

Využití ultrazvuku pro měření viskoelastických vlastností materiálů

Bc. Pavel Bunganič

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Bunganič**

Osobní číslo: **T17278**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Využití ultrazvuku pro měření viskoelastických vlastností materiálů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Diplomová práce se bude zabývat využitím ultrazvukového měření viskoelastických vlastností materiálů pomocí ultrazvuku.**
- 2. Tato metoda je v současnosti v metrologii využívána zejména pro detekci vnitřních vad materiálů a výrobků.**
- 3. Cílem bude tuto metodu optimalizovat pro měření viskoelastických vlastností polymerních materiálů a jejich vývoje v čase.**

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

International advances in nondestructive testing . New York: Gordon and Breach. ISSN
0140-072X.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na možnosti využití odrazové metody ultrazvukového měření pro určení viskoelastických vlastností. Pro vyhodnocení těchto parametrů je běžně potřeba mít pevnou odrazovou plochu v přesně definované vzdálenosti od ultrazvukové sondy, která je v dostatečné míře zkoumaným materiálem vyplněna. V případě této práce je zkoumána možnost získání obdobných výsledků pomocí prvního odrazu od povrchu materiálu a vyhodnocení různých dějů doprovázených změnou viskozity.

Klíčová slova: ultrazvuková vlna, akustická impedance, amplituda akustického tlaku, amplituda napětí

ABSTRACT

This work focuses on the possibilities of using the ultrasonic reflection method to determine viscoelastic properties. In order to evaluate these parameters, it is commonly necessary to have a fixed reflective surface at a precisely defined distance from the ultrasonic probe, which is sufficiently filled with the material to be examined. In this work, the possibility of obtaining similar results by first reflection from the surface of the material and evaluation of various events accompanied by a change in viscosity is investigated.

Keywords: ultrasonic wave, acoustic impedance, sound pressure amplitude, voltage amplitude

Rád bych upřímně poděkoval doc. Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. za vstřícný a trpělivý přístup při vedení mé diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Martině Hříbové a Ph.D., doc. Ing. Vladimíru Patovi, Ph.D. za cenné rady pro vypracování.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP AKUSTICKÉHO VLNĚNÍ.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ POPIS VLNĚNÍ	12
1.1.1 Kmitání.....	12
1.1.2 Vlnění.....	14
1.2 TVARY A DRUHY AKUSTICKÝCH VLN.....	15
1.2.1 Tvary akustických vln	16
1.2.1.1 Rovinná vlna	16
1.2.1.2 Válcová vlna	16
1.2.1.3 Kulová vlna.....	17
1.2.2 Druhy akustických vln	17
1.2.2.1 Podélné vlny	17
1.2.2.2 Příčné vlny	18
1.2.2.3 Povrchové vlny	19
1.2.2.4 Deskové vlny	20
1.3 VLASTNOSTI ULTRAZVUKOVÉHO POLE.....	21
1.3.1 Akustický tlak	21
1.3.2 Akustická impedance	21
1.3.3 Energie akustického vlnění	22
1.3.4 Intenzita ultrazvukové vlny.....	23
1.3.5 Akustický výkon	23
1.3.6 Hladiny akustických veličin.....	24
1.3.7 Rychlost ultrazvukových vln.....	26
1.3.7.1 Rychlost šíření ultrazvukových vln v plynném prostředí	27
1.3.7.2 Rychlost šíření ultrazvukových vln v izotropním kapalném prostředí	29
1.3.7.3 Rychlost šíření ultrazvukových vln v izotropním tuhém prostředí.....	30
1.3.8 Tlumení ultrazvukových vln	34
1.3.8.1 Kapaliny a plyny	35
1.3.8.2 Tuhé látky	36
1.3.9 Ultrazvuková vlna na rozhraní dvou prostředí.....	37
1.3.9.1 Kolmý dopad.....	38
1.3.9.2 Šikmý dopad	41
2 ULTRAZVUK V METROLOGII A MĚŘENÍ	43
2.1 METODY MĚŘENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU	44
2.1.1 Průchodová metoda	45
2.1.2 Odrazová metoda	46
2.2 ULTRAZVUKOVÁ DEFECTOSKOPIE.....	46
II PRAKTICKÁ ČÁST	48
3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	49
4 METODA MĚŘENÍ.....	50

4.1	MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	51
4.1.1	Nastavení ultrazvukového přístroje.....	51
4.2	VOLBA KRYCÍ VRSTVY	52
4.2.1	Výsledky měření a zpracování dat	52
4.2.1.1	Referenční vzorek	53
4.2.1.2	LDPE	55
4.2.1.3	LLDPE	57
4.2.1.4	HDPE	59
4.2.1.5	PVC.....	61
4.2.1.6	boPET	63
4.2.2	Srovnání naměřených dat	64
4.2.2.1	Amplituda napětí.....	65
4.2.2.2	Síla signálu.....	68
4.2.3	Diskuze výsledků	71
5	ZMĚNA AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	72
5.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ	72
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT	73
5.2.1	Změny v imerzní vrstvě	74
5.2.2	Amplituda napětí	75
5.2.2.1	Koeficient odrazu a akustická impedance měřeného vzorku.....	76
5.2.2.2	Rychlost ultrazvukové vlny	77
5.2.3	Síla signálu odražené vlny	78
5.3	URČENÍ POLOČASU DĚJE	80
5.3.1	Amplituda napětí	81
5.3.2	Síla signálu odražené vlny	83
5.4	DISKUZE VÝSLEDKŮ	85
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK.....	96

ÚVOD

V současné době je využití technologie ultrazvuku v průmyslu na vzestupu. Primárně se těší největší oblibě v oboru defektoskopie, kde je hojně využívána jako jedna z nedestruktivních metod pro odhalení vnitřních vad a definice jejich tvaru a rozměrů. Dalšími odvětvími, kde lze využití ultrazvukové technologie nalézt je kupříkladu svařování plastů či obrábění velmi tvrdých materiálů. V omezené míře se metody měření pomocí této technologie také objevují u určování hustoty, průtoku kapalin nebo elastických vlastností materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá možností změny viskoelastických vlastností pomocí ultrazvukové odrazové metody. U této metody jsou vyhodnocované parametry běžně odečítány z druhé odražené vlny, která prošla materiálem. Tato práce se zaměřuje na možnosti vyhodnocení vlastností zkoumaného materiálu pomocí první odražené vlny. Ta sice neprošla samotným materiálem, ale díky chování ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí lze pomocí odražené části vlny hodnotit jeho vlastnosti.

Teoretická část je věnována fyzikálnímu popisu ultrazvukové vlny a jejímu využití pro měření v metrologii. V praktické části se práce věnuje optimalizaci měření odražené ultrazvukové vlny od materiálů, ve kterém probíhá síťování polymerní struktury. Ve druhé polovině praktické části je měření vyzkoušeno. Na základě výsledků tohoto měření jsou poté popsány změny akustických vlastností materiálu související se změnami jeho viskoelastických vlastností.

Cílem diplomové práce je optimalizace měření vlastností materiálu během síťování polymerní struktury. Optimalizované měření poté prakticky odzkoušet a určit parametry, které souvisí se změnou viskoelastických vlastností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP AKUSTICKÉHO VLNĚNÍ

Při definici zvuku (případně ultrazvuku) a jeho následných změn během interakce s určitým prostředím je potřeba nejprve popsat fyzikální jevy, které jsou průchodem této vlny vyvolány. Primárním projevem, který má průchod zvukové (ultrazvukové) vlny daným prostředím, je mechanické kmitání částic kolem své rovnovážné polohy. Za částici lze považovat malou část prostředí, jejíž rozměry jsou dostatečně malé vůči vlnové délce zvukového vlnění. Dle frekvence kmitání těchto částic lze zvuk rozdělit do 4 akustických pásem. (1) (2)

Tabulka 1: Rozdělení zvuku dle vyvolaného kmitání prostředí (2)

Akustické pásmo	Frekvence [Hz]
Infrazvuk	<20
Zvuk	20 – 20 000
Ultrazvuk	20 000 – 100 000 000
Hyperzvuk	>100 000 000

1.1 Základní popis vlnění

Pro popis ultrazvukové vlny je nejčastějším nástrojem mechanický oscilátor. Za ten se považuje každý hmotný element prostředí, kterým vlna prochází. Hmotné elementy se v případě ultrazvuku považují za lineární oscilátor. (1)

1.1.1 Kmitání

Kmitání (kmitavý pohyb) lze definovat jako vychýlení hmotné částice z její rovnovážné polohy, které je zprostředkováno buď samovolně (nenucené) nebo dodáním určité energie (nucené). Dále se kmitání dá rozdělit na tlumené a netlumené (harmonické). Při nuceném netlumeném kmitání je potřeba konstantně dodávat energii, která slouží k překonání odporu prostředí, v němž se kmitání uskutečňuje. (2)

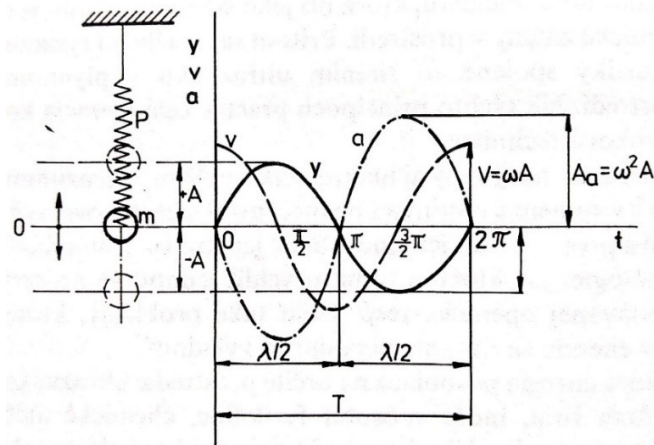
Jednou ze základních vlastností kmitání, která se používá pro jeho popis, je frekvence f [Hz, s⁻¹]. Ta je definována jako počet kmitů za časový interval 1 sekundy.

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

Pro samotný popis jedno kmitu se primárně používá perioda T [s]. Ta je definována jako doba, za kterou proběhne jeden úplný kmit (cyklus). Z rovnice 1 je patrné, že periodu lze definovat jako převrácenou hodnotu frekvence f .

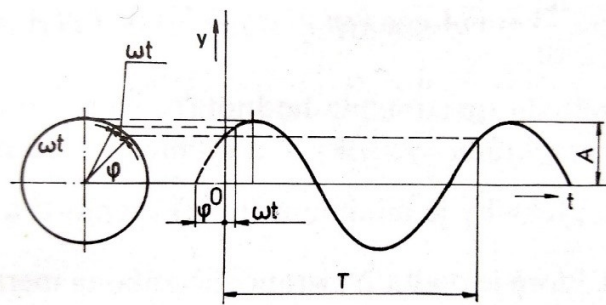
$$T = \frac{1}{f} \quad 2$$

Dalším ukazatelem užívaným pro popis kmitání je vlnová délka λ [m]. T je definována jako vzdálenost uražená za dobu jednoho kmitu T .



Obrázek 1: Závislost výchylky y , rychlosti v a zrychlení a kmitavého pohybu hmotného bodu na čase t (3)

Jelikož se jedná o periodický děj, lze frekvenci i periodu zapsat pomocí veličiny ω [s^{-1}], kterou lze nazvat kruhovou frekvencí.



Obrázek 2: Časové rozvinutí harmonického kmitání (3)

V tomto případě je výpočet frekvence a periody vyjádřen v rovnici 3. (4)

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad 3$$

Pro popis dráhy samotného hmotného bodu je důležité určit meze, ve kterých se bod pohybuje. Touto mezí lze nazvat krajní výchylku bodu neboli amplitudu výchylky A [m].

Pomocí amplitudy výchylky a kruhové frekvence se poté dá určit okamžitá výchylka hmotného bodu y [m] v závislosti na čase.

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad 4$$

Derivací okamžité výchylky podle času lze stanovit rychlost kmitání částice kolem rovnovážné polohy v [$m \cdot s^{-1}$].

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad 5$$

Další derivací podle času je poté možné vypočítat zrychlení částice a [$m \cdot s^{-2}$].

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad 6$$

1.1.2 Vlnění

Díky vlastnostem pružného prostředí, ve kterém se kmitání hmotné částice uskutečňuje, je kmitání pomocí pružných vazeb přenášeno na částice v okolí. Tento proces je specifický v tom, že prostředím postupuje jen rozruch spojený přenosem energie a částice se trvale nepřesunují ze své rovnovážné polohy. Tyto vzájemně navazující kmitavé procesy lze nazvat vlněním. Pružné vlastnosti prostředí se vyskytují v plynných, kapalných i tuhých látkách. (3)

Při vyhodnocování ultrazvukové vlny je vedle kmitání jednotlivých částic podstatné i její šíření určitým směrem. Tento jev se dá odvodit z výpočtu vlnové rovnice pro jeden směr šíření. (1)

$$\frac{d^2y}{d^2t} = c^2 \cdot \frac{d^2y}{d^2x} \quad 7$$

V rovnici 7 je vyjádřeno šíření vlny rychlostí c [$m \cdot s^{-1}$] ve směru x a v dané hodnotě dráhy x .

Při známé rychlosti šíření c lze v kombinaci s charakterem kmitání určit délku vlny λ . (5)

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad 8$$

Rychlost šíření vlny, která je získána rovnicí 8, se označuje za fázovou rychlost s indexem f. (5) (9)

Akustická výchylka y [m] je dána pomocí rovnice 9. (1)

$$y = A \cdot \sin \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad 9$$

Akustickou rychlost lze poté vyjádřit derivací akustické výchylky.

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad 10$$

Při porovnání rovnic 4 a 5 s rovnicemi 9 a 10 je patrný rozdíl ve vyjádření fázového úhlu φ [rad]. Tento rozdíl je vyjádřen pomocí rovnice 11.

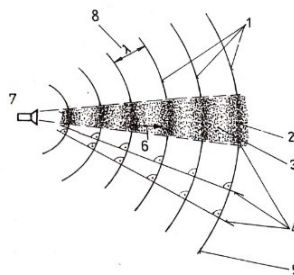
$$\varphi = \omega \cdot \left(\frac{x}{c} \right) \quad 11$$

1.2 Tvary a druhy akustických vln

Pro popis tvaru a druhu vlnění je primárně potřeba určit termín fáze. Fází se nazývá určitá úhlová odchylka, při které částice, mající od sebe vzdálenost délky jedné vlny λ , dosahují v daném okamžiku stejné hodnoty okamžité výchylky. (5)

Při uskutečnění šíření ultrazvukové vlny určitým prostředím se pro popis vlnění používají dva termíny. Prvním je geometricky popsané místo v daném prostředí, kam vlnění dosáhlo v určitém okamžiku. Takové místo lze poté nazvat čelem vlny.

Pro rozlišení tvaru vlnění je však důležitý termín vlnoplocha. Tímto termínem se označuje místo, kde všechny body kmitají se stejnou fází. Tato definice umožňuje chápat čelo vlny jako první bod vlnoplochy, který má taktéž největší vzdálenost od zdroje. (3)



Obrázek 3: Šíření ultrazvukové vlny v plynném nebo kapalném prostředí

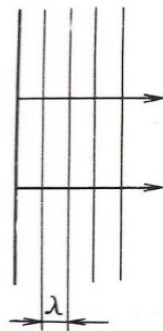
1 – vlnoplocha, 2 – zhuštění, 3 – zředění, 4 – ultrazvukové paprsky, 5 – čelo vlny, 6 – směr kmitání částic prostředí, 7 – zdroj ultrazvukového vlnění, 8 – vlnová délka λ (3)

1.2.1 Tvary akustických vln

V případě neohrazeného prostředí se ultrazvukové vlny vždy šíří prostorově od zdroje vlnění. Dle charakteru šíření vlny patrného ze zakreslení vlnoplochy v určitém okamžiku lze toto vlnění rozdělit na 3 typy:

1.2.1.1 Rovinná vlna

V případě rovinné vlny se je vlnoplocha kolmá na směr jejího šíření. Pro matematický popis této vlny se užívá základní rovnice vlnění (rovnice 9).

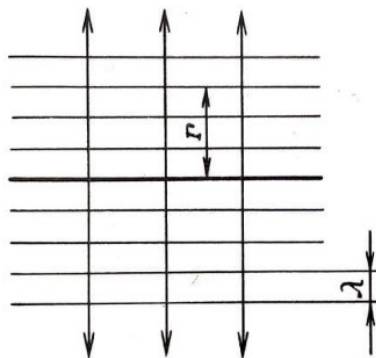


Obrázek 4: Rovinná vlna (5)

1.2.1.2 Válcová vlna

U válcových vln tvoří vlnoplochy souosé válce. Zdrojem takovýchto vln je pomyslná přímka či válec. V praxi se užívá pro případ, kdy má ultrazvukový zdroj tvar obdélníku, jehož jedna strana je menší než vlnová délka λ . Pro popis šíření válcové vlny je užívána následující rovnice, kde r vyjadřuje poloměr vlnoplochy. (4) (5)

$$y = \frac{A}{\sqrt{r}} \cdot \sin \left[\omega \cdot \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \quad 12$$

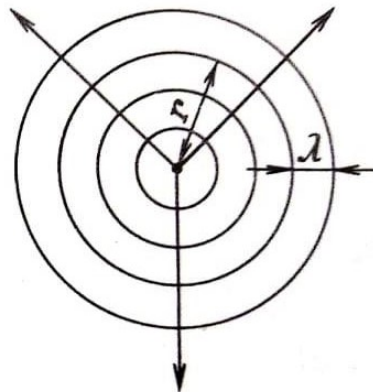


Obrázek 5: Válcová vlna (5)

1.2.1.3 Kulová vlna

Pokud je zdroj ultrazvukových vln malý (bodový), pak lze podle vlnoplochy považovat vlny za kulové. Vlnoplochy mají tvar vlnových ploch, jejichž střed tvoří bodový zdroj. V případě značně velkého poloměru r se změní popis vlny z kulové na rovinnou. Pro popis tohoto typu vln se používá následující rovnice. (4) (5)

$$y = \frac{A}{r} \cdot \sin \left[\omega \cdot \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \quad 13$$



Obrázek 6: Kulová vlna (5)

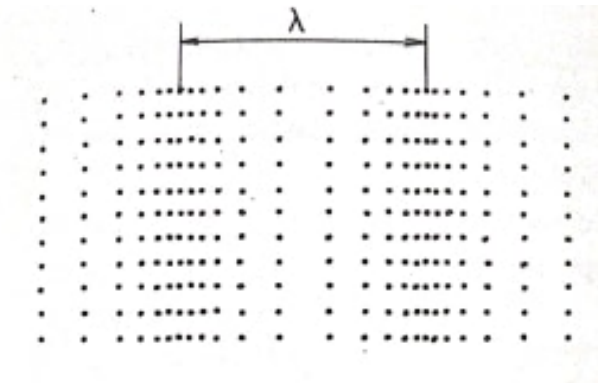
1.2.2 Druhy akustických vln

Pro posouzení, o jaký druh vlny se jedná, se již nehledí na vlnoplochu, ale na pohyb částic prostředí vzhledem ke směru šíření zvukové vlny. V případě plynného nebo kapalného prostředí se díky myšlenému neohraničení prostoru tohoto prostředí uskutečňuje pouze zhušťování a zředování molekul ve směru šíření vlny. U tuhého prostředí se však v minimálně jednom směru objevuje ohraničení prostoru. To způsobuje kmitání molekul nebo hmotných elementů v různých směrech. U některých takových kmitání je potřeba udávat roviny, ve kterých se kmitání uskutečňuje. Pokud k němu dochází jen v jedné rovině, jsou vlny označovány jako lineárně polarizované. (1) (4) (6)

1.2.2.1 Podélné vlny

Podélné, někdy také longitudinální vlny jsou nejběžnějším druhem vln, které se šíří všemi prostředími. Jedinou podmínkou pro jejich šíření jsou dostatečně velké rozměry vůči vlnové délce λ . Z pohledu rychlosti šíření vlny je tento druh označován jako nejrychlejší. Kmitání částic probíhá přímočaře ve směru šíření vlny, kdy dochází k jejich střídavému zhušťování

a zředování (potažmo i ke střídavé změně objemu prostředí). Při popisu vlastností těchto vln je používán index L . (1) (5)

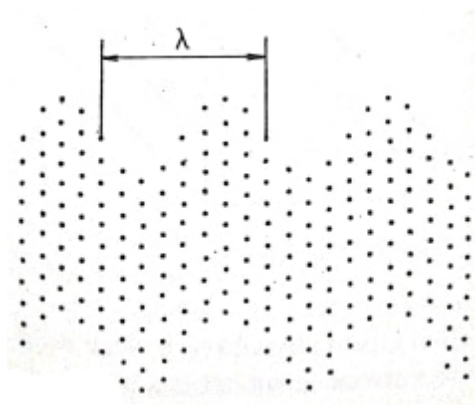


Obrázek 7: Podélná vlna (6)

1.2.2.2 Příčné vlny

Příčné neboli transverzální vlny se mohou šířit pouze v tuhém prostředí. Podmínkou jejich šíření je prostor prostředí větší, než je délka vlny λ a jeho schopnost odolávat smykovému namáhání. Plynné ani kapalně prostředí nekladou žádný odpor vůči tomuto namáhání, a proto se v nich tento druh vln nevyskytuje.

