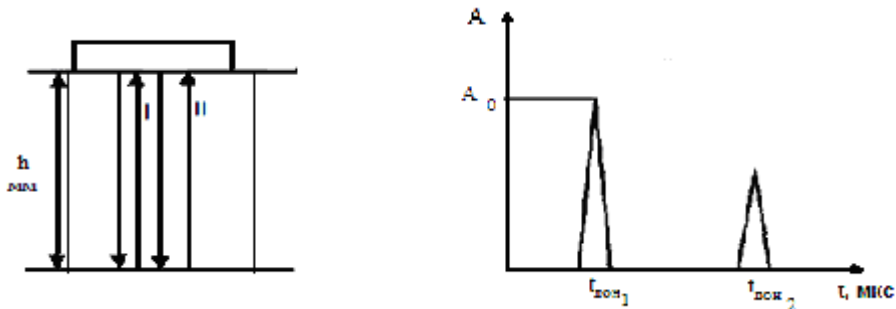


Рисунок 3.1 - Схема прозвучивания эталона и показания УЗ-дефектоскопа  $X = 2h$

Между 1-м и 2-м эхо-импульсами волна прошла две толщины изделия. Разность времени  $t_{дон} - t_{зад} = 2h/C_l$ . Отсюда скорость продольных волн

$$C_l = \frac{2h}{t_{дон} - t_{зад}} \quad (3.2)$$

$$t_{зад} = 2 * t_{дон1} - t_{дон2} \quad (3.3)$$

## Метод определения коэффициента затухания

Плоскопараллельный образец, на поверхности которого расположен прямой преобразователь.

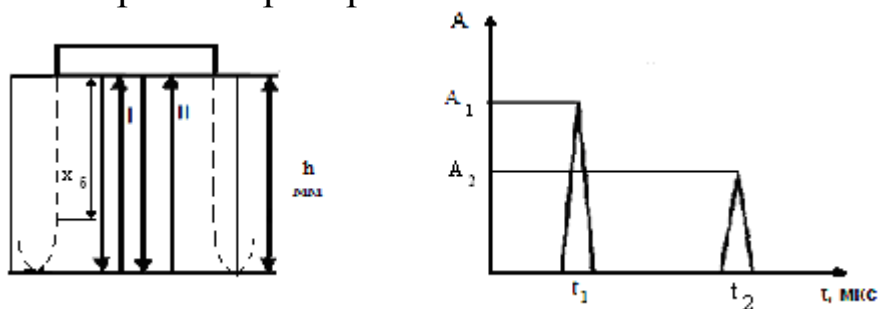


Рисунок 3.3 – Схема прозвучивания эталона и показания УЗ-дефектоскопа

Если  $x_б < h$ , то волна отразится назад к преобразователю в виде сферической волны, поэтому коэффициент  $\alpha$  рассчитывается для дальней зоны.

$$\alpha = \frac{1}{4h - 2h} \left( \ln \frac{A_1}{A_2} - \ln \frac{4h}{2h} \right) = \frac{1}{2h} \left( \ln \frac{A_1}{A_2} - \ln 2 \right) \quad (3.6)$$

Если  $x_б \geq h$ , то на донную поверхность падает плоская волна и отражается также плоская волна. Так как расхождения нет, то это ближняя зона.



$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (3.7)$$

## 4 Методы акустического контроля и толщинометрия

### 4.1 Ультразвуковая толщинометрия

Рассмотрим способ определения толщины акустическим методом.

В принципе измерения толщины используют зависимость времени прохождения волны от расстояния, которое прошла волна. При известных значениях времени и скорости можно определить путь.

