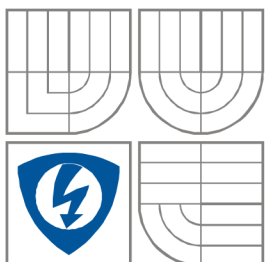


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

ULTRAZVUK V DIAGNOSTICE MATERIÁLŮ

ULTRASOUND IN MATERIAL DIAGNOSTICS

Bakalářská práce

Bachelor thesis

AUTOR PRÁCE

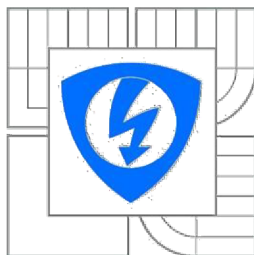
AUTHOR

Michal Kristek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Michal Kristek
Ročník: 3

ID: 155185
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Ultrazvuk v diagnostice materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte fyzikální základy ultraakustiky a seznamte se s možnostmi využití ultrazvuku v diagnostice materiálů. Zaměřte se zejména na oblast stanovení tloušťek elektrotechnických materiálů.

Seznamte se s komerčním ultrazvukovým zařízením fy. Olympus a osvojte si jeho ovládání. Provedte měření tloušťek u vybraných materiálů.

Sepište zprávu o dosažených výsledcích. Pojednejte o případných omezeních použité metody a zhodnoťte možnosti širšího využití dané metody v diagnostice materiálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je prostudovat fyzikální základy ultraakustiky a seznámit se s možnostmi využití ultrazvuku v diagnostice materiálů. Dále se seznámit s funkcemi a obsluhou ultrazvukového zařízení EPOCH LT od firmy OLYMPUS a provést měření tloušťek a rychlostí šíření ultrazvuku u vybraných materiálů.

Klíčová slova

Ultrazvuk, defektoskopie, NDT

Abstract

Objectives of the bachelor thesis are to study the physical basis of ultra acoustic and comprehend the basics of ultrasound usage in diagnostic of materials. I should also become familiar with functions and usage of ultrasound device EPOCH LT made by OLYMPUS and perform measurement of thickness and speed of ultrasound spreading in selected materials.

Keywords

Ultrasound, defectoscopy, NDT

Bibliografická citace mé práce

KRISTEK, M. *Ultrazvuk v diagnostice materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 26 s. Bakalářská práce. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že moji bakalářskou práci na téma „**Ultrazvuk v diagnostice materiálů**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. 6. 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Kazellemu, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 4. 6. 2015

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Fyzikální podstata ultrazvuku	9
2.1 Popis vlny	9
2.2 Druhy vlnění	10
2.3 Tvar vlnoploch	10
2.4 Akustický tlak	11
2.5 Intenzita vlnění.....	11
2.6 Akustický výkon	11
3. Ultrazvukové vlastnosti prostředí	12
3.1 Akustická impedance.....	12
3.2 Tlumení ultrazvukového vlnění	12
3.3 Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v různých látkách.....	12
3.3.1 Rychlost ultrazvuku v kapalinách	13
3.3.2 Rychlost ultrazvuku v plynech.....	13
3.3.3 Rychlost ultrazvuku v pevných látkách.....	14
3.4 Odraz a lom.....	15
3.4.1 Snellův zákon.....	15
4. Ultrazvuková sonda	16
4.1 Typy ultraakustických měničů	16
4.1.1 Piezoelektrické měniče	16
4.2 Základní parametry ultrazvukových sond	18
4.3 Možnosti vnitřního uspořádání sond – Phase Array	18
4.4 Metody měření NDT	19
4.4.1 Průchodová metoda	19
4.4.2 Odrazová metoda	19
4.4.3 Příklad aplikace.....	19
5. Metody zobrazení ultrazvukových signálů	21
5.1 A zobrazení	21
5.2 B zobrazení	21
5.3 C zobrazení	21
5.4 D zobrazení	21

5.5	F zobrazení.....	22
5.6	P zobrazení.....	22
5.7	TOFD zobrazení (Time of flight-diffraction)	22
6.	Vyhodnocovací diagramy	23
7.	Ultrazvukové zařízení EPOCH LT	24
7.1	Vybavení a funkce.....	24
7.1.1	Napájení.....	24
7.1.2	Ovládání.....	24
7.1.3	Princip činnosti ultrazvukové sondy	25
7.1.4	Kalibrace.....	26
7.1.5	Kalibrační blok.....	26
7.1.6	Záznamník dat.....	26
7.1.7	Gage View Interface.....	27
8.	Praktická část.....	28
8.1	Určení rychlosti UZ ve vybraných materiálech	28
8.2	Měření rychlosti UZ ve vodě	29
8.3	Závislost rychlosti UZ u vzorků s příměsí vápence	31
8.4	Měření UZ v kapalině.....	32
8.4.1	Plastová nádoba.....	32
8.4.2	Skleněná nádoba.....	33
8.5	Závislost rychlosti UZ ve vodě s rostoucí příměsí ethanolu.....	34
9.	Závěr	36
10.	Seznam použité literatury.....	37

Seznam obrázků

Obr. 1 Spektrum kmitočtů [11]	9
Obr. 2 Popis parametrů zvukové vlny	9
Obr. 3 Odraz a lom ultrazvukové vlny [7].....	15
Obr. 4 Vliv deformace na generování elektrického náboje.	17
Obr. 5 Grafické znázornění funkce různých typů sond [12].....	18
Obr. 6 a) Přímé zkoušení na krátkou vzdálenost b) Zkoušení 1. echem c) Zkoušení 2. echem	19
Obr. 7 Různé typy defektů sváru [13]	20
Obr. 8 Metody zkoušení – přímé a podélné [13]	20
Obr. 9 Metody zobrazení ultrazvukových signálů	22
Obr. 10 Metoda zobrazení TOFD[15]	23
Obr. 11 Klávesnice ultrazvukového zařízení EPOCH LT	25
Obr. 12 Konstrukční znázornění sondy [12].....	25
Obr. 13 Kalibrační přípravek k zařízení EPOCH LT	26
Obr. 14 Grafické vyobrazení skleněné nádoby a naměřené rozměry.....	29
Obr. 15 Použitá laboratorní nádoba.....	29
Obr. 16 Výsledný průběh ultrazvukového vlnění v nádobě s vodou	30
Obr. 17 Grafická závislost změny rychlosti ultrazvuku v polypropylenu s rostoucí příměsí vápence.....	31
Obr. 18 Tvar a tloušťka stěny použité plastové nádoby	32
Obr. 19 Tvar a tloušťka stěny použité skleněné nádoby	33
Obr. 20 Naměřený průběh UZ vlnění ve skleněné nádobě naplněné vodou	33
Obr. 21 Grafická závislost změny rychlosti ultrazvuku s rostoucí příměsí ethanolu ve vodě..	34
Obr. 22 Použitá plastová nádoba.....	35
Obr. 23 Naměřený průběh v ethanolu	35

Seznam tabulek

Tab. 1 Tabulka rychlosti šíření ultrazvuku v různých materiálech [1].....	14
Tab. 2 Tabulka naměřených hodnot rychlostí ultrazvuku v různých materiálech	28
Tab. 3 Tabulka naměřených hodnot tloušťky a rychlosti UZ v předložených materiálech.....	31
Tab. 4 Tabulka naměřených hodnot rychlosti ultrazvuku s rostoucí příměsí ethylenu.....	34

1. Úvod

Ultraakustické vlny mají v současné době obrovský význam. Svými vlastnostmi jsou vhodné pro širokou škálu aplikací. Výhodou je jistě to, že se ultrazvukové vlny dostanou i do míst, kam se nelze běžně dostat. Cílové využití závisí především na intenzitě vlnění. Intenzita totiž udává, zda má vlnění destruktivní nebo nedestruktivní charakter. Z toho důvodu se ultrazvukové vlnění dělí na aktivní (destruktivní) a pasivní (nedestruktivní).

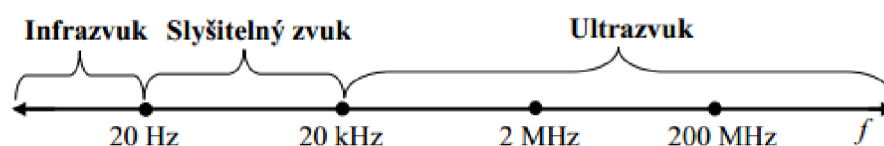
Aktivní ultrazvuk nachází uplatnění především ve výrobním procesu. Jedná se o elektrotechnické odvětví, kde je využíván např. k čištění po pájecím procesu nebo při kontaktování čipů k nosným substrátům, nebo ve strojírenství.

Tato práce se však zabývá pasivním typem ultrazvukového vlnění. Pasivním je označován z toho důvodu, že na rozdíl od aktivního typu nemění fyzikální ani chemické vlastnosti zkoumaných materiálů. Tento typ ultrazvukového vlnění je využíván ve velké míře ve zdravotnictví. Zde je používán k diagnostice ale také k samotnému léčení. Dalším odvětvím, kde je pasivní ultrazvuk využíván, je takzvaná NDT měřicí technika. Jedná se o nedestruktivní defektoskopii.

Nedestruktivní defektoskopie je diagnostická metoda, která kontroluje jakost výrobku během výrobního procesu, po něm a také v provozu. Tato metoda vyhledává vnitřní i povrchové vady materiálů, aniž by nějak narušila vlastnosti zkoumaných materiálů. Její využití lze nalézt téměř všude, kde je zapotřebí kontrolovat stav materiálu. Například stav mostů nebo také v jaderném či leteckém průmyslu. Z toho lze usoudit, že se jedná o velmi důležitý a přesný typ měřicí metody.

