

Měření ultrazvukem

Měření ultrazvukem

Princip metody

- Princip metody spočívá ve využití ultrazvukového vlnění, resp. jeho odrazu od plošných nečelistvostí.
- Ultrazvukovým vlněním rozumíme mechanické vlnění s frekvencí nad **20 kHz**, které se šíří prostředím v důsledku jeho elastických vlastností. Ultrazvukový přístroj spolu se sondou/sondami slouží k vysílání, přijímání a rovněž i zpracování signálu.
- Přístroj vybudí díky krátkému impulzu o vysokém napětí (řádově stovky Voltů) v měniči sondy mechanické vlnění o frekvenci stovek kHz až jednotek MHz.
- Přijatý signál přístroj zobrazuje ve formě echa.

Měření ultrazvukem

Mechanické kmitání

- U aplikací ultrazvuku se setkáváme s malými amplitudami kmitajících částic, u nichž většinou nenastávají odchylky od sinusového tvaru. Takový druh kmitání lze popsat vlnovou rovnicí:

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2},$$

jejíž partikulární řešení pro rovinnou vlnu je rovnice harmonického pohybu:

$$a = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

kde: **A** je amplituda výchylky [m], $\omega = 2\pi f$ je kruhová frekvence [rad/s], **c** určuje rychlost šíření vlny [m/s], **x** je souřadnice polohy [m], x/c je fázový úhel [rad].

- Rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy, tzv. akustická rychlost, je dána:

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

Měření ultrazvukem

Mechanické kmitání

Poznámka: Efektivní hodnota

-Význam zejména v případě periodických veličin. V elektrotechnice se například setkáváme s efektivní hodnotou střídavého proudu/napětí přičemž tato hodnota je ekvivalentní velikosti stejnosměrného proudu/napětí, který by při průchodu odporovou zátěží/přiložení na odporovou zátěž vykazoval/vykazovalo stejný průměrný výkon.

- Definujme harmonickou veličinu: $y = A \sin \omega t$
- Pro efektivní hodnotu platí:

$$\begin{aligned} y_{ef} = y_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2 \omega t dt} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt} = \sqrt{\frac{A^2}{2}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

Měření ultrazvukem

Mechanické kmitání

- Prochází-li ultrazvuková vlna s akustickou rychlostí v prostředím s vlnovým odporem ρc , vznikne v něm akustický tlak:

kde:

$$p = Zv = \rho c \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

$Z = \rho c$ – akustický vlnový odpor [Pa·s/m]

$\omega A \rho c$ – P_a amplituda akustického tlaku [Pa]

ωA – V_a amplituda akustické rychlosti [m/s]

Obdobně jako v elektronice můžeme zavést efektivní veličiny:

$$p_{ef} = \frac{\omega A \rho c}{\sqrt{2}}, \quad v_{ef} = \frac{\omega A}{\sqrt{2}},$$

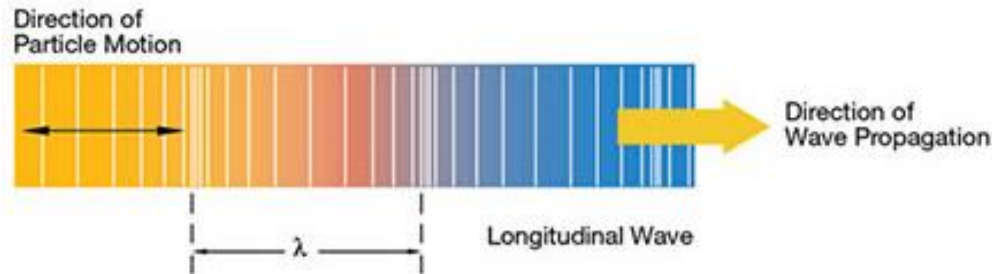
s nimiž lze definovat intenzitu ultrazvukové rovinné nebo kulové vlny výrazem:

$$I = p_{ef} v_{ef} = \frac{1}{2} \omega^2 A^2 \rho c = \frac{P_a V_a}{2}$$

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Podélné (longitudinální/kompresní) vlny

- Podélné vlny se mohou šířit v pevných, kapalných i plynných prostředích.
- Směr kmitání částic je shodný se směrem šíření vlny v daném prostředí.
- Vlivem šíření podélné vlny v daném prostředí dochází k objemovým změnám tohoto prostředí (zhušťování a zředování prostředí).



Zdroj: <http://www.olympus-ims.com/>

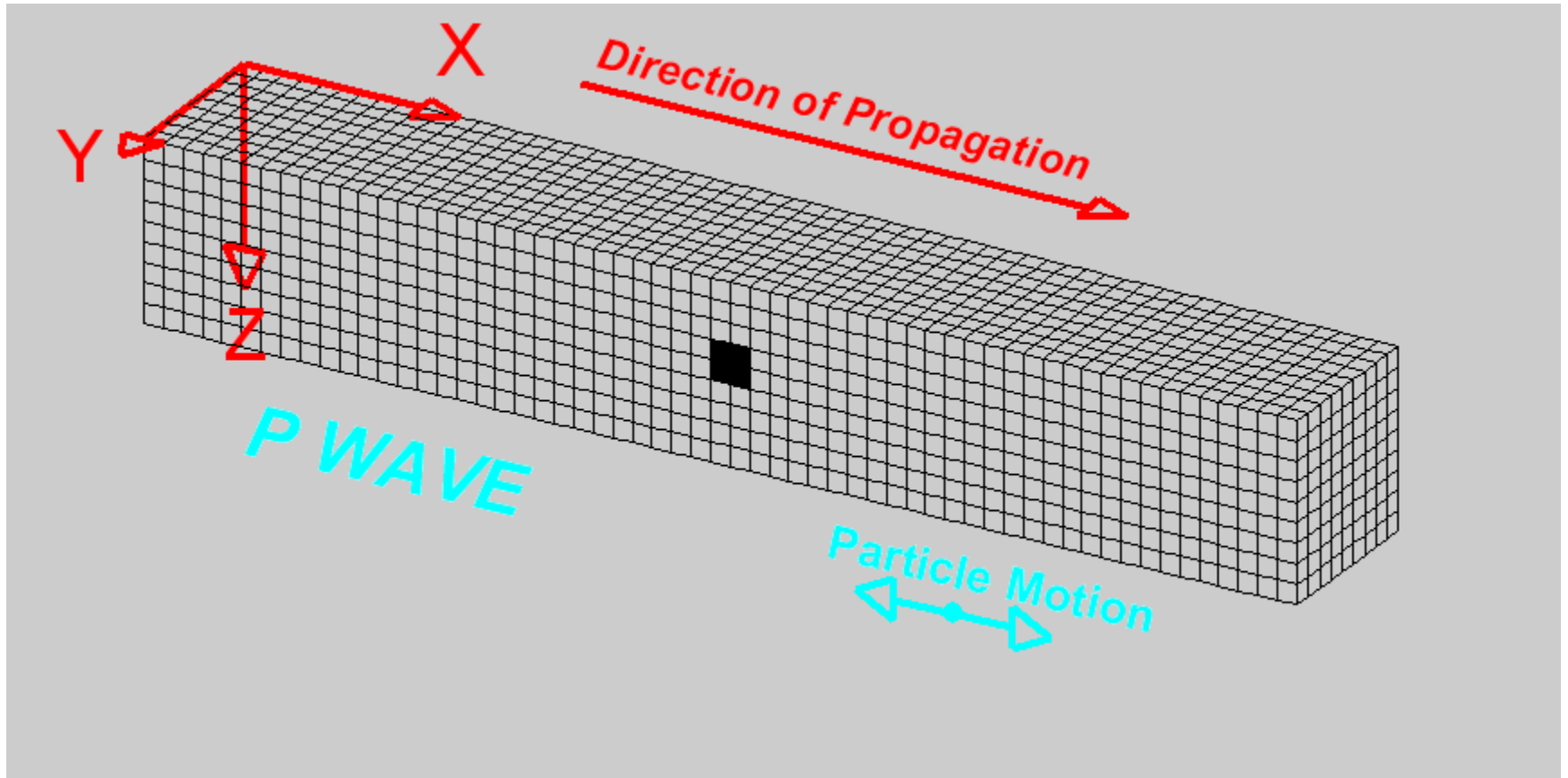
- Rychlost šíření podélných vln je funkcí elastických vlastností materiálu a hustoty:

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

kde E [MPa] vyjadřuje modul pružnosti a ρ [kg/m³] je hustota prostředí, jakým se vlna šíří a μ je Poissonovo číslo.