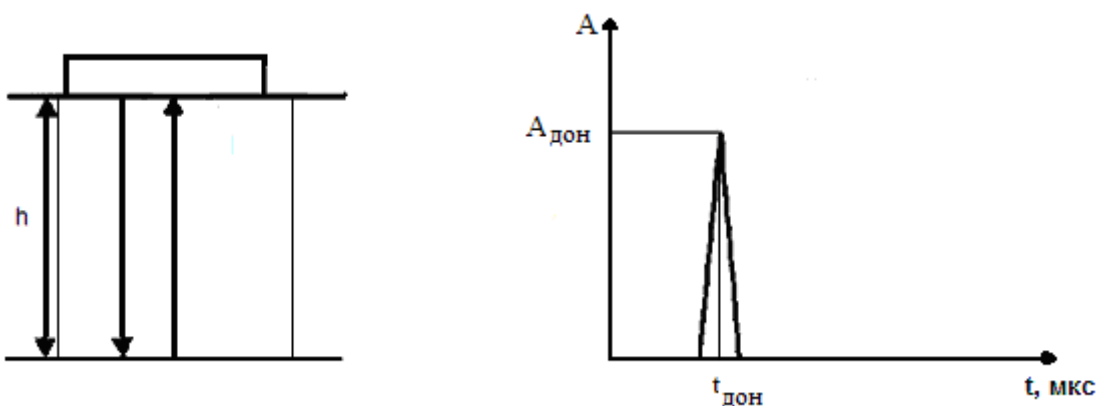


Рисунок 4.1 – Схема контроля

$X = C_l \cdot t_{\text{изд}}$  – формула для определения пути, который прошла волна.

Время прохождения волны в изделии находится по следующей формуле:

$$t_{\text{изд}} = t_{\text{дон}} - t_{\text{зад}} \quad (4.1)$$

Толщина изделия рассчитывается:

$$h = \frac{C_l (t_{\text{дон}} - t_{\text{зад}})}{2} \quad (4.2)$$

Погрешность измерения толщины зависит от:

1. Погрешность прибора;
2. Погрешность скорости звука;
3. Погрешность контактного слоя жидкости;
4. Длительность импульса.

$$\frac{\Delta h}{h} \cdot 100\% = 2\% + 100\% \frac{C_l}{2h} \left( \frac{\Delta h_{\text{жс}}}{C_{\text{жс}}} + \frac{\chi}{f} \right) \quad (4.3)$$

Для расчета абсолютной погрешности нужно полученное

значение относительной погрешности, рассчитанной по формуле (4.3) умножить на  $h$  и разделить на 100%.

## 4.2 Акустический тракт

Акустический тракт – область среды, через которую распространяется волна.

При расчете акустического тракта определяется амплитуда волны в произвольной точке акустического тракта.

Закон затухания волны для дискообразного преобразователя:

$$A(x) = A_0 \frac{S_n}{\lambda x} e^{-\alpha x} \quad (4.4)$$

При отражении от бесконечной плоскости амплитуда рассчитывается по такой же формуле, без изменения.

При отражении от дефекта формула акустического тракта должна учитывать размер и форму дефекта.

Формы дефектов:

1 Дискообразный отражатель – дефекты в виде трещин.

а) дальняя зона:

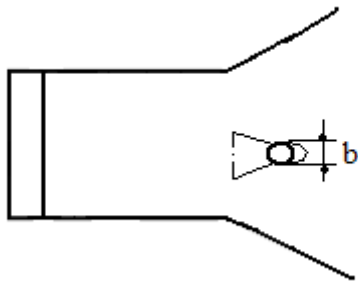


Рисунок 4.2 - Дискообразный отражатель дальняя зона

$$x = x_1 + x_2 \quad (4.5)$$

где  $x$  – общий путь волны,  $x_1$  – расстояние от излучателя до дефекта;  $x_2$  – расстояние от дефекта до приемника

Амплитуда рассчитывается по следующей формуле:

$$A(x) = A_0 \frac{S_n}{\lambda x} \cdot \frac{4S_g}{\lambda x} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.6)$$

б) ближняя зона - расхождения нет:

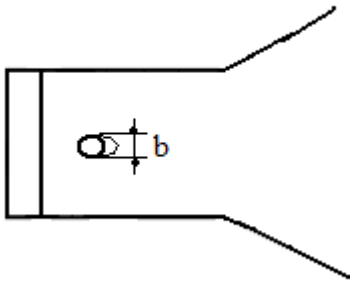


Рисунок 4.3 - Дискообразный отражатель ближняя зона

Амплитуда для ближней зоны рассчитывается по формуле:

$$A(x) = A_0 \frac{4S_e}{\lambda x} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.7)$$

$$S_e = \frac{\pi b^2}{4} \quad (4.8)$$

где  $b$  – диаметр диска.

2 Сферический отражатель (пора, шлаковое включение)

а) дальняя зона:

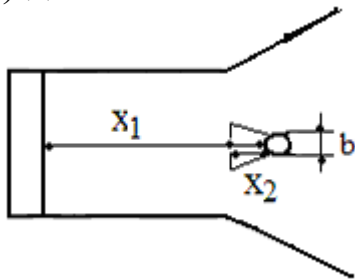


Рисунок 4.4 - Сферический отражатель дальняя зона

Амплитуда рассчитывается по следующей формуле:

$$A(x) = A_0 \frac{S_n}{\lambda x} \cdot \frac{2b}{x} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.9)$$

б) ближняя зона:

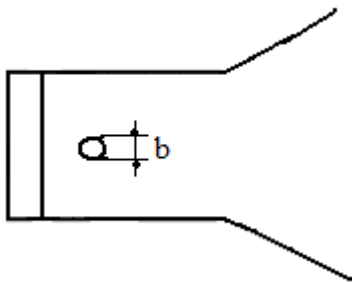


Рисунок 4.5 - Сферический отражатель ближняя зона

Амплитуда для ближней зоны рассчитывается по формуле:

$$A(x) = A_0 \frac{2b}{x} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.10)$$

$$S_n = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.11)$$

### 3 Цилиндрический отражатель

а) дальняя зона:

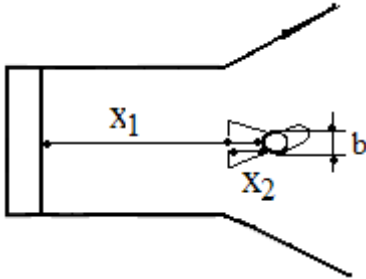


Рисунок 4.6 - Цилиндрический отражатель дальняя зона

Амплитуда рассчитывается по следующей формуле:

$$A(x) = A_0 \frac{S_n}{\lambda x} \cdot \sqrt{\frac{2b}{x}} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.12)$$

б) ближняя зона:

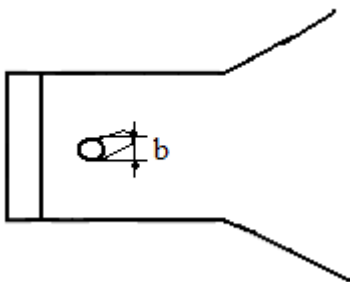


Рисунок 4.7 - Цилиндрический отражатель ближняя зона

Амплитуда для ближней зоны рассчитывается по формуле:

$$A(x) = A_0 \sqrt{\frac{2b}{x}} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.13)$$

В плоскопараллельных пластинах при использовании прямого совмещенного преобразователя и эхо-метода акустического контроля выполняется соотношения  $x = 2h_b$ , где  $h_b$  – глубина залегания дефекта. Эта характеристика определяется по формуле (4.2), в которой вместо времени донного сигнала  $t_{дон}$  используется время эхо-сигнала от дефекта  $t_{\delta}$ .