2. Fyzikální podstata ultrazvuku

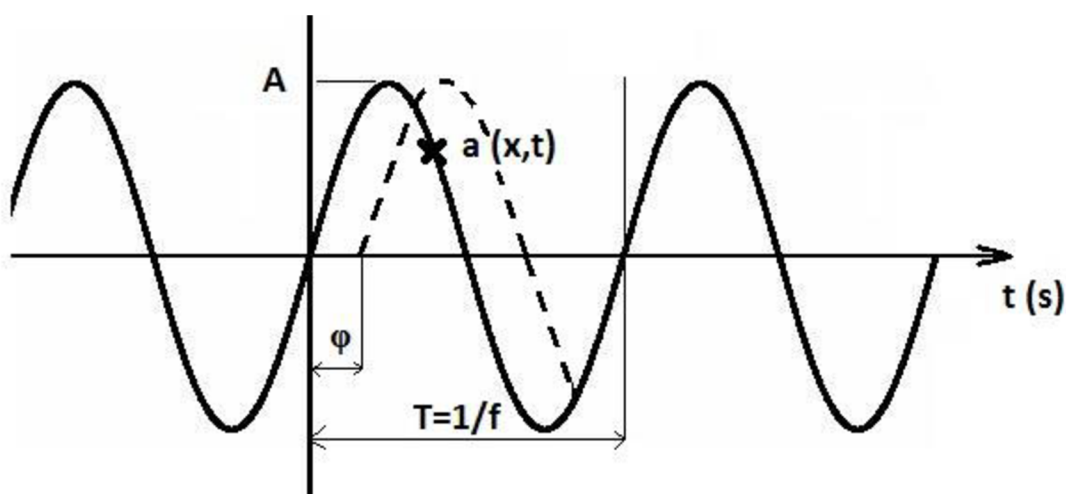
Vědní obor, zabývající se vznikem, šířením a samotnou podstatou zvuku je akustika, která zároveň patří mezi nejstarší vědní obory. Samotný zvuk je mechanické vlnění šířící se prostorem. Tyto vlny se mohou šířit ve všech skupenstvích: pevném, kapalném i plynném. Zvuková vlna vzniká při mechanickém kmitání částic daného prostředí. Tyto částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh. V případě ultrazvukového vlnění se jedná o kmitání s frekvencí vyšší než 20kHz.



Obr. 1 Spektrum kmitočtů [11]

Ultrazvukové vlnění se šíří prostředím určitou rychlostí a s určitou energií. Tato energie se projevuje např. změnami tlaku. Jedna z důležitých vlastností ultrazvuku je intenzita vlnění. Vlnění s nízkou hodnotou intenzity má nedestruktivní charakter, což znamená, že neovlivňuje fyzikální ani chemické vlastnosti prostředí, kterým prochází. Tento typ ultrazvuku je označován jako pasivní. Uplatnění nalézá převážně v měření a diagnostice. Naopak vlny s vysokou hodnotou intenzity mají vliv na prostředí, kterým se šíří. Tento typ ultrazvuku je označován jako aktivní. Jeho vlastností se využívá převážně ve výrobě. Například v obrábění, svařování kovů, v elektrotechnice nebo při čištění.

2.1 Popis vlny



Obr. 2 Popis parametrů zvukové vlny

kde $a(x,t)$ - okamžitá hodnota výchylky
 A [x] - amplituda výchylky
 T [s] - perioda kmitu
 f [Hz] - frekvence vlnění
 φ [rad] - fáze
 ω [s^{-1}] - kruhová frekvence

Vlnová rovnice

$$\frac{\delta^2 a(x,t)}{\delta t^2} = v \cdot \frac{\delta^2 a(x,t)}{\delta x^2} \quad (2.1)$$

Řešením rovnice (2.1) obdržíme:

$$a(x,t) = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \cdot \sin (\omega t - \varphi) \quad (2.2)$$

Rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy, tzv. akustická rychlost, je dána vztahem:

$$v_a = \frac{da(x,t)}{dt} = \omega \cdot A \cdot \cos (\omega t - \varphi) \quad (2.3)$$

Vlnová délka

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T \quad (2.4)$$

2.2 Druhy vlnění

- podélné (šíří se ve všech skupenstvích)
- příčné (šíří se pouze v pevných látkách)
- povrchové
- deskové

2.3 Tvar vlnoploch

- rovinné
- kulové
- válcové

2.4 Akustický tlak

Ultrazvuková vlna vyvolává změny tlaku postupným zředováním a zhušťováním prostředí. Tyto změny popisujeme jako akustický tlak P_A .

Amplituda

$$P_A = \omega \cdot A \cdot Z_A = \omega \cdot A \cdot \rho \cdot v \quad (2.5)$$

kde Z_A [Ω] - akustická impedance
 ρ [kg/m³] - hustota prostředí

Celkový tlak p_c

$$p_c = p_s \pm p_A = p_s \pm \omega \cdot A \cdot \rho \cdot v \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2.6)$$

2.5 Intenzita vlnění

Intenzita ultrazvukového vlnění vyjadřuje mohutnost šíření energie a definuje se jako výkon P , který prochází jednotkovou plochou S , která je kolmá na směr šíření vlnění. Pro intenzitu ultrazvukového vlnění platí vztah:

$$I_A = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$

kde P [W] - akustický výkon
 S [m²] - plocha, kterou prochází vlnění

V praxi se dělí ultrazvukové vlnění podle intenzity:

- s nízkou intenzitou do $5 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- se střední intenzitou od $5 \cdot 10^3$ do $1 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- s vysokou intenzitou od $1 \cdot 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a víc

2.6 Akustický výkon

Je to výkon přenášený ultrazvukovým vlněním a odpovídá energii zvukových vln E_A vyzařených zdrojem dopadajících na plochu za jednu sekundu.

Tento vztah je vyjádřen zde:

$$P = \frac{dE_A}{dt} = I_A \cdot S \quad (2.8)$$

3. Ultrazvukové vlastnosti prostředí

Využití ultrazvukové technologie závisí na zdroji ultrazvukového záření a na prostředí, kterým se šíří. Všechna prostředí se vyznačují charakteristickými vlastnostmi, mezi které patří impedance, absorpce a rychlost šíření.

3.1 Akustická impedance

Akustická impedance prostředí je dána podílem efektivních hodnot tlaku a rychlosti nebo součinem hustoty prostředí a rychlosti zvuku v daném prostředí.

$$Z_A = \frac{p_{ef}}{v_{ef}} = \rho \cdot v \quad (3.1)$$

3.2 Tlumení ultrazvukového vlnění

Intenzita ultrazvukového vlnění klesá se vzrůstající vzdáleností od zdroje. Je to zapříčiněno geometrickými faktory (odraz, lom, ohyb, atd.) a absorpcí vlnění. Geometrické tlumení je zapříčiněno především nehomogenitou prostředí, průchodem různými typy prostředí, délkou vysílané vlny atd. Absorpce vlnění je zapříčiněna vnitřním třením částic, které se v jednotlivých prostředích vyskytují, čímž dochází k přeměně mechanické energie na tepelnou.

Tlumení v plynech a kapalinách je způsobeno třemi faktory

- viskozitou prostředí (δ_1)
- vedením tepla (δ_2)
- absorpčními mechanismy mezi molekulami (δ_3)

Tlumení v pevných látkách je způsobeno

- přeměnou ultrazvukové energie na teplo vlivem vnitřního tření
- rozptylem ultrazvukového vlnění (ohyb, lom)

3.3 Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v různých látkách

Šířením ultrazvukového vlnění dochází ke střídavým změnám tlaku okolního prostředí. U plyných a kapalných látek závisí rychlost šíření na tlaku a hustotě prostředí. V kapalinách a plynech jsou malé mezimolekulární vazby a tak se těmito typy prostředí šíří pouze podélné vlny, protože proti nim nevzniká smykové napětí. Zhušťování a zředování částic u obou

prostředí probíhá bez výměny tepla, tedy adiabaticky. U pevných látek jsou mezimolekulární vazby mnohem vyšší, proto kromě změny tlaku dochází také ke smykovému napětí. Z toho plyne, že pevnou látkou šíří vlny podélně i příčně.

3.3.1 Rychlost ultrazvuku v kapalinách

Vzorec pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v kapalinách:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{AD} \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{\kappa}{\beta_{IZ} \cdot \rho}} \quad (3.2)$$

kde	K [Pa]	-	adiabatický modul objemové pružnosti
	ρ [kg·m ⁻³]	-	hustota plynu
	β_{AD} [Pa ⁻¹]	-	adiabatická stlačitelnost
	β_{IZ} [Pa ⁻¹]	-	izotermická stlačitelnost
	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ [-]	-	Poissonova konstanta (poměr tepel při stálém tlaku a stálém objemu)

S měnící se teplotou dochází ke změně rychlosti šíření ultrazvuku v kapalinách. Změnu rychlosti UZ v závislosti na teplotě okolí vyjadřuje vztah:

$$v = v_0 + \gamma \cdot (T - T_0) \quad (3.3)$$

kde	v_0 [m·s ⁻¹]	-	rychlost šíření při počáteční teplotě T_0
	γ [m·s ⁻¹ ·K ⁻¹]	-	absolutní teplotní součinitel
	T [K]	-	teplota

3.3.2 Rychlost ultrazvuku v plynech

Vzorec pro výpočet rychlosti šíření je totožný se vzorcem (3.2)

Změnu rychlosti UZ v závislosti na teplotě vzduchu vyjadřuje vztah:

$$v = v_0 \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad (3.4)$$

Změnu rychlosti UZ v závislosti na vlhkosti vzduchu vyjadřuje vztah:

$$v = v_0 \cdot (1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi) \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad (3.5)$$

kde	φ [%]	-	relativní vlhkost
-----	---------------	---	-------------------

3.3.3 Rychlost ultrazvuku v pevných látkách

Pevnou látkou se mohou šířit vlny podélné, stejně jako v kapalných a plynných látkách, ale také příčné. K tomuto jevu dochází vlivem působení smykového napětí. Rychlost ultrazvukových vln je dána typem vlnění.

Pro výpočet rychlosti šíření podélné vlny platí vzorec:

$$v_L = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}} \quad (3.6)$$

kde E_p [Pa] - modul pružnosti v tahu
 ρ [kg·m⁻³] - hustota prostředí

Pro výpočet rychlosti šíření příčné vlny platí vzorec:

$$v_T = \sqrt{\frac{G_s}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_p}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \kappa)}} \quad (3.7)$$

kde G_s [Pa] - modul pružnosti ve smyku

Tab. 1 Tabulka rychlosti šíření ultrazvuku v různých materiálech [1]

Materiál	v (in/μs)	v (m/s)	Materiál	v (in/μs)	v (m/s)
Oxid hlinitý Al ₂ O ₃ , 99,5%	0,4013	10190	Hořčík	0,227	5770
Hliník, rolovaný	0,253	6420	Molybden	0,247	6250
hliník, 6061T6	0,251	6383	Nikl	0,2377	6040
Berylium	0,5073	12890	Nylon	0,1031	2735
Mosaz žlutá, 70 Cu, 30 Zn	0,185	4700	Polyetylén	0,0705	1950
Měď, rolovaná	0,1972	5010	Polystyrén	0,0925	2350
Dural, 17S	0,2487	6320	Silikonová pryž	0,0373	948
Tavený křemen	0,2349	5968	Nerezová ocel	0,2278	5790
Sklo korundové	0,2008	5100	Titan	0,237	5990
Sklo flintové	0,1567	3980	Wolfram	0,2129	5410
Sklo, pyrex	0,222	5640	Uran	0,133	3370
Ocel	0,2345	5960	Voda	0,059	1498
Olovo	0,0771	1960	Zinek	0,1657	4210

*Tabulkové hodnoty jsou převzaty z materiálů, které jsou součástí vybavení zařízení EPOCH LT.

