

*Ультразвуковой контроль (УЗК).*

*Физические основы генерации ультразвуковых волн (УЗВ). Распространение УЗВ в материале.*

# Ультразвуковая дефектоскопия на первый взгляд (фото из открытых источников)



# Ультразвуковая дефектоскопия на первый взгляд (фото из открытых источников)

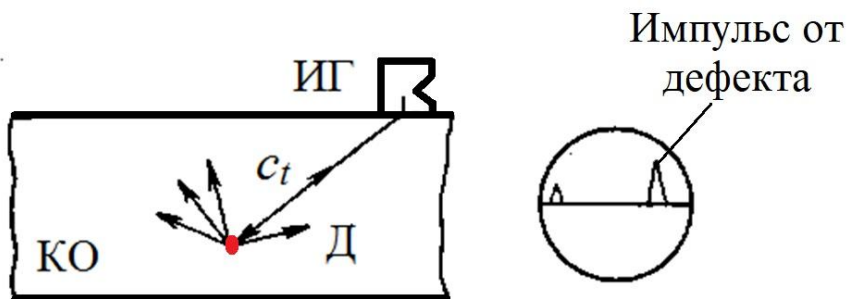
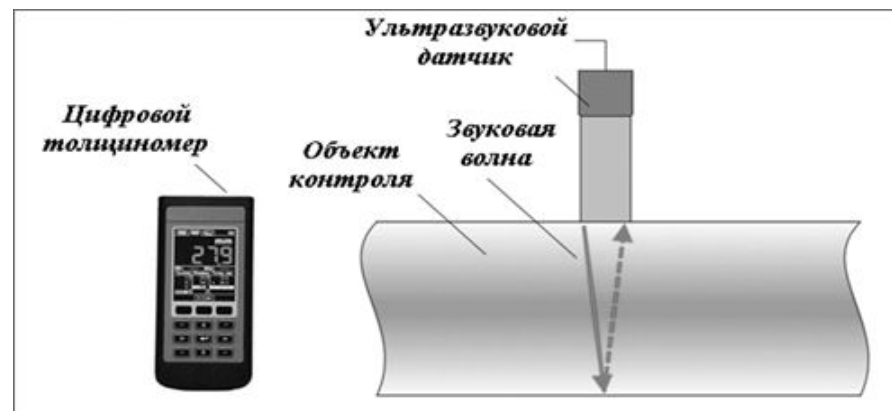


Схема ультразвуковой дефектоскопии:  
ИГ – искательная головка; КО –  
контролируемый объект; Д - дефект