### 4.3 Определение коэффициента двойного преобразования

Коэффициент двойного преобразования характеризует потери энергии преобразователя в совмещенном режиме.

$$K_{\text{ин}} = K_u K_n = \frac{U_n}{U_2}$$

$$x=2h$$

$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda}$$

$$K_u = \frac{A_0}{U_2} \quad K_n = \frac{U_n}{A_x} \quad (4.14)$$

$$K_{\text{ин}} = \frac{U_n}{U_2} \cdot \frac{A_0}{A_x} \Leftarrow K_{\text{ин}} = K_u K_n$$

$$\frac{A_0}{A_x} = \frac{\lambda x}{S_n} \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.15)$$

Для дальней зоны коэффициент двойного преобразования:

$$K_{\text{ин}} = \frac{U_n}{U_2} \cdot \frac{2\lambda h}{S_n} \cdot e^{2\alpha h} \quad (4.16)$$

Для ближней зоны коэффициент двойного преобразования:

$$K_{\text{ин}} = \frac{U_n}{U_2} e^{2\alpha h} \quad (4.17)$$

### 4.4 Определение параметров дефектов

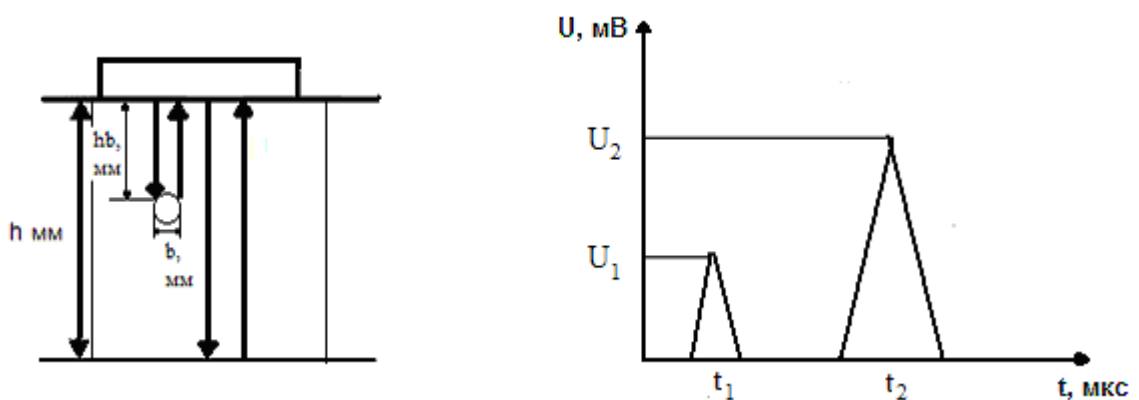


Рисунок 4.8 - Схема прозвучивания изделия с дефектом и показания УЗ-дефектоскопа

Первый сигнал является сигналом от дефекта, так как дефект расположен ближе к преобразователю, чем донная поверхность и отраженная от него звуковая волна доходит раньше. Таким образом  $t_{\delta} = t_1$ .

Глубина залегания дефекта:

$$h_{\delta} = \frac{C_l(t_{\delta} - t_{зад})}{2} \quad (4.18)$$

4.4.1 Размер дискообразного дефекта для дальней зоны:

$$K_{un} = \frac{U_n}{U_2} \cdot \frac{A_0}{A_x} \Leftarrow K_{un} = K_u K_n \quad (4.19)$$

Выражаем отношение  $A_x/A_0$ :

$$\frac{A_x}{A_0} = \frac{U_n}{U_2 K_{un}} = \frac{S_n}{2\lambda h_b} B \cdot e^{-2\alpha h_b} \quad (4.20)$$

Здесь  $B$  – коэффициент формы дефекта, характеризующий во сколько раз дефект ослабляет эхосигнал в соответствии со своими формой и размером. В соответствие с формулами акустического тракта (4.6), (4.9) и (4.12) для дискообразного (д), сферического (с) и цилиндрического (ц) отражателей коэффициенты формы равны:

$$B_{д} = \frac{\pi b^2}{2\lambda h_b}, \quad B_{с} = \frac{b}{h_b}, \quad B_{ц} = \sqrt{\frac{b}{h_b}} \quad (4.21)$$