3.4 Odraz a lom

V homogenním prostředí se akustická vlna šíří přímočaře, narazí-li však na rozhraní dvou prostředí, dojde k jednomu z následujících jevů. Každé prostředí je charakterizováno určitým vlnovým odporem Z_x . V případě, že se vlnové odpory obou prostředí shodují, pokračuje vlna dále v přímočarém pohybu bez náznaku lomu nebo ohybu. Jsou-li tyto odpory různé, nastane jev popisovaný Snellovým zákonem.

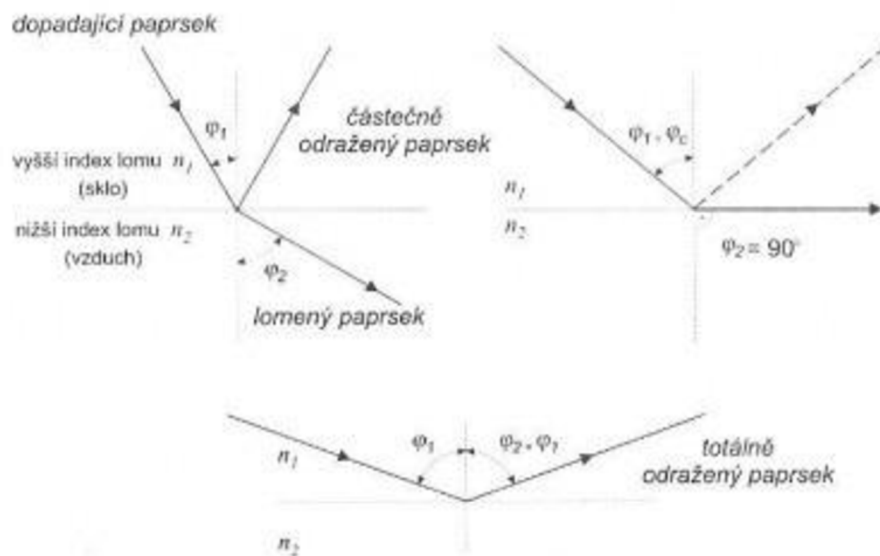
3.4.1 Snellův zákon

Dopadne-li vlna na rozhraní dvou prostředí s indexy lomu n_1 a n_2 pod úhlem φ a je-li toto rozhraní rovinné, lze popsat odraz a lom vlny touto rovnicí:

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (3.8)$$

z toho plyne:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.9)$$



Obr. 3 Odraz a lom ultrazvukové vlny [7]

Z obrázku je patrné, že při dopadu vlny na rozhraní dojde k jejímu částečnému odrazu, kdy $\varphi_1 = \varphi_1'$, a také lomu pod úhlem φ_2 . Existuje mezní úhel φ_m , což je maximální úhel dopadu, při kterém ještě dochází k lomu vlnění.

Vztah pro výpočet hodnoty φ_m :

$$\varphi_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (3.10)$$

Je-li úhel dopadu větší než tento mezní úhel, dojde k úplnému (totálnímu) odrazu.

4. Ultrazvuková sonda

Je to elektroakustické zařízení, které slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou (vysílač) a opačně (přijímač). Princip přeměny závisí na typu použitého měniče uvnitř sondy.

4.1 Typy ultraakustických měničů

- a) Mechanické měniče
 - píšťaly
 - sirény
 - speciální měniče

- b) Elektromechanické měniče
 - piezoelektrické
 - elektrodynamické
 - magnetostrikční

Mechanické měniče nejsou příliš rozšířené. Používají se především pro měření rychletekoucích kapalin a plynů, kde dochází k přeměně energie přímo na ultrazvukové vlnění. Mají omezený rozsah frekvenčního, výkonového pásma a účinnosti, ale jsou konstrukčně jednoduché.

4.1.1 Piezoelektrické měniče

Funkce piezoelektrických měničů je založena na piezoelektrickém jevu, což je schopnost krystalu generovat elektrický náboj při jeho deformaci a opačně, kdy vlivem elektrického pole dochází k deformaci krystalu. Tento jev se vyskytuje pouze u krystalů bez středu symetrie. Nejčastěji používaným materiálem je křemen (SiO_2), u kterého se piezoelektrické vlastnosti vyskytují do teploty 573°C . Při vyšších teplotách tuto vlastnost ztrácí. Jedná se o vratný děj.

Rozdělení podle struktury je následující:

- monokrystalické piezoelektrické látky (SiO_2 , BaTiO_3)
- polykrystalické piezoelektrické látky
- organické polymery (PVC, PVF)

Tyto měniče jsou součástí takzvaných ultrazvukových sond.

Podle vnitřního uspořádání rozlišujeme sondy:

- přímé
- úhlové
- dvojitě
- fokusační
- speciální (vodotěsné imerzní sondy)

Popis funkce ultrazvukové sondy s piezoelektrickým měničem je znázorněn v kapitole číslo 7.1.3 *Princip činnosti ultrazvukové sondy*.

Piezoelektrický element tvoří výbrus získaný z krystalu křemene. Hrany vyřezané destičky jsou rovnoběžné s osami X, Y a Z. Piezoelektrický jev závisí na směru deformace.

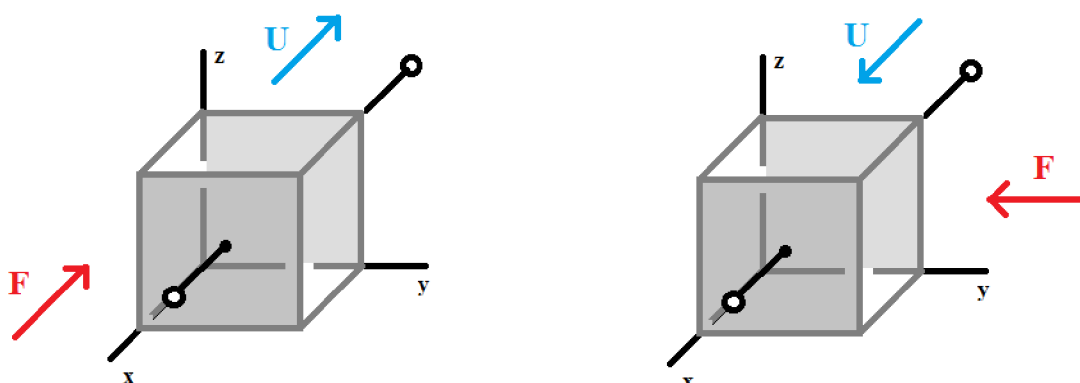
Působí-li na destičku deformace ve směru osy X, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na tuto osu se objevují elektrické náboje. Tyto vzniklé elektrické náboje mají velikost:

$$Q = K_p \cdot F \quad (3.11)$$

kde K_p [C/N] - piezoelektrická konstanta

Působí-li na krystal deformace o síle F a je-li její směr rovnoběžný s osou Y, vznikají opět elektrické náboje na plochách kolmých na osu X, avšak jejich polarita je opačná než v předchozím případě. Velikost těchto elektrických nábojů je popsána vztahem:

$$Q = -K_p \cdot F \quad (3.12)$$



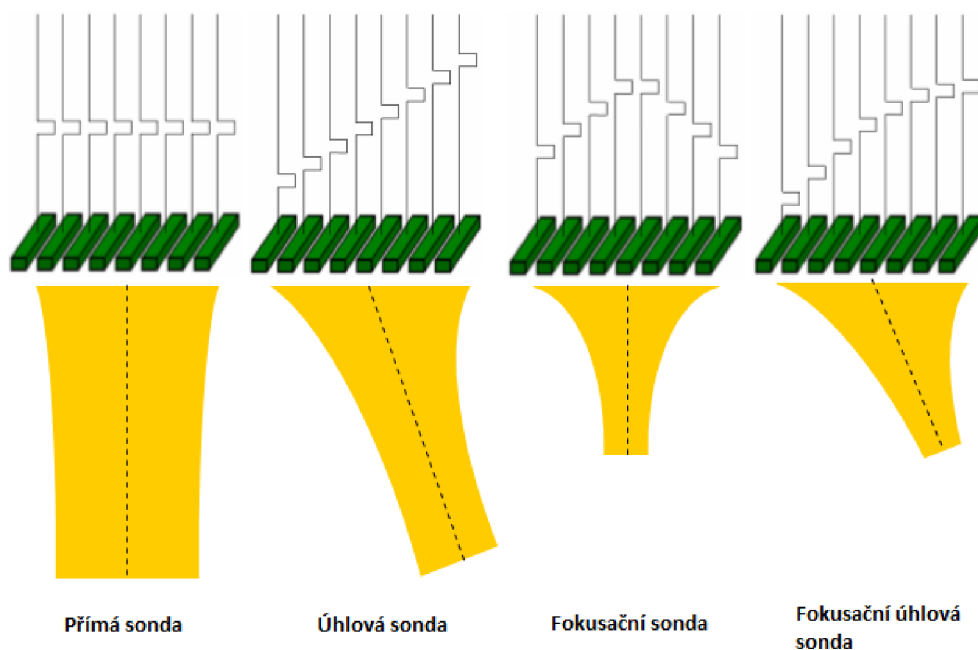
Obr. 4 Vliv deformace na generování elektrického náboje.

4.2 Základní parametry ultrazvukových sond

- jmenovitá frekvence (udává výrobce)
- šířka pásma
- délka blízkého pole
- divergenční úhel
- jmenovitý úhel sondy
- ohnisko (u fokusačních sond)
- úhel sklonu měničů dvojitě sondy

4.3 Možnosti vnitřního uspořádání sond – Phase Array

Uvnitř každé sondy je několik vzájemně izolovaných drobných elementů, které jsou jednotlivě buzeny elektrickým signálem. Každý element má vlastní konektor, A/D převodník a je buzen signálem s definovaným zpožděním. Zpoždění signálu jednotlivých elementů má za následek, že generované ultrazvukové vlnění je vysíláno pod určitým úhlem. Sondy se liší vysílanou frekvencí, úhlem a použitým teplotním rozsahem. Frekvence sondy udává její rozlišovací schopnost. Sondy s vyšší frekvencí mají lepší rozlišovací schopnosti na úkor menšího dosahu vln. Sondy s nízkou frekvencí mají tyto vlastnosti opačné.