Měření ultrazvukem

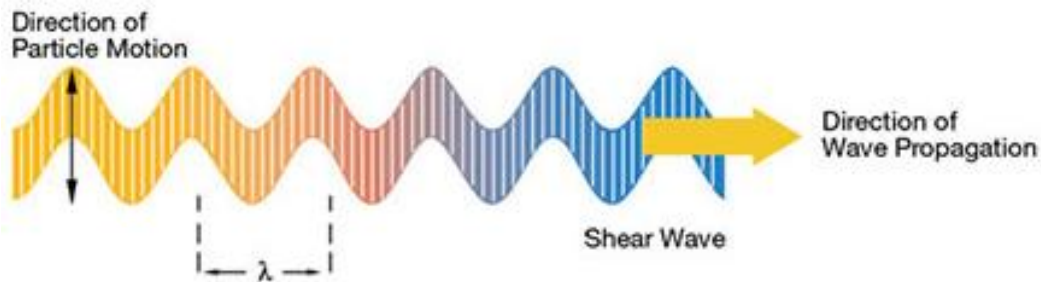
Typy ultrazvukových vln – Podélné (longitudinální/kompresní) vlny



Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Příčné (transverzální) vlny

- Příčné vlny se mohou šířit pouze těch látkách, ve kterých je možné přenést smykové zatížení. Směr kmitání částic je kolmý na směr šíření vlny daným prostředím.



Zdroj: <http://www.olympus-ims.com/>

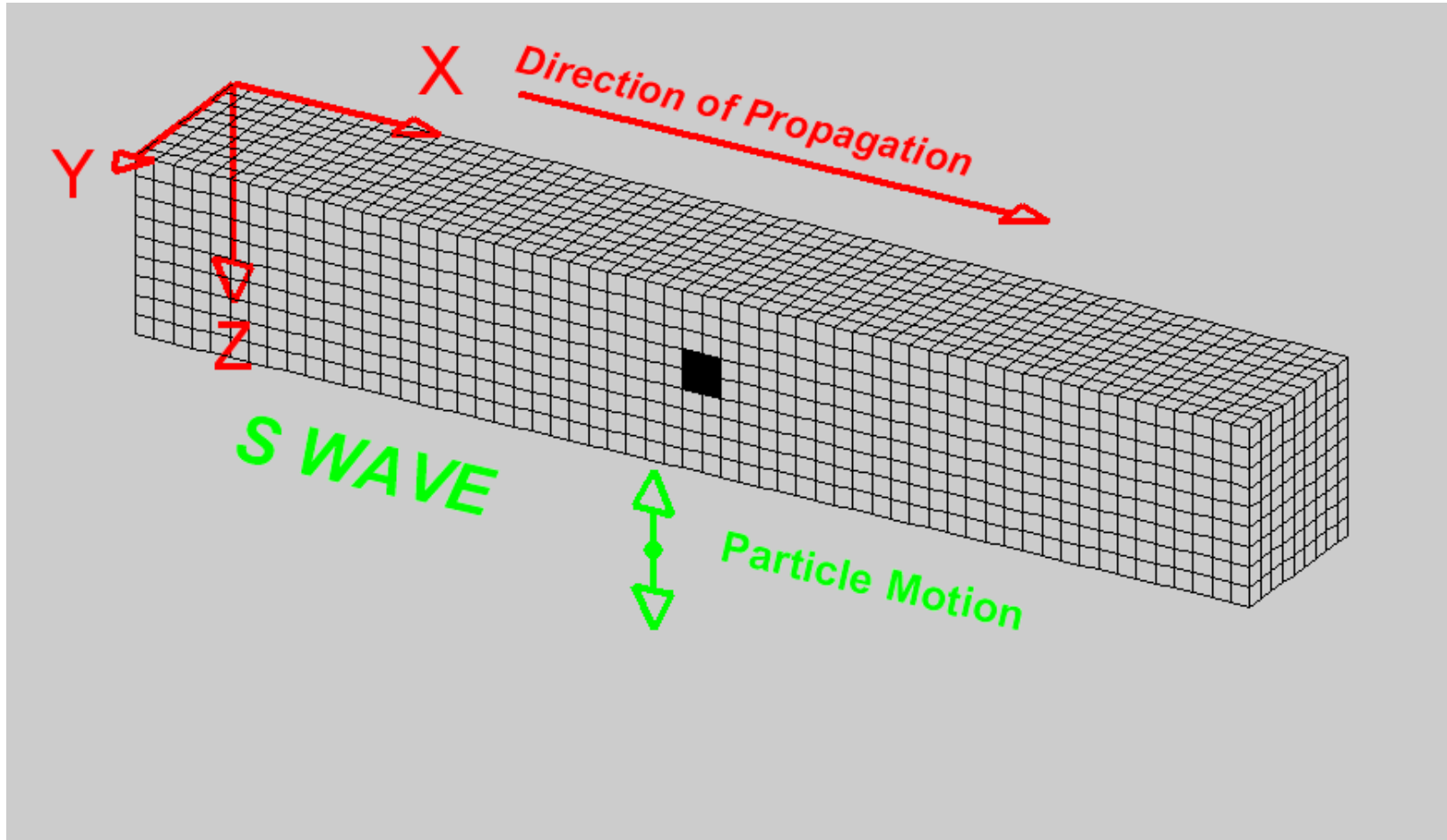
- Rychlost šíření příčných vln v tuhých látkách je dána vztahem:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

kde G [MPa] vyjadřuje smykový modul pružnosti a ρ [kg/m³] je hustota prostředí, jakým se vlna šíří.

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Příčné (transverzální) vlny

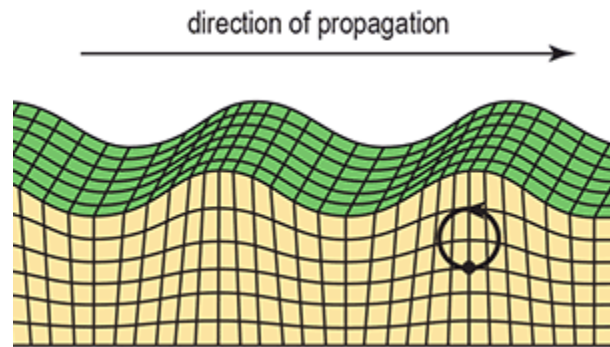


Zdroj: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves>

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Rayleighovy vlny

- Rayleighova vlna je kombinací příčné a podélné vlny. Částice vykonávají pohyb po eliptických drahách. Rayleighovy vlny se šíří po povrchu a zasahují do hloubky o velikosti jedné vlnové délky.