Из выражения (4.20) следует, что в ближней зоне ( $X_{\delta} \geq h_b$ ), коэффициент формы дефекта равен:

$$B = \frac{U_n}{U_2 K_{un}} e^{2\alpha h_b}, \quad (4.22)$$

а в дальней зоне ( $X_{\delta} < h_b$ ):

$$B = \frac{U_n}{U_2 K_{un}} \cdot \frac{2\lambda h_b}{S_n} e^{2\alpha h_b}. \quad (4.23)$$

После его определения может быть выражен из формул (4.21) и рассчитан эквивалентный размер дефекта  $b$ .

## 5 Примеры расчетов в курсовой работе

### Задание 1

Определить время задержки волны в преобразователе и акустические свойства среды: скорость звука продольных колебаний  $C_l$  [м/с] и коэффициент затухания  $\alpha$  [Нп/м], длину волны  $\lambda$  [мм] в эталоне (рис. 1). Частота звуковых колебаний  $f=2,5$  МГц.

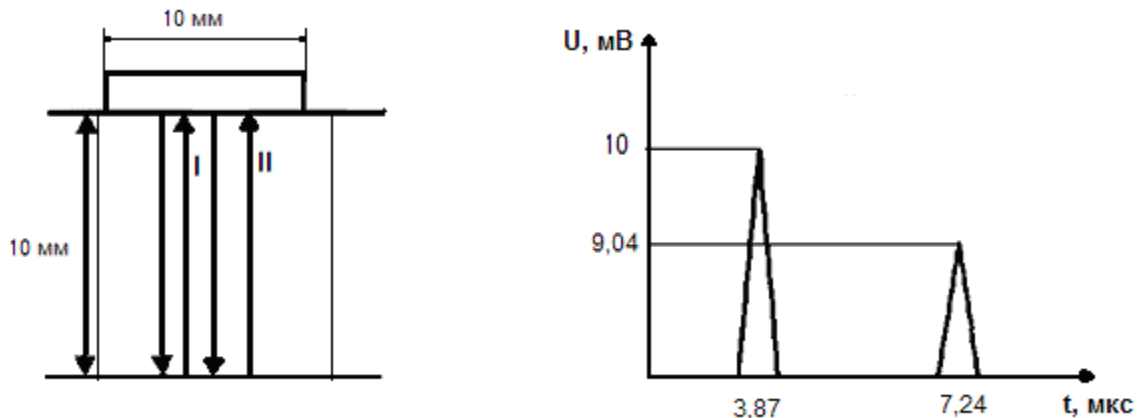


Рисунок 1 – Схема прозвучивания эталона и показания УЗ-дефектоскопа. На экране дефектоскопа наблюдаются сигналы, соответствующие двойному (I) и четырехкратному (II) прохождению волны через толщину образца

Решение:

1) Найдем время задержки:

$$t_{\text{зад}} = 2 * t_{\text{дон1}} - t_{\text{дон2}} = 2 * 3.87 - 7.24 = 0.5 \text{ мкс}$$

2) Найдем скорость звука. Как видно из рисунка толщина изделия  $h = 10$  мм, что составляет 0.01 м.

$$C_l = \frac{2h}{t_{\text{дон}} - t_{\text{зад}}} = 2 * 0.01 / ((3.87 - 0.5) * 10^{-6}) = 5934.7 \text{ м/с}$$

3) Найдем длину волны. Частоту звука следует перевести в герцы,  $f = 2500000$  Гц.

$$\lambda = C_l / f = 5934.7 / 2.5 * 10^6 = 2.37 \text{ мм}$$

4) Найдем протяженность ближней зоны. Как видно из рисунка диаметр излучателя  $D = 10$  мм. Таким образом, получаем:

$$X_6 = D^2 / (4 \lambda) = 100 / (4 * 2.37) = 10.5 \text{ мм}$$

$X_6 > h$ , т.к.  $10.5 \text{ мм} > 10 \text{ мм}$ . Таким образом, контроль ведется в ближней зоне, и коэффициент затухания вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{U_1}{U_2} = 1/(2*0.01)*\ln(10 / 9.04) = 5 \text{ Нп/м}$$