Obr. 5 Grafické znázornění funkce různých typů sond [12]

4.4 Metody měření NDT

Defektoskopie využívá dvě metody měření – **Průchodovou** a **odrazovou**.

4.4.1 Průchodová metoda

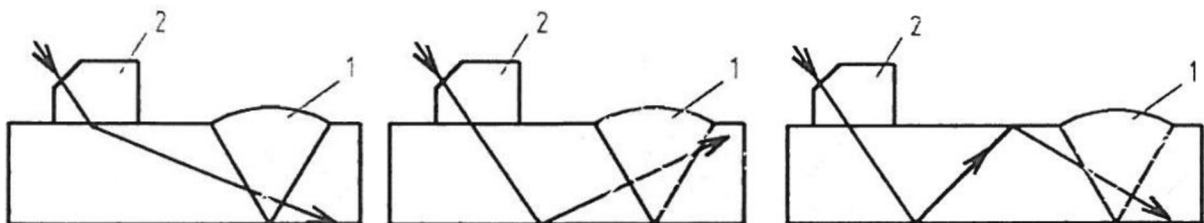
Při této metodě měření je nutné použít dvě stejné sondy, které jsou umístěny proti sobě. Jedna má funkci vysílače a druhá funkci přijímače. Nachází-li se uvnitř zkoumaného materiálu vada, část vln se od jejího povrchu odrazí a tím za vadou vznikne stín. Přijímací sonda, která vyhodnocuje množství přijaté energie vlnění, zaznamená úbytek energie a výsledek zaznamená. Tato metoda nedokáže určit přesnou polohu vady, ale pouze procentuálně vyčísluje její velikost. Tento princip měření je vhodný pro zkoušení materiálů menších tloušťek.

4.4.2 Odrazová metoda

Při této metodě měření se používá pouze jedna sonda, která je současně vysílačem i přijímačem. Sonda vysílá krátké ultrazvukové impulzy, které se odráží od povrchu zkoumaného materiálu nebo jeho vnitřních vad. Odražené impulzy detekované sondou zařízení vyhodnotí a určí přesnou vzdálenost místa odrazu. V případě, že zkoumáme materiál, jehož povrch je rovnoměrný, je vhodné použít přímou sondu. V jiném případě je nutné použít sondy úhlové.

4.4.3 Příklad aplikace

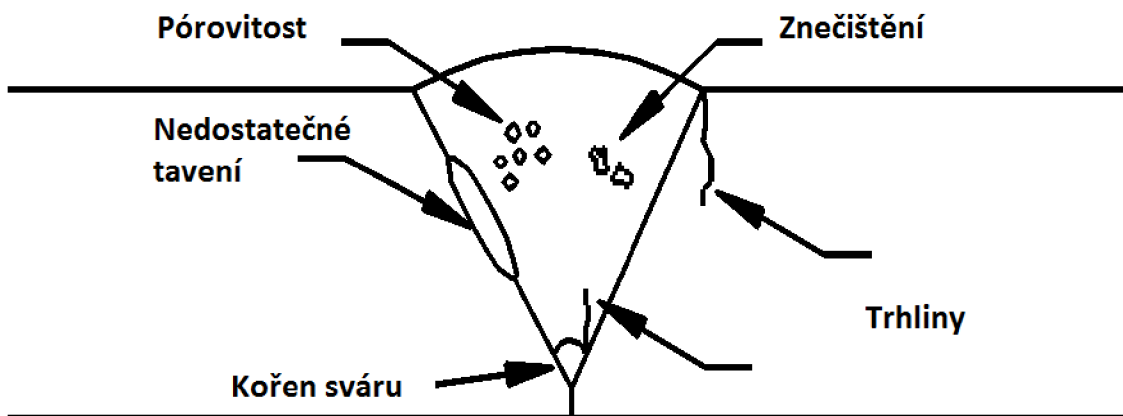
V případě, že je zkoumaným materiálem svár s nerovnoměrným povrchem, je nutné použít úhlovou sondu. Tu přiložíme k místu nedaleko sváru, kde je povrch rovnoměrný a vysíláme vlny pod úhlem, který vlnový svazek nasměruje ke zkoumanému místu. Svár lze zkoumat přímým zkoušením na krátkou vzdálenost, zkoušením 1. echem nebo zkoušením 2. echem.



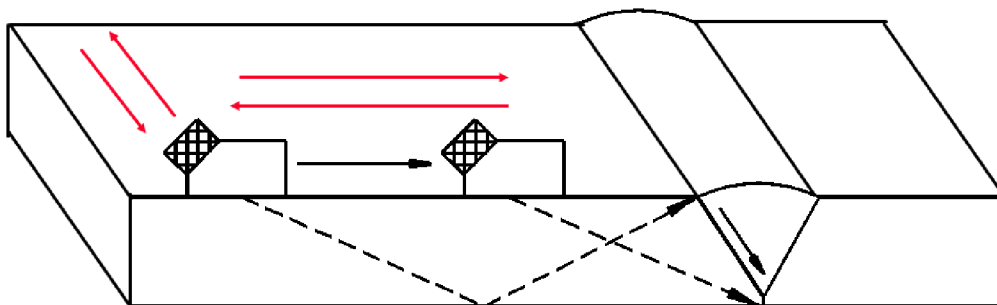
Obr. 6 a) Přímé zkoušení na krátkou vzdálenost b) Zkoušení 1. echem c) Zkoušení 2. echem [8]

V případě přímým zkoušením na krátkou vzdálenost dopadají ultrazvukové vlny přímo do prostoru sváru. Při zkoušení 1. echem dopadají ultrazvukové vlny nejdříve na spodní stranu stěny, od které se odrazí do místa sváru. Zkoušení 2. Echem využívá ještě odrazu od horní strany stěny.

U sváru zkoumáme několik druhů defektů, mezi které patří např. pórovitost, trhliny, nečistoty nebo nedostatečně provařený materiál (nepodařený kořen sváru). Tyto defekty dělíme na prostorové a rovinné. K určení správného typu defektu je nutné učinit alespoň dva ze tří typů zkoušení – podélné a příčné, popřípadě směrové.



Obr. 7 Různé typy defektů sváru [13]



Obr. 8 Metody zkoušení – přímé a podélné [13]

5. Metody zobrazení ultrazvukových signálů

Ultrazvuková defektoskopie využívá několik typů zobrazení ultrazvukových signálů. Jsou to metody typu A, B, C, D, P a F.

5.1 A zobrazení

Je to základní typ zobrazení, kde osa x znázorňuje dráhu šíření vlny a osa y hodnotu ultrazvukového signálu na lineární nebo logaritmické stupnici. Na naměřeném průběhu jsou zobrazené impulzy, tzv. ECHA, které odpovídají odraženým vlnám a vstupnímu impulzu. Vstupní impulz je nazýván jako vstupní echo, výstupní jako koncové echo a odraz od překážky či vady jako vadové echo.

5.2 B zobrazení

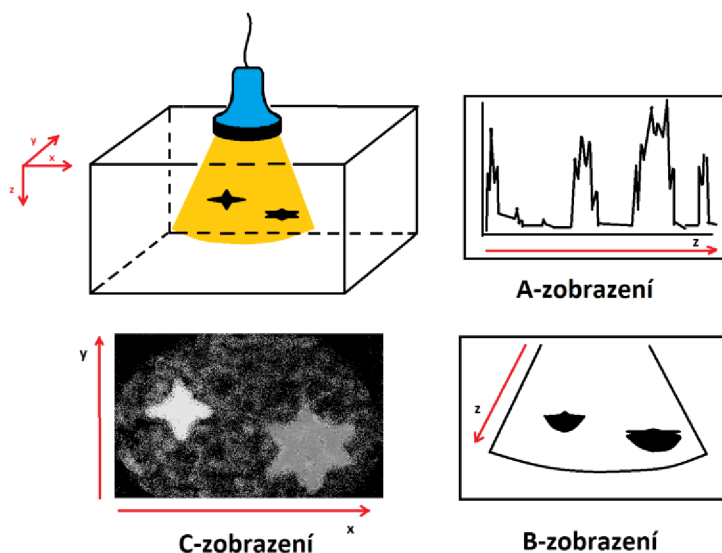
Jedná se o 2D nebo 3D zobrazení zkoumaného materiálu v řezu, jehož rovina je kolmá k povrchu zkoumaného materiálu. Sonda se pohybuje po přímce (křivce) a je vyhodnocována její okamžitá poloha. Ta se označuje jako vzdálenost x na jedné z os pravoúhlé soustavy a osa z , která udává vzdálenost odrazu ultrazvukové vlny (hloubku).

5.3 C zobrazení

Jedná se také o 2D nebo 3D zobrazení zkoumaného materiálu v řezu, jehož rovina je rovnoběžná k povrchu zkoumaného materiálu. Sonda se pohybuje meandrovitě a vyhodnocuje okamžité hodnoty souřadnic x a y . Hloubkové úrovně mohou být rozlišeny barevně.

5.4 D zobrazení

Modifikace C-zobrazení.