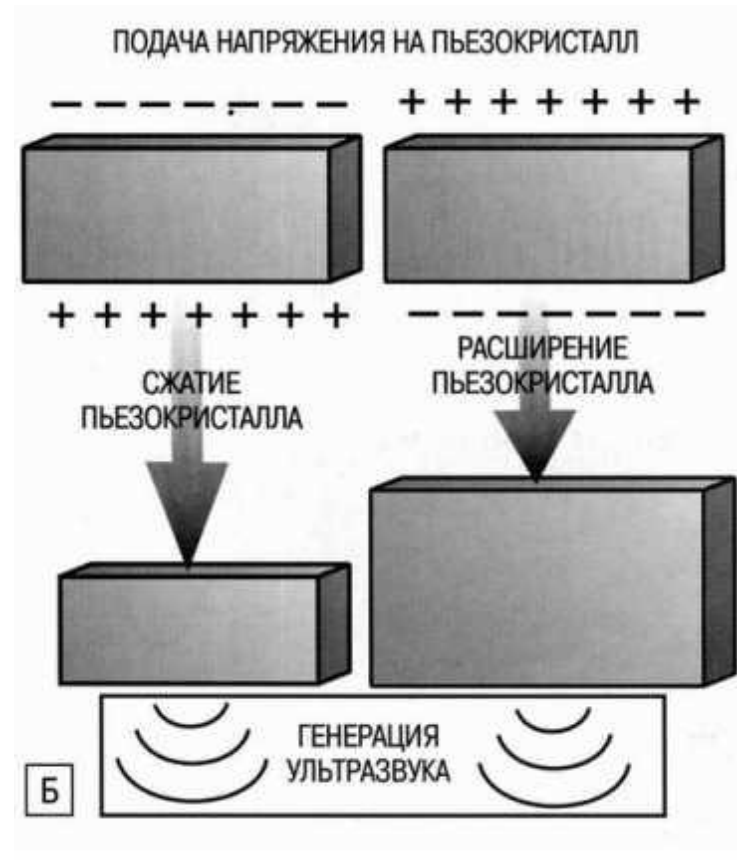


# Физические основы генерации УЗВ. Пьезоэффект.

## Прямой пьезоэффект



## Обратный пьезоэффект



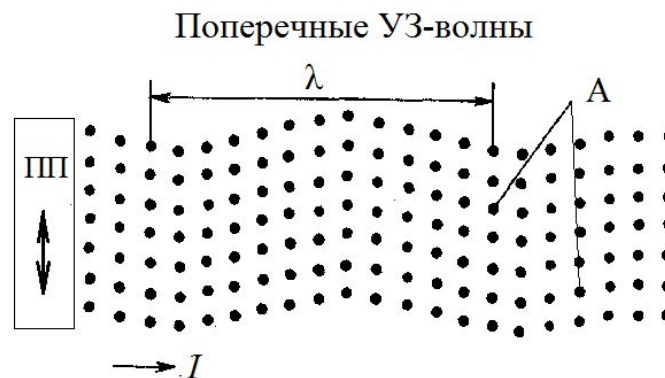
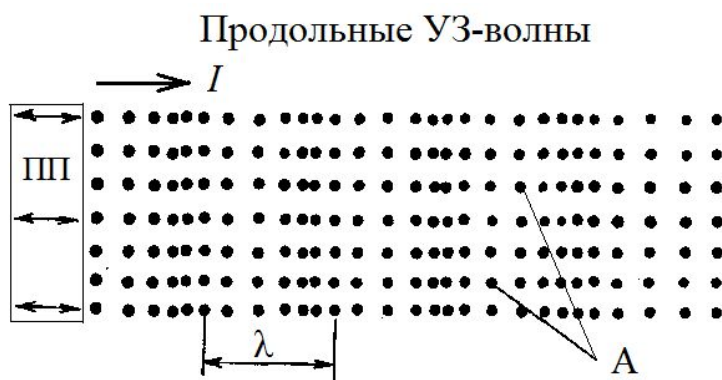
*Прямой пьезоэлектрический эффект* – явление возникновения электрического заряда на поверхностях пластины из пьезоматериала при её деформировании.

*Обратный пьезоэлектрический эффект* – явление изменения размеров пластинки под действием электрического поля.

## Формирование УЗВ в материале

*Ультразвуковая волна* – процесс распространения в среде упругих колебаний ультразвуковой частоты (свыше 20 000 Гц).

Каждая частица среды колеблется вблизи положения своего равновесия, передавая энергию соседним частицам, *т.е. осуществляется процесс переноса энергии без переноса вещества.*



*Продольная волна* – волна, в которой колебательное движение частиц среды *совпадает* с направлением распространения волны.

*Поперечная волна* – волна, в которой частицы колеблются в направлении, *перпендикулярном* направлению распространения волны.

*Могут существовать в твердых телах, жидкостях и газах.*

*Могут существовать только в твердых телах.*

## Характеристики УЗВ

*Скорость звука  $c$  (м/с)* – скорость распространения в среде упругих колебаний.

*Продольная волна:*

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

*Поперечная волна:*

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$$

$$c_t = c_l \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}$$

$$\left(\frac{c_t}{c_l}\right)_{Fe} = 0,55 \quad \left(\frac{c_t}{c_l}\right)_{Al} = 0,49$$

*Длина волны  $\lambda$  (м)* – расстояние между двумя плоскостями, в которых частицы находятся в одинаковом состоянии движения (например, между двумя зонами сжатия).

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

Частота $f$ , МГц	Длина волны $\lambda$ , мм		
	сталь		вода
	$(c_l = 5900 \text{ м/с})$	$(c_t = 3245 \text{ м/с})$	$(c_l = 1490 \text{ м/с})$
0,5	11,8	6,49	2,98
2	2,95	1,62	0,75
5	1,18	0,65	0,30
10	0,59	0,32	0,15

## Характеристики УЗВ (продолжение)

*Давление звуковой волны  $p$  (Па)* – переменное избыточное давление, возникающее в упругой среде при прохождении через неё звуковой волны.

$$p = \rho c V$$

$\rho$  – плотность материала;  $V$  – колебательная скорость частиц.

$z = \rho c$  - акустический импеданс среды (удельное акустическое сопротивление среды).

*Плотность потока энергии  $\omega$  (Вт)* – энергия, проходящая за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению волны.

$$\omega = \frac{p^2}{z}$$

*Интенсивность звука, сила звука (Вт/м<sup>2</sup>)* – средняя плотность потока энергии за период колебания звуковой волны.

$$I = \frac{z \omega^2 U^2}{2}$$

$U$  – величина смещения частицы относительно положения равновесия.

# Затухание УЗВ в материале

*Затухание УЗВ* – уменьшение амплитуды колебаний частиц в звуковой волне, вызванное процессами рассеяния и поглощения.

## Рассеяние УЗВ

Основной фактор, влияющий на рассеяние УЗВ в металлах – *соотношение длины волны  $\lambda$  и средней величины зерна  $D$* .