В результате получаем:  $t_{\text{зад}}=0.5$  мкс,  $C_1=5934.7$  м/с,  $\lambda =2.37$  мм,  
 $\alpha =5$  Нп/м

## Задание 2

По величине скорости звука идентифицировать материал эталона:

Сталь		Кварцевое	
углеродистая	$C_1=5940$ м/с	стекло	$C_1=5900$ м/с
Сталь			
аустеничная	$C_1=5770$ м/с	Оргстекло	$C_1=2700$ м/с
Алюминий	$C_1=6360$ м/с	Фторопласт	$C_1=1135$ м/с
Медь	$C_1=4720$ м/с	Эбонит	$C_1=2400$ м/с
Чугун	$C_1=3500$ м/с		

Чем вызвано затухание волны (расхождением, рассеянием, поглощением)?

Решение:

В нашем случае  $C_1=5934.7$  м/с, значит материал эталона – сталь углеродистая.

1. Углеродистая сталь относится к зернистым материалам, следовательно в ней происходит рассеяние звука на зернах.

2. Контроль осуществлялся в ближней зоне, где волновой фронт имеет плоскую форму, значит расхождение волны отсутствует.

3. Поглощение волн происходит за счет процессов внутреннего трения слоев вещества, которое осуществляется во всех материалах в процессе звуковых колебаний.

Вывод: затухание волн вызвано рассеянием и поглощением.

## Задание 3

Определить коэффициент двойного преобразования  $K_{\text{ип}}$  акустического датчика (использованного в п.1) и толщину  $h$  [мм] изделия, которое выполнено из материала эталона, идентифицированного в п.2 и погрешность измерения толщины ( $C_{\text{ж}}=1500$  м/с,  $\Delta h_{\text{ж}}=0.1$  мм,  $\chi =0,125$ ), используя (если нужно) известные скорость звука  $C_1$  и длину волны  $\lambda$ , время задержки волны



в преобразователе  $t_{зад}$ , коэффициент затухания в материале  $\alpha$ , а также данные на рис. 2 : время и амплитуду донного сигнала  $t_{дон}$ . Напряжение генератора составляло  $U_2 = 5 \text{ В}$ .

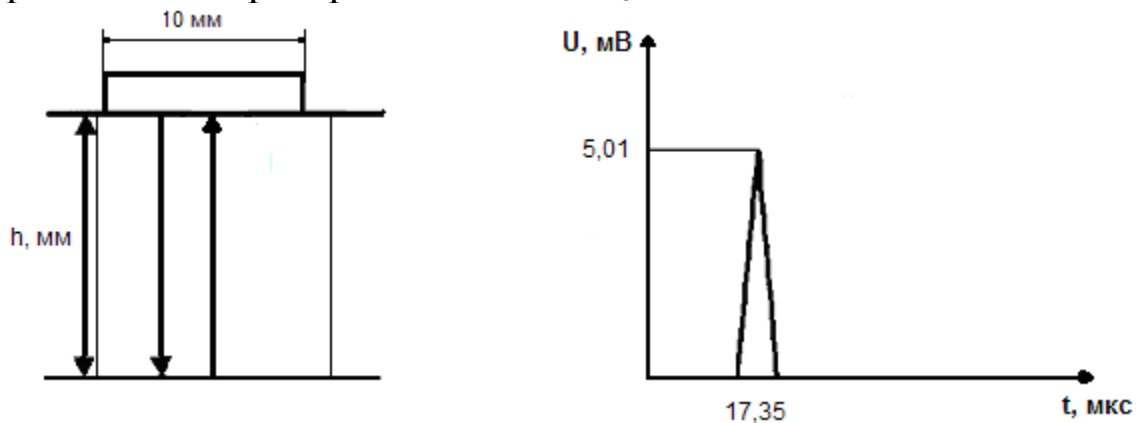


Рисунок 2 – Схема прозвучивания бездефектного изделия и показания УЗ-дефектоскопа наблюдается сигнал, соответствующий двойному прохождению волны через толщину образца