Obr. 9 Metody zobrazení ultrazvukových signálů

5.5 F zobrazení

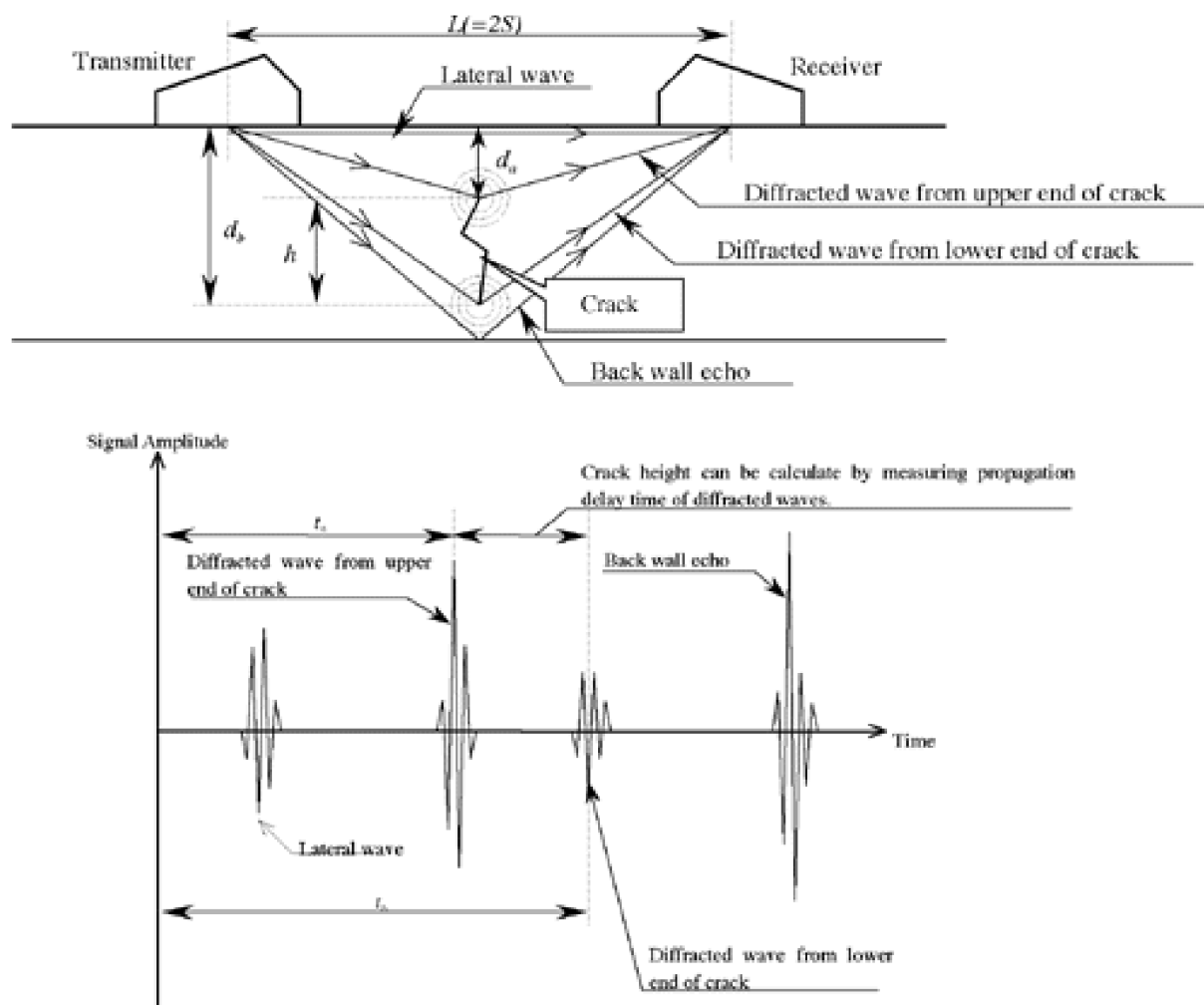
Je to C-zobrazení, kde je místo amplitudy zobrazena vybraná veličina ultrazvukového signálu (např. amplitudové nebo frekvenční spektrum).

5.6 P zobrazení

P-scan (progressive scan) je projekce B-scanování a C-scanování, kdy jsou jednotlivé projekce zpracovávány a vytváří tak obraz zkoumané oblasti.

5.7 TOFD zobrazení (Time of flight-diffraction)

Metoda používá dvě úhlové sondy, které lokalizují defekt v materiálu na základě rozptylu a ohybu vlny (difrakce). Skenování probíhá podélně i příčně, čímž lze získat vzdálenost a velikost defektu. Výsledný obraz je vyhodnocován z časové difference mezi jednotlivými vlnami. Tato metoda zobrazení není vhodná pro příliš zrnitý materiál nebo materiál s vysokou četností defektů.



Obr. 10 Metoda zobrazení TOFD[15]

6. Vyhodnocovací diagramy

Vyhodnocovací diagramy jsou grafické prostředky pro stanovení velikosti vadového echa v A-zobrazení. Stanovení velikosti vady pomocí vyhodnocovacích diagramů, které dodává výrobce, spočívá v porovnání vadového echa s echem referenčního reflektoru s definovanými parametry (tvar, velikost, poloha).

7. Ultrazvukové zařízení EPOCH LT

7.1 Vybavení a funkce

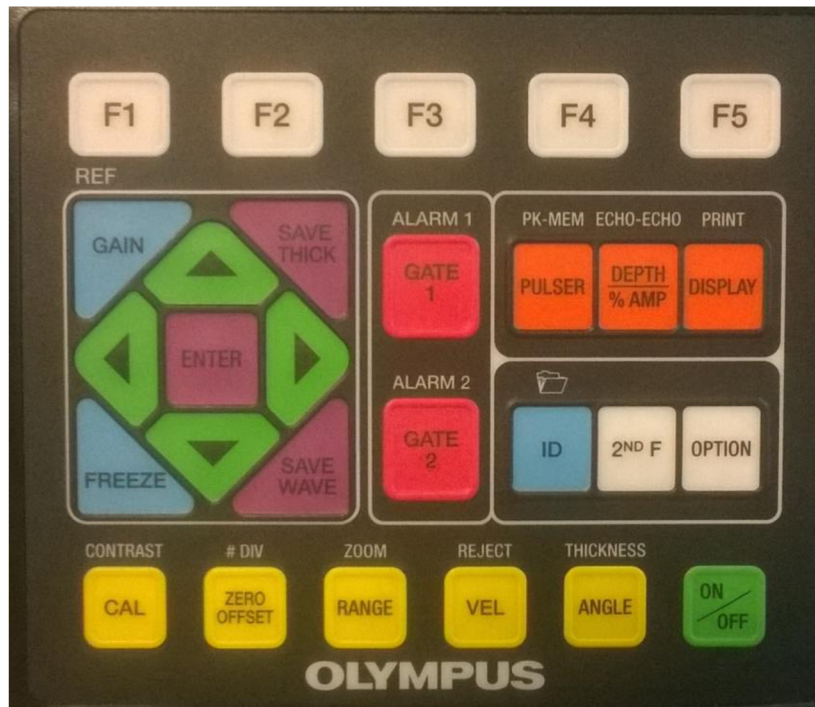
Typ přístroje a jeho vybavení záleží především na požadavku zákazníka. Ústav elektrotechnologie je vybaven zařízením EPOCH LT, který je dále vybaven napájecím kabelem, kabelem pro propojení s počítačem, dvěma kabely pro připojení sondy, čtyřmi úhlovými sondami, kalibračním přípravkem a CD s programem GageView Interface.

7.1.1 Napájení

Přístroj je vybaven univerzálním vstupem pro síťové napájení. Napájení lze využít v rozsahu 100-120V nebo 200-240V o kmitočtu 50 nebo 60Hz. Aby mohlo být zařízení mobilní a nebylo závislé na napájení ze sítě, je vybaveno nikl-metal hydridovou baterií (NiMH). Jmenovitá doba provozu udávaná výrobcem je 6-8 hodin.

7.1.2 Ovládání

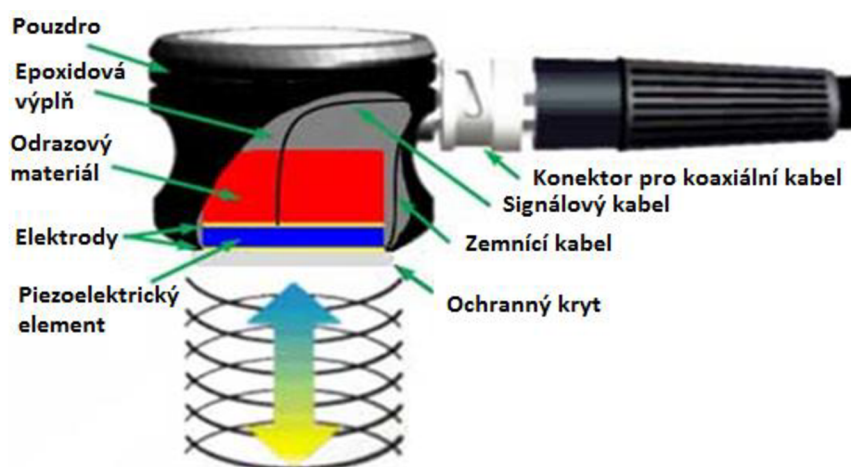
Přístroj je vybaven klávesnicí, která má pro jednodušší manipulaci barevně rozlišené skupiny ovládacích prvků. Zelené tlačítko [ON/OFF] slouží k zapnutí/vypnutí přístroje. Žlutá tlačítka jsou určena především pro kalibraci přístroje, nicméně mají i jiné funkce. Tlačítko [RANGE] slouží k přepnutí do nastavení rozsahu osy x, [VEL] do nastavení rychlosti šíření ultrazvukových vln v daném prostředí a [ANGLE] do nastavení tloušťky měřeného materiálu. Bílými tlačítky [F1] – [F5] lze měnit řádově úroveň rozsahu osy x. Rozsah lze nastavit i jemně pomocí zelených kurzorů [↑] [↓] [←] [→]. Fialová tlačítka slouží k uložení naměřených tlouštěk nebo celých průběhů. Modré tlačítko [ID] slouží k vyhledání uložených záznamů v paměti, tlačítko [GAIN] k nastavení zesílení ultrazvukového svazku a [FREEZE] k zmrazení aktuálních průběhů pro lepší čitelnost při odečítání hodnot. Klávesa [ENTER] společně s kurzorovými klávesami slouží ke změnám nastavení základních ultrazvukových parametrů. Červená tlačítka [GATE1] a [GATE2] slouží k vymezení oblasti, pro kterou určíme rychlost šíření ultrazvukového vlnění nebo odečítáme tloušťku měřené oblasti. Oranžová tlačítka slouží k nastavení generátoru impulzů, hloubky amplitudy a nastavení režimu zobrazení. V případě, že se nějaká funkce zobrazuje až jako druhá na dané klávese, lze sekundární funkci vybrat stisknutím [2nd F] a příslušného tlačítka.



Obr. 11 Klávesnice ultrazukového zařízení EPOCH LT

7.1.3 Princip činnosti ultrazukové sondy

Ultrazuková sonda je složena ze dvou elektrod, mezi nimiž je piezoelektrický element. Její funkce je založena na principu piezoelektrického jevu. Ten se dělí na jev přímý a nepřímý. Přímý piezoelektrický jev spočívá ve schopnosti krystalu generovat napětí při jeho deformaci. Nepřímý jev má opačné vlastnosti, kdy vlivem elektrického napětí dochází k deformaci krystalu. Ultrazuková sonda s funkcí vysílače využívá nepřímého piezoelektrického jevu, kdy přivedený signál rozkmitá piezoelektrický element a tím dochází ke střídavým změnám tlaku okolí., Sonda s funkcí přijímače využívá jevu přímého, kde změnami akustického tlaku dochází k deformaci piezoelektrického elementu, a tím ke generování napětí.



Obr. 12 Konstrukční znázornění sondy [12]

7.1.4 Kalibrace

Kalibrace slouží k nastavení přístroje pro přesné měření na konkrétním materiálu s použitím správného převodníku a při přesné teplotě. Je nutné nastavit nulový posun, kdy dochází k časové kompenzaci mezi vysláním hlavní vlny a vstupu do testovaného materiálu. Dále je nutné nastavit správnou rychlost vlnění, které odpovídá měřenému materiálu. Ke kalibraci je vhodné použít kalibrační blok, který je součástí vybavení.