Tyto vlny se vyznačují kmitáním, které je v rovině kolmé na směr šíření vlny. Pro tuto vlastnost se příčné vlny označují jako polarizované. Pokud je zdroj příčných vln natočen, tak se s jeho natočením změní i rovina, ve které částice kmitají. Podle směru šíření vlny lze příčné vlny rozdělit na příčně vertikální (SV mód) a příčně horizontální (SH mód). Při porovnání s podélnými vlnami nedochází ke změně objemu prostředí. Také je jejich rychlost šíření c menší než u vln podélných, a proto mají při stejné frekvenci f kratší vlnovou délku λ (viz. rovnice 8). Pro popis vlastností těchto vln se používá index T . (1) (2) (5)

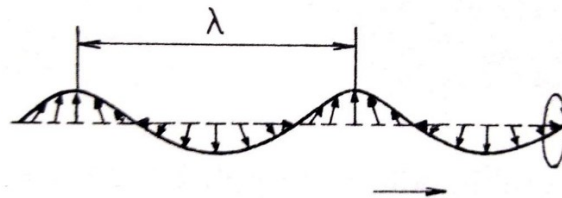


Obrázek 8: Příčná vlna (6)

1.2.2.3 Povrchové vlny

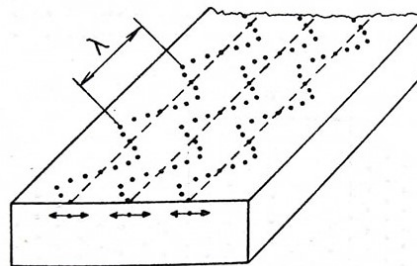
Povrchové vlny se nazývají též Rayleighovy vlny. Stejně jako u příčných vln tu je podmínka odolnosti vůči smykovému napětí. To je důvod, proč se tyto vlny mohou šířit pouze v tuhém prostředí. Tento druh vlny se vyskytuje na povrchu tuhých látek. Samotné kmitání částic prostředí se skládají ze dvou vektorů. První vektor je rovnoběžný se směrem šíření vlny a je kolmý vůči povrchu, což odpovídá podélné vlně. Druhým vektorem je směr kmitání kolmý na směr šíření vlny. Tento charakter kmitání je stejný jako u vlny příčné. Při porovnání těchto dvou vektorů je patrné, že příčná složka povrchové vlny má s rostoucí hloubkou pomalejší úbytek než složka podélná. To má za následek, že složením těchto dvou vektorů vzniká protáhlá elipsa, která je kolmá k povrchu a její hloubkový dosah je zhruba roven vlnové délce λ povrchové vlny ve zkoušeném materiálu. Pro popis charakteristik tohoto vlnění se používá indexu R . Při porovnání s příčnou vlnou se povrchové vlny šíří pomaleji. Rychlost tohoto šíření lze vypočítat pomocí následující rovnice. (1) (2) (5) (6)

$$c_R = (0,92 \text{ až } 0,94) \cdot c_T \quad 14$$



Obrázek 9: Rayleighova vlna (6)

Zvláštním typem povrchových vln jsou Loveovy vlny. Jejich šíření probíhá ve velmi tenkých vrstvách tuhého prostředí, které je pevně spojeno s jiným tuhým prostředím. Při tomto šíření vlny probíhá kmitání jen v příčném směru (kolmo na směr šíření vlny) a zároveň v rovině rovnoběžné s povrchem. (4) (6)

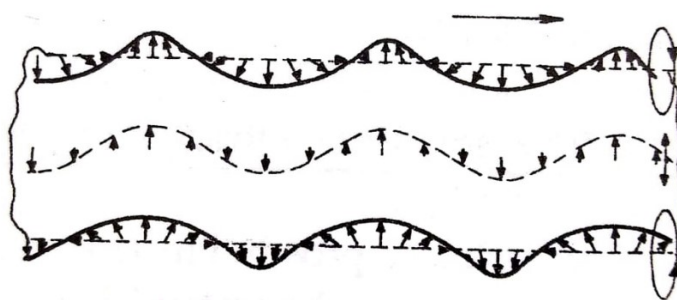


Obrázek 10: Loveovy vlny (6)

1.2.2.4 Deskové vlny

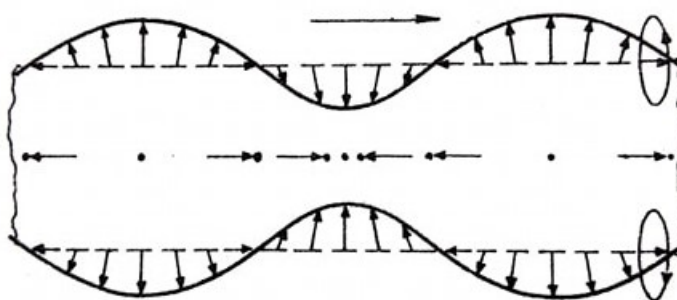
Tyto vlny se také jinak nazývají Lambovy vlny. Pro tento druh vln se užívá indexu D . Charakteristické pro ně je, že se šíří v deskách nebo drátech, jejichž rozměry jsou minimálně v jednom směru blízké nebo srovnatelné s délkou vlny λ . Za těchto podmínek se Rayleighovy vlny vzájemně ovlivňují a tím se mění i charakter celé vlny. Tento charakter kmitání se vyskytuje ve dvou druzích jako vlny asymetrické a symetrické. (1) (5)

Asymetrické neboli ohybové vlny se vyznačují příčným kmitáním částic na neutrální ose (střední část tělesa) a na povrchu po elipse.



Obrázek 11: Asymetrické Lambovy vlny (6)

Symetrické vlny se také jinak nazývají vlnami dilatačními. Oproti asymetrickým vlnám zde dochází k podélnému kmitání částic na neutrální ose a na povrchu je kmitání opět po elipse.



Obrázek 12: Symetrické Lambovy vlny (6)

Rychlost šíření vlny c je díky závislosti na frekvenci f u Lambových vln proměnlivá. K jejímu určení se používá součin frekvence f a charakteristický rozměr d (u desky se jedná o tloušťku a u tyče o její průměr). Příslušná rychlost šíření c_D se poté určí pomocí hodnoty tohoto součinu a typu vlny (symetrická či asymetrická). Díky těmto dvěma údajům se poté z nomogramů dá určit skutečná rychlost šíření vlny. (2)

1.3 Vlastnosti ultrazvukového pole

Pro posouzení a vyhodnocení ultrazvukového signálu se sleduje celá řada vlastností, které jsou přímo závislé na vlastnostech a struktuře posuzovaného prostředí (materiálu).

1.3.1 Akustický tlak

Během průchodu akustické vlny určitým prostředím jsou elementy tohoto prostředí postupně vystavovány střídavému stlačování a roztahování. Tento jev je zapříčiněn působením harmonického tlaku akustické vlny, který vytváří akustický tlak p [Pa]. Tento tlak je definován jako okamžitá výchylka tlaku plynu nebo kapaliny od tlaku statického (atmosférický, hydrostatický). (4)

$$p_c = p_0 + p \quad 15$$

Pro výpočet samotného tlaku p je poté používána následující rovnice:

$$p = \rho \cdot c \cdot v = p_A \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] = A \cdot \omega \cdot \rho \cdot c \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad 16$$

V defektoskopii je nejdůležitějším ukazatelem hodnota amplitudy akustického tlaku p_A [Pa]. Tato hodnota je díky piezoelektrickému jevu přímo úměrná elektrickému napětí na elektrodách ultrazvukové sondy. (1)

$$p_A = A \cdot \omega \cdot \rho \cdot c \quad 17$$

Dalším údajem, který lze z rovnice 16 vyčíst, je hodnota amplitudy akustické rychlosti v_A [$m \cdot s^{-1}$]. (5)

$$v_A = A \cdot \omega \quad 18$$

Obdobně jako v elektrotechnice lze u akustického tlaku a rychlosti zavést jejich efektivní veličiny. (5)

$$p_{ef} = \frac{p_A}{\sqrt{2}} \quad 19$$

$$v_{ef} = \frac{v_A}{\sqrt{2}} \quad 20$$

1.3.2 Akustická impedance

Důležitým faktorem pro posouzení různých vlastností materiálů je jejich akustická impedance Z [Rayl, $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$].

Obecně se jedná o komplexní číslo, které vychází z poměru akustického tlaku a akustické rychlosti vlny v materiálu s ideálními elastickými vlastnostmi. (1)

$$Z = \frac{p}{v} \quad 21$$

Zároveň se však primárně jedná o vlastnost prostředí. Hodnota akustické impedance vyjadřuje odpor prostředí vůči šíření akustické vlny.

$$Z = \rho \cdot c \quad 22$$

1.3.3 Energie akustického vlnění

Obecně se akustickou energií rozumí energie, která je přenášena akustickým vlněním. Tato energie se v pružném prostředí projevuje jen vybuzením ke kmitání, a ne permanentním přemísťováním hmoty prostředí.

Z pohledu výpočtu je možno jako první určit objemovou hustotu akustické energie. Ta je dána jako diferenciální podíl akustické energie E_a a objemu V_0 . (4)

$$w = \frac{dE_a}{dV_0} \quad 23$$

Tuto rovnici lze následně využít pro určení hodnoty hustoty ultrazvukové energie přenášené pomocí vlnění. (4)

$$w = \frac{1}{2} \cdot \frac{p_A \cdot v_A}{c} = \frac{1}{2} \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho \quad 24$$

Z rovnice 24 je patrné, že hustota energie vlny je úměrná hustotě prostředí ρ a druhým mocninám amplitudy výchylky A a frekvence f (viz. rovnice 3).

Důležité je také brát v potaz typ vlny, které daná hustota akustické energie odpovídá. U rovinné vlny se během šíření v prostředí beze ztrát nemění amplituda A se vzdáleností od zdroje. Tudíž se nemění ani hustota akustické energie. Pokud se však jedná o šíření pomocí válcové nebo kulové vlny, tak se vzdáleností od zdroje energie naopak klesá. Pro případ válcové vlny je tento pokles přímo úměrný vzdálenosti od zdroje, u vlny kulové je pokles úměrný kvadrátu vzdálenosti od zdroje. (4)

1.3.4 Intenzita ultrazvukové vlny

Intenzitu ultrazvukové vlny $I_a [W \cdot m^{-2}]$ lze definovat jako fyzikální veličinu, která vyjadřuje mohutnost šíření energie. Projevem šíření akustické energie určitým prostředím je rozkmitání jeho částic vyjádřené pomocí akustického tlaku. Díky tomuto poznatku lze intenzitu ultrazvukové vlny vypočítat z následujícího vztahu.

$$I_a = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2(t)}{\rho \cdot c} dt = p_{ef}^2 \cdot \frac{1}{\rho \cdot c} = p_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot A^2 \cdot \omega^2 = \frac{p_A^2}{2 \cdot \rho \cdot c} \quad 25$$

Při porovnání rovnice 25 s rovnicí 24, která vyjadřuje hustotu ultrazvukové energie, tak lze výpočet zkrátit do následujícího tvaru.

$$I_a = w \cdot c \quad 26$$

V praxi lze dle intenzity ultrazvukové vlny rozdělit ultrazvukové pole do tří oblastí.

Tabulka 2: Rozdělení ultrazvukového pole dle jeho intenzity (4)

Ultrazvukové pole	$I_a [W \cdot m^{-2}]$
Nízké intenzity	$< 0,5 \cdot 10^4$
Střední intenzity	$0,5 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^4$
Vysoké intenzity	$> 10 \cdot 10^4$

1.3.5 Akustický výkon

S intenzitou ultrazvukové vlny je úzce spojen akustický výkon $P [W]$. V zásadě jde o její vyjádření v ploše ve směru šíření vlny. V praxi se většinou užívá plochy, která je na směr šíření kolmá. Tuto vzájemnou závislost lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$I_a = \frac{P}{S} \quad 27$$

Tento vztah lze dále upravit do tvaru, který lépe koresponduje se základními vlastnostmi šířící se vlny.

$$P = p \cdot v \cdot S \quad 28$$

Při dosazení do této rovnice z rovnic 10 a 16 je možno výpočet zapsat v následujícím tvaru:

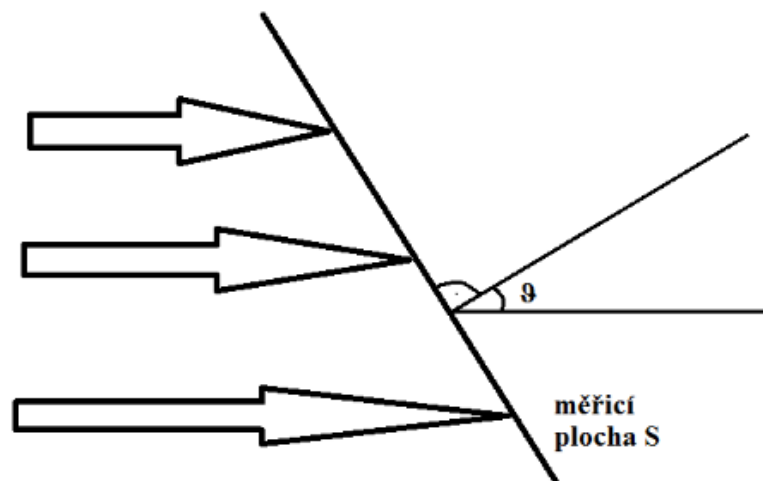
$$P = S \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \cos^2 \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad 29$$

V praxi je více užívána hodnota měrného akustického výkonu $N [W \cdot m^2]$. Zde se kromě velikosti měřené plochy zohledňuje i úhel jejího natočení vůči směru šíření vlny.

$$N = \frac{P}{S \cdot \cos \vartheta} \quad 30$$

Pro usnadnění výpočtu je vhodné volit úhel natočení měřicí plochy $\vartheta = 90^\circ$. Při následném dosazení z rovnice 29 lze pak vzorec pro měrnou hodnotu akustického výkonu zapsat následovně:

$$N = p \cdot v = A^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \cos^2 \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] \quad 31$$



Obrázek 13: Měřicí plocha akustického výkonu

1.3.6 Hladiny akustických veličin

Při použití všech předchozích vztahů v praxi se objeví problém, že se akustické veličiny mění o mnoho řádů. To je důvodem zavedení pojmu hladina, která vyjadřuje akustické veličiny v decibelech. Decibel je v zásadě jednotka, jež udává podíl dvou hodnot stejné veličiny. Z tohoto pohledu je zjevné, že se jedná o fyzikálně bezrozměrnou veličinu, která má logaritmický charakter. V oboru defektoskopie je tohoto vyjádření užíváno pro hodnoty úrovně útlumu nebo úrovně signálu a šumu. (1)

Při použití decibelových stupnic je nutné zavedení určitých referenčních hodnot. Prakticky je možné si zvolit vlastní referenční hodnoty, které pak musejí být uvedeny v protokolu měření. Pro sjednocení různých měření je však vhodnější použít referenční hodnoty dané normou ČSN EN ISO 80000–8: Akustika. (1) (7)

Tabulka 3: Referenční hodnoty hladin akustických veličin dle ČSN EN ISO 80000–8: Akustika (17)

Veličina	Hodnota
P_0	$10^{-12} W$
p_0	$2 \cdot 10^{-5} Pa$
v_0	$10^{-9} m \cdot s^{-1}$
S_0	$1 m^2$
I_0	$10^{-12} W \cdot m^{-2}$
c_0	$331,6 m \cdot s^{-1}$
ρ_0	$1,293 kg \cdot m^{-3}$

První takovouto užívanou hodnotou je hladina akustické rychlosti $L_v[dB]$.

$$L_v = 20 \cdot \log \frac{v}{v_0} \quad 32$$

Jako druhá hodnota je zavedena hladina akustického tlaku $L_p[dB]$, která slouží jako určení akustického tlaku v měřicím bodě v prostoru.

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p_{ef}}{p_0} = 10 \cdot \log \frac{p_{ef}^2}{p_0^2} = 10 \cdot \log \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \quad 33$$

Další hodnotou je vyjádření hladiny intenzity $L_I[dB]$.

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{\frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 \cdot c_0}} = 20 \cdot \log \frac{p_{ef}}{p_0} + 10 \cdot \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho \cdot c} \quad 34$$

Poslední v praxi užívaný je vztah pro určení hladiny akustického výkonu $L_W[dB]$, který vyjadřuje akustický výkon vyzařovaný zdrojem.

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = 10 \cdot \log \frac{I \cdot S}{I_0 \cdot P_0} = L_I + 10 \cdot \log S = L_p + 10 \cdot \log S \quad 35$$

1.3.7 Rychlost ultrazvukových vln

Primárním důsledkem šíření ultrazvukové vlny určitým prostředím je periodické stlačování a zřed'ování jeho částic, které je projevem změn tlaku během průchodu vlny. Rychlost, jakou se ultrazvukové vlny šíří, je ovlivněna vlastnostmi jednotlivých prostředí. Díky velkým rozdílům mezi vlastnostmi plyných, kapalných a tuhých látek je nejprve potřeba definovat mechanismus jakým ultrazvuková vlna daným prostředím prochází.

U čistě plyných a kapalných prostředí je typické, že se u nich vyskytují malé mezimolekulární vazebné síly. Proto nelze definovat určité hranice, které by byly dány samotnými vlastnostmi prostředí. Dalším důsledkem těchto malých vazebných sil je absence smykových napětí, která by byla odezvou vůči smykovému namáhání. Tento jev se vyskytuje u všech plynů a téměř všech kapalin. Výjimkou mohou být některé kapaliny, které vykazují vysoce viskózní vlastnosti. Díky těmto dvěma souvisejícím vlastnostem zmíněných prostředí v nich nedochází k žádným odrazům a v jejich izotropním stavu se šíří jen podélné vlny. Samotná rychlost šíření ultrazvukové vlny v čistých plynech nebo kapalinách je závislá na tlaku, hustotě a teplotě prostředí. Děje spojené s přenosem ultrazvukového vlnění probíhají adiabaticky (bez odevzdání či přivedení tepla). To je zapříčiněno vysokou rychlostí, kterou jsou částice prostředí soustavně zhušťovány nebo zřed'ovány. (4) (5)

V případě tuhých látek se naopak vyskytují mnohem vyšší vazební účinky mezi jejich částicemi. To má za následek, že v nich lze vyvolat jak smykové, tak i tlakové namáhání či napětí. Díky těmto pružně elastickým vlastnostem jsou tuhé látky schopny přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.2 o druzích akustických vln, mají u tuhých látek velký vliv rozměry vyšetřovaného tělesa. Je důležité zohlednit porovnání určitého charakteristického rozměru tělesa (či rozměrů) s vlnovou délkou λ . To slouží k určení druhu vlny, který se v daném tělese vyskytuje. Dalším důležitým ukazatelem je i samotná vnitřní struktura materiálu. V případě anizotropních látek, jakou jsou třeba různé polymery, se rychlost šíření odvíjí od orientace jejich krystalů. Naopak je tomu u amorfních látek (jejichž strukturní mřížka se podobá kapalině) nebo polykrystalických látek, které se skládají z náhodně orientovaných krystalických zrn. Tyto látky lze souhrnně nazvat izotropními. V prostředí vykazujícím tyto strukturní vlastnosti není rychlost šíření nijak ovlivněna směrem orientace zrn. (3) (4) (5)

1.3.7.1 Rychlost šíření ultrazvukových vln v plynném prostředí

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly (1.3.7), v plynném a kapalném prostředí se díky jejich vlastnostem mohou šířit jen podélné vlny. Proto v následujících dvou podkapitolách (1.3.7.1 a 1.3.7.2) není užito indexu L , kterým se vlastnosti náležející tomuto druhu vln označují.

Pro případ ideálního plynu je rychlost šíření vlny $c[m \cdot s^{-1}]$ dána následujícím vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} \quad 36$$

Vlastnosti prostředí jsou v rovnici 36 reprezentovány jeho hustotou ρ a Poissonovou konstantou κ . Tu lze vyjádřit jako poměr měrného tepla za konstantního tlaku $c_p[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ a měrného tepla za konstantního objemu $c_v[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ nebo pomocí poměru izotermického koeficientu stlačitelnosti $\beta_{iz}[Pa^{-1}]$ a adiabatického koeficientu stlačitelnosti $\beta_{ad}[Pa^{-1}]$. (4) (5)

$$\kappa = \frac{\beta_{iz}}{\beta_{ad}} = \frac{c_p}{c_v} \quad 37$$

Při dosazení vztahů pro určení Poissonovy konstanty z rovnice 37 do rovnice 36 lze výpočet rychlosti šíření ultrazvukové vlny v ideálním plynném prostředí dle potřeby upravit.

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta_{ad} \cdot \rho}} = \sqrt{\kappa \cdot \frac{1}{\beta_{iz} \cdot \rho}} \quad 38$$

Další úpravou rovnice 36 může být zavedení pojmu adiabatický modul objemové pružnosti $K[Pa]$. V rovnici pro výpočet tohoto modulu je zohledněna změna tlaku v závislosti na změně objemu $V_0[m^3]$. (8)

$$K = -\left(\frac{dp}{dV_0}\right) \cdot V_0 = -\frac{p}{\frac{V_0}{V_0}} \quad 39$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad 40$$

V úvodu kapitoly 1.3.7 je zmíněno, že rychlost šíření ultrazvukové vlny je závislá na hustotě, tlaku a teplotě. Tlak a hustota jsou zastoupeny v rovnici 36. Změnu rychlosti šíření zapříčiněnou závislostí na teplotě lze u malých odchylek vypočítat za předpokladu známé rychlosti šíření vlny c_0 při teplotě $t = 0^\circ\text{C}$. (5)

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p_0}{\rho_0}} \cdot (1 + b' \cdot \theta) = c_0 + b \cdot \theta \quad 41$$

kde $p_0[\text{Pa}]$ – počáteční tlak při $t = 0^\circ\text{C}$

$\rho_0[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ – počáteční hustota při $t = 0^\circ\text{C}$

$b'[\text{K}^{-1}]$ – poměrný teplotní součinitel

$b[\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ – teplotní součinitel

$\theta[^\circ\text{C}]$ - teplota, pro kterou je prováděn výpočet

Posledním faktorem, který je potřeba u ideálních plynů zmínit, je vlhkost vzduchu. Rychlost šíření ultrazvukové vlny roste spolu s rostoucí vlhkostí přibližně lineárně. Tento nárůst však není nijak dramatický. Například při nárůstu vlhkosti o 50 % dojde ke zvýšení rychlosti přibližně o 1 %. V případě potřeby přesného určení rychlosti vlny ve vlhkém vzduchu lze do rovnice 39 zavést poměrnou vlhkost vzduchu α_v (viz rovnice 40). (4) (5)

$$c = 331,82 \cdot (1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_v) \cdot (1 + 1,83 \cdot 10^{-3} \theta) \quad 42$$

Rychlost šíření ultrazvukové vlny vypočítaná z rovnic 36, 38 a 40 se týká pouze ideálních plynů, kde se nebere v úvahu závislost na frekvenci. U reálných (většinou víceatomových) plynů se tato závislost objevuje a je vysvětlena jako projev akustické disperze. Na tu mají vliv různé fyzikální parametry prostředí, jímž se vlna šíří. Mezi takové parametry lze zařadit relaxační děje, vnitřní tření nebo rezonančními ději podmíněná absorpce. Největší vliv na frekvenční závislost v plynech má tepelná relaxace, kterou lze charakterizovat jako zpoždění nebo dobu relaxace τ . Tato doba relaxace vyjadřuje čas, jehož je potřeba k výměně energie mezi interními a externími stupni volnosti, které zároveň určují měrné teplo daného plynu. Porovnáním doby tepelné relaxace τ a periody ultrazvukových kmitů T lze definovat tři různé mechanismy kmitání částic. Prvním takovým mechanismem je případ, kdy je doba relaxace mnohem menší než perioda ultrazvukových kmitů. V tomto případě kmitají atomy v molekule ve shodě se stupni volnosti. Naopak při vysokých frekvencích, kdy je perioda menší než doba relaxace, nemohou již atomy kmitat ve shodě se stupni volnosti. Rychlost

šíření vlny je v obou těchto případech nezávislá na frekvenci. K disperzi rychlosti dochází v případech středních frekvencí, kdy je délka periody ultrazvukových kmitů porovnatelná s dobou relaxace. (4) (5)

1.3.7.2 Rychlost šíření ultrazvukových vln v izotropním kapalném prostředí

Díky podobným fyzikálním vlastnostem kapalného a plynného prostředí lze rovnice pro výpočet rychlosti šíření ultrazvukové vlny použít pro oba typy prostředí (rovnice 36 až 41).

Co se týká jednotlivých fyzikálních veličin, které mohou rychlost šíření ovlivnit, tak zejména u teploty vody se objevuje zajímavá vlastnost. Rychlost šíření ve vodě stoupá spolu s teplotou až na hranici 74°C. Překonáním této teploty rychlost šíření ultrazvukové vlny klesá. (4)

Vliv tlaku je díky nestlačitelnosti kapalin téměř minimální. Kupříkladu ve vodě se rychlost šíření vlny zvyšuje o pouhé 0,1 % na 1 MPa. Pokud však je potřeba opravdu přesného určení, tak je u čistých kapalin použit vztah, který je obdobný rovnici 41. (5)

V praxi se však nevyskytují jen čisté kapaliny. Často je nutné pracovat s různými roztoky a směsmi, které mají rozdílnou koncentraci jednotlivých složek. Za předpokladu udržení konstantní teploty a tlaku je u malých koncentrací možno vyjádřit vliv koncentrace na rychlost šíření ultrazvukové vlny následujícím lineárním vztahem: (5)

$$c = c_0 + a_k \cdot q \quad 43$$

kde $a_k [m \cdot s^{-1}]$ – absolutní součinitel koncentrace

$q [\%]$ - koncentrace

Díky různé koncentraci lze měnit teplotní závislost rychlosti šíření. To je využíváno při volbě imerzní vrstvy. Například použitím roztoku vody a etylalkoholu. Zde je využito toho, že voda má do hodnoty $t = 74^\circ\text{C}$ kladný teplotní součinitel b a etylalkohol naopak záporný. Nastavením přesné koncentrace $q = 15,62\%$ má roztok vlastnosti, při nichž je v rozmezí teplot $t = 10 - 40^\circ\text{C}$ konstantní rychlost šíření ultrazvukové vlny $c = 1600 m \cdot s^{-1}$. (5)

Dalším využitím v praxi je měření rychlosti šíření v tekutých kovech a solích. Její rychlosti je obvykle nelineární, ale v některých případech dvousložkových směsí ji lze analyticky vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$c = \sqrt{[q_1 \cdot c_1^2 + (1 - q_1) \cdot c_2^2]} \quad 44$$

Často je také možné se setkat s kapalinami, které obsahují malé tuhé částice či malé živé organismy. Zde je rychlost šíření závislá na jejich rozměrech a koncentraci. Pokud se střední velikost částic D [m] blíží délce vlny λ , pak lze použít vzorce pro čistou kapalinu. V případě, že tato velikost částic je mnohem menší než délka vlny, je možné pro určení rychlosti šíření ultrazvukové vlny použít následující vzorec: (5)

$$c = \frac{c_1}{\sqrt{\left\{ \left[1 + q' \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \right] \cdot \left[1 - q' \left(1 - \frac{\rho_1 \cdot c_1^2}{\rho_2 \cdot c_2^2} \right) \right] \right\}}} \quad 45$$

1.3.7.3 Rychlost šíření ultrazvukových vln v izotropním tuhém prostředí

Na začátku této kapitoly je řečeno, že vedle vnitřní struktury a fyzikálních vlastností materiálu zkoumaného tělesa jsou také důležitým faktorem jeho rozměry.

První je případ, kdy jsou všechny rozměry zkoumaného tělesa větší než vlnová délka. V takovém prostředí se stejně jako u kapalin a plynů šíří primárně podélné (longitudinální) vlny označené indexem L. Díky vlastnosti tuhých látek odolávat tlakovému a smykovému namáhání je pro výpočet rychlosti vlny nutno znát modul pružnosti v tahu E [Pa] a Poissonovo číslo μ [–] pro daný materiál. (4) (5)

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}} \quad 46$$

Dalšími jsou případy, kdy je jeden rozměr tělesa, který je kolmý na směr šíření vlny, menší než její vlnová délka. Typickým takovým tělesem je například deska či plech, kde se z pohledu akustického šíření vlny jeví jako charakteristický rozměr tloušťka d . (1) (5)

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2}} \quad 47$$

Posledním případem je šíření vlny tělesem, jehož dva rozměry jsou menší než vlnová délka šířící se vlny. Typickým tělesem pro takovéto šíření vlny je tyč, jejímž charakteristickým rozměrem je její průměr d . (5)

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad 48$$

V případě tuhých těles se nešíří jen podélné vlna, ale díky jejich charakteristickým rozměrům i vlny příčné, povrchové a deskové. Rychlost šíření příčných (transverzálních) vln lze určit pomocí modulu pružnosti ve smyku $G[Pa]$.

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 49$$

Zároveň je možno rychlosti šíření příčných vln určit za pomoci stejných známých hodnot jako u vln podélných. Toho lze využít díky vztahu, který slouží k výpočtu Poissonova čísla.

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad 50$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 - \mu)}} \quad 51$$

Často je udáván poměr rychlosti šíření podélných a příčných vln, který je díky vztahu v rovnici 50 závislý pouze na Poissonově čísle. (4)

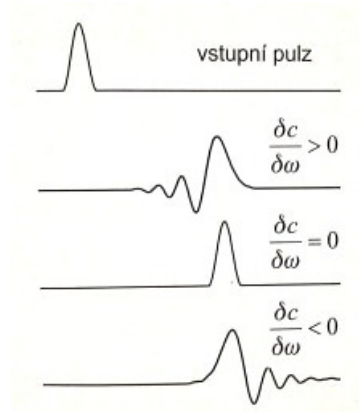
$$\frac{c_T}{c_L} = \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \mu}{2 \cdot (1 - \mu)}} \quad 52$$

Rychlost šíření povrchových (Raileghových) vln, označovaných indexem R, lze určit pomocí vzorce 14, uvedeném v kapitole 1.2.2. Pro přesnější výpočet je však vhodnější použít následující vztah, který také vychází ze znalosti rychlosti šíření příčné vlny. Tento vztah je přesný v případě rovné plochy, ale v technické praxi ho lze užít i pro zakřivené plochy. (5)

$$c_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \mu}{1 + \mu} \cdot c_T \quad 53$$

Zatím uvedené rovnice 46 až 53, týkající se podélných, příčných a povrchových vln v pásmu používaných v defektoskopii (20 kHz – 20 MHz), jsou prakticky nezávislé na frekvenci f . Deskové (Lambovy) vlny jsou však již na frekvenci závislé. Tato závislost je dána tím, že tloušťka tělesa d je menší než vlnová délka λ . To dovoluje ultrazvukovým vlnám, které by jinak vykazovaly chování povrchových vln, ovlivňovat vlnění v místě neutrální osy tělesa. Na základě tloušťky tělesa d a frekvence vlny f se v tělese šíří vlny dvěma módy, symetricky nebo asymetricky (viz. 1.2.2.4). Na základě příslušného módu a frekvence f poté dochází u

šíření vlny k disperzi. Tu lze definovat jako změnu tvaru impulzu, jež je zapříčiněna rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých spektrálních složek. V jejím důsledku poté vzniká proměnný tvar impulzu v závislosti na vzdálenosti od zdroje vlny nebo čase. (1) (5) (9)



Obrázek 14: Vliv disperze při šíření ultrazvukového impulzu (1)

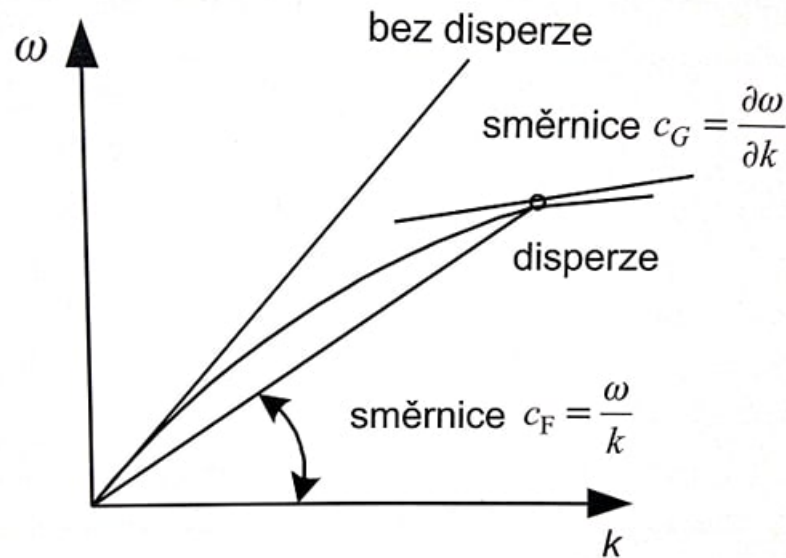
Určení rychlosti šíření deskové vlny c_D je možné provést dvěma způsoby. U obou je však nutné znát určité parametry, které vycházejí z vlnového čísla neboli vlnočtu k příslušné vlny.

$$k = \frac{\omega}{c_F} \quad 54$$

Pomocí výpočtu z rovnice 54 lze poté určit dvě charakteristické rychlosti, které poté slouží k určení rychlosti a módu deskové vlny. První takovou rychlostí je fázová rychlost c_F . Tato rychlost šíření vychází ze základní rovnice pro určení vlnové délky λ (rovnice 8). Ta popisuje rychlost šíření vlny pouze na základě vlnové délky a příslušné frekvence.

Další charakteristickou rychlostí určenou pomocí vlnového čísla k je grupová (skupinová) rychlost c_G . Ta udává rychlost vlnové grupy (skupiny), která vznikla jako důsledek mnoha odrazů v prostředí. Jako výsledná vlna se poté uvažuje vlnění, které vzniklo superpozicí jednotlivých odražených vln vykazujících stejnou polarizaci, ale různé kmitočty a vlnová čísla. Výsledná grupová rychlost c_G poté udává rychlost šíření grupy, která má stejnou amplitudu a málo rozdílný kmitočet. (1) (5)

$$c_G = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad 55$$



Obrázek 15: Fázová a grupová rychlost (1)

První způsob, jak určit rychlost šíření deskové vlny c_D , je analytický výpočet pomocí Rayleigh-Lambovyh rovnic. Ty popisují závislost vlnového čísla a frekvence v homogenní izotropní desce o tloušťce $2 \cdot h$ pro časově frekvenční distribuci. (1)

$$\frac{\tan(q \cdot h)}{\tan(p \cdot h)} = \left[\frac{4 \cdot k^2 \cdot q \cdot p}{(q^2 - k^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad 56$$

Exponent ± 1 zde vyjadřuje, zda se jedná o symetrický mód (+1) nebo antisymetrický mód (-1). Dále se zde vyskytují proměnné p a q , které jsou definovány následujícími vztahy:

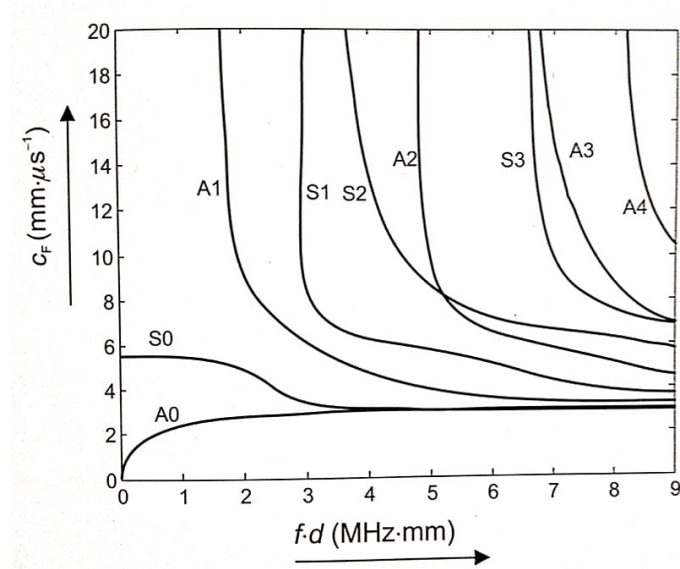
$$p^2 = \left(\frac{\omega^2}{c_L} \right) - k^2 \quad 57$$

$$q^2 = \left(\frac{\omega^2}{c_T} \right) - k^2 \quad 58$$

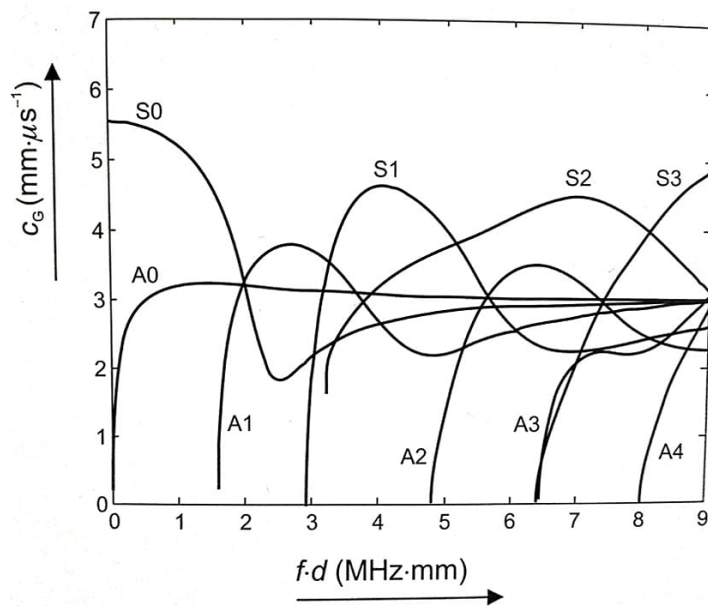
Toto analytické vyjádření je však velmi obtížné, jelikož se v tělese šíří nekonečný počet vln, které mají rozdílný vlnový mód.

Druhou možností, která se v praxi využívá, je užití nomogramů. V těchto nomogramech jsou zakresleny disperzní charakteristiky, které byly vypočteny pokročilými metodami z naměřených hodnot elastických konstant příslušného materiálu. Tyto konstanty odpovídají fázové a grupové rychlosti symetrických a asymetrických vln, uvedených jako funkce součinu frekvence f a tloušťky desky d . Symetrické a asymetrické módy odpovídající příslušným dis-

perzním křivkám se v nomogramech označují jako S0, A0, S1, A1 a dále. Příklad nomogramu pro určení fázové a grupové rychlosti deskové vlny v duralovém plechu o tloušťce 0,8 mm je uveden na obrázcích 16 a 17. (1)



Obrázek 16: Nomogram pro určení fázové rychlosti (1)



Obrázek 17: Nomogram pro určení grupové rychlosti (1)

1.3.8 Tlumení ultrazvukových vln

Jedním z důležitých aspektů, který doprovází průchod ultrazvukové vlny určitým prostředím, je pokles její energie, s čímž je spojen i pokles akustického tlaku. Tento jev je přímo závislý na vlastnostech prostředí a vzdálenosti, kterou vlna v tomto prostředí urazila. (1)

Pro určení tohoto poklesu je veličinou činitel útlumu prostředí α [$dB \cdot m^{-1}$]. Poměrný pokles akustického tlaku je poté určen na základě konstantního útlumu α a vzdálenosti od počátku tlumení daným prostředím l . (5)

$$\frac{dp}{p} = -\alpha \cdot dl \quad 59$$

Integrací rovnice 63 lze uvést vztah pro pokles akustického tlaku na dráze následujícím výrazem:

$$p_l = p_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l} \quad 60$$

1.3.8.1 Kapaliny a plyny

Při průchodu ultrazvukové vlny kapalným nebo plynným prostředím jsou ztráty α definovány jako součet ztrát způsobených viskozitou (vnitřním třením) α_v a ztrát způsobených vlivem vedení tepla α_T .

$$\alpha = \alpha_v + \alpha_T = \frac{2 \cdot \pi^2}{\rho \cdot c^3} \cdot \left[\frac{4}{3} \cdot \eta + \lambda_T \cdot \left(\frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_p} \right) \right] \cdot f^2 = a \cdot f^2 \quad 61$$

Ve druhé polovině rovnice 61 je přímo viditelná závislost jednotlivých ztrátových koeficientů na jejich fyzikálních charakteristikách. U ztrát způsobených viskozitou α_v je to dynamická viskozita η [$Pa \cdot s$]. Vliv vedení tepla je tu charakterizován tepelnou vodivostí λ_T [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] a měrným teplem za stálého objemu c_v a stálého tlaku c_p . (4)

Veličina, která se vyskytuje na konci rovnice 61, se nazývá ztrátové číslo a . To je užíváno jako charakteristika útlumu, která není závislá na frekvenci. K jejímu vyjádření lze použít rovnici 62.

$$a = \frac{\alpha}{f^2} \quad 62$$

V případě šíření vlny v kapalném prostředí je ztrátové číslo a závislé zejména na viskózním tlumení. Dalším faktorem, který má na tlumení vlny vliv, je nehomogenita samotného prostředí. Ta je způsobena přítomností cizích částic a malých bublin.

Pro plynné prostředí má velký vliv na tlumení ultrazvukové vlny znečištění. Přítomnost vodních par a dýmových částic způsobuje jeho tlumení.

Jak u plynného, tak i u kapalného prostředí hraje velkou roli teplota. S jejím růstem se zvyšuje útlum procházející vlny. Jediná výjimka je u vody, kde naopak útlum s růstem teploty klesá. (1) (5)

1.3.8.2 Tuhé látky

Prochází-li ultrazvuková vlna tuhým prostředím, dochází k útlumu pomocí dvou mechanismů.

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad 63$$

Prvním mechanismem je pohlcování (absorpce) vlny α_p , které je způsobeno hlavně vnitřním třením kmitajících částic. Energie vlny, která je absorbována, se prostřednictvím kmitání mění na energii tepelnou. Dalšími důvody pohlcení ultrazvukové vlny jsou hysterezní ztráty, relaxační a tepelné jevy a plastické tečení. Z důvodu adiabatických změn objemu jsou tlumením více ovlivněny podélné vlny. Z pohledu volby vhodných parametrů pro měření je podstatné, že útlum zapříčiněný pohlcením části energie vlny je u většiny tuhých látek přímo úměrný frekvenci ultrazvuku. (5)

Druhým typem, který ovlivňuje útlum ultrazvukové vlny, je útlum rozptylem α_r . Vlivem tohoto jevu dochází k odrazu, lomu, ohybu a rozptylu procházející vlny. Tento mechanismus se uplatňuje zejména u nehomogenního a polykrystalického prostředí, které vykazuje neideální elastické vlastnosti. Příčinou tohoto tlumení je dopad ultrazvukových vln na rozhraní vyskytujících se v nehomogenních prostředích. Typicky lze tento jev pozorovat u polykrystalických látek jako jsou kovy, které vykazují složení z většího počtu náhodně prostorově orientovaných zrn. Díky anizotropii krystalů vykazují takováto prostředí různé elastické vlastnosti pro různé směry a tím je přímo ovlivněna rychlost šíření ultrazvuku, jenž jimi prochází. V zásadě platí, že s rostoucí anizotropií se zvyšují i ztráty způsobené rozptylem.

Při vyhodnocování celkového činitele útlumu daného tuhého prostředí je důležité určit vzájemný poměr velikosti vlnové délky λ a střední velikosti zrna struktury \bar{D} [mm]. Tento poměr hraje významnou roli při určení celkových ztrát způsobených rozptylem.

První možností je případ, kdy je délka vlny mnohem větší než střední velikost zrna.

$$2 \cdot \pi \cdot \bar{D} < \lambda < 20 \cdot \bar{D} \quad 64$$

$$\alpha = a_p \cdot f + a_r \cdot f^4 \quad 65$$

Celkový činitel útlumu prostředí lze poté určit pomocí rovnice 67, kde a_p a a_r značí ztráty způsobené pohlcováním a rozptylem. Za těchto podmínek dochází k Rayleighovu rozptylu, jehož ztráty rozptylem přibližně odpovídají třetí mocnině střední velikosti zrna ($a_r \approx \bar{D}^3$).

Dalším případem je stav, kdy je délka vlny srovnatelná se střední velikostí zrna. Rozptyl, ke kterému při něm dochází, se nazývá stochastickým. Ztráty zapříčiněné tímto rozptylem jsou úměrné střední velikosti zrna ($a_r \approx \bar{D}$). (1)

$$\bar{D} < \lambda < 2 \cdot \pi \cdot \bar{D} \quad 66$$

$$\alpha = a_p \cdot f + a_r \cdot f^2 \quad 67$$

Třetí možností je situace, kdy je vlnová délka menší než střední velikost zrna. V takovém případě dochází k difúznímu rozptylu. Principem tohoto rozptylu je mechanismus, kdy ultrazvuková vlna proniká (difunduje) mezi jednotlivými krystaly. Díky takovému pronikání dochází k útlumu vlny v každém zrně. K následnému vyjádření činitele útlumu lze použít rovnici 67. Ztráty rozptylem přibližně odpovídají střední velikosti zrna umocněných na minus prvou ($a_r \approx \bar{D}^{-1}$).

Extrémní případ nastává v okamžiku, kdy je délka vlny výrazně menší než střední velikost zrna. Za těchto podmínek dochází k pohlcování ultrazvukové vlny v každém zrně. Dalším jevem je odraz samotné vlny. Ten je způsoben nejen velikostí samotného zrna, ale i vyloučenými látkami, které lze nalézt na jejich hranicích (například uhlík). Pro tyto případy je rovnice 67 sloužící k určení činitele útlumu modifikována o další člen, který zde zastupuje vliv středního činitele odrazu \bar{R} na hranicích zrn. (1)

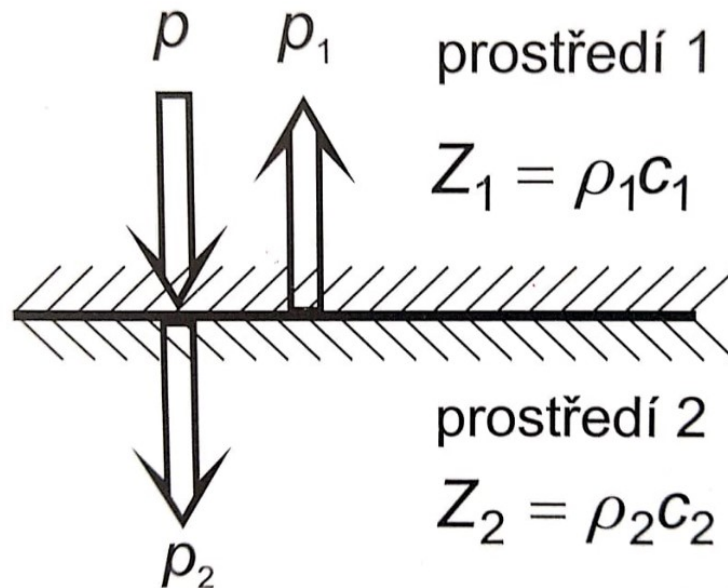
$$\alpha = a_p \cdot f + a_r \cdot f^2 + \frac{\bar{R}}{\bar{D}} \quad 68$$

1.3.9 Ultrazvuková vlna na rozhraní dvou prostředí

Pro defektoskopii je jednou z nejdůležitějších vlastností ultrazvukové vlny její chování na rozhraní dvou různých prostředí. Při jejím průchodu tímto rozhraním je část vlny odražena zpátky ke zdroji vlnění a část pokračuje dále ve svém šíření. Poměr odražené a dále procházející vlny je poté dán akustickou impedancí jednotlivých prostředí, která je dána jejich fyzikálními vlastnostmi. Dalším důležitým aspektem je úhel, pod kterým dopadá ultrazvuková vlna na dané rozhraní. (2) (5)

1.3.9.1 Kolmý dopad

Základním případem je dopad ultrazvukové vlny kolmo na dané rozhraní dvou různých prostředí. Typický případ takto dopadající vlny je zobrazen na obrázku 18.



Obrázek 18: Kolmý dopad ultrazvukové vlny a rozhraní dvou prostředí (1)

Při posuzování dopadající, odražené a průchozí vlny se vychází z určení změny akustického tlaku (zejména jejich amplitudy), akustické rychlosti a rozdílu fyzikálních vlastností jednotlivých prostředí, která jsou vyjádřena jejich akustickou impedancí.

$$p = p_A \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] = \rho_1 \cdot c_1 \cdot v = Z_1 \cdot v \quad 69$$

$$p_1 = p_{A1} \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t + \frac{x}{c_1} \right) \right] = -\rho_1 \cdot c_1 \cdot v_1 = -Z_1 \cdot v_1 \quad 70$$

$$p_2 = p_{A2} \cdot \cos \left[\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c_2} \right) \right] = \rho_2 \cdot c_2 \cdot v_2 = Z_2 \cdot v_2 \quad 71$$

Pro maximální zjednodušení výpočtu, lze rozhraní považovat jako počátek dráhy $x = 0$. Při zavedení této podmínky na rozhraní platí kontinuita akustických tlaků a akustických rychlostí.

$$p_2 = p + p_1 \quad 72$$

$$v_2 = v + v_1 \quad 73$$

Po dosazení hodnot z rovnic 69, 70 a 71 do rovnic 72 a 73 je možné vyjádřit stejnou kontinuitu i pro hodnoty amplitudy akustického tlaku či akustické rychlosti. Následující vztahy

jsou pro akustický tlak i akustickou rychlost stejné. Z důvodu snadnějšího vyhodnocení ultrazvukové vlny je častěji užíván vztah pro akustický tlak.

$$p_{A2} = p_A + p_{A1} \quad 74$$

K hodnocení vlastností samotného rozhraní jsou užívány součinitel odrazu R a součinitel průchodu D :

$$R = \frac{p_{A1}}{p_A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 \cdot c_2 - \rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2 + \rho_1 \cdot c_1} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad 75$$

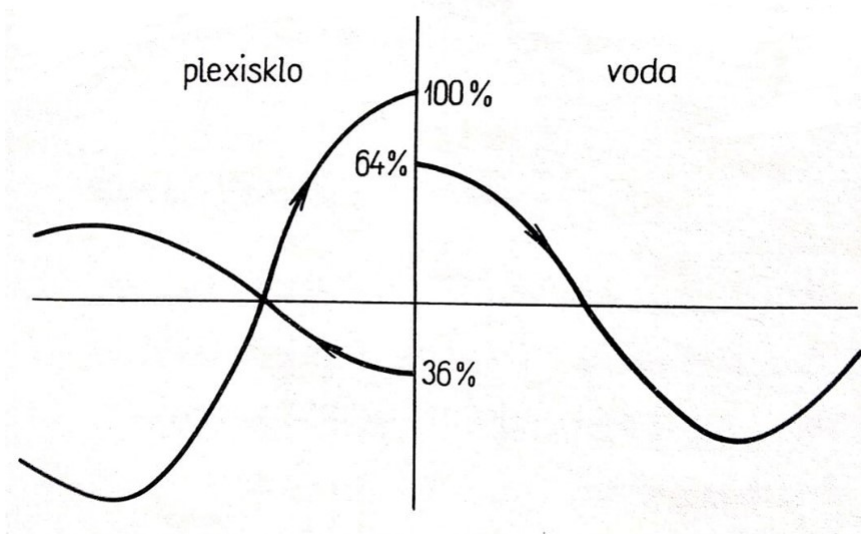
$$D = \frac{p_{A2}}{p_A} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \cdot \rho_2 \cdot c_2}{\rho_2 \cdot c_2 + \rho_1 \cdot c_1} = \frac{2}{1 + m} = 1 + R \quad 76$$

$$m = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \quad 77$$

Dle koeficientu m , který vyjadřuje poměr akustických impedancí obou prostředí, mohou nastat tři možnosti.

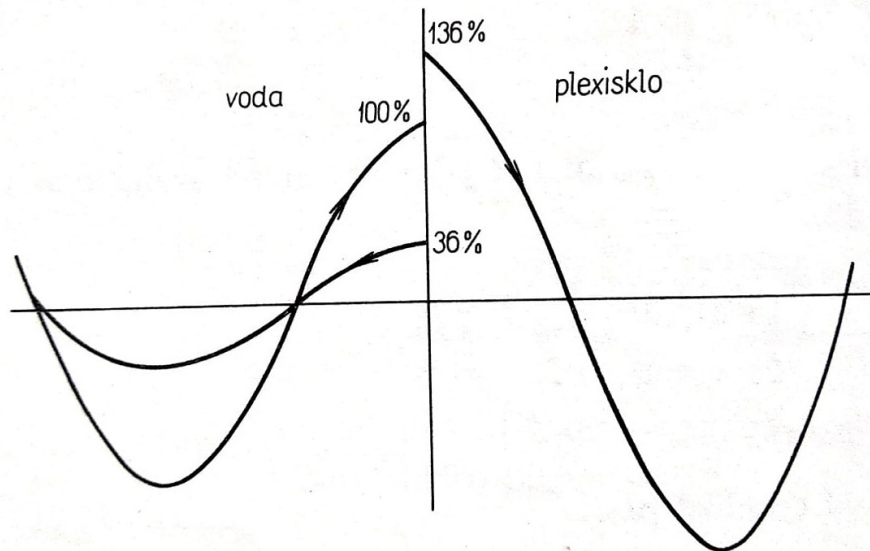
První je možnost, kdy je $m = 1$. Při takovémto poměru akustických impedancí nedochází k žádnému odrazu a ultrazvuková vlna pokračuje v nezměněném stavu dále.

Další možností je stav, kdy je poměr akustických impedancí $m > 1$. Z rovnice 81 je patrné, že akustická impedance Z_1 je větší než akustická impedance Z_2 . Takovýto stav indikuje, že prostředí 1 má větší hustotu než prostředí 2. Jako příklad může posloužit situace, kdy je prostředí 1 tvořeno plexisklem a prostředí 2 vodou. Při dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dochází k odrazu, jehož fáze akustického tlaku je opačná proti fázi vlny dopadající. (1) (5)



Obrázek 19: Přechod ultrazvukové vlny z hustšího do řidšího prostředí (5)

Poslední možností je případ vyjádřený poměrem akustických impedancí $m < 1$. Za tohoto poměru většinou probíhá přechod z řidšího do hustšího prostředí. V tomto případě nedochází ke změně fáze akustického tlaku.



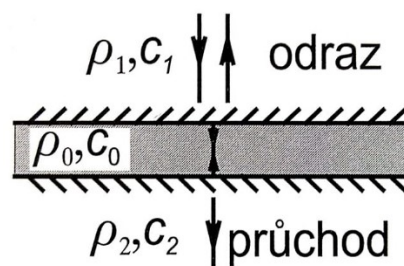
Obrázek 20: Přechod ultrazvukové vlny z řidšího do hustšího prostředí (5)

Pokud ultrazvuková vlna prochází tenkou vrstvou, která má srovnatelnou tloušťku d s vlnovou délkou λ , dochází k interferenci vlny dopadající na vrstvu od zdroje a vln odražených od obou rozhraní. Tato tenká vrstva se neuplatní, pokud je tloušťka vrstvy $d < \lambda$ nebo dosahuje hodnot daných rovnicí 82.

$$d = n \cdot 0,5 \cdot \lambda \quad 78$$

V případě, že se tenká vrstva o akustické impedanci Z_0 nachází mezi dvěma prostředími, která nabývají akustické impedance Z_1 a Z_2 , je její vliv zanedbatelný za splnění podmínky ukázané v rovnici 83.

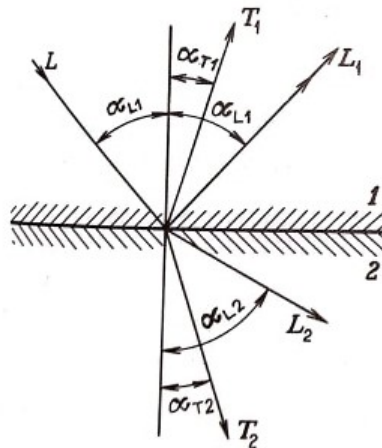
$$Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} = \sqrt{\rho_1 \cdot c_1 \cdot \rho_2 \cdot c_2} \quad 79$$



Obrázek 21: Kolmý průchod a odraz ultrazvukové vlny tenkou vrstvou (1)

1.3.9.2 Šikmý dopad

Dopadá-li ultrazvuková vlna pod určitým úhlem na rozhraní 2 prostředí, tak dochází k jejímu odrazu, lomu a případně transformaci. Ta je podmíněna schopností alespoň jednoho prostředí přenášet příčné vlny. Pokud tedy dopadne příčná vlna na rozhraní 2 tuhých prostředí pod úhlem, tak díky transformaci se mohou v obou prostředích šířit podélné i příčné vlny. Tato transformace se týká jak odražené, tak i procházející složky vlny.



Obrázek 22: Šikmý dopad podélné ultrazvukové vlny (5)

Na obrázku 25 je znázorněn šikmý dopad podélné ultrazvukové vlny. Jelikož se jedná o myšlené rozhraní dvou tuhých látek, tak se v obou z nich po průchodu (odrazu) vlny vyskytuje jak podélná, tak i příčná složka. Úhly, pod kterými se jednotlivé složky šíří dál jsou posuzovány vůči normále k rozhraní. Jejich vzájemný vztah je společně s jejich příslušnou rychlostí šíření vlny dán Snellovým zákonem:

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}} \quad 80$$

Pro praxi se Snellův zákon používá v upraveném tvaru, kde se poměry rychlosti rovnají poměrům sinů. Poměr rychlostí lze také nazvat indexem lomu n . V rovnici 85 je uveden příklad takové úpravy mezi dopadající podélnou a odraženou transformovanou příčnou vlnou.

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{\sin \alpha_{T1}} = \frac{c_{L1}}{c_{T1}} \quad 81$$

Podle úhlu dopadu je zaveden pojem kritický úhel. Jedná se o situaci, kdy při dopadu vlny dojde k úplnému odrazu nebo vymizení jednoho druhu vln. To je dáno vzájemnou závislostí úhlů všech procházejících i odražených vln na úhlu dopadu podélné vlny α_{L1} . S růstem tohoto úhlu rostou i úhly všech ostatních vln.

První kritický úhel je dán okamžikem, kdy úhel, pod kterým dopadá podélná vlna α_{L1} , odpovídá úhlu šíření po lomu $\alpha_{L2} = 90^\circ$. V tomto případě se podélná složka vlny již nešíří druhým prostředím, ale pouze jeho povrchem jako povrchová podélná vlna. Tento úhel lze matematicky vyjádřit pomocí rovnice 86.

$$\sin \alpha_{K1} = \frac{c_{L1}}{c_{L2}} \quad 82$$

Druhý kritický úhel je analogicky stejný případ jako u prvního kritického úhlu. Rozdílem je, že v tomto případě dochází k indexu lomu, kdy je $\alpha_{T2} = 90^\circ$. Příčná vlna se poté nešíří druhým prostředím, ale opět pouze jeho povrchem jako povrchová příčná vlna.

$$\sin \alpha_{K2} = \frac{c_{L1}}{c_{T2}} \quad 83$$

Třetí kritický úhel nastává v okamžiku, kdy velikost úhlu α_{L1} dosáhne takové míry, že se v druhém prostředí šíří pouze povrchové Rayleighovy vlny.

$$\sin \alpha_{K3} = \frac{c_{L1}}{c_{R2}} \quad 84$$

2 ULTRAZVUK V METROLOGII A MĚŘENÍ

V oblasti strojírenství má ultrazvuk široké uplatnění. Metody jeho využití lze nalézt již u procesů spojených s tuhnutím taveniny a tvorby krystalických zárodků u kovů. Dále je využíván pro obrábění tvrdých materiálů, kde by tradiční postupy nebyly dostatečně účinné nebo by se z finančního hlediska nevyplatily. Zejména u výroby z polymerních materiálů nelze opomenout použití ultrazvuku pro sváření. Tyto metody jsou však v praxi spíše okrajové. Jedinou výjimku zde tvoří svařování plastů.

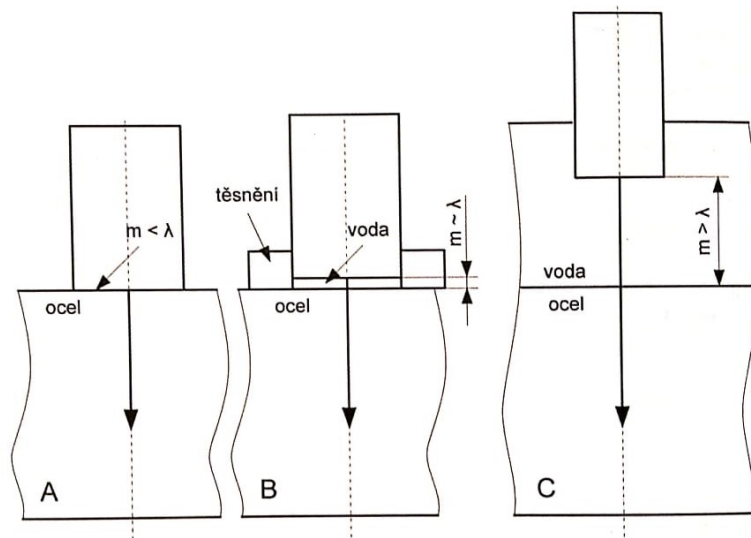
Kde má však ultrazvuk své široké uplatnění je metrologie a defektoskopie. Velkou výhodou je, že se jedná o metody z oblasti nedestruktivního testování. Dalšími výhodami jsou relativně velká přesnost, nenáročnost na přepravu a nízké provozní náklady. Nevýhodou může být samotný proces měření a vyhodnocení výsledků, který vyžaduje zkušeného operátora.



Obrázek 23: Testování trupu letadla pomocí ultrazvukového zařízení (11)

2.1 Metody měření pomocí ultrazvuku

Základem všech měření pomocí ultrazvuku je volba vhodné metody. Primárně je důležité zajistit přenos ultrazvukové energie ze sondy do zkoušeného materiálu. Díky vysokým frekvencím využívaných pro měření pomocí ultrazvuku (1–5 MHz) se ultrazvuková vlna šíří vzduchem velmi špatně. To vyžaduje, aby mezi sondou a zkoušeným materiálem byla vrstva, která vyplní tento prostor a zajišťuje tak přenos akustické energie. Tato vrstva se souhrnně nazývá jako akustická vazba. Dle jejích vlastností vůči ultrazvukové vlně ji lze rozdělit na kontaktní, mezerová a imerzní. (1) (2) (6)



Obrázek 24: Typy akustických vazeb A – kontaktní, B – mezerová, C – imerzní (2)

Při použití kontaktní akustické vazby jsou sonda a povrch materiálu v těsném kontaktu. Tenká vrstva, která je zde nanášena, pouze vyplňuje nerovnosti povrchu a souhrnně se nazývá vazebním prostředím. Obecně se o této vrstvě dá říci, že její tloušťka je menší než vlnová délka vysílané ultrazvukové vlny. Jako vazební prostředí se nejčastěji používají olej, vazelína, různé druhy tuků, glycerin, želatina a specializované přípravky na bázi škrobu (Apeko, Koramex, Tapetol). Tento způsob akustické vazby se nejčastěji uplatňuje při ručním zkoušení materiálu.

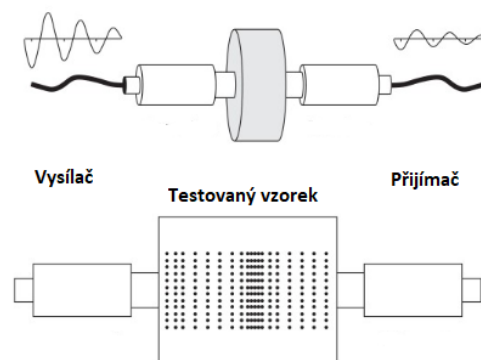
Pokud je použita mezerová akustická vazba, tak sonda již není v přímém kontaktu s povrchem zkoušeného materiálu. Jako vazební prostředí se obvykle používá voda nebo olej, které jsou kontinuálně přiváděny. Pro docílení co nejmenšího ovlivnění ultrazvukové vlny akustickou vazbou je důležité, aby její tloušťka byla srovnatelná s vlnovou délkou procházející vlny. Mezerová akustická vazba je volena převážně pro mechanizovaný způsob zkoušení.

Pokud je vzdálenost mezi sondou a povrchem zkoumaného materiálu výrazně větší, než je vlnová délka procházející vlny, jedná se o imerzní akustickou vazbu. Jako vazební prostředí se nejčastěji používá voda, olej či jiná kapalina, u které je znám její vliv na šíření ultrazvukové vlny. Zkoumaný předmět bývá obvykle v imerzní kapalině plně ponořen. U této metody je důležité zajistit dostatečnou tloušťku vazebního prostředí, aby se jednotlivá echa nepřekrývala.

Dalším důležitým aspektem je vhodné umístění jedné či více sond a typ vysílaného ultrazvukového signálu. U ultrazvukových sond je zásadní, zdali příslušná sonda funguje jako vysílač i přijímač ultrazvukového signálu či je použito jedné sondy jako vysílače a druhé jako přijímače. To je dáno typem prováděného měření, geometrií a rozměry zkoušeného vzorku a možným přístupem z více stran. Z pohledu samotného ultrazvukového signálu je dle zamýšleného měření nutno zvolit, zda bude vysílán jako spojitá vlna či jako krátké periodicky se opakující impulzy. Z těchto podmínek lze poté pro měření použít dvě základní metody – průchodovou nebo odrazovou.

2.1.1 Průchodová metoda

Při zvolení průchodové metody je důležité použití dvou sond, kdy jedna funguje jako vysílač a druhá jako přijímač ultrazvukového signálu. Tyto sondy jsou souose uloženy na opačných stranách zkoumaného vzorku. Pro vyhodnocení se porovnává úbytek akustické energie na základně změny akustického tlaku. Dnes se již vyrábí pouze zařízení využívající impulzního signálu. Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost. Jako nevýhody se uvádí malá citlivost měření a nutnost přístupu ke vzorku z obou stran a zajištění sousostnosti ultrazvukových sond. V praxi je průchodová metoda využívána v defektoskopii, pro měření útlumu procházející vlny a u speciálních měření.

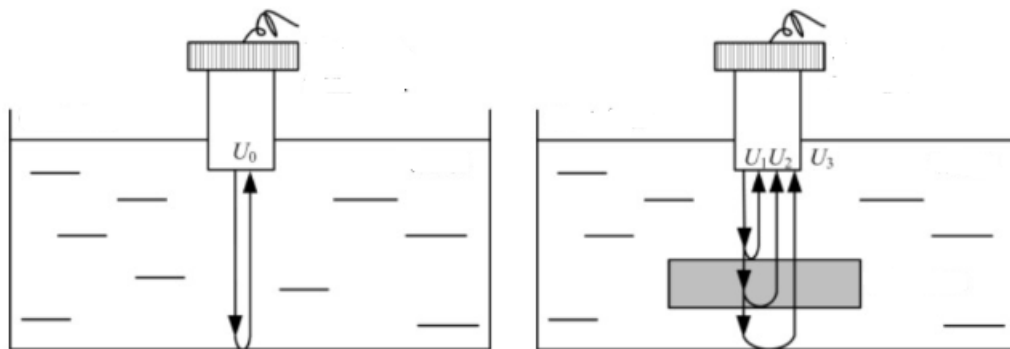


Obrázek 25: Průchodová metoda (13)

2.1.2 Odrazová metoda

Principem odrazové metody je využití jevu, ke kterému dochází na rozhraní dvou prostředí. K vyhodnocení měření poté slouží odražený signál, který je porovnáván se signálem vyslaným. Opět je porovnáván úbytek akustické energie, který se projeví snížením akustického tlaku příslušné vlny. Je však nutné, že vlna tentokrát urazí dvojnásobnou vzdálenost. Velkou výhodou oproti průchodové metodě je použití pouze jedné sondy, která slouží jako vysílač i přijímač ultrazvukové vlny. Při zvolení spojitého signálu je využití této metody obdobné jako u průchodové metody, ale samotný proces měření již není zatížen nevýhodami plynoucími z použití dvou sond.

V současné době je v praxi nejhojněji využívána impulzová odrazová metoda. Díky využití samostatných impulzů lze pomocí této metody zjistit nejvíce informací o zkoušeném materiálu. Jedinou nevýhodou impulzní odrazové metody je použití složitějších přístrojů.



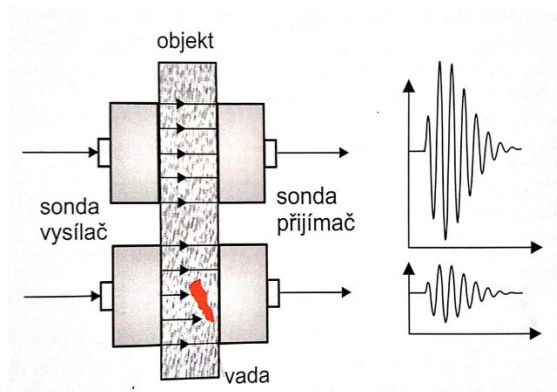
Obrázek 26: Odrazové metoda s imerzní akustickou vazbou (12)

2.2 Ultrazvuková defektoskopie

Největší uplatnění ultrazvukové technologie je v oblasti defektoskopie. Jedná se o zjišťování vnitřních vad a defektů, které by se mohly negativně projevit na životnosti a funkčnosti zkoumaného dílu. Na základě použité metody lze celkem přesně určit jak přesnou polohu, tak i rozměry detekované vady. Prakticky lze použít průchodovou i odrazovou metodu se spojitým i impulzním signálem.

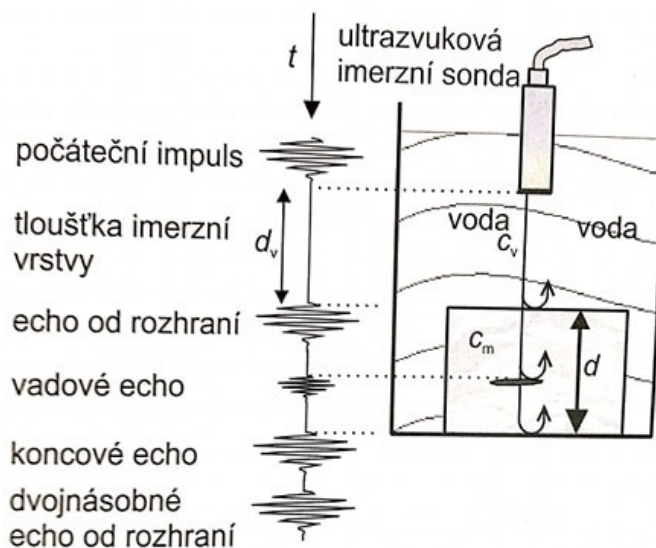
Při použití průchodové metody lze detekovat vadu díky výraznějšímu poklesu akustické energie, která je přijata druhou sondou. Tato metoda však dokáže zjistit vadu a její rozměry pouze v rovině kolmé na osu vysílané ultrazvukové vlny. O její hloubce či celkovému ob-

jemu ze zpracovaného signálu nelze nic vypovědět. Dalšími nevýhodami jsou potřeba rovnoběžnosti protilehlých povrchů a obtížné rozlišení přítomnosti vady oproti poklesu akustické vazby.



Obrázek 27: Využití průchodové metody pro defektoskopii (1)

Z pohledu přesnosti a množství získaných informací je však vhodnější použít impulzní odrazovou metodu. Její jediné omezení je v případě testování tenkých předmětů jako jsou například plechy. Pokud je rozhraní, na které dopadne ultrazvuková vlna, tvořeno vzduchem, nabývá koeficient odrazu R hodnoty téměř rovné jedné. Jelikož obvykle bývají vady v materiálu vyplněny právě vzduchem, lze odraženou vlnu brát jako ovlivněnou pouze fyzikálními vlastnostmi zkoušeného materiálu a případně vazebným prostředím.



Obrázek 28: Využití impulzní odrazové metody s imerzní akustickou vazbou (1)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

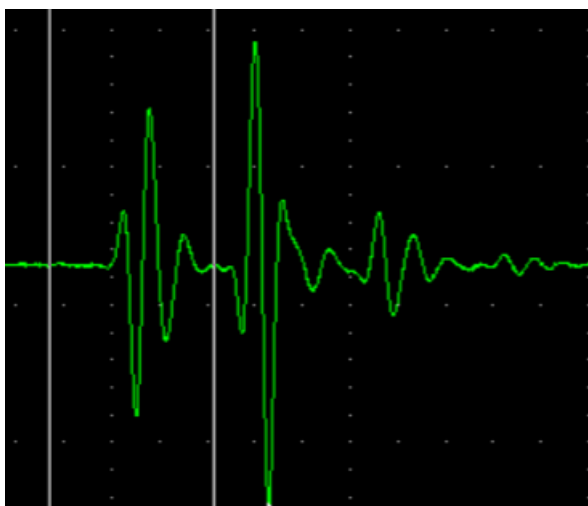
Hlavním cílem diplomové práce je ověření možnosti sledování změn viskoelastických vlastností během sítování polymerního materiálu pomocí ultrazvukové vlny odražené od povrchu vzorku.

V první části je cílem zvolit vhodnou metodu měření a její optimalizace, které zajistí eliminaci všech nežádoucích projevů.

Předmětem druhé části je vyzkoušení navržené a optimalizované metody na zvoleném materiálu.

4 METODA MĚŘENÍ

Předmětem této práce je měření změny viskoelastických vlastností během síťování polymerních materiálů pomocí ultrazvuku. První polovina se zabývá optimalizací měření a zajištění jeho opakovatelnosti. Díky tomu, že vzorek je v počátečním stavu v tekutém stavu, stává se prakticky nemožné použít kontaktní či mezerovou metodu. S volbou imerzní metody bylo nutné zajistit vhodné vazebné prostředí. Při hledání takového prostředí se základním kritériem stala nemísitelnost imerzní vrstvy s vyhodnocovaným materiálem. Bohužel pro splnění této podmínky nebyly nalezeny vhodné materiály. Druhou možností tedy bylo oddělit imerzní vrstvu a zkoumaný vzorek pevnou vrstvou, která zabrání jejich kontaktu. Základním požadavkem pro volbu této vrstvy byla minimální interakce se vzorkem a vazebným prostředím. Toto řešení zároveň zvyšuje univerzálnost měřící metody.



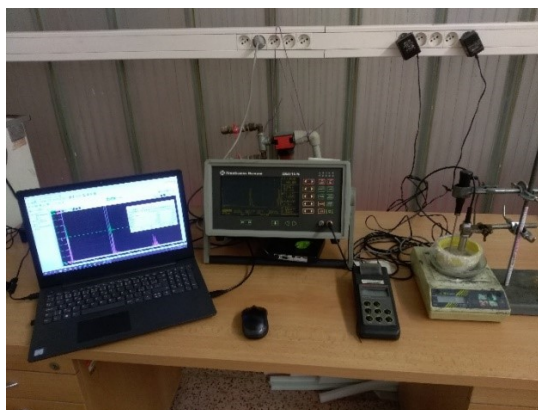
Obrázek 29: Odečtený ultrazvukový signál

Na obrázku 29 je zobrazen ultrazvukový signál ve formě výstupu z osciloskopu. Pro vyhodnocení bylo uvažováno první echo, které náleží vlně odražené od rozhraní imerzní vrstvy a zkoumaného vzorku. Z takto získaného signálu lze primárně určit jeho amplitudu neboli rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším místem. Druhou určovanou veličinou je celková síla odražené ultrazvukové vlny. Tu je možné spočítat díky možnosti získat vyobrazený signál ve formě jednotlivých bodů, které ho tvoří. Hodnoty amplitudy těchto bodů se poté vyjádří jako jejich absolutní hodnota. Pro určení celkové síly signálu jsou takto určené body křivky numericky integrovány pomocí lichoběžníkového pravidla.

4.1 Měřicí zařízení

Tabulka 4: Použité zařízení pro měření

Zařízení	Výrobce a model
Ultrazvukový přístroj	Krautkramer Branson USD 15 S
Ultrazvuková sonda	Krautkramer Alpha ISS / 5 MHz / 0,5'' 2''SPH FCS
Osciloskop	TiePie Handyscope HS5
Váha	Kern 440-33
Digitální teploměr	Hanna Instruments HI 955301 PT100



Obrázek 30: Zapojení sestavy měřicích zařízení

4.1.1 Nastavení ultrazvukového přístroje

Tabulka 5: Nastavení ultrazvukového přístroje

Parametr	Nastavená hodnota
Citlivost měření	55 dB
Rozsah měření	50 mm
Rychlost vlny	1466 m·s ⁻¹
Tlumení signálu	25 Ω
Frekvence	5 MHz

4.2 Volba krycí vrstvy

Při volbě krycí vrstvy bylo nutné vzít v úvahu, jak bude ultrazvuková vlna touto vrstvou ovlivněna. Jednou z možností je použít homogenní pevný blok z určitého materiálu, jehož vliv se musí při následném vyhodnocení vzít v úvahu. Druhou možností je použití tenké fólie, která má minimální dopad na procházející ultrazvukovou vlnu.

Použitím pevného bloku nelze zajistit eliminaci vzduchových bublin na rozhraní, kde se dotýká vzorku, které negativně ovlivňují odraz ultrazvukové vlny. Dalším negativem je nedostatečná pružnost uvažovaného bloku. Ten by se musel částečně zatlačit do vzorku, čímž by v něm vznikl otisk. To by při případném masovém použití v praxi vyžadovalo další operaci (například přebroušení), která by se negativně promítla do celkových nákladů.

Z důvodu snazšího provedení byla zvolena polymerní fólie, která se používá k balení potravin. Ta má kromě své tloušťky a nepropustnosti i další výhody, jako jsou chemická a teplotní stálost, dostatečná pružnost dovolující zajistit hladkost vzorku a částečná přilnavost, díky níž se na rozhraní fólie a vzorku dají odstranit bubliny vzduchu.

U výběru vhodné fólie bylo voleno z pěti materiálů – PVC, boPET, LLDPE, LDPE a HDPE. Jako referenční vzorek pro toto měření byla zvolena již vytvrzená epoxidová pryskyřice HAVEL Composites L285. Jelikož se jedná o vzorek v tuhém stavu, tak zde není potřeba použití krycího prostředku, který by zamezil kontaktu vzorku s imerzní kapalinou (voda). Referenční vzorek byl poté postupně překrýván jednotlivými fóliemi, jež díky své nízké tloušťce nebyly detekovány ultrazvukovým přijímačem jako rozhraní ležící v cestě ultrazvukové vlny. Jediným projevem tenké fólie je útlum vlny, jehož projev je v naměřených datech detekován jako pokles amplitudy a síly signálu odražené vlny.

4.2.1 Výsledky měření a zpracování dat

Pro všechna měření bylo použito stejné výšky ultrazvukové sondy $h_s = 25 \text{ mm}$.

U výsledných výběrových souborů o $n = 10$ je testováno, zdali data mají normální rozdělení. Pro vyhodnocení normality naměřených dat byl zvolen Anderson – Darlingův test se zavedenou nulovou hypotézou $H_0: \text{Data} \in N(\mu, \sigma^2)$ a alternativní hypotézou $H_a: \text{Non}$ s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$. Dále jsou data testována na přítomnost odlehlých hodnot pomocí Box-plot diagramu.

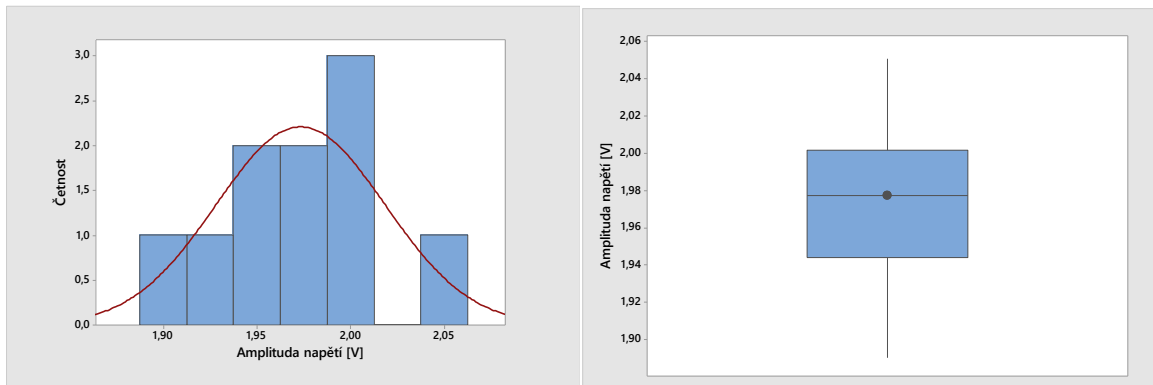
4.2.1.1 Referenční vzorek

Tabulka 6: Naměřené údaje pro referenční vzorek

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,935	$2,485 \cdot 10^{-7}$
2	1,998	$2,60626 \cdot 10^{-7}$
3	1,947	$2,51814 \cdot 10^{-7}$
4	1,994	$2,38692 \cdot 10^{-7}$
5	1,969	$2,73724 \cdot 10^{-7}$
6	1,986	$2,45426 \cdot 10^{-7}$
7	1,951	$2,59261 \cdot 10^{-7}$
8	2,012	$2,53416 \cdot 10^{-7}$
9	2,051	$2,50533 \cdot 10^{-7}$
10	1,89	$2,35092 \cdot 10^{-7}$

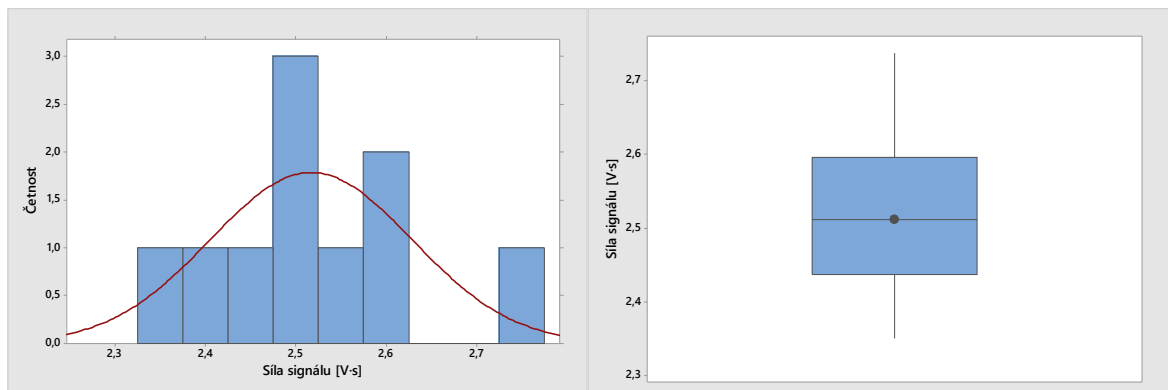
Tabulka 7: Bodové odhady statistických veličin referenčního vzorku

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,9733	$2,5171 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,0452	$0,1116 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,002	$0,0125 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0143	$0,0353 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	2,29	4,43
Medián \tilde{x}	1,9775	$2,5117 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,161	$0,3863 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 31: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí referenčního vzorku

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,932 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.



Obrázek 32: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ referenčního vzorku

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,864 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

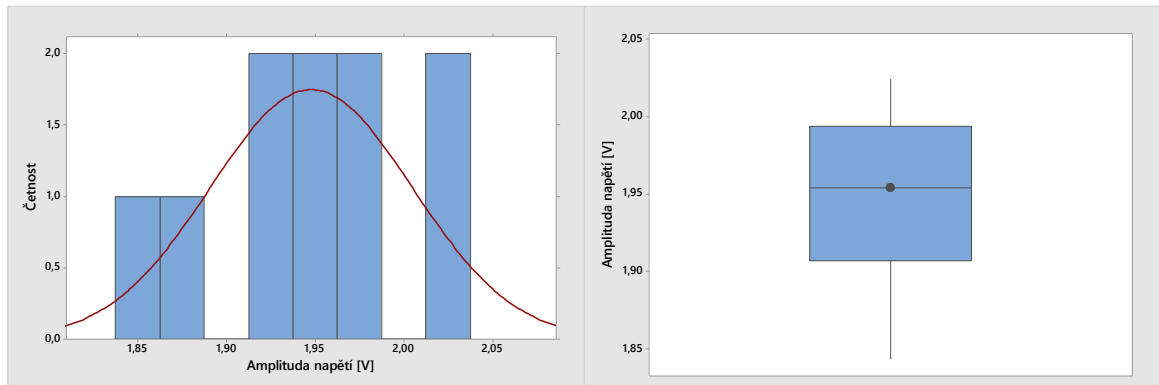
4.2.1.2 LDPE

Tabulka 8: Naměřené údaje pro fólii z LDPE

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,953	$2,47141 \cdot 10^{-7}$
2	2,024	$2,47067 \cdot 10^{-7}$
3	1,884	$2,41114 \cdot 10^{-7}$
4	2,016	$2,53594 \cdot 10^{-7}$
5	1,986	$2,43159 \cdot 10^{-7}$
6	1,975	$2,37896 \cdot 10^{-7}$
7	1,914	$2,44445 \cdot 10^{-7}$
8	1,843	$2,41963 \cdot 10^{-7}$
9	1,955	$2,51696 \cdot 10^{-7}$
10	1,929	$2,47227 \cdot 10^{-7}$

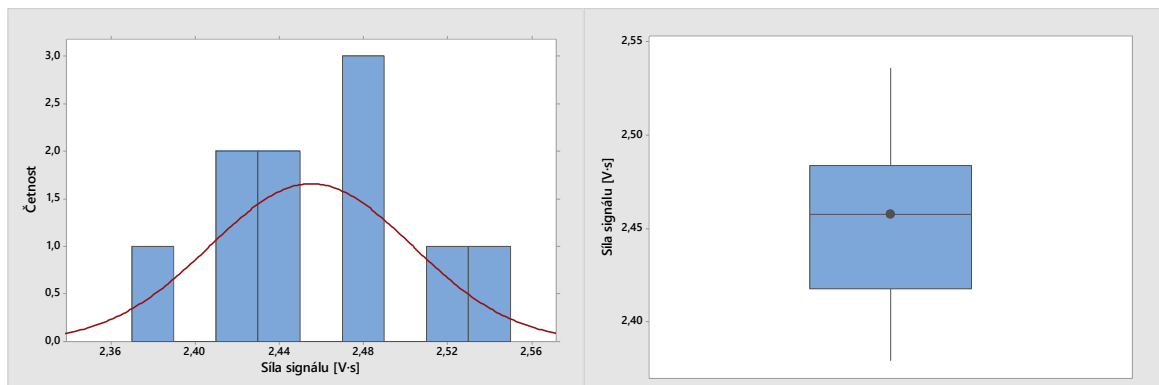
Tabulka 9: Bodové odhady statistických veličin fólie z LDPE

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,9479	$2,4553 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,057	$0,0481 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0033	$0,0023 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,018	$0,0152 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	2,93	1,96
Medián \tilde{x}	1,94	$2,4576 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,181	$0,157 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 33: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z LDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,922 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.



Obrázek 34: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z LDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,816 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

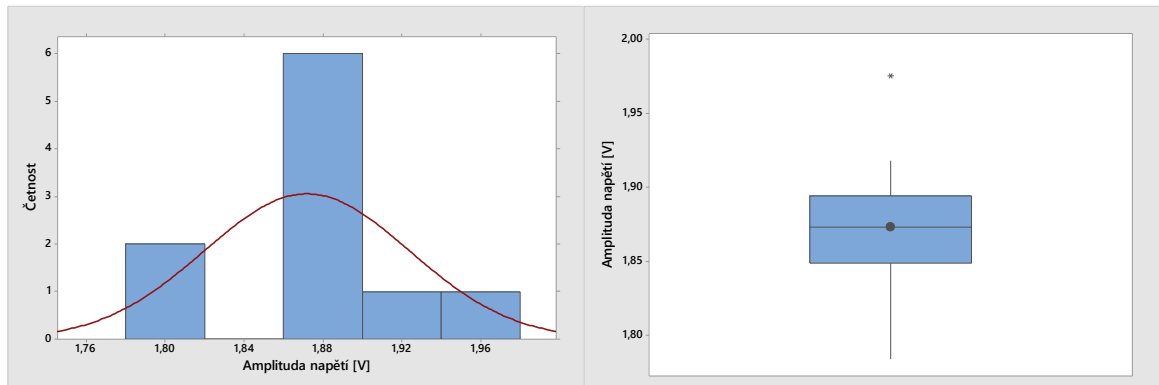
4.2.1.3 LLDPE

Tabulka 10: Naměřené údaje pro fólii z LLDPE

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,861	$2,35531 \cdot 10^{-7}$
2	1,886	$2,2922 \cdot 10^{-7}$
3	1,876	$2,31818 \cdot 10^{-7}$
4	1,918	$2,32102 \cdot 10^{-7}$
5	1,975	$2,46682 \cdot 10^{-7}$
6	1,784	$2,12898 \cdot 10^{-7}$
7	1,875	$2,2171 \cdot 10^{-7}$
8	1,812	$2,2948 \cdot 10^{-7}$
9	1,871	$2,52226 \cdot 10^{-7}$
10	1,861	$2,28157 \cdot 10^{-7}$

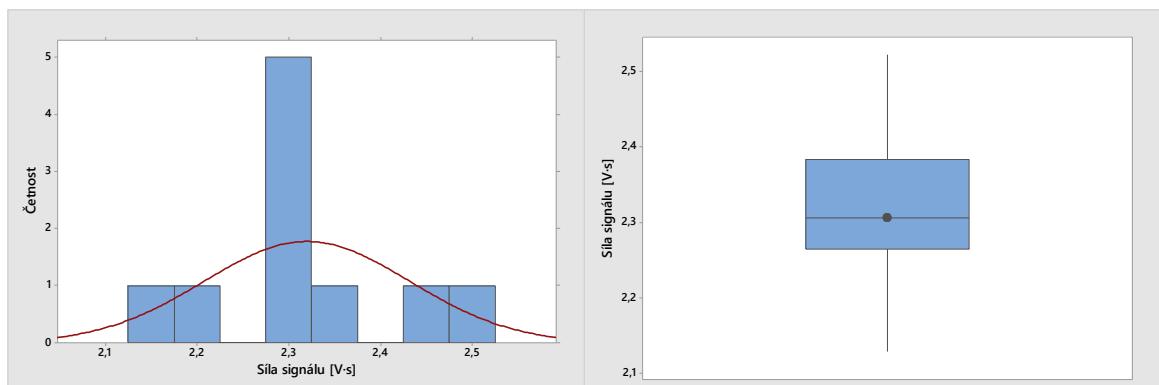
Tabulka 11: Bodové odhady statistických veličin fólie z LLDPE

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,8719	$2,3198 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,0522	$0,1124 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0027	$0,0126 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0165	$0,0355 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	2,79	4,84
Medián \tilde{x}	1,873	$2,3065 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,191	$0,3933 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 35: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z LLDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,267 > \alpha$. Box-plot diagram vykázal maximální hodnotu $A_U = 1,975 V$ jako odlehlou. Pro prokázání, zda se jedná o chybu měření nebo extrém bylo použito Grubbsova testu odlehlých hodnot. U tohoto testu byla zvolena nulová hypotéza $H_0: Max \in N$ a alternativní hypotéza $H_a: Non$ na se zvolenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Grubbsův test potvrdil nulovou hypotézu, že testovaná hodnota patří do normálního rozdělení daného výběrového souboru s $P = 0,26 > \alpha$.



Obrázek 36: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z LLDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,352 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

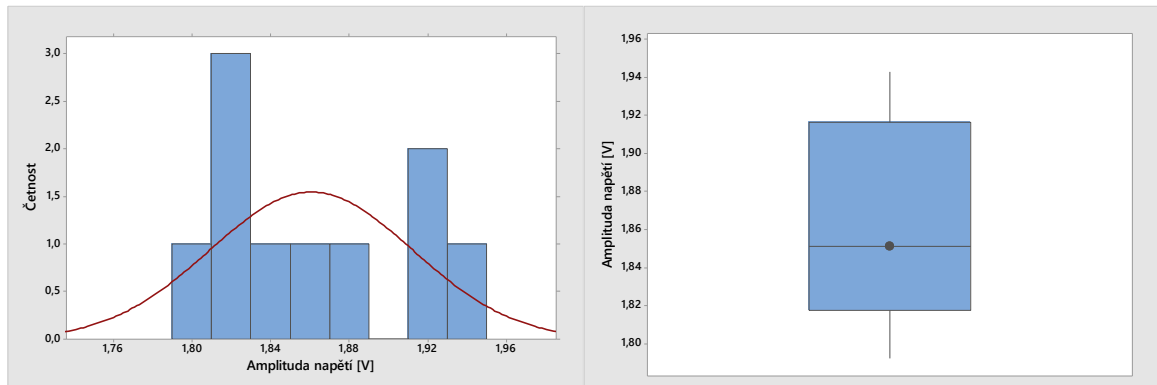
4.2.1.4 HDPE

Tabulka 12: Naměřené údaje pro fólii z HDPE

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,816	$2,17308 \cdot 10^{-7}$
2	1,824	$2,41251 \cdot 10^{-7}$
3	1,818	$2,42178 \cdot 10^{-7}$
4	1,914	$2,43057 \cdot 10^{-7}$
5	1,875	$2,35388 \cdot 10^{-7}$
6	1,924	$2,45569 \cdot 10^{-7}$
7	1,847	$2,61904 \cdot 10^{-7}$
8	1,943	$2,31912 \cdot 10^{-7}$
9	1,855	$2,36712E-07$
10	1,792	$2,29978 \cdot 10^{-7}$

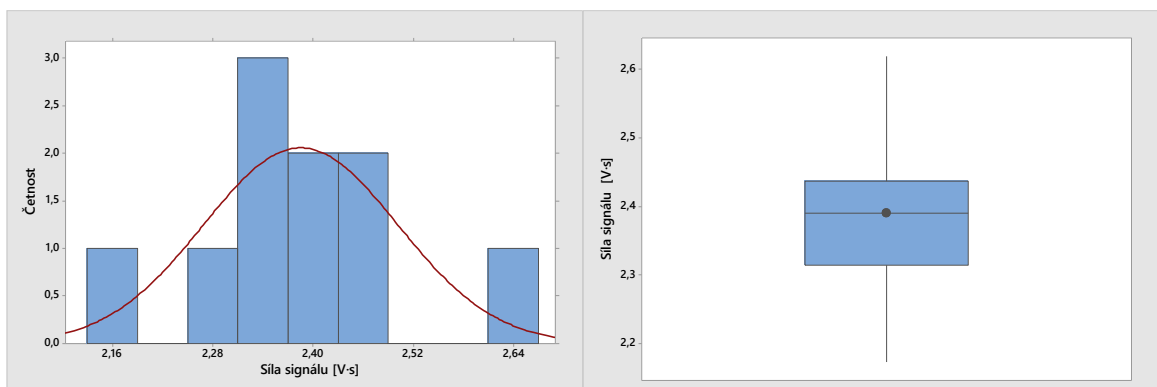
Tabulka 13: Bodové odhady statistických veličin fólie z HDPE

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,8608	$2,3853 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,0516	$0,1163 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0027	$0,0135 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0163	$0,0368 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	2,77	4,88
Medián \tilde{x}	1,851	$2,3898 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,151	$0,446 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 37: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z HDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,452 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.



Obrázek 38: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z HDPE

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,506 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

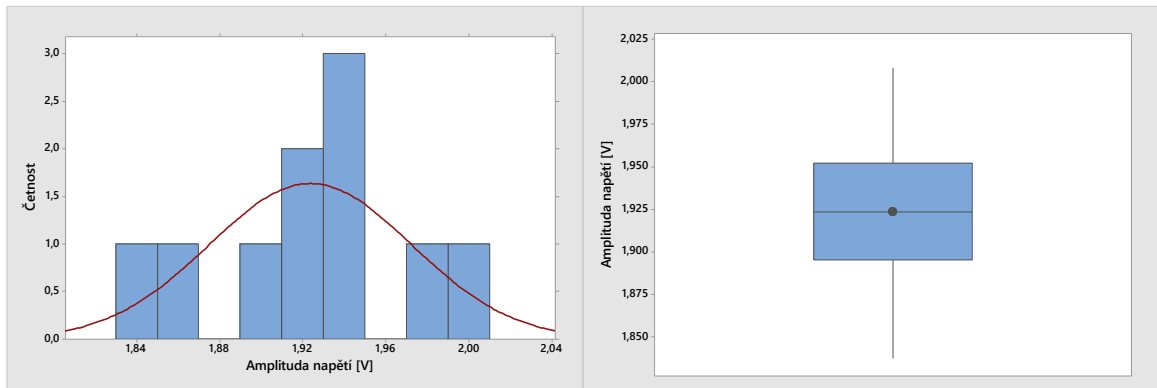
4.2.1.5 PVC

Tabulka 14: Naměřené údaje pro fólii z PVC

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,931	$2,58198 \cdot 10^{-7}$
2	1,945	$2,5058 \cdot 10^{-7}$
3	1,916	$2,35747 \cdot 10^{-7}$
4	1,869	$2,26869 \cdot 10^{-7}$
5	2,008	$2,70851 \cdot 10^{-7}$
6	1,941	$2,37027 \cdot 10^{-7}$
7	1,837	$2,26992 \cdot 10^{-7}$
8	1,904	$2,86235 \cdot 10^{-7}$
9	1,973	$2,8128 \cdot 10^{-7}$
10	1,914	$2,48176 \cdot 10^{-7}$

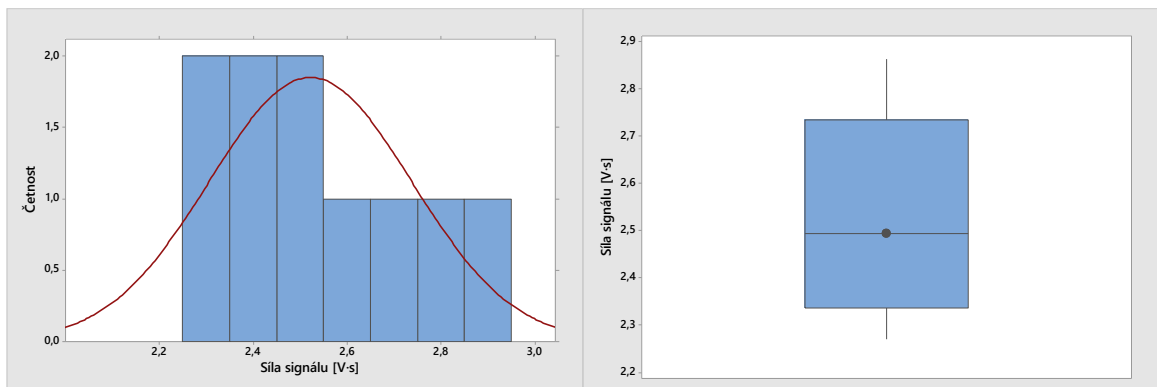
Tabulka 15: Bodové odhady statistických veličin fólie z PVC

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,9238	$2,522 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,0488	$0,2156 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0024	$0,0465 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0154	$0,0682 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	2,53	8,55
Medián \tilde{x}	1,9235	$2,4938 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,171	$0,5937 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 39: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z PVC

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,889 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.



Obrázek 40: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z PVC

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,516 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

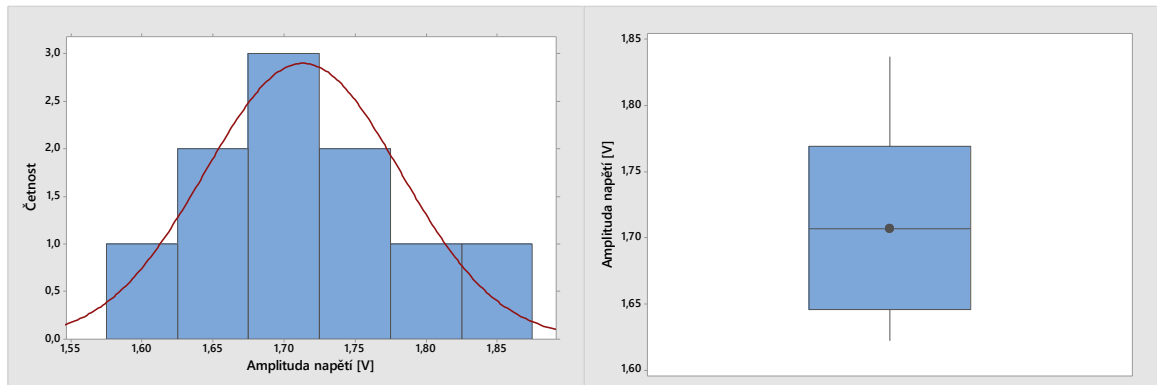
4.2.1.6 boPET

Tabulka 16: Naměřené údaje pro fólii z boPET

Měření	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
1	1,649	$1,98469 \cdot 10^{-7}$
2	1,788	$2,13729 \cdot 10^{-7}$
3	1,637	$2,07378 \cdot 10^{-7}$
4	1,692	$2,38367 \cdot 10^{-7}$
5	1,763	$2,166 \cdot 10^{-7}$
6	1,714	$2,16696 \cdot 10^{-7}$
7	1,731	$2,22382 \cdot 10^{-7}$
8	1,622	$2,09649 \cdot 10^{-7}$
9	1,837	$2,33755 \cdot 10^{-7}$
10	1,7	$2,06312 \cdot 10^{-7}$

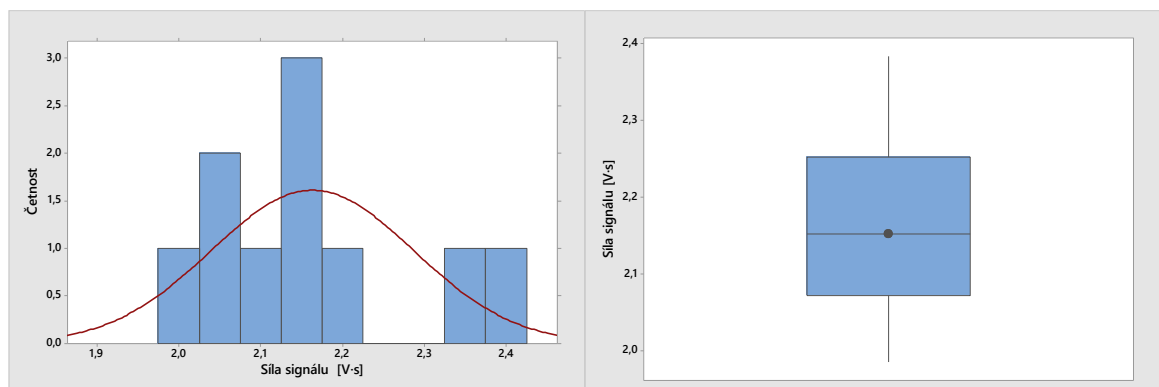
Tabulka 17: Bodové odhady statistických veličin fólie z boPET

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	10	10
Průměr \bar{x}	1,7133	$2,1633 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,0688	$0,1237 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0047	$0,0157 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0218	$0,0391 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	4,02	5,72
Medián \tilde{x}	1,707	$2,1516 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,215	$0,399 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 41: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z boPET

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,902 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.



Obrázek 42: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z boPET

Anderson – Darlingův test prokázal platnost nulové hypotézy, že vyhodnocovaná data mají normální rozdělení s hodnotou $P = 0,532 > \alpha$. Box-plot diagram nevykázal žádnou odlehlou hodnotu.

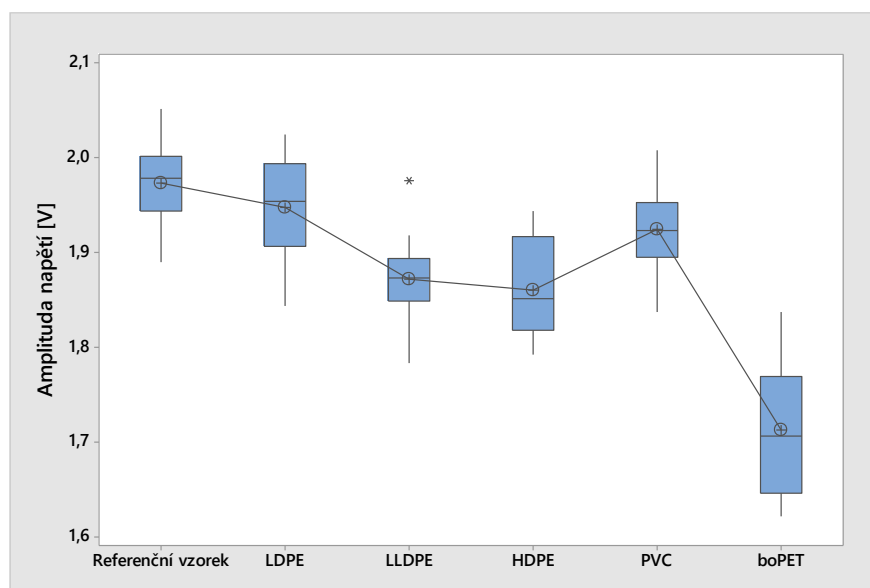
4.2.2 Srovnání naměřených dat

Cílem porovnání naměřených výběrových výběrů je určit materiál, jenž má nejmenší vliv na útlum procházející ultrazvukové vlny. Pro vyhodnocení byla vybrána metoda ANOVA (Analysis of Variance – analýza rozptylu). Tato metoda je primárně určena pro posuzování více výběrů, které disponují stejnými rozptyly. Tuto podmínku vyhodnocované výběrové soubory nesplňují. Pro tento případ lze použít Games – Howellovu metodu a Scheffého metodu, která pracuje se vzájemnými porovnáními všech vybraných výběrových souborů na základě T-testu.

4.2.2.1 Amplituda napětí

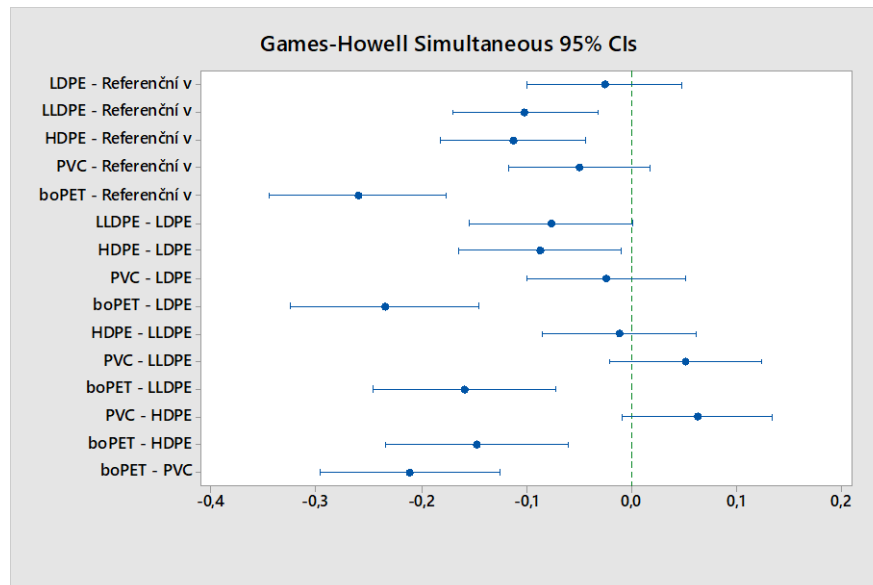
Tabulka 18: Souhrn statistických veličin pro amplitudu napětí [V]

Veličina	Reference	LDPE	LLDPE	HDPE	PVC	boPET
n	10	10	10	10	10	10
\bar{x}	1,9733	1,9479	1,8719	1,8608	1,9238	1,7133
s	0,0452	0,057	0,0522	0,0516	0,0488	0,0688
s^2	0,002	0,0033	0,0027	0,0027	0,0024	0,0047
μ_α	0,0143	0,018	0,0165	0,0163	0,0154	0,0218
V_x	2,29	2,93	2,79	2,77	2,53	4,02
\tilde{x}	1,9775	1,94	1,873	1,851	1,9235	1,707
R	0,161	1,181	1,191	0,151	0,171	0,215



Obrázek 43: Srovnání výsledných Box – plot digramů amplitudy napětí odraženého vlny

Porovnání statistických veličin a Box – plot diagramů pro jednotlivé materiály krycích fólií lze usoudit, že k nejmenšímu útlumu ultrazvukové vlny dochází při průchodu skrze LDPE a PVC. To však je bez příslušné statistické analýzy nepotvrzené a pouze může napovědět, na jaké materiály může být zaměřena pozornost.



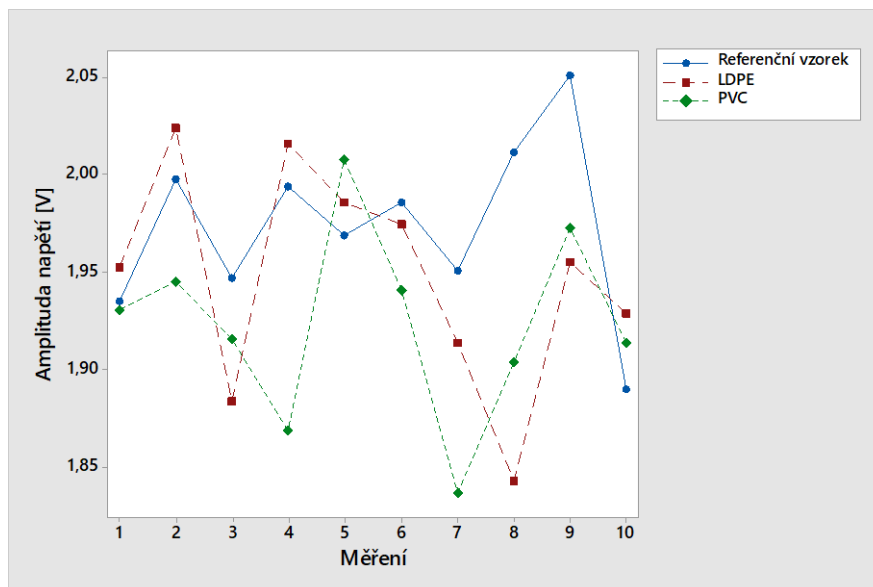
Obrázek 44: Games – Howellův diagram podobnosti jednotlivých materiálů

U vyhodnocení Games – Howellova digramu je směrodatným údajem, zdali se zobrazené rozmezí pro určitou dvojici porovnávaných výsledků prochází nulou či nikoliv. Srovnáním údajů z diagramu na obrázku 44 lze říci, že od referenčního vzorku se statisticky nevýznamně liší ultrazvuková vlna procházející fólií z materiálů PVC a LDPE s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$.

Párové porovnávání dvojic úrovní Scheffého metoda			
Srovnávaná dvojice	Rozdíl	Významnost	Pravděpodobnost
Bez - PVC	0,0495	Nevýznamný	0,5363950718
Bez - HDPE	0,1125	Významný	0,002412818729
Bez - boPET	0,26	Významný	3,171956804E-012
Bez - LLDPE	0,1014	Významný	0,008628966765
Bez - LDPE	0,0254	Nevýznamný	0,9534912587
PVC - HDPE	0,063	Nevýznamný	0,2620581627
PVC - boPET	0,2105	Významný	3,373268753E-009
PVC - LLDPE	0,0519	Nevýznamný	0,4824009164
PVC - LDPE	-0,0241	Nevýznamný	0,9627684575
HDPE - boPET	0,1475	Významný	2,612165677E-005
HDPE - LLDPE	-0,0111	Nevýznamný	0,9989662291
HDPE - LDPE	-0,0871	Významný	0,03773357112
boPET - LLDPE	-0,1586	Významný	5,606132422E-006
boPET - LDPE	-0,2346	Významný	1,092436586E-010
LLDPE - LDPE	-0,076	Nevýznamný	0,1013774662

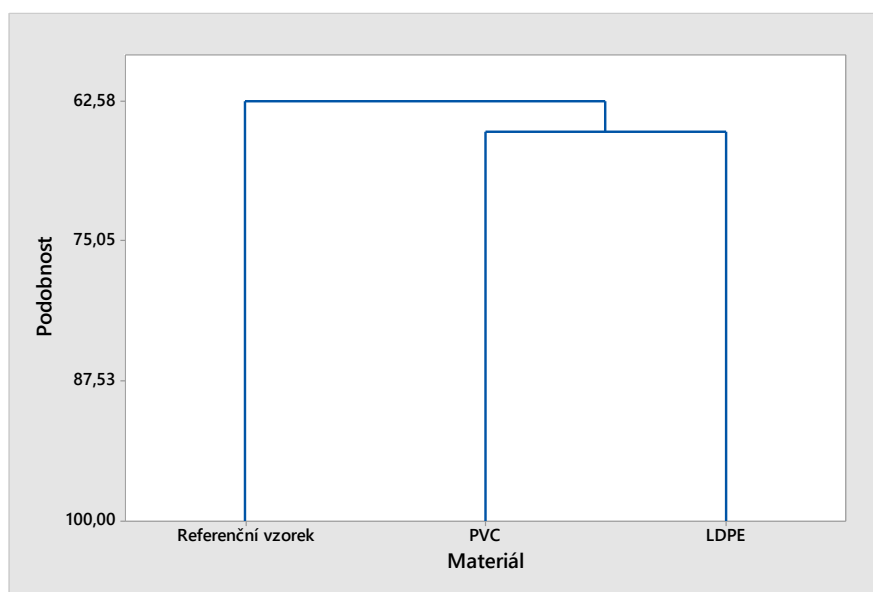
Obrázek 45: Vyhodnocení výsledků amplitudy napětí pomocí Scheffého metody

Za účelem potvrzení výsledků vyhodnocených pomocí Games – Howellovy metody jsou data podrobena vyhodnocení pomocí Scheffého metody. Výsledky zpracování dat pomocí této metody poukazují, že statisticky nevýznamný rozdíl, s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$, od referenčního vzorku lze opět nalézt u fólie z LDPE a PVC.



Obrázek 46: Časový diagram měření amplitudy napětí pro vybrané materiály krycí fólie

Časový diagram na obrázku 46 ukazuje, jak se liší jednotlivá měření referenčního vzorku od měření na vzorku překrytém fólií z LDPE a PVC.



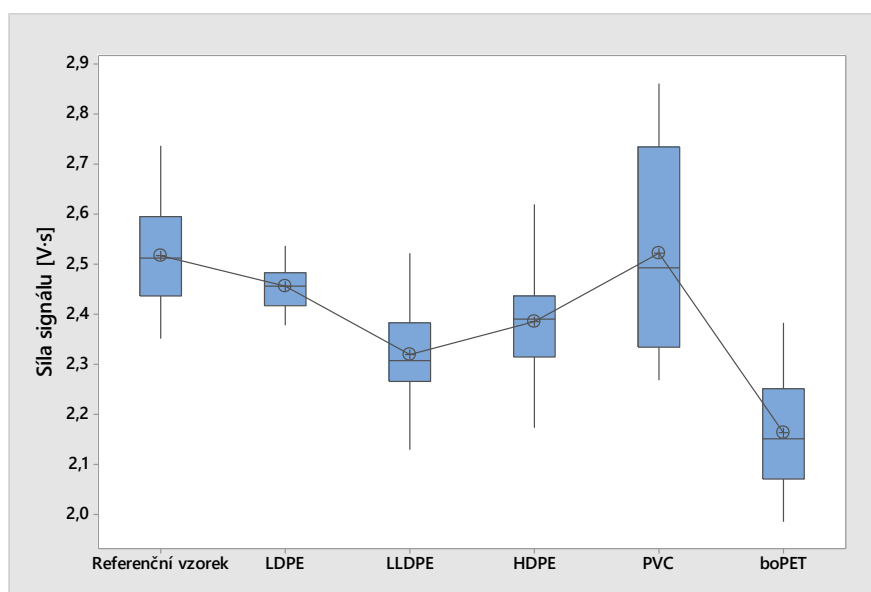
Obrázek 47: Dendrogram výsledků vybrané materiály krycí fólie

Naměřená data u vybraných dvou materiálů byla podrobena Clusterové (Shlukové) analýze, která a pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ ukazuje, jak si jsou naměřená data na základě posuzovaných parametrů vzájemně podobná. Výsledkem této analýzy je dendrogram (obrázek 47) ukazující, že jeden shluk je dle očekávání tvořen měřeními, kdy byl referenční materiál překryl polymerní fólií. Podobnost dat u těchto dvou materiálů vyšla na 65,27 %. Tento shluk je referenčnímu vzorku podobný na 62,58 %.

4.2.2.2 Síla signálu

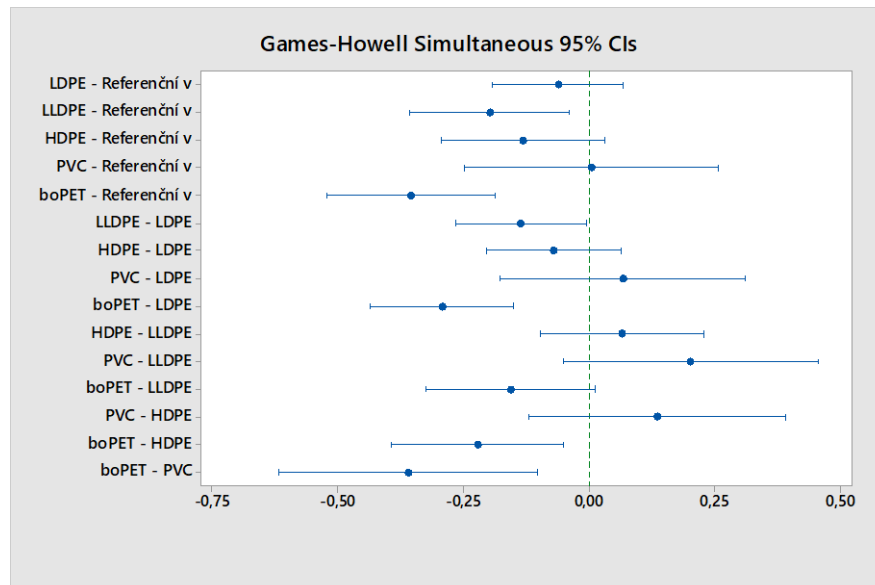
Tabulka 19: Souhrn statistických veličin pro sílu signálu $\cdot 10^{-7}$ [V·s]

Veličina	Reference	LDPE	LLDPE	HDPE	PVC	boPET
n	10	10	10	10	10	10
\bar{x}	2,5171	2,4553	2,3198	2,3853	2,522	2,1633
s	0,1116	0,0481	0,1124	0,1163	0,2156	0,1237
s^2	0,0125	0,0023	0,0126	0,0135	0,0465	0,0157
μ_α	0,0353	0,0152	0,0355	0,0368	0,0682	0,0391
V_x	4,43	1,96	4,84	4,88	8,55	5,72
\tilde{x}	2,5117	2,4576	2,3065	2,3898	2,4938	2,1516
R	0,3863	0,157	0,3933	0,446	0,5937	0,399



Obrázek 48: Srovnání výsledných Box – plot digramů síly signálu odražené vlny

Při porovnání statistických veličin a Box – plot digramů náležících datům naměřených pro celkovou sílu odraženého signálu lze stejně jako u amplitudy napětí usuzovat, že referenčnímu vzorku se nejvíce podobají měření u vzorků zakrytých fólií z LDPE a PVC. Zejména u PVC je aritmetický průměr blízký referenčnímu vzorku. Nicméně je důležité jiné statistické veličiny, kdy zejména rozptyl má téměř dvojnásobnou hodnotu oproti referenci.



Obrázek 49: Games – Howellův diagram podobnosti jednotlivých materiálů

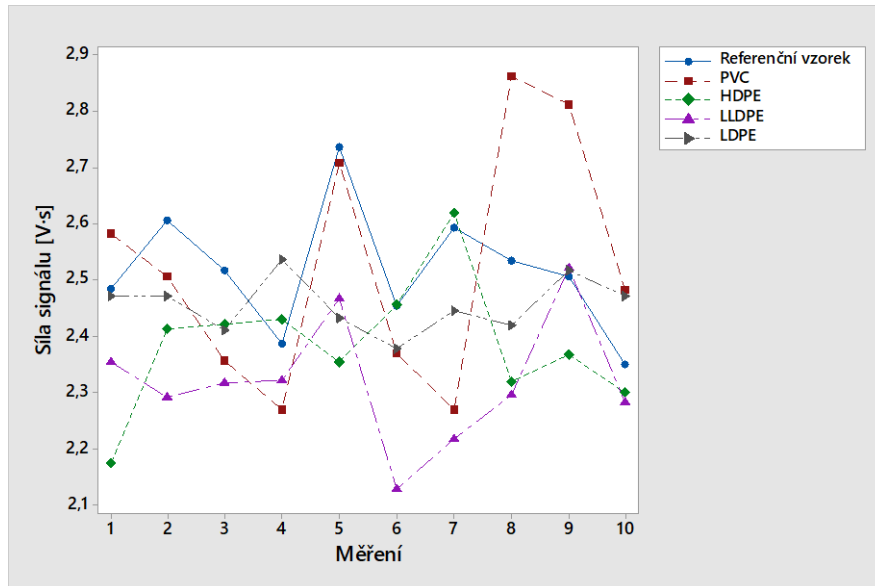
Vyhodnocením Games – Howellova diagramu se ukazuje, že z pohledu síly signálu odražené vlny se s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ statisticky významně liší pouze měření, při kterém byl referenční vzorek překryt fólií z boPET.

Párové porovnávání dvojic úrovní
Scheffého metoda

Srovnávaná dvojice	Rozdíl	Významnost	Pravděpodobnost
Bez - PVC	-4,87451E-010	Nevýznamný	0,9999997723
Bez - HDPE	1,3182548E-008	Nevýznamný	0,4179638253
Bez - boPET	3,5374512E-008	Významný	2,722153326E-005
Bez - LLDPE	1,9725884E-008	Nevýznamný	0,06009475628
Bez - LDPE	6,17804E-009	Nevýznamný	0,9510855029
PVC - HDPE	1,3669999E-008	Nevýznamný	0,3757320897
PVC - boPET	3,5861963E-008	Významný	2,060561916E-005
PVC - LLDPE	2,0213335E-008	Významný	0,04996662711
PVC - LDPE	6,665491E-009	Nevýznamný	0,933135812
HDPE - boPET	2,2191964E-008	Významný	0,02250520342
HDPE - LLDPE	6,543336E-009	Nevýznamný	0,9379823292
HDPE - LDPE	-7,004508E-009	Nevýznamný	0,9184318209
boPET - LLDPE	-1,5648628E-008	Nevýznamný	0,2282784021
boPET - LDPE	-2,9196472E-008	Významný	0,0008037276042
LLDPE - LDPE	-1,3547844E-008	Nevýznamný	0,3861338504

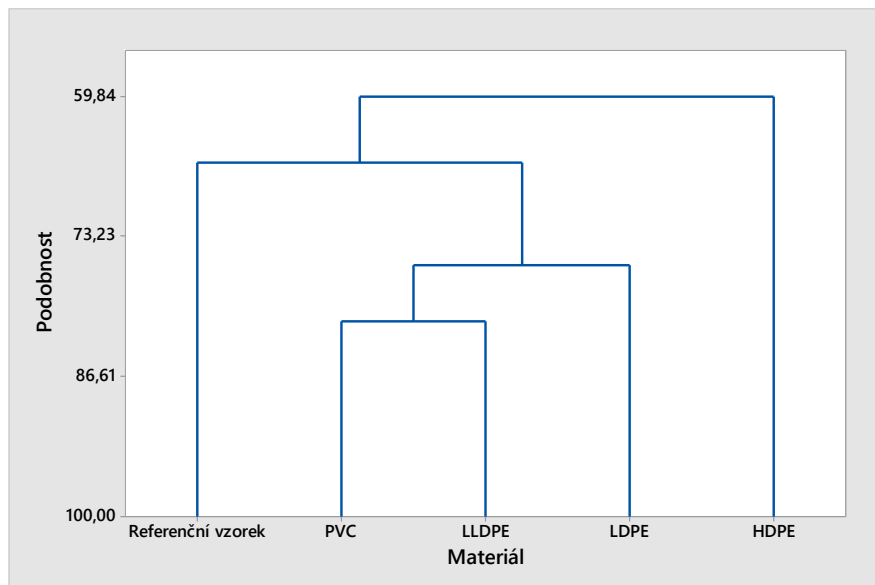
Obrázek 50: Vyhodnocení výsledků síly signálu pomocí Scheffého metody

Stejný výsledek jako u Games – Howellovy metody byl s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ prokázán i pomocí Scheffého metody. I zde se ukázalo, že jediným vzorkem, který se statisticky významně liší od referenčního měření, byl vzorek překrytý fólií z boPET.



Obrázek 51: Časový diagram měření síly signálu pro vybrané materiály krycí fólie

Obdobně jako u měření amplitudy napětí je i pro sílu odraženého signálu vypracován časový diagram jednotlivých bodů měření u vzorků, které se statisticky nevýznamně lišili od referenčního vzorku. Z časového digramu na obrázku 51 je patrné, že jednotlivé naměřené údaje odpovídají závěrům z použití metody ANOVA.



Obrázek 52: Dendrogram výsledků vybrané materiály krycí fólie

Při posouzení vzájemné podobnosti naměřených údajů pro sílu odraženého signálu pomocí Clusterové metody lze konstatovat, že s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$, se mají nejvíce společných znaků vzorky měřené skrze fólii za PVC a LLDPE (81,34 %). Tomuto shluku se na 75,94 % podobají výsledky měřené přes LDPE fólii. Tyto údaje poté odpovídají na 66,18

% referenčnímu vzorku. Posledním materiálem, který byl vyhodnocován, je fólie z HDPE. U té se statisticky prokázalo, že shluku zbylých měření odpovídá jen z 59,84 %.

4.2.3 Diskuze výsledků

Porovnání ovlivnění průchodu ultrazvukové vlny materiálem fólie, kterou byl měřený vzorek překryt, bylo prováděno na základě dvou naměřených údajů.

Posouzením výsledků z měření amplitudy napětí odražené vlny se statisticky prokázalo, že nejmenší vliv na procházející vlny lze zaznamenat u fólií z LDPE a PVC. Tento závěr je potvrzen i při posouzení druhého vyhodnocovaného údaje, síly signálu odražené vlny. Nicméně u tohoto vyhodnocení se jako statisticky nevýznamné rozdíly od referenčního vzorku ukázaly i výsledky pro fólie ze LLDPE a HDPE.

Co se týká HDPE, tak bylo pomocí Clusterové analýzy prokázáno, že se referenčnímu i ostatním vzorkům podobá nejméně. Z tohoto důvodu ho nelze považovat za nejvhodnější, a tudíž ho i vyřadit spolu s fólií z boPET, která u obou srovnání ani jednou neobstála.

U zbylých tří materiálů (LDPE, PVC a LLDPE) je možno považovat výsledky vyhodnocené pomocí amplitudy napětí za více adekvátní, jelikož tyto údaje byly odečteny přímo z ultrazvukového přístroje. Pro získání údaje o síle signálu odražené vlny bylo provedena matematická operace numerického integrování absolutní hodnoty odraženého signálu. U výsledků získaných touto operací se může projevit zanesení určité chyby.

Pro závěrečný výběr vhodné krycí fólie bylo tedy rozhodováno mezi PVC a LDPE, jejichž ovlivnění ultrazvukové vlny vyšlo statisticky srovnatelné. V tomto případě rozhodl aspekt práce se samotným materiálem fólie. Při snaze docílit co nejhladšího povrchu měřeného vzorku se u fólie z PVC negativně projevil efekt její smrštitelnosti. Tento efekt je navíc umocněn exotermním charakterem polymerace zamýšleného materiálu pro měření.

Pomocí statistického vyhodnocení a zkušenostem s aplikací fólie z jednotlivých materiálů byla jako nejvhodnějším krycím prostředkem vybrána fólie LDPE, která z pohledu amplitudy napětí i síly signálu odražené vlny vyšla jako nejvhodnější. Její další výhodou byla snadná aplikace při měření, kdy neprojevila nežádoucí jevy jako již zmíněná přílišná smrštitelnost u PVC nebo tendence fólií vytvářet nerovný povrch při napětí, jak tomu bylo u orientovaných fólií (LLDPE a boPET).

5 ZMĚNA AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Druhá část této práce se přímo zabývá zkoumáním akustických veličin daného materiálu v závislosti na změně jeho viskoelastických vlastností během síťování polymerního materiálu. Primární měřenou veličinou byla zvolena hodnota amplitudy napětí, která je přímo úměrná hodnotě amplitudy akustického tlaku ultrazvukové vlny. Jak již bylo řečeno, práce se zaměřuje na použití imerzní odrazové metody. U této metody je důležité znát vlastnosti imerzní vrstvy, kdy následně při použití základních fyzikálních principů akustické impedance a chování ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí či materiálů (viz. kapitola 1.3.2 a 1.3.9) lze určit vlastnosti zkoumaného materiálu.

5.1 Příprava vzorků

Jako materiál pro měření byla zvolena polyesterová pryskyřice s obchodním názvem Havelpol 4. Pro výběr tohoto materiálu rozhodla možnost nastavení rychlosti vytvrzení pomocí volby množství přidaného iniciátoru a urychlovače reakce. Tyto složky byly voleny dle doporučení výrobce polyesterové pryskyřice.

Tabulka 20: Složení vzorku pro měření

Složka	Obchodní název	Objem [ml]
Polyesterová pryskyřice	Havelpol 4	25
Urychlovač	Kobalt 1 %	0,5
Iniciátor	Peroxid K1	1,5

Samotná příprava vzorku probíhala dle následujícího postupu. V prvním kroku byla připravena plastová miska, jejíž dno se překrylo fólií z LDPE. Do takto připravené misky se přidala polyesterová pryskyřice a následně urychlovač reakce. Pryskyřice s urychlovačem se důkladně promíchali a nechali 5 minut odstát. Během těchto 5 minut se ze smíchaného roztoku vytratily téměř všechny vzduchové bubliny, které byly do vzorku zaneseny během nalévání a míchání. V dalším kroku byl přidán iniciátor reakce a celý roztok opět promíchán.

Po promíchání celého vzorku následovalo jeho překrytí fólií z LDPE a zalití imerzní kapalinou (voda). Tento krok se z pohledu úspěšnosti měření a kvality naměřených výsledků jevil jako kritický. Ukázalo se, že pryskyřice ve svém kapalném stavu během zalévání imerzní

kapalinou vzlíná po povrchu misky nahoru a vzorek nabyde tvaru konvexní paraboly, což se negativně projeví na odraženém signálu. Pro eliminaci tohoto jevu byl vytvořen těsnící prstenec o průměru misky, ve které probíhalo měření. Jako materiál pro jeho výrobu bylo použito hmoty užívané pro otisky zubů ve stomatologii Siloflex, jejíž hlavní výhodou je dostatečná pružnost dovolující přechodné uložení uvnitř misky. Proces aplikace krycí fólie a imerzní kapaliny probíhal za střídavého přilévání imerzní kapaliny a úpravě pozice těsnícího prstence tak, aby jeho přítlak na kapalný vzorek vyrovnával tlak imerzní kapaliny a krycí fólie zachovala co největší rovinnost.

5.2 Výsledky měření a zpracování dat

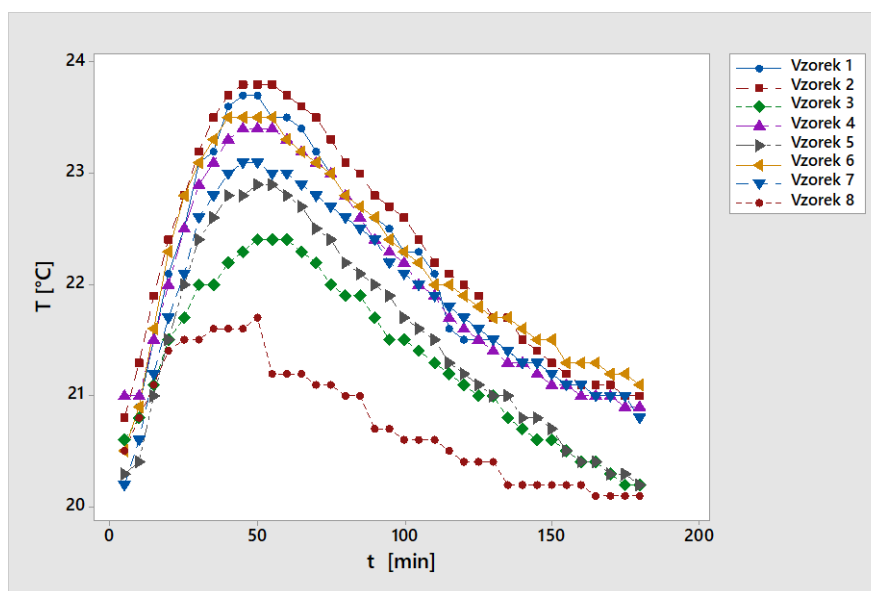
Měření bylo provedeno na celkovém počtu osmi vzorků. Časový rozsah byl u všech měření zvolen 180 minut, kdy se jako počáteční bod zvolil čas přimíchání iniciátoru reakce. Poté byla každých pět minut odečtena aktuální hodnota amplitudy napětí a teploty imerzní vrstvy. U všech vzorků byla také určena jejich skutečná hmotnost a výška ultrazvukové sondy od jejich povrchu.

Tabulka 21: Fyzikální vlastnosti vzorku a vzdálenost ultrazvukové sondy

Vzorek	Hmotnost [g]	V [ml]	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	h_s [mm]
1	29,87	27	1106,296	26
2	31,75	27	1175,926	25,8
3	29,47	27	1091,481	26,1
4	30,1	27	1114,815	25,5
5	31,22	27	1156,296	26
6	31,76	27	1176,296	25,9
7	31,12	27	1152,593	25,7
8	31,1	27	1151,852	26,2

5.2.1 Změny v imerzní vrstvě

Díky tomu, že u polyesterové pryskyřice se jedná o exotermní radikálovou kopolymeraci, byla procesem vytvrzování přímo ovlivněna i imerzní vrstva. Ta se během vytvrzování ohřívala a již z výsledků změny teploty lze odečíst závislost naznačující kinetiku tohoto procesu. Hodnota teploty v čase měření posloužila k odečtení aktuální hustoty prostředí z tabulek. Dalším parametrem, určeným dosažení teploty do rovnice 41, je rychlost šíření ultrazvukové vlny v daném prostředí. Při znalosti těchto dvou aktuálních vlastností imerzní vrstvy je poté možno dopočítat, pomocí rovnice 22, skutečnou akustickou impedanci. Ta v závislosti na změně teploty rostla. Stejně tak tomu bylo s hodnotou rychlosti šíření ultrazvukové vlny.



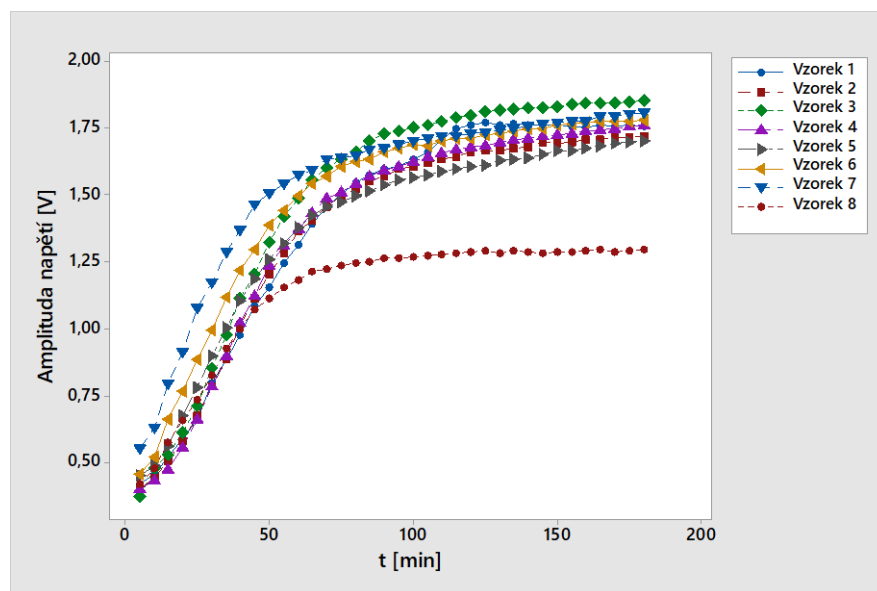
Obrázek 53: Změna teploty imerzní vrstvy v závislosti na čase

Na obrázku 53 lze vidět vývoj teploty v závislosti na čase. Z grafu lze odečíst, že nejméně tepla bylo imerzní vrstvě odevzdáno u vzorku 3 a 8. U všech vzorků byla nejvyšší teplota imerzní vrstvy určena v čase $t = 50 \text{ min}$, kdy ustalo dodávání tepla a vrstva se začala pomalu ochlazovat. V tabulce 22 je uvedena teplota každého vzorku pro tento čas a hodnoty, které byly pomocí tohoto údaje dopočítány.

Tabulka 22: Hodnoty fyzikálních vlastností imerzní vrstvy při T_{max}

Vzorek	T_{max} [°C]	ρ_{min} [kg·m ⁻³]	c_{max} [m·s ⁻¹]	Z_{max} [Pa·s·m ⁻¹]
1	23,7	997,37	1492,25	1488328
2	23,8	997,35	1492,5	1488542
3	22,4	997,68	1489	1485543
4	23,4	997,44	1491,5	1487688
5	22,9	997,56	1490,25	1486618
6	23,5	997,42	1491,75	1487901
7	23,1	997,52	1490,75	1487047
8	21,7	997,84	1487,25	1484031
Průměr	23,063	997,52	1490,7	1486962
Směrodatná odchylka	0,715	0,17	1,8	1535

5.2.2 Amplituda napětí