Решение:

1) Определим толщину образца.

$$h = \frac{C_l(t_{дон} - t_{зад})}{2} = 5934.7 * (17.35 - 0.5) * 10^{-6} / 2 = 0.05 \text{ м} = 50 \text{ мм}$$

2) Погрешность измерения толщины рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \delta h &= 2\% + 100\% \frac{C_l}{2h} \left( \frac{\Delta h_{жс}}{C_{жс}} + \frac{\chi}{f} \right) = \\ &= 2\% + 100\% * 5934.7 / (2 * 0.05) * (0.1 * 10^{-3} / 1500 + 0.125 / (2.5 * 10^6)) = \\ &= 2\% + 0.593 * 10^7 * (0.67 * 10^{-7} + 0.5 * 10^{-7})\% = 2\% + 0.593 * 1.17\% = 2.69\% \\ \Delta h &= \delta h * h / 100\% = 2.69\% * 50 / 100\% = 1.3 \text{ мм} \end{aligned}$$

3) Определим коэффициент преобразования. Поскольку диаметр излучателя и длина волны такие же как и в первом задании, то и протяженность ближней зоны осталась той же  $X_6 = 10.5 \text{ мм}$ . Однако толщина изделия другая  $h = 50 \text{ мм}$ , следовательно:  $X_6 < h$  – дальняя зона контроля и коэффициент преобразования определяется по формуле:

$$K_{un} = \frac{U_n}{U_2} \cdot \frac{2\lambda h}{S_n} \cdot e^{2\alpha h}$$

$$\text{Рассчитаем площадь излучателя } S_n = \frac{\pi D^2}{4} = 3.14 * 10^2 / 4 = 78.5 \text{ мм}^2$$

Напряжение принятого сигнала переведем в вольты  $U_n = 5.01 * 10^{-3} \text{ В}$

$$K_{un} = \frac{5.01 \cdot 10^{-3}}{5} \cdot \frac{2 \cdot 2.37 \cdot 50}{78.5} \cdot e^{2 \cdot 5 \cdot 0.05} = 0.005$$

$$K_{инп}=0.005$$

В результате получаем:  $K_{инп}=0,005$      $(h \pm \Delta h) = (50.0 \pm 1.3)$  мм

#### Задание 4

Определить какой из сигналов дефектоскопа на рис.3 относится к дефекту. Вычислить глубину залегания  $h_b$  [мм] и размеры  $b$  [мм] дефекта в изделии из материала эталона (п.2), полагая, что дефект – пора. Для этого воспользоваться требуемыми значениями, определенными в предыдущих пунктах ( $\lambda, \alpha, t_{зад}, K_{инп}$ ), а также временем и амплитудой сигнала, отраженного от дефекта (рис. 3). Напряжение генератора составляло 12.5 В.

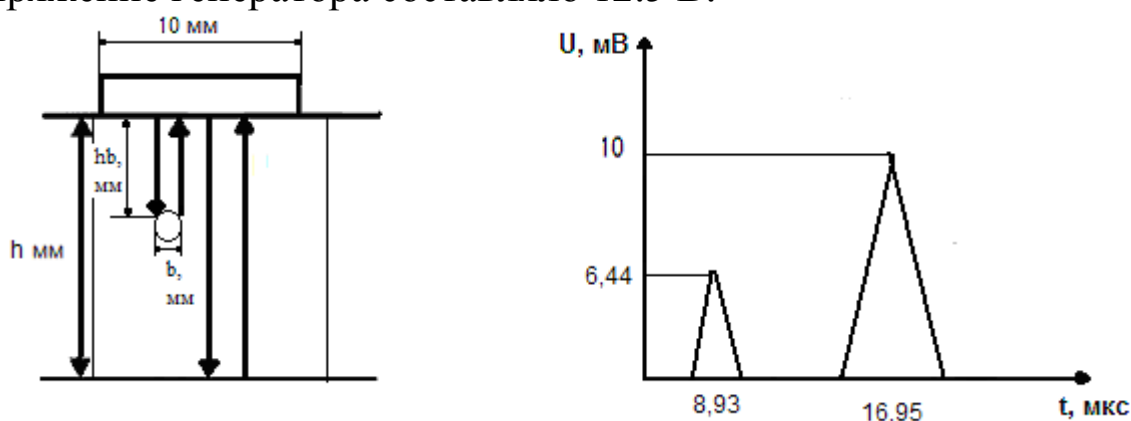


Рисунок 3 – Схема прозвучивания изделия с порой и показания УЗ-дефектоскопа. На экране дефектоскопа наблюдается сигналы волн, отраженных от дефекта и донной поверхности

Решение: Сигнал с амплитудой  $U=6,44$  мВ относится к дефекту, т.к. дефект расположен ближе к преобразователю, время прохождения волны будет меньше, чем до донной поверхности. Следовательно  $t_{деф} = 8.93$  мкс

1) Найдем глубину залегания дефекта:

$$h_g = \frac{C_l(t_{деф} - t_{зад})}{2} = 5934.7 * (8.93 - 0.5) * 10^{-6} / 2 = 0.025 \text{ м} = 25 \text{ мм}$$

т.к.  $X_b (10.5 \text{ мм}) < h_b (25 \text{ мм})$ , то контроль производится в дальней зоне

2) Найдем коэффициент формы дефекта в дальней зоне. Напряжение принятого сигнала переведем в вольты  $U_n = 6.44 * 10^{-3}$  В.

$$B = \frac{U_n}{U_2 K_{un}} \cdot \frac{2\lambda h_b}{S_n} e^{2\alpha h_b} = \frac{6.44 \cdot 10^{-3}}{12.5 \cdot 0.005} \cdot \frac{2 \cdot 2.37 \cdot 25}{78.5} \cdot e^{2 \cdot 5 \cdot 0.025} = 0.2$$

3) Найдем размер дефекта. В нашем случае дефект – пора, которая

является сферическим отражателем. Из выражения (4.21) для сферы получаем:

$$b = B \cdot h_b = 0.2 \cdot 25 = 5 \text{ мм}$$

В результате получаем:  $h_b=25$  мм,  $b= 5$  мм.

### **Заключение**

Заключение курсовой работы должно содержать основные выводы и результаты расчетов по всем четырем заданиям.

### **Список литературы**

- 1 Акустические и электрические измерения в неразрушающем контроле материалов и изделий / Д.Ю. Бирюков, А.Ф. Зацепин, А.И. Сюрдо. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 124 с.
- 2 Общие сведения по методам и средствам измерений, испытаний и контролю/ Д.Ю. Бирюков. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 31 с.
- 3 Физические основы акустических методов контроля/ Д.Ю. Бирюков. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. 56 с.

*Учебное издание*

Бирюков Дмитрий Юрьевич

**Руководство к выполнению курсовой работы по методам и средствам измерений, испытаний и контроля**

Редактор издательства – И.Г. Южакова  
Компьютерные верстка и дизайн  
И.В. Дубровской, Т.Н. Хисамиевой  
Корректор – М.Ю. Петров

ИД №06263 от 12.11.2001 г.

---

Подписано в печать 11.06.2012	Формат 60x84 1/16		
Бумага типографская	Офсетная печать	Усл.печ.л. 7,38	
Уч.-изд.л. 6,9	Тираж 100	Заказ	Цена "С"

---

Издательство ГОУ УГТУ-УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ ГОУ УГТУ-УПИ,  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19