7.1.5 Kalibrační blok

Tento blok, se dvěma známými tloušťkami, je vyroben z oceli. Přesný typ použitého materiálu je vyrytý na jedné z ploch přípravku. Je tedy známá rychlost šíření ultrazvukových vln materiálem. Dále je v bloku malý otvor, který slouží ke správnému nastavení úhlových sond. Na hraně bloku jsou označena místa s velikostí jednotlivých úhlů, které s nimi otvor svírá. Zařízení má funkci automatické kalibrace. Stačí přiložit sondu na správné místo kalibračního přípravku a kalibraci spustit. Automatická kalibrace se spouští stisknutím tlačítka [CAL] a vypíná tlačítkem [ENTER].



Obr. 13 Kalibrační přípravek k zařízení EPOCH LT

7.1.6 Záznamník dat

Součástí zařízení je systém zaznamenávání naměřených údajů. Každé naměřené hodnotě je přiřazeno ID pro lepší orientaci v seznamu naměřených hodnot. Záznamník je schopen uložit maximálně 2000 naměřených hodnot tlouštěk nebo 100 vlnových křivek. Rozdíl mezi naměřenou tloušťkou a vlnovou křivkou je prostý. Naměřená křivka ukládá okamžité hodnoty, zatímco vlnová křivka ukládá celý průběh měření a daleko více zahrnuje paměť.

7.1.7 Gage View Interface

GageView interface je program společnosti Panametrics-NDT™ s podporou systému Windows. Slouží k vytváření, shromažďování, spravování a tisknutí dat z ultrazvukových detekčních zařízení firmy Olympus. Mezi podporované modely patří Epoch 4, Epoch 4B, **Epoch LT**, Epoch 4 PLUS, a Epoch XT.

Program nabízí tyto schopnosti:

Vytváření datových sad a průzkumů

Stahování a nahrávání tlouštěk nebo celých vlnových křivek

Zobrazení informací naměřených průběhů včetně tlouštěk, nastavených parametrů měření a hodnot nastavení převodníku

Exportování hodnot tlouštěk do tabulek a dalších programů

Tisk zpráv, generovaných tabulek nebo statistik

8. Praktická část

8.1 Určení rychlosti UZ ve vybraných materiálech

První část praktické části spočívá v určení rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech při jejich známé tloušťce.

Pro měření byly použity vzorky pěti různých materiálů. V prvním kroku jsem změřil jejich tloušťku v místech, kde bude probíhat měření rychlosti ultrazvuku. K naměření tloušťky jsem měl k dispozici posuvné měřítko a mikrometr. K samotnému měření rychlosti ultrazvuku jsem použil přímou sondu s frekvencí 4 MHz a jako kontaktní prostředí vodu. Přiložením měřicí sondy ke zkoumanému vzorku se na displeji zobrazil průběh. Ten byl složen z několika amplitud, které představují odražené vlny od prostředí s jinou rychlostí ultrazvukového vlnění. Prostřednictvím tlačítek GATE1 a GATE2 jsem vymezil sledovanou oblast. Tato oblast je situována mezi dvěma amplitudami, které znázorňují počátek vstupu ultrazvukových vln do prostředí a jejich odraz od koncové hrany materiálu. Rozdíl mezi těmito amplitudami odpovídá tloušťce měřeného materiálu. V pravém horním rohu displeje byla vyobrazena aktuální hodnota měřené tloušťky, která je úzce spojena s nastavenou rychlostí šíření ultrazvukových vln. Prostřednictvím tlačítka VEL jsem postupně upravoval hodnotu rychlosti šíření ultrazvukových vln v materiálu, dokud se aktuální naměřená hodnota tloušťky, neshodovala s hodnotou naměřenou posuvným měřítkem. Jakmile se hodnoty shodovaly, odečetl jsem aktuální rychlost šíření ultrazvuku. Pokus jsem opakoval pro každý vzorek a výsledky zaznamenal do tabulky, kde jsou porovnány s obecnými hodnotami.

Tab. 2 Tabulka naměřených hodnot rychlostí ultrazvuku v různých materiálech

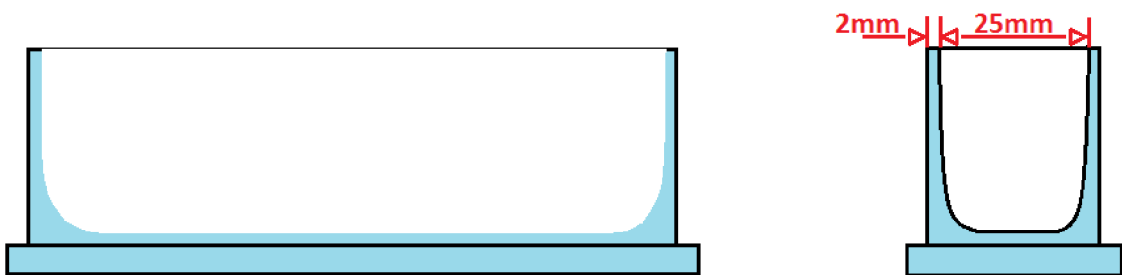
Materiál	Tloušťka [mm]	Rychlost šíření v [m/s]	
		Tabulková hodnota	Naměřená hodnota
PMMA	1,89	2780	2627
sklo	1,53	5100	4942
plexisklo	2,01	2680	2485
epoxidová pryskyřice	1,96	2540	3479
teflon	4,73	1420	1350

*Tabulkové hodnoty jsou převzaty z materiálů, které jsou součástí vybavení zařízení EPOCH LT.

8.2 Měření rychlosti UZ ve vodě

Druhá část spočívá v určení rychlosti šíření ultrazvuku v kapalině, tedy měření přes prostředí skleněné nádoby.

Měřená kapalina byla nalita ve skleněné nádobě z boritokřemičitého skla. V prvním kroku jsem naměřil tloušťku stěny v místě, kde byla později přiložena měřící sonda, a vzdálenost mezi protilehlými stěnami. K měření bylo opět použito posuvné měřítko a mikrometr.

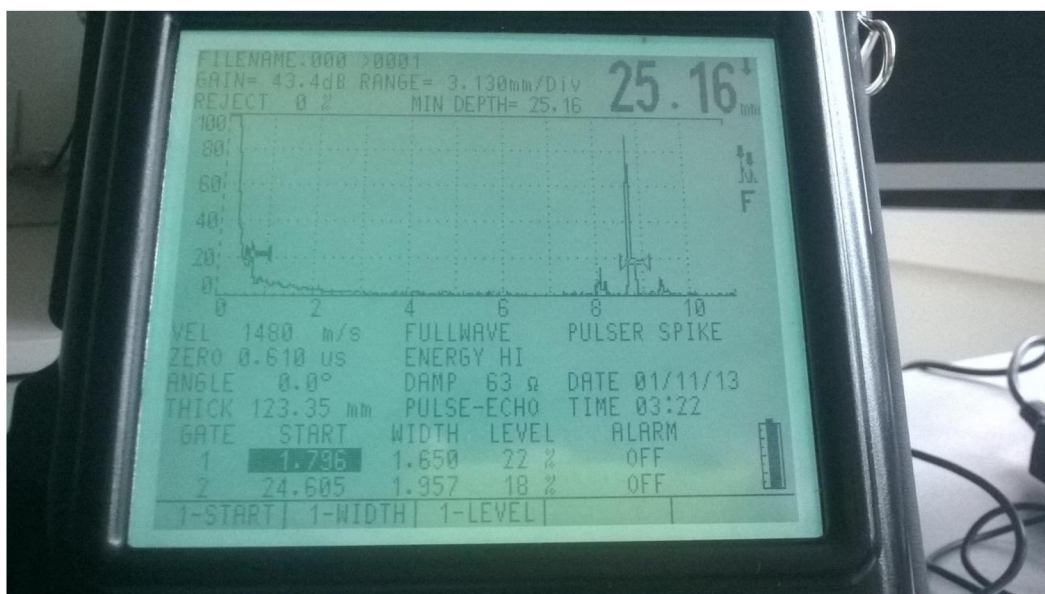


Obr. 14 Grafické vyobrazení skleněné nádoby a naměřené rozměry



Obr. 15 Použitá laboratorní nádoba

V dalším kroku jsem nádobu naplnil vodou a stejnou kapalinu jsem použil i jako kontaktní medium mezi sondou a nádobou. K určení rychlosti UZ v kapalině jsem opět použil přímou sondu. Výsledný průběh byl velmi tlumený, protože část vlnění byla absorbována skleněným prostředím, které oddělovalo kapalinu od okolního prostředí. Z toho důvodu jsem zvýšil energii vysílaného ultrazvukového svazku na hodnotu „High“ a prostřednictvím tlačítka GAIN jsem ještě navýšil hodnotu zesílení. Výsledný průběh nabyl čitelných hodnot. Prostřednictvím tlačítek GATE1 a GATE2 jsem vymezil měřenou oblast a upravováním rychlosti šíření ultrazvukových vln jsem dostavil tloušťku na požadovanou (mikrometrem změřenou) hodnotu 25mm. Odpovídající rychlost šíření ultrazvuku byla 1480 m/s.