Zdroj: www.kgs.ku.edu

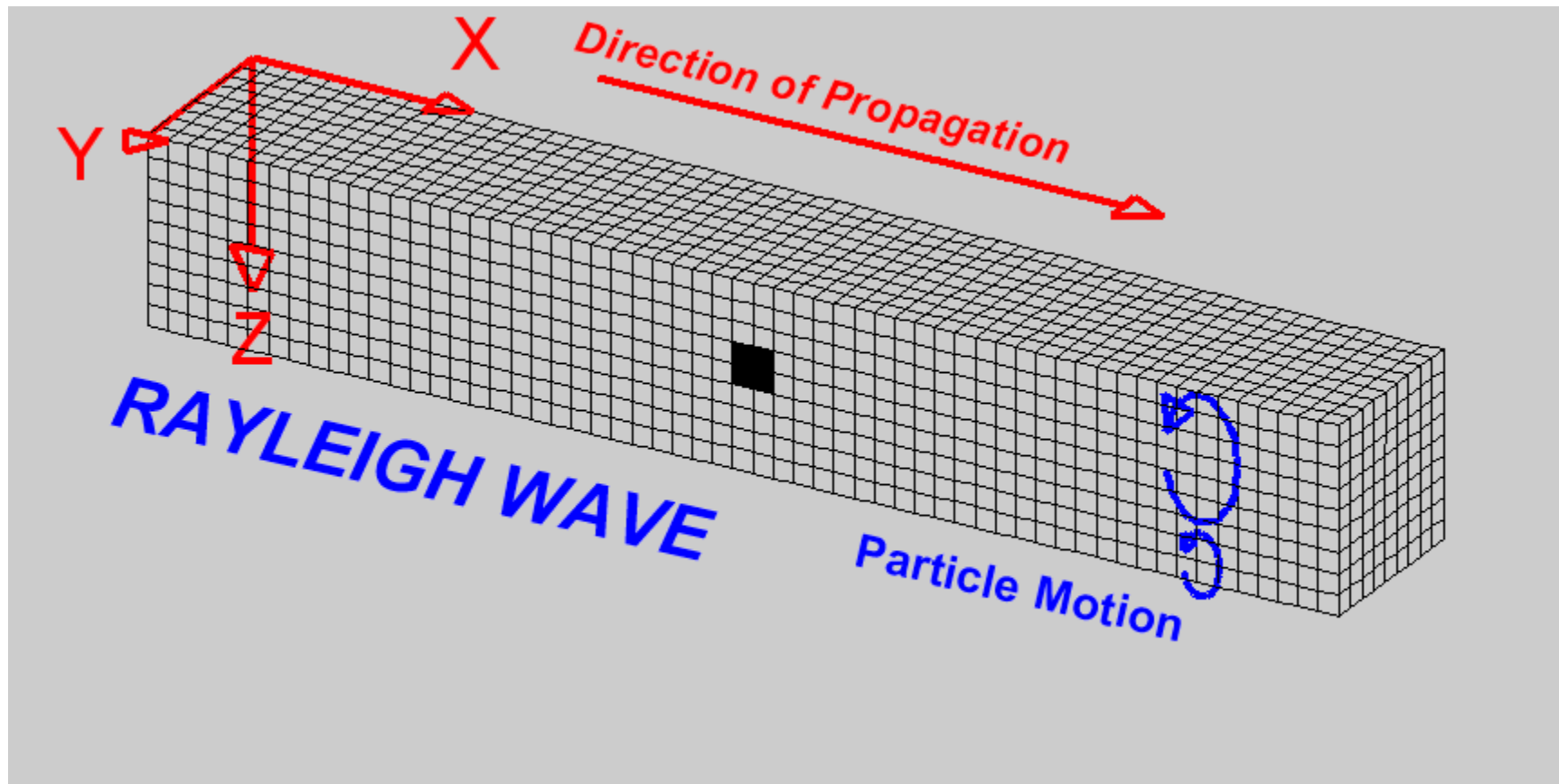
Rychlost šíření Rayleighových vln je dána vztahem:

$$c_R \approx \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} c_T$$

kde μ je Poissonovo číslo a c_T rychlost šíření příčných vln v daném prostředí.

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Rayleighovy vlny

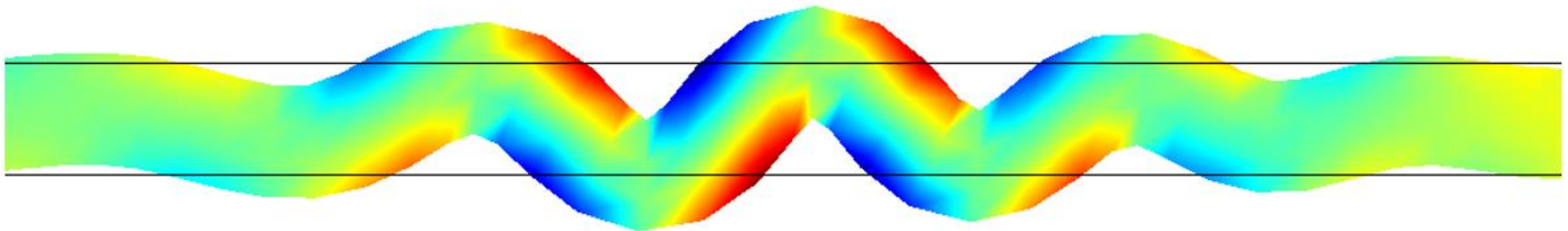


Měření ultrazvukem

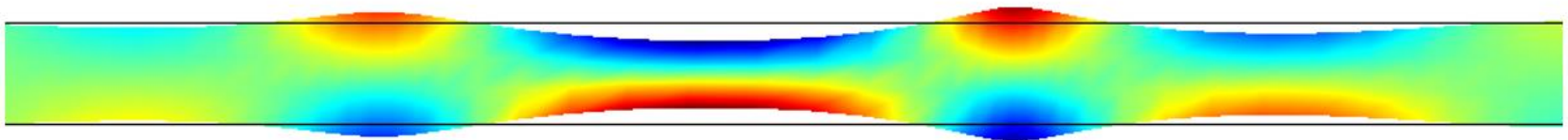
Typy ultrazvukových vln – Lambovy (deskové) vlny

- Lambovy vlny existují ve dvou variacích, a to vlny symetrické a asymetrické.
- Výskyt počtu módů asymetrické resp. symetrické Lambovy vlny je podmíněn polohou buzení, frekvencí vlny a tloušťkou materiálu.
- Lambovy vlny, na rozdíl od Rayleighových vln, zasahují celou tloušťku materiálu.

Antisymetrická Lambova vlna



Symetrická Lambova vlna



Měření ultrazvukem

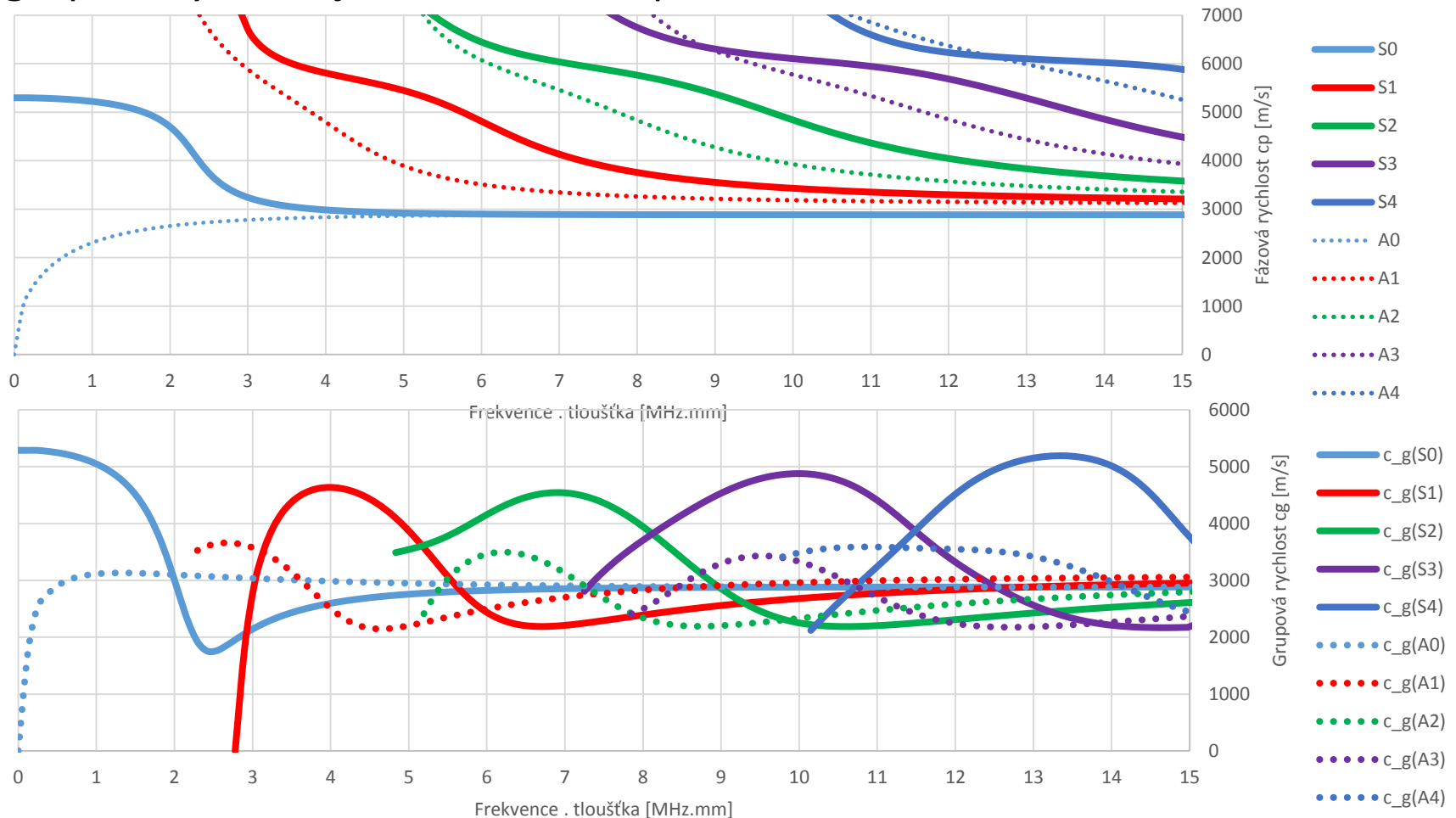
Typy ultrazvukových vln – Lambovy (deskové) vlny



Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových vln – Lambovy (deskové) vlny

- Fázová rychlost Lambových vln, počet módů pro danou frekvenci a jejich grupová rychlost je určována z disperzních křivek.



Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Kolmý dopad na rozhraní

- V souvislosti s kolmým dopadem na rozhraní dvou prostředí je možné se setkat s pojmy jako činitel odrazu:

$$R = \frac{p_R}{p_I} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

či činitel průchodu:

$$D = \frac{p_T}{p_I} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

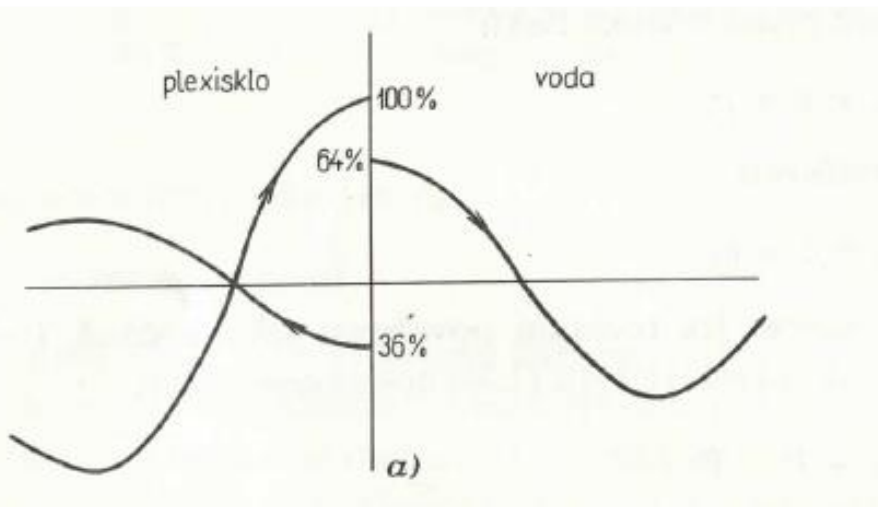
kde Z_1 resp. Z_2 vyjadřují akustické vlnové odpory prostředí 1 resp. 2.

- V zásadě mohou nastat dva případy:
 - v prvním z nich je akustický vlnový odpor prostředí 1 větší než prostředí 2, v takovém případě obdržíme zápornou hodnotu činitele odrazu, která nám indukuje změnu fáze odražené vlny.
 - V druhém případě, kdy vlna přechází z řidšího prostředí do prostředí hustšího se fáze odražené a průchozí vlny nemění. V obou případech však dochází ke změně amplitudy odražených i prošlých vln

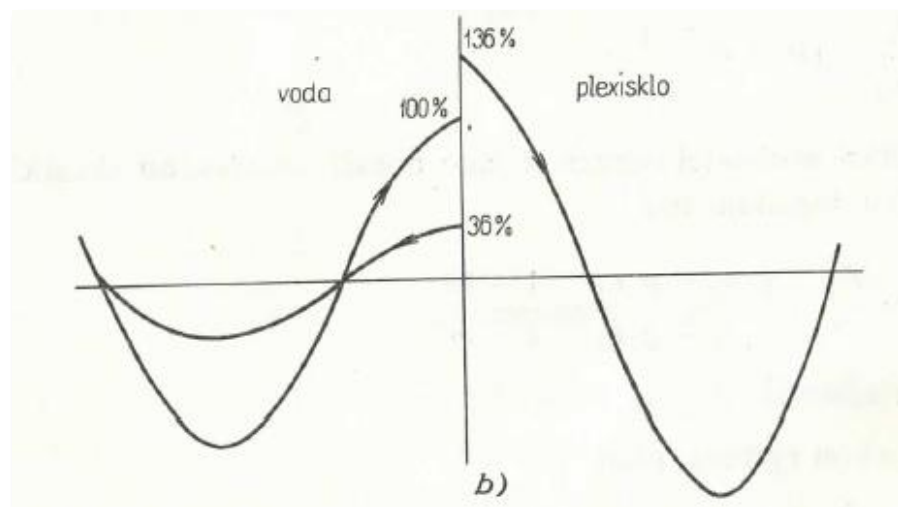
Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Kolmý dopad na rozhraní

Případ 1



Případ 2



Zdroj: Obráz, J.: Ultrazvuk v měřící technice. 2. upr. vyd. Praha: Stát. nakl. techn. lit., 1984. 485 s.

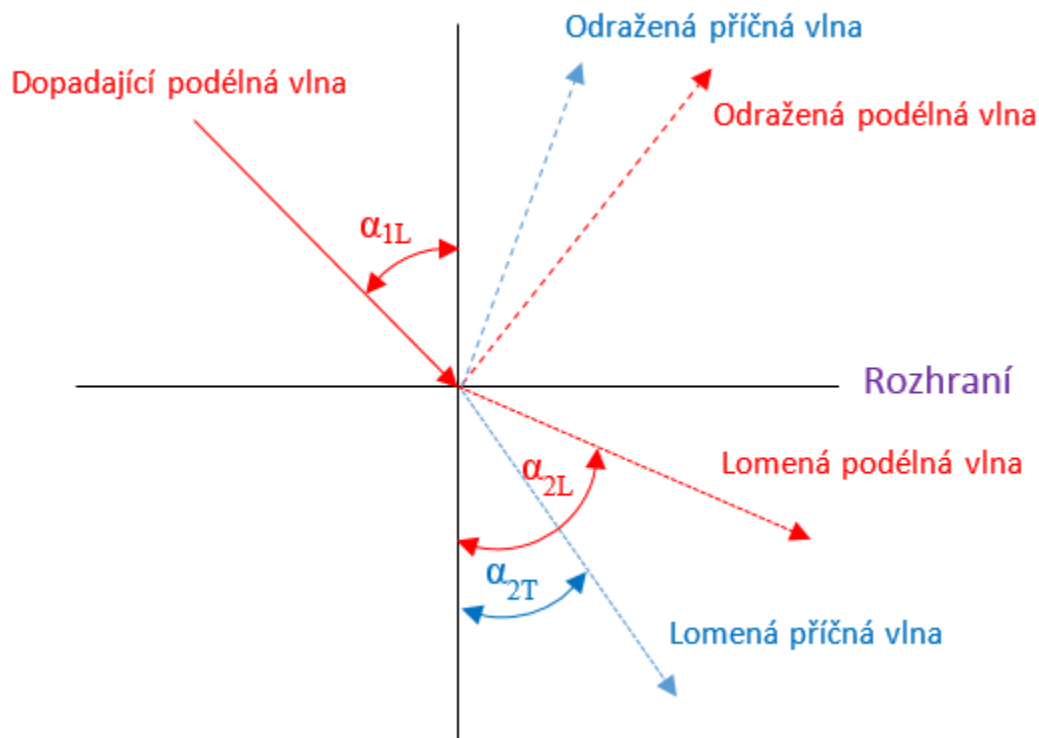
Pozn.: Výsledek amplitudy vyšší než 100% v případě 2 je na první pohled paradoxní. Provedeme-li však výpočet čísel odrazu R pro intenzitu, která je funkcí druhé mocniny akustického tlaku, bude zákon zachování energie platit.

$$R = \frac{I_R}{I_I} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}, D = 1 - R$$

Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Šikmý dopad na rozhraní

- Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k jejímu odrazu, lomu a popřípadě i transformaci v případě, že jedno z prostředí je schopné přenášet příčné vlny.



Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Šikmý dopad na rozhraní

- Vzájemný vztah úhlů všech složek měřených od normály k rozhraní a jejich rychlostí šíření je dán **Snellovým zákonem**:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

kde c vyjadřuje rychlost šíření daného typu vlny v prostředích 1 resp. 2 a α určuje úhel dané vlny v prostředích 1 resp. 2.

- Při postupném zvyšování úhlu α_{1L} nastane pro limitní hodnotu α_{1K} totální odraz podélné vlny v prostředí 2 tak, že bude platit $\alpha_{2L} = 90^\circ$. Úhel α_{1K} se nazývá první kritický úhel.
- Při prvním kritickém úhlu vymizí z prostředí 2 podélná vlna za současné existence podpovrchové podélné vlny a příčné vlny.

$$\alpha_{1K} = \arcsin \frac{c_{1L}}{c_{2L}}$$

Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Šikmý dopad na rozhraní

- Jestliže budeme dále zvyšovat úhel dopadu podélné vlny v prostředí 1 α_{1L} , nastane pro limitní hodnotu α_{2K} totální odraz příčné vlny v prostředí 2 tak, že bude platit $\alpha_{2T}=90^\circ$.
- Úhel α_{2K} se nazývá druhý kritický úhel. Při druhém kritickém úhlu vymizí z prostředí 2 příčná vlna za současné existence podpovrchové příčné vlny.

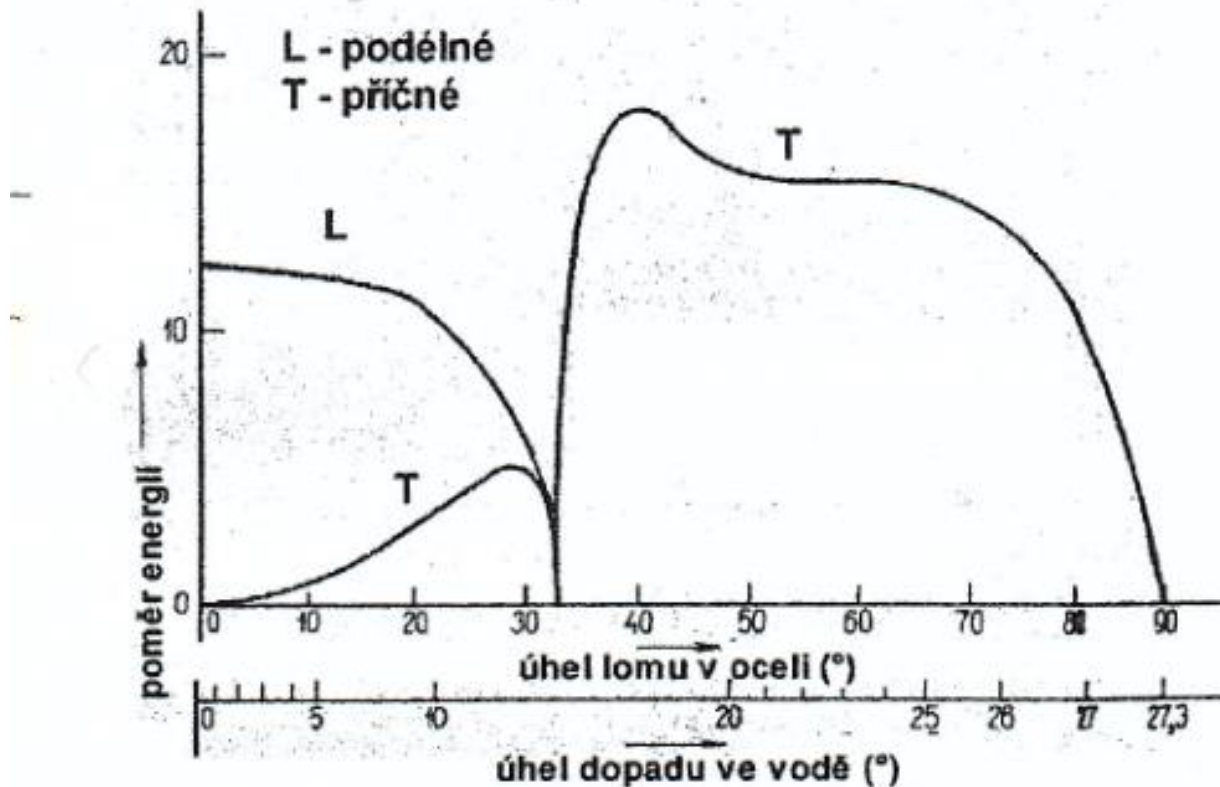
$$\alpha_{2K} = \arcsin \frac{c_{1L}}{c_{2T}}$$

- Při dalším navyšování úhlu dopadu podélné vlny v prostředí 1 nad hodnotu α_{2K} , vznikne v prostředí 2 Rayleighova povrchová vlna. Tento úhel se nazývá třetí kritický úhel, a je označován jako α_{3K} .

$$\alpha_{3K} = \arcsin \frac{c_{1L}}{c_R}$$

Měření ultrazvukem

Odraz a lom ultrazvukových vln - Šikmý dopad na rozhraní

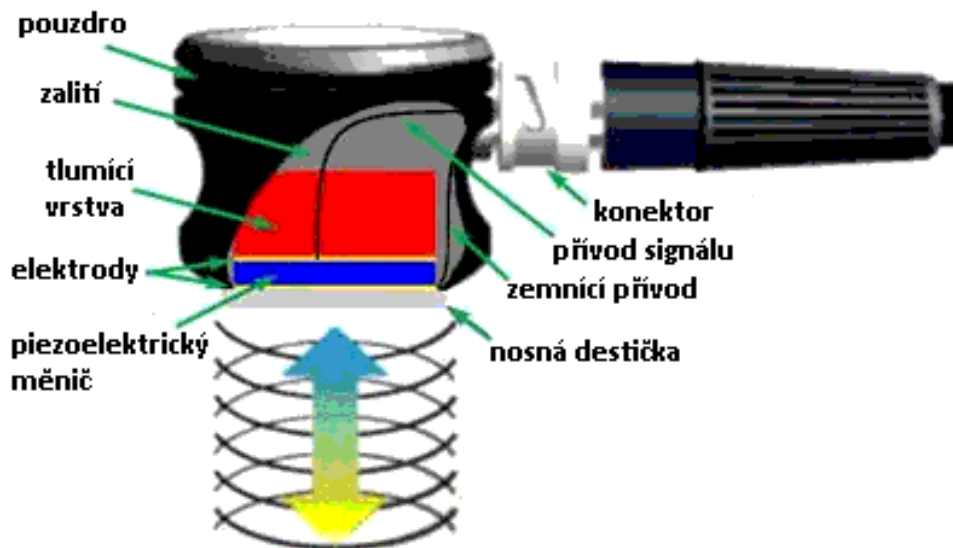


Obr. 1.22 - Závislost akustického tlaku lomených vlnových složek na úhlu dopadu pro rozhraní voda-ocel

Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů

- Na následujícím obrázku je znázorněna typická konstrukce ultrazvukového snímače. Hlavními částmi jsou pouzdro, měnič, tlumící tělísko a nosná destička.



Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů - Měníč

Piezoelektrické měniče

- Piezoelektrické měniče fungují na principu transformace elektrické energie na energii mechanickou a naopak.
- V případě **přímého piezoelektrického jevu** se **mechanická energie transformuje na elektrickou**, v případě **nepřímého piezoelektrického jevu** je tomu naopak - **energie elektrická se transformuje na energii mechanickou**.
- Typickými piezoelektrickými materiály jsou křemen, PVDF, PZT 5. Relace mezi tloušťkou měniče a jeho rezonanční frekvencí je následující:

$$f_R = \frac{c}{2d}$$

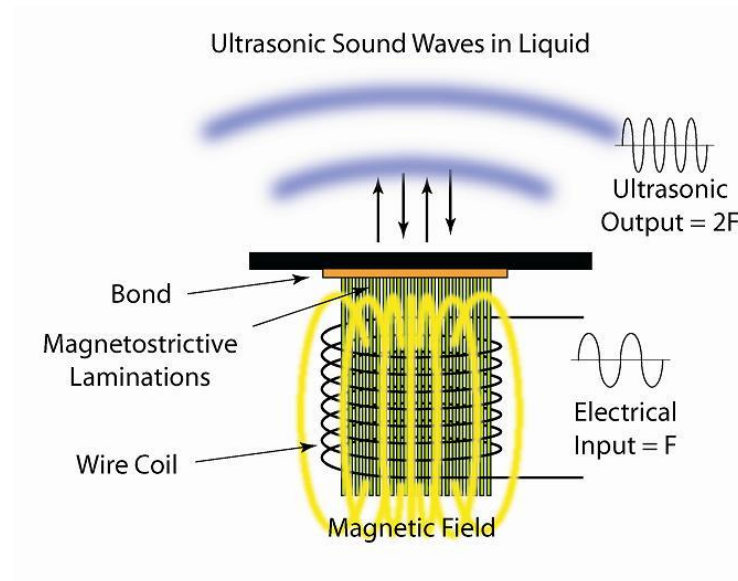
kde c je rychlost šíření podélné vlny v piezoelementu a d vyjadřuje tloušťku piezoelementu.

Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů - Měníč

Magnetostrikční měniče

- Magnetostrikční měniče využívají ke své činnosti magnetostrikci – fyzikální jev, kdy těleso z feromagnetického materiálu mění v magnetickém poli své rozměry.



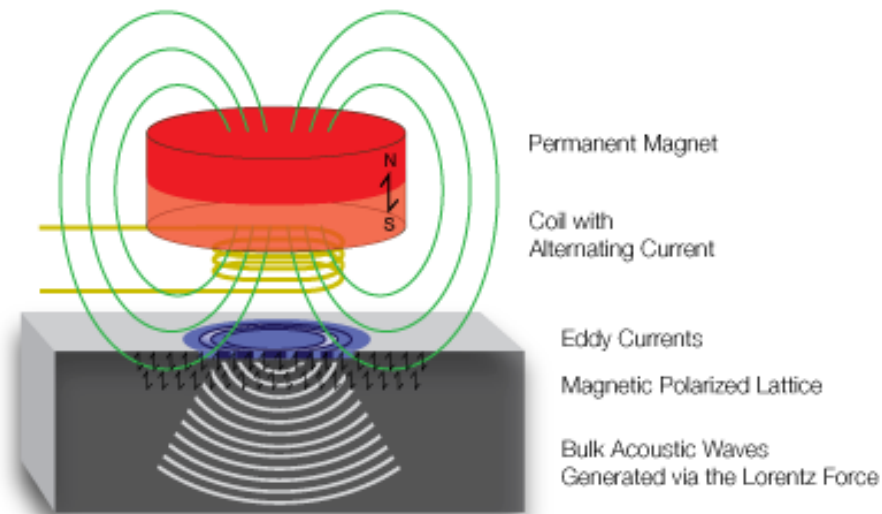
Zdroj: www.ctgclean.com

Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů - Měníč

Elektrodynamické měniče

- Elektrodynamické měniče ke své funkci využívají Lorentzovu sílu, která generuje ultrazvukové vlnění přímo v materiálu.
- V případě EMAT sond není nutný kontakt s povrchem. Podmínkou a zároveň jistým omezením použití EMAT sondy je elektricky vodivý materiál.



Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů - **Tlumení**

- U většiny sond je za měničem umístěno tlumící tělísko, které jednak fixuje samotný měnič a dále jej v potřebné míře tlumí.
- Tlumící tělísko je tvořeno z epoxidové pryskyřice plněné wolframovým práškem. Míra tlumení měniče ovlivňuje rozlišovací schopnost a dosah.

Širokopásmová sonda je charakterizována:

- přítomností tlumícího tělíska o vysokém tlumení
- dobrou rozlišitelností (pod povrchem a rovněž i v hloubce)
- menším dosahem
- širokým frekvenčním spektrem

Úzkopásmová sonda je charakterizována:

- přítomností tlumícího tělíska o malém tlumení
- špatnou rozlišitelností (pod povrchem a rovněž i v hloubce)
- větším dosahem
- užším frekvenčním spektrem

Měření ultrazvukem

Konstrukce ultrazvukových snímačů – Blízké a vzdálené pole

- Ultrazvukový svazek, který vystupuje ze snímače, je možné rozdělit na dvě dominantní oblasti – blízké a vzdálené pole.
- V blízkém poli (angl. **Near field**), též nazývaném jako Fresnelova oblast, dochází k cyklickému střídání maxim a minim akustického tlaku jak v podélném, tak i příčném směru vlivem interference vln.
- Blízké pole je zakončeno přítomností jednoho samostatného maxima s přibližně dvojnásobkem amplitudy akustického tlaku ve směru příčném.
- Tento rapidní nárůst amplitudy akustického tlaku je dán díky fokusaci ultrazvukového svazku. Délku blízkého pole je možné určit na základě vztahu:

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

- kde **N** je délka blízkého pole [mm], **D** je průměr měniče [mm], **f** je frekvence sondy [MHz] a **c** je rychlost šíření ultrazvukového svazku v daném prostředí [mm/μs].

Měření ultrazvukem

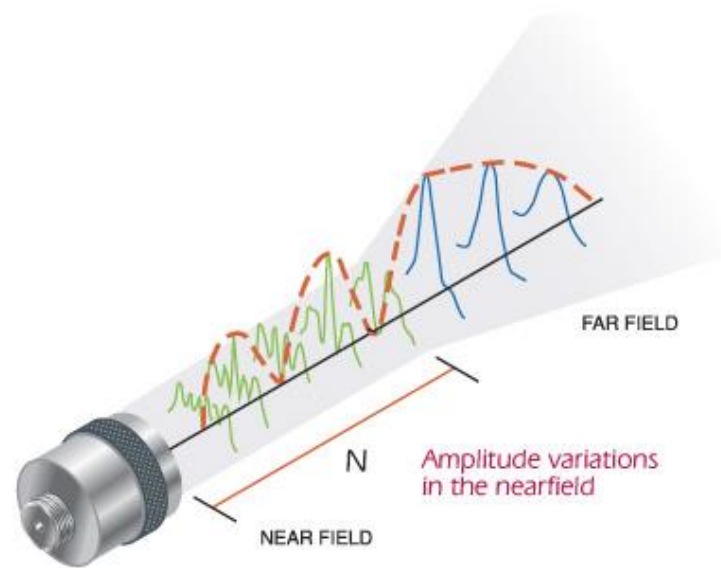
Konstrukce ultrazvukových snímačů – Blízké a vzdálené pole

- Ve vzdálenosti větší než délka blízkého pole již amplituda akustického tlaku klesá a její maximum je vždy na ose.

Ve vzdáleném poli (Frauhoferově oblasti) se rovněž uplatňuje rozevírání ultrazvukového svazku, které je možné určit na základě následujícího vztahu:

$$\sin(\varphi - 6dB) = 0,5 \frac{c}{f \cdot D}$$

kde φ určuje úhel rozevření svazku při poklesu amplitudy akustického tlaku na okraji vzhledem k ose o 6 dB, D je průměr měniče [mm], f je frekvence sondy [MHz] a c je rychlost šíření ultrazvukového svazku v daném prostředí [mm/μs].



Zdroj: www.olympus-ims.com

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových snímačů - Přímé sondy

- Přímé sondy jsou v drtivé většině zdrojem podélných vln. Ultrazvukový svazek prochází materiálem ve směru kolmém na povrch.
- Přímé sondy obsahují pouze jeden měnič, který plní funkci jak přijímače, tak i vysílače.

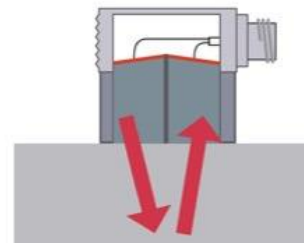
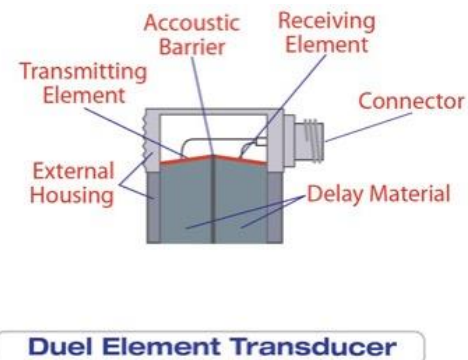
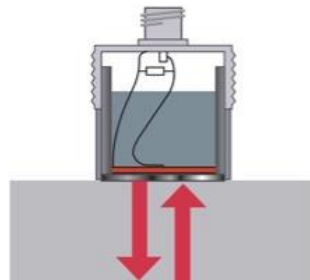
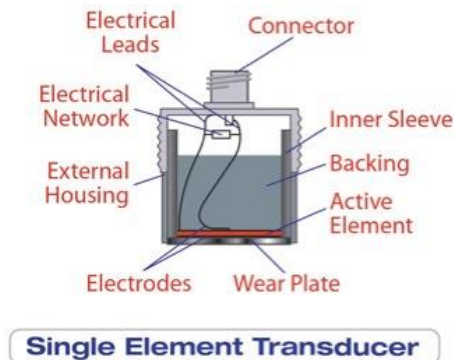


Zdroj: www.olympus-ims.com

Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových snímačů - Dvojité sondy

- Dvojité sondy se využívají v případě zkoušení výrobků s malou tloušťkou, resp. požadavkem na zkoušení v těsné blízkosti povrchu.
- Dvojitá sonda obsahuje ve společném pouzdru dva akusticky oddělené snímače, kdy jeden plní roli vysílače a druhý figuruje jako přijímač.



Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových snímačů - Úhlové sondy

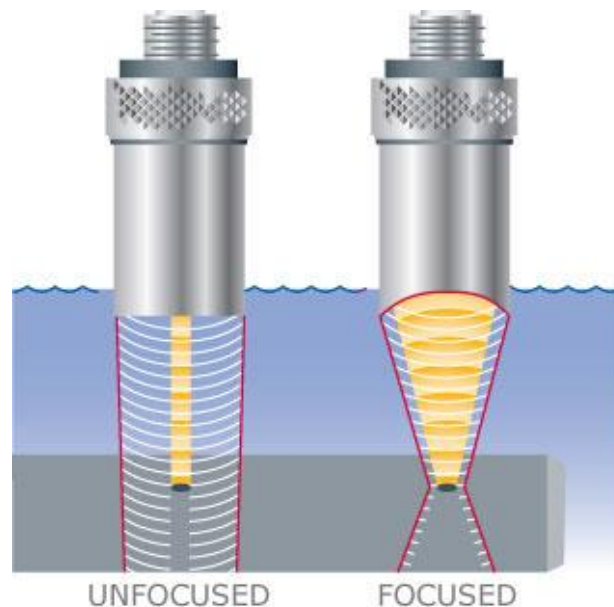
- Úhlové sondy se využívají pro účely prozvučování příčnými, podélnými popřípadě povrchovými vlnami. Generace požadovaného typu vlny se dosáhne vhodným úhlem sklonu měniče vůči normále k povrchu.
- Úhlové sondy se vyrábějí buď ve formě sondy s pevně zabudovaným měničem do šasi samotné sondy, nebo ve formě plexiklínu, do kterého je možné upnout přímou sondu.



Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových snímačů - Imerzní sondy

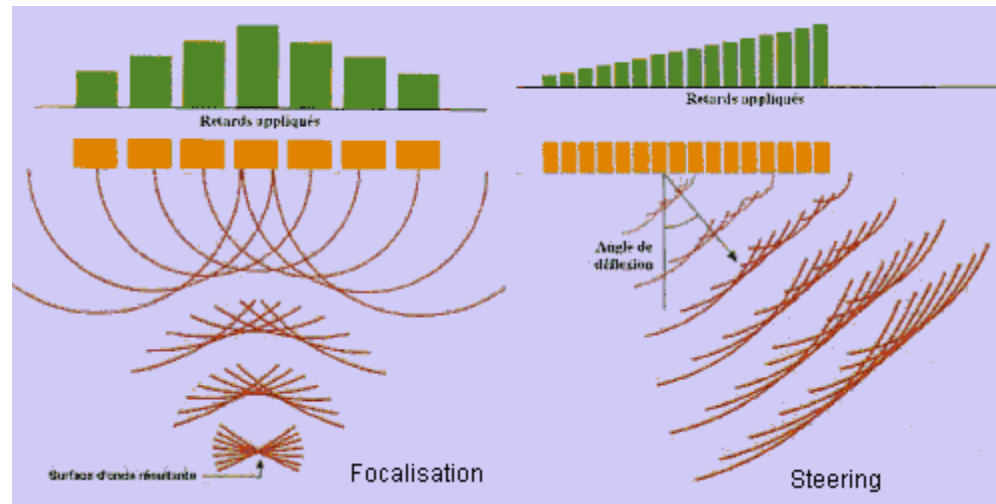
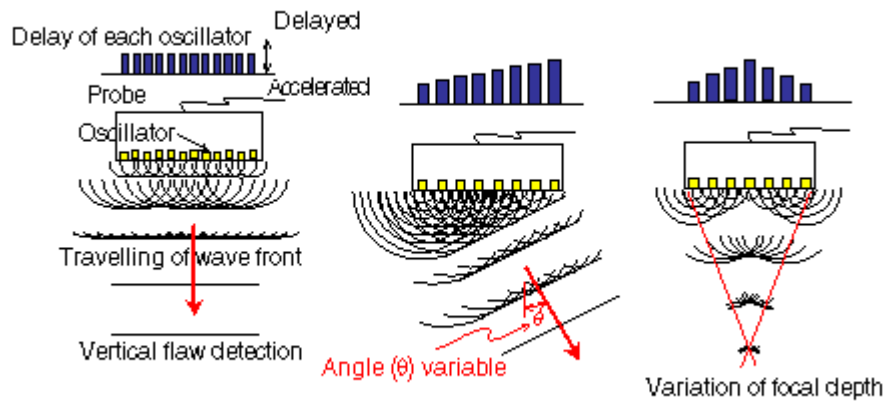
- V případě imerzního zkoušení (pod vodou) využíváme k tomu určené imerzní sondy. Imerzní sondy disponují vodotěsnou konstrukcí s nebo bez fokusace ultrazvukového svazku.
- Fokusace ultrazvukového svazku zvyšuje citlivost k reflektorům v ohnisku, mimo ohnisko je však citlivost k reflektorům nižší oproti nefokusované sondě.



Měření ultrazvukem

Typy ultrazvukových snímačů - Phased array sondy

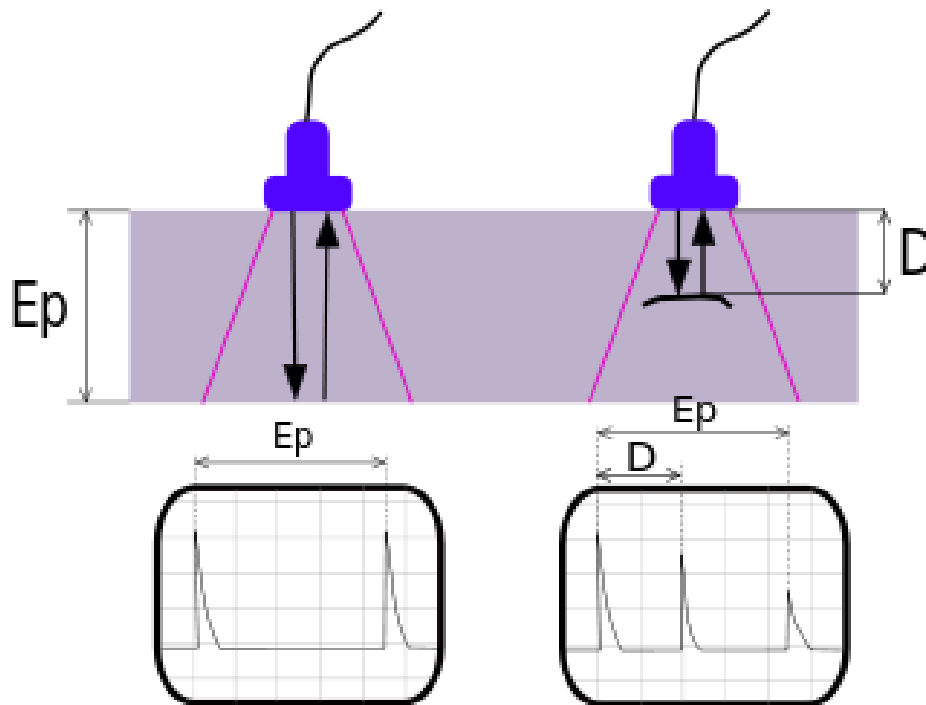
- Phased array sondy obsahují řadu segmentových měničů ve společném pouzdrů. Díky řízené generaci pulzů u jednotlivých měničů je možné téměř libovolně modifikovat výsledný tvar ultrazvukové vlny (fokusovat, naklápět atd.)



Měření ultrazvukem

Techniky zkoušení – Impulzní odrazová metoda

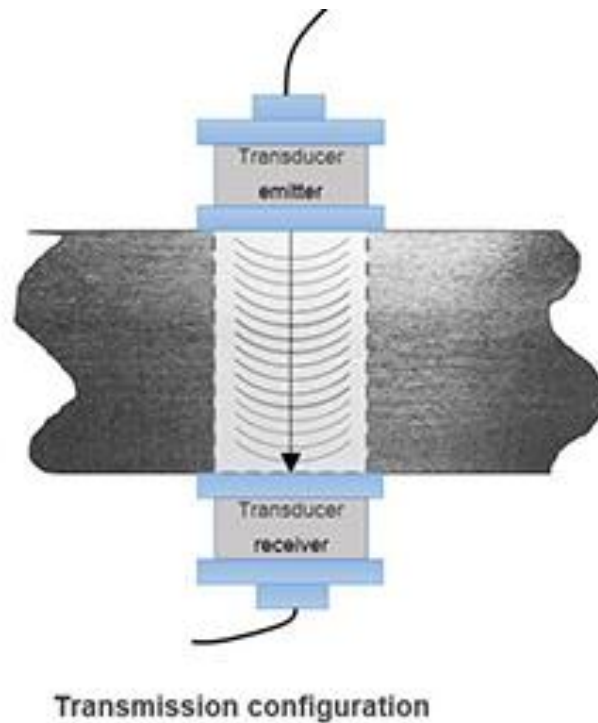
- Impulzní odrazová metoda je v praxi nejčastěji využívanou metodou. Princip spočívá ve vysílání krátkých ultrazukových impulzů, které se odrážejí od povrchů, případně vnitřních vad a putují zpět ke snímači, který figuruje rovněž jako přijímač.



Měření ultrazvukem

Techniky zkoušení – Průchodová metoda

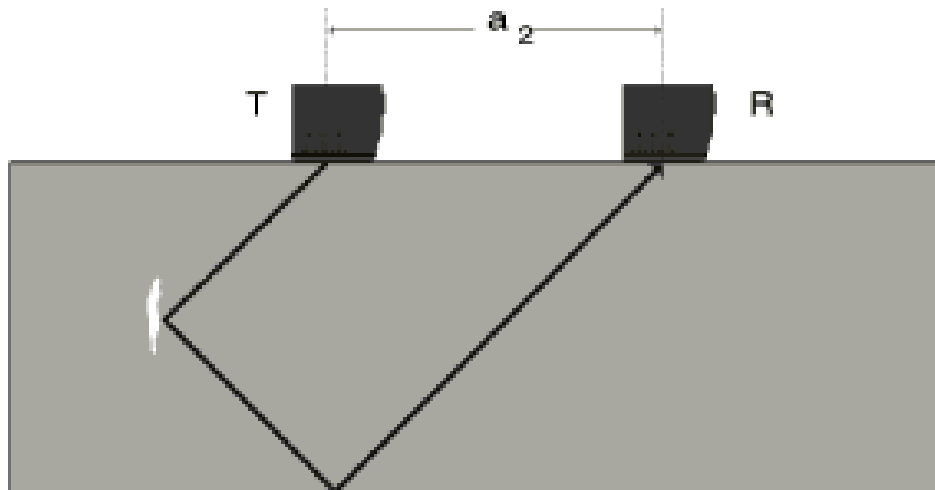
- U průchodové metody se využívají dva snímače – jeden plní funkci přijímače a druhý funkci vysílače. V případě přítomné vady dojde k poklesu echa.



Měření ultrazvukem

Techniky zkoušení – Tandemová metoda

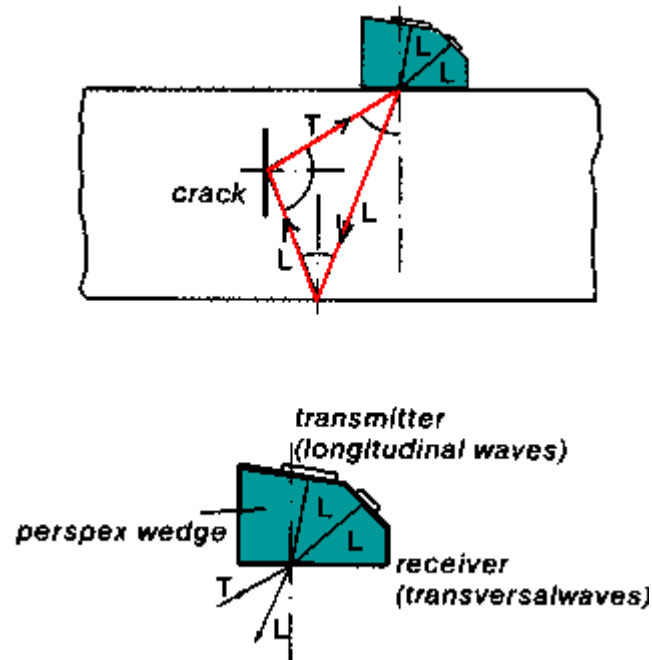
- Tandemová metoda se využívá především v případě zjišťování plošných necelistvostí orientovaných kolmo na stěnu ve svarech o větších tloušťkách. Metoda využívá dvě sondy (obvykle 45°), jedna z nich funguje jako vysílač a druhá jako přijímač.



Měření ultrazvukem

Techniky zkoušení – LLT metoda

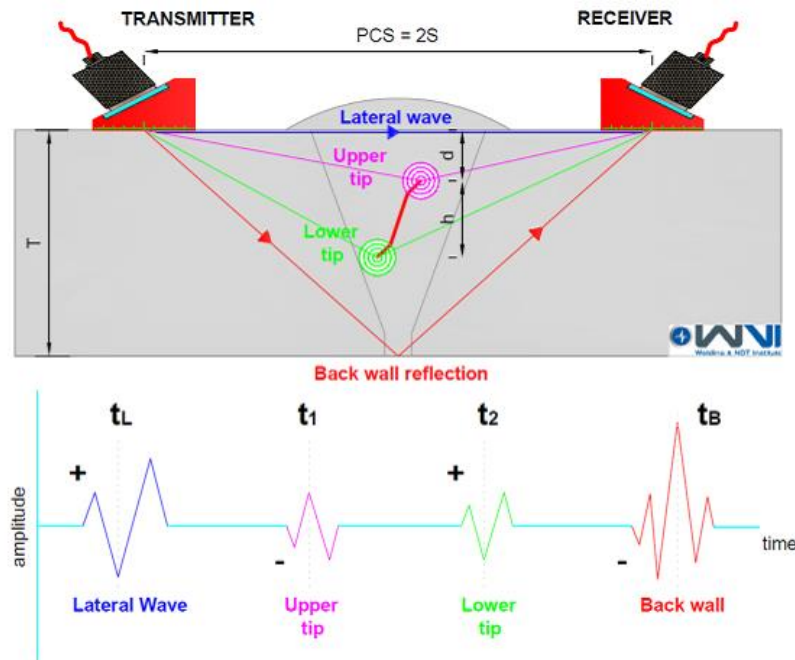
- LLT metoda je modifikací tandemové techniky, kdy je měnič přijímače a vysílače ve společném pouzdru. Název LLT metody je spojen přítomností dvou typů vln – podélných (Transversal) a příčných (Longitudinal).



Měření ultrazvukem

Techniky zkoušení – TOFD metoda (Time Of Flight Diffraction method)

- TOFD metoda je založena na difrakci ultrazvukových vln na okrajích nečelistvostí. Na základě rozdílu doby příchodu difrakčních vln z horního a spodního okraje trhliny je možné určit její vertikální rozměr.



Literatura

- [1] Školící materiály, Advanced Technology Group a.s.
- [2] Obraz, J.: *Ultrazvuk v měřicí technice*, 2. upravené vydání, Praha, 1984, 485 s
- [3] Kopec, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, Brno, CERM 2008, 571 s., ISBN 978-80-7204-591-4