$\lambda \ll D$  - рассеяние практически отсутствует, звук поглощается в каждом зерне как в одном большом кристалле; затухание определяется интенсивностью поглощения;

$\lambda \approx (1 \dots 4) D$  – «диффузное рассеяние» - высокий коэффициент рассеяния, наиболее сильное затухание;

$\lambda = (4 \dots 10) D$  – рассеяние снижается;  $\delta_p \approx Df^2$ ;

$\lambda \gg D$  – рассеяние волны происходит мелкими частицами;  $\delta_p \approx D^3f^4$ ;

## Поглощение УЗВ

*Поглощение УЗВ* – преобразование звуковой энергии в тепловую.

Интенсивность поглощения во многом определяется частотой колебаний. Чем выше частота колебаний – тем большая часть энергии преобразуется в тепловую – тем выше поглощение.

Коэффициент поглощения  $\delta_{\text{п}}$  пропорционален частоте колебаний :  $\delta_{\text{п}} \approx f$

*Закон снижения интенсивности звука при прохождении отрезка пути за счет затухания:*

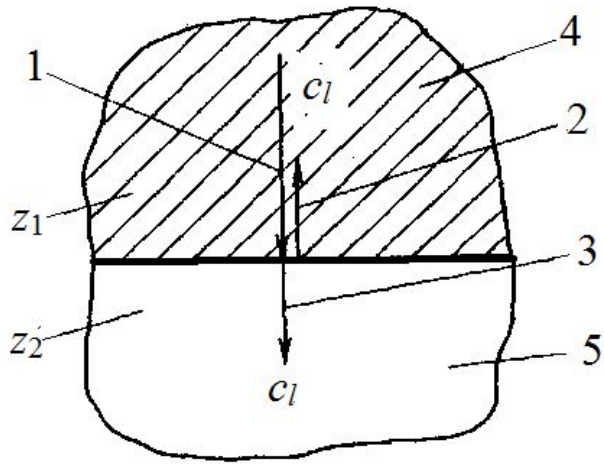
$$I_x = I_0 e^{-2\delta x} \quad \delta = \delta_p + \delta_n$$

$$\delta = k_1 f^4 + k_2 f$$



## Отражение УЗВ на границе раздела двух сред

**Отражение** – изменение направления волны на границе раздела, при котором волна частично переходит в другую среду.



*Схема преобразования продольной УЗВ при прохождении по нормали через границу двух сред*

*Коэффициент отражения продольной УЗВ:*

$$R = \left( \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2$$

*Коэффициенты отражения продольной волны на границе между сталью и некоторыми средами, заполняющими полости дефектов сварки*

Материал несплошности	R, %
Газ	100
Вода	88
Кварц	31
Шлак	16
Медь	0,21

# Трансформация УЗВ на границе раздела двух сред

**Преломление** – изменение направления волны на границе раздела, при котором волна переходит в другую среду.

**Трансформация** – преобразование волн одного типа в волны другого типа, происходящее на границе раздела двух сред.

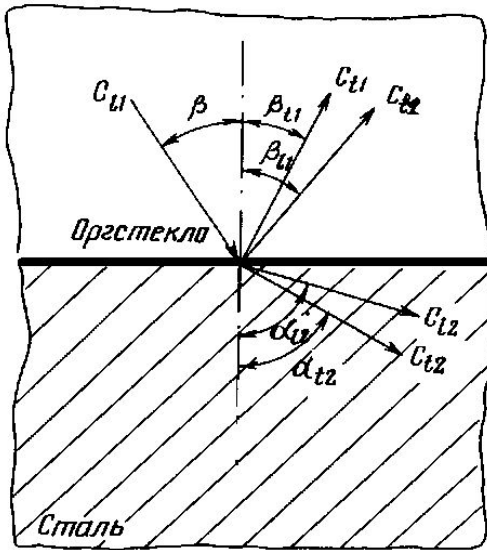


Схема преобразования продольной УЗВ при прохождении УЗВ через границу двух сред под углом  $\beta$

Уравнение Снеллиуса

$$\frac{\sin \beta}{c_{l1}} = \frac{\sin \beta_{l1}}{c_{l1}} = \frac{\sin \beta_{t1}}{c_{t1}} = \frac{\sin \alpha_{l2}}{c_{l2}} = \frac{\sin \alpha_{t2}}{c_{t2}}$$

**Первый критический угол  $\beta_{кр1}$**  – значение угла падения  $\beta$ , при котором преломленная продольная волна  $c_{l2}$  не будет проходить во вторую среду (т.е.  $\alpha_{l2} = 90^\circ$ ).

$$\beta_{кр1} = \arcsin\left(\frac{c_{l1}}{c_{l2}}\right)$$

**Второй критический угол  $\beta_{кр2}$**  – значение угла падения  $\beta$ , при котором преломленная поперечная волна  $c_{t2}$  не будет проходить во вторую среду (т.е.  $\alpha_{t2} = 90^\circ$ ).

$$\beta_{кр2} = \arcsin\left(\frac{c_{l1}}{c_{t2}}\right)$$