Obr. 16 Výsledný průběh ultrazvukového vlnění v nádobě s vodou

8.3 Závislost rychlosti UZ u vzorků s příměsí vápence

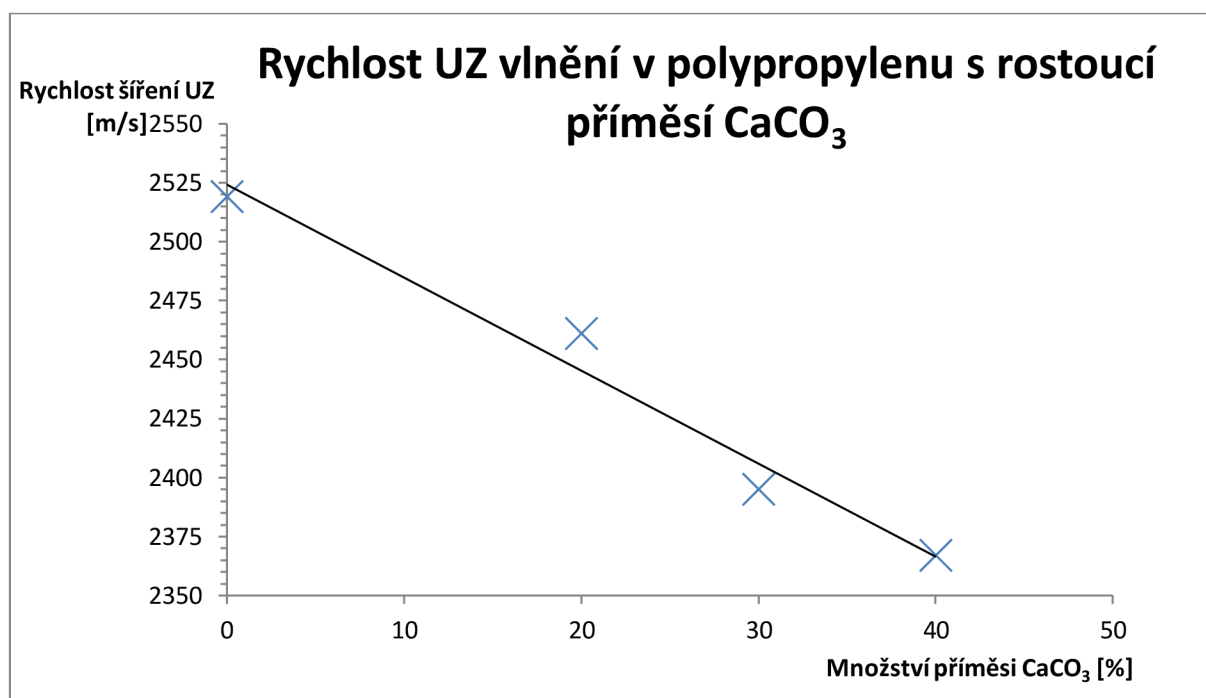
Pro toto měření jsem měl k dispozici 4 vzorky materiálů ve tvaru puku. 100% polypropylen, polypropylen s 20%, s 30% a 40% CaCO_3 (vápencem). Cílem měření bylo zjistit, zda se rychlost šíření ultrazvuku s rostoucí příměsí v materiálu mění lineárně.

Každý vzorek měl rozdílnou tloušťku. Bylo tedy nutné naměřit tloušťky jednotlivých vzorků v místě, kde probíhalo měření. K naměření těchto vzdáleností jsem použil mikrometr a výsledky zaznamenal do přehledné tabulky.

Další krok spočíval v naměření rychlosti šíření UZ v jednotlivých vzorcích a vyhodnocení dosažených výsledků.

Tab. 3 Tabulka naměřených hodnot tloušťky a rychlosti šíření UZ v předložených materiálech

	polypropylen (PP)	PP + 20% CaCO_3	PP + 30% CaCO_3	PP + 40% CaCO_3
d [mm]	1,97	1,91	1,99	1,92
v [m/s]	2519	2461	2395	2367



Obr. 17 Grafická závislost změny rychlosti ultrazvuku v polypropylenu s rostoucí příměsí vápence

8.4 Měření UZ v kapalině

Pro měření kapalin mi byly zapůjčeny dvě plastové a jedna skleněná nádoba. Mým úkolem bylo zjistit, která z těchto nádob bude nejlépe vyhovovat tomuto typu měření.

První krok spočíval v naměření parametrů všech zapůjčených nádob. K tomu jsem použil digitální posuvné měřítko. Dále už stačilo nádoby naplnit měřenou kapalinou a porovnat výsledné průběhy. Zaměřil jsem se především na čitelnost naměřených průběhů, na naměřené parametry vzdáleností a rychlostí a vše porovnal s reálnými hodnotami.

8.4.1 Plastová nádoba

Rozměry použité nádoby:



Obr. 18 Tvar a tloušťka stěny použité plastové nádoby

Tloušťka stěny: 1,54 mm

Naměřená rychlost šíření UZ vlnění v plastu: 2346 m/s

Naměřená rychlost šíření UZ v kapalině: 1480 m/s (tabulková hodnota 1498 m/s)

Při rychlosti 1480 m/s byla naměřená celková vzdálenost od místa vstupu UZ vlnění po zadní stěnu nádoby 21,99 mm. Vzdálenost mezi stěnami je 20,05 mm. Rozdílem těchto hodnot jsem získal vzdálenost, která odpovídá pouze plastové nádobě. Tato hodnota činí 1,94 mm, tedy jedna stěna odpovídá 0,97 mm.

Přepočtem na odpovídající rychlost šíření v plastu by měla tloušťka stěny odpovídat reálné hodnotě tloušťky.

Poměr rychlostí šíření v obou prostředích: $\frac{2346}{1480} = 1,585$

Vynásobením tloušťky stěny při rychlosti 1480 m/s získaným poměrem bych měl získat reálnou hodnotu stěny.

$$0,97 \cdot 1,585 = 1,537 \text{ mm}$$

Výsledná hodnota se opravdu blíží hodnotě 1,54 mm. Z toho plyne, že naměřené hodnoty v obou materiálech odpovídají skutečnosti.

8.4.2 Skleněná nádoba

Rozměry použité nádoby:



Obr. 19 Tvar a tloušťka stěny použité skleněné nádoby

Tloušťka stěny: 0,97 mm

Naměřená rychlost šíření UZ vlnění: 5295 m/s

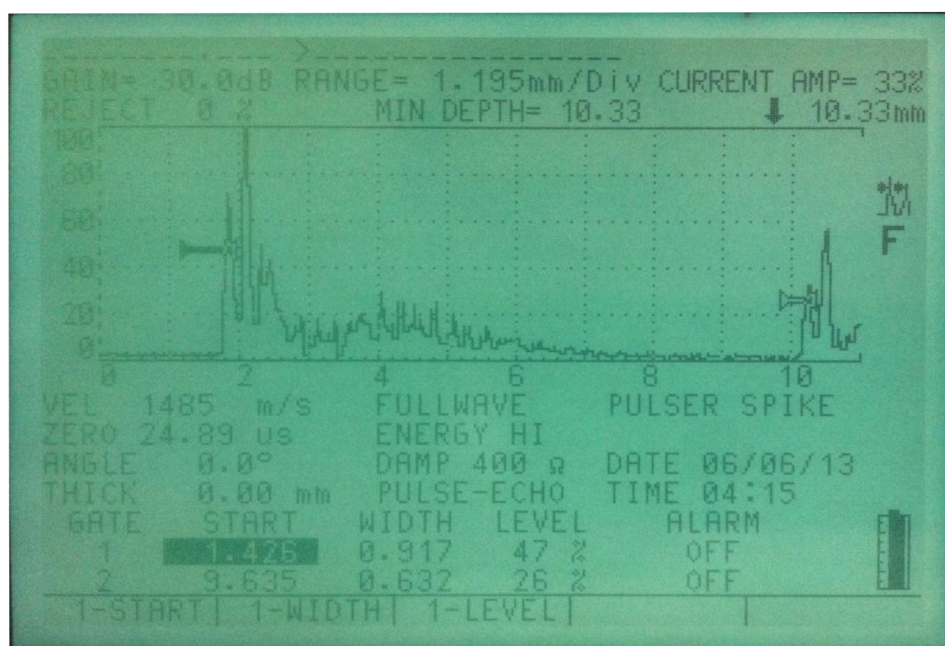
Naměřená rychlost šíření UZ v kapalině: 1485 m/s (tabulková hodnota 1498 m/s)

Poměr rychlostí šíření v obou prostředích: $\frac{5295}{1485} = 3,566$

Tloušťka stěny ze získaného údaje odpovídá vzdálenosti 0,35 mm. Vynásobením získané hodnoty vzdálenosti vypočítaným poměrem mezi rychlostmi šíření UZ v obou prostředích lze získat reálnou hodnotu tloušťky.

$$0,35 \cdot 3,566 = 1,212 \text{ mm}$$

Přesná hodnota tloušťky je 0,97 mm a vypočítaná hodnota jí není příliš blízká.



Obr. 20 Naměřený průběh UZ vlnění ve skleněné nádobě naplněné vodou

Na závěr jsem porovnal výsledky obou měření a pro další měření jsem si vybral plastovou nádobu, protože na rozdíl od skleněné nádoby nebyl měřený průběh doprovázený takovým šumem a nepřesnostmi. Tento šum byl zřejmě způsoben tím, že sklo bylo v matném provedení, a tak docházelo k četným odrazům již ve skleněném prostředí.

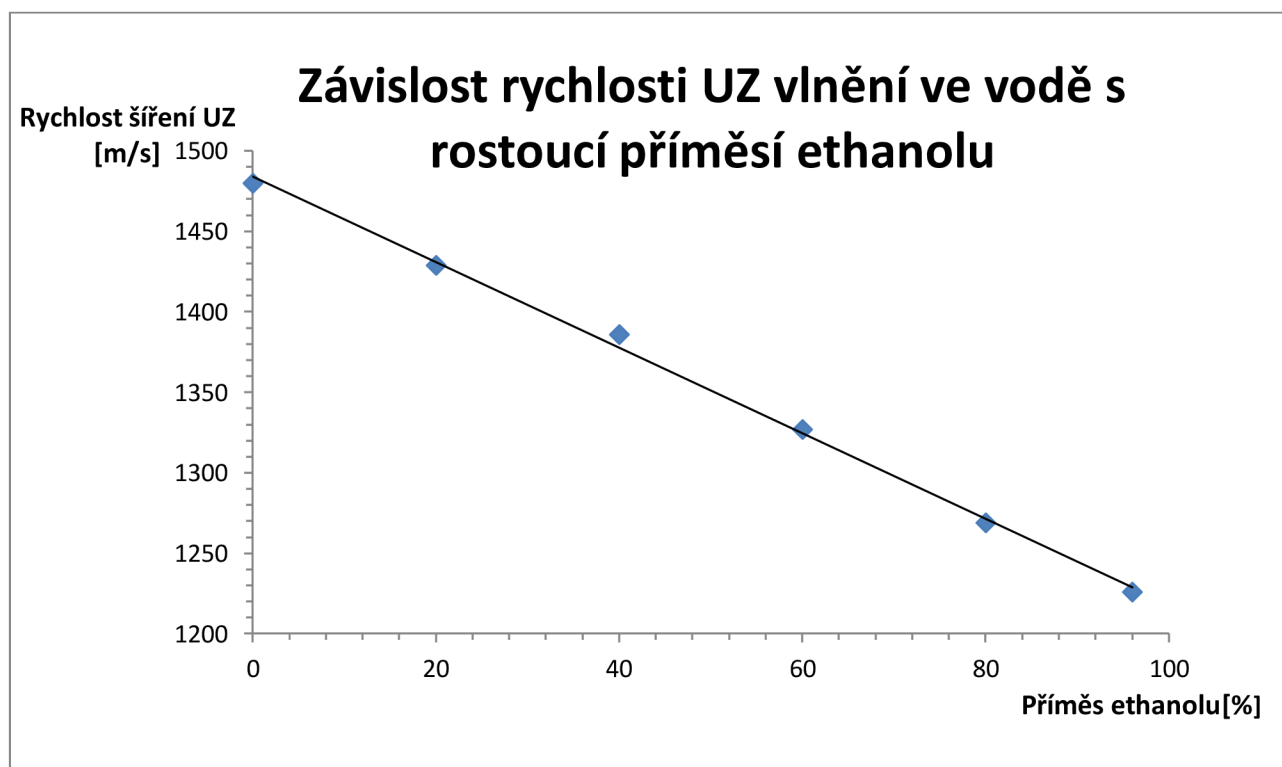
8.5 Závislost rychlosti UZ ve vodě s rostoucí příměsí ethanolu

Cílem tohoto měření je určit, jak se bude chovat ultrazvuk ve vodě s narůstající příměsí 96% ethanolu.

Použil jsem červenou plastovou nádobu, do které jsem pomocí plastové stříkačky vstříkoval v přesném poměru množství vody a ethanolu. K měření jsem použil přímou 4 MHz sondu. Naměřené hodnoty rychlosti UZ jsem zaznamenal a vynesl v grafické závislosti.

Tab. 4 Tabulka naměřených hodnot rychlosti ultrazvuku s rostoucí příměsí ethanolu

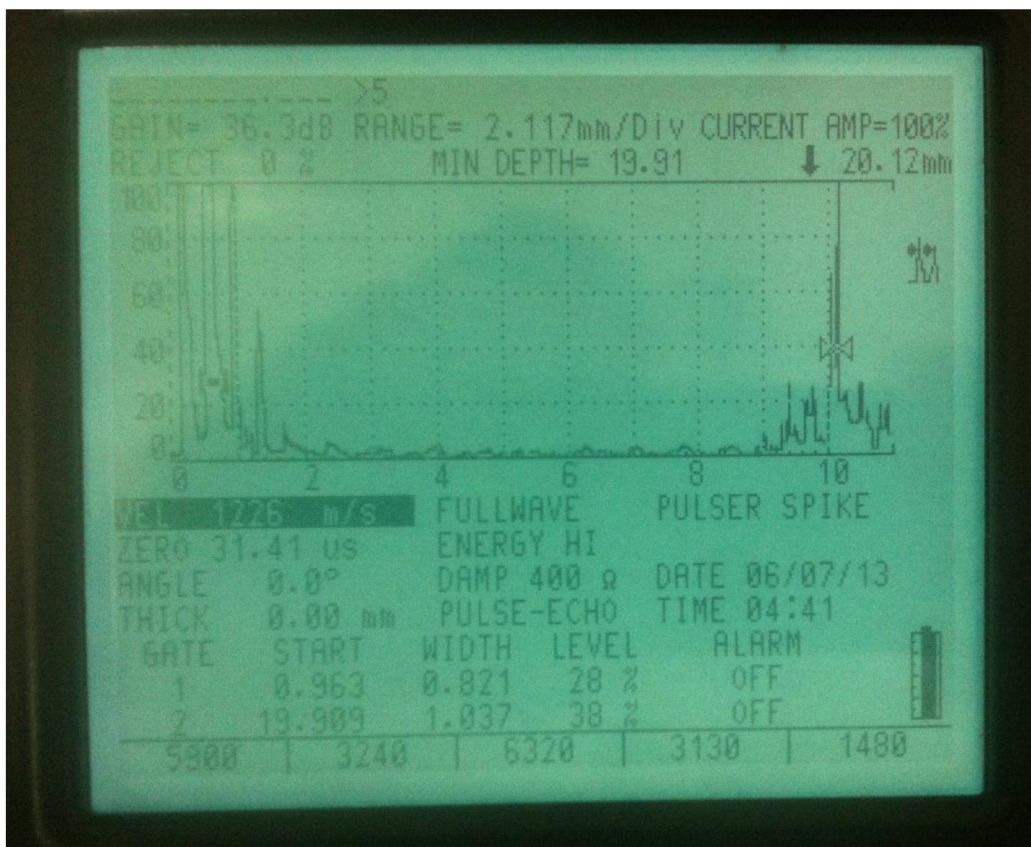
Objem a poměr kapalin	voda 40 ml ethal. 0 ml	voda 40 ml ethal. 10 ml	voda 20 ml ethal. 13 ml	voda 20 ml ethal. 30 ml	voda 10 ml ethal. 40 ml	voda 0 ml ethal. 30 ml
Příměs ethanolu [%]	0	20	40	60	80	96
Rychlost UZ [m/s]	1480	1429	1386	1327	1269	1226



Obr. 21 Grafická závislost změny rychlosti ultrazvuku s rostoucí příměsí ethanolu ve vodě



Obr. 22 Použitá plastová nádoba



Obr. 23 Naměřený průběh v ethanolu

9. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo prostudovat fyzikální podstatu ultrazvuku a seznámit se s jeho využitím v diagnostice materiálů. Zejména v oblasti stanovení tloušťek elektrotechnických materiálů. Dalším bodem zadání bylo seznámení s komerčním ultrazvukovým zařízením EPOCH LT firmy Olympus a osvojit si jeho ovládání.

Zadané měření tloušťek u vybraných materiálů jsem rozšířil o stanovení rychlosti ultrazvukového vlnění ve vybraných materiálech a prostředích. Tato měření jsem uskutečnil za použití zařízení EPOCH LT s přímou ultrazvukovou sondou s frekvencí 4MHz. Naměřené hodnoty tloušťek odpovídaly reálným hodnotám. Naměřené hodnoty ultrazvukového vlnění u vybraných materiálů a prostředí jsem porovnal s tabulkovými hodnotami, které jsou k dispozici v manuálu zařízení EPOCH LT. Ten je součástí vybavení. Porovnávání s tabulkovými hodnotami není vždy přesné, jako v případě skla, kde nelze určit, zda je naměřená hodnota správná, protože tabulkové hodnoty neudávají, o jaký typ skla se jedná. Jedná se pouze o orientační hodnoty. Naměřené výsledky se jim blíží.

Cílem dalšího měření bylo pozorovat chování ultrazvukového vlnění v materiálu s rostoucím podílem příměsi. Zkoumaným materiálem byl propylen s rostoucí příměsí vápence (rostoucím podílem vápence) a zkoumanou kapalinou voda s rostoucí příměsí ethanolu. Výsledný grafický průběh dokazuje, že změna rychlosti šíření ultrazvukového vlnění v materiálu či kapalině s rostoucím množstvím příměsi je lineární. U polypropylenu s rostoucím množstvím příměsi vápence je odchylka výsledných hodnot vyšší. To může být zapříčiněno tím, že procentuální hodnota příměsi v materiálu může být nepřesná. Zkoumané vzorky nebyly podloženy řádnou dokumentací.

Pro měření s větším rozlišením byla pořízena přímá sonda s frekvencí 20 MHz. Zkušební měření jsem došel k závěru, že maximální rozlišení sondy činí 0,3 mm. Maximální rozlišení sondy s frekvencí 4 MHz je 1,5 mm. U všech uvedených měření byla použita přímá sonda s frekvencí 4 MHz, protože měřená vzdálenost (tloušťka) materiálů byla větší než 1,5 mm. Sondu s frekvencí 20 MHz jsem použil pouze pro kontrolní měření, protože měřený průběh doprovázel šum, který byl viditelný z důvodu většího rozlišení sondy.

Dále pracuji na laboratorní úloze do předmětu Diagnostika a zkušebnictví. Úloha se bude týkat využití ultrazvuku v defektoskopii a bude se zabývat určením rychlosti šíření ultrazvuku ve vybraných materiálech a kapalinách a dále stanovením tloušťky vybraných materiálů.

10. Seznam použité literatury

- [1] OLYMPUS NDT. *EPOCH LT: Ultrazvukový detektor trhlin - uživatelský manuál*. USA, 2005.
- [2] SMOLEK, Jan. *Kontrola a měření strojních součástí a jejich polotovarů: Nedestruktivní defektoskopie - Zkoušky zvukem a ultrazvukem*. Brno, 2013. Dostupné z: http://web.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_23-18.pdf. Projekt. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1.
- [3] JANSKÝ, Jan. *Ultrazvuková defektoskopie* [online]. 2004[cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2004/UZ_JANSKY.pdf
- [4] *Metoda kontroly ultrazvukem* [online]. 2009 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.controltest.cz/metody-ndt/kontroly-ultrazvukem.php>
- [5] *Defektoskopie v průmyslu* [online]. 2008 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/?mnu=18,0>
- [6] EPOCH LT: *Defektoskopie* [online]. 2005 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/cs/epoch-lt/>
- [7] Vysvětlení teorie šíření světla optickým vláknem. *Vysvětlení teorie šíření světla optickým vláknem* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.ackoo.estranky.cz/clanky/vysvetleni-teorie-sireni-svetla-optickym-vlaknem.html>
- [8] *Zkoušky bez porušení materiálu*. 2012-2014. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf
- [9] OLYMPUS CORPORATION. *GageView* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.olympus-ims.com/en/products/gageviewall/>
- [10] ŠVEHLA, Štefan a Zdenko FIGURA. *Ultrazvuk v technológii*. Bratislava: ALFA, 1984, 528 s. SMTL 63-482-84.
- [11] VAŇKÁT. *Urcování směru příchodu ultrazvukového signálu v prostředí s odrazy*. Pardubice, 2012. Dostupné z: http://dSPACE.upce.cz/bitstream/10195/48512/3/VankatT_UrcovaniSmeru_ZN_2012.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Zdeněk Němec.
- [12] Prezentace firmy Olympus, PELLETIER, Eric. OLYMPUS CORPORATION. *Basic Phased Array Introduction*. USA, 2006.
- [13] HENJER. OLYMPUS CORPORATION. *Introduction to Ultrasound and Panametrics-NDT Digital Flaw Detectors*. USA, 2005.
- [14] Akustika. FUCHS, . *Elektroakustiká zařízení* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/~fuchs/download/Akustika.pdf>
- [15] TOFD. *TOFD* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://www.mhps.com/en/technology/business/power/service/inspection/images/tofd_01.gif
- [16] EXPERIMENTÁLNÍ ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ POMOCÍ LABVIEW. 2009. BAŠE, Michal. *EXPERIMENTÁLNÍ ULTRAZVUKOVÁ MĚŘENÍ POMOCÍ*

LABVIEW [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18584

[17] Elektrické tlakoměry. *E-automatizace* [online]. - [cit. 2015-05-31]. Dostupné z:

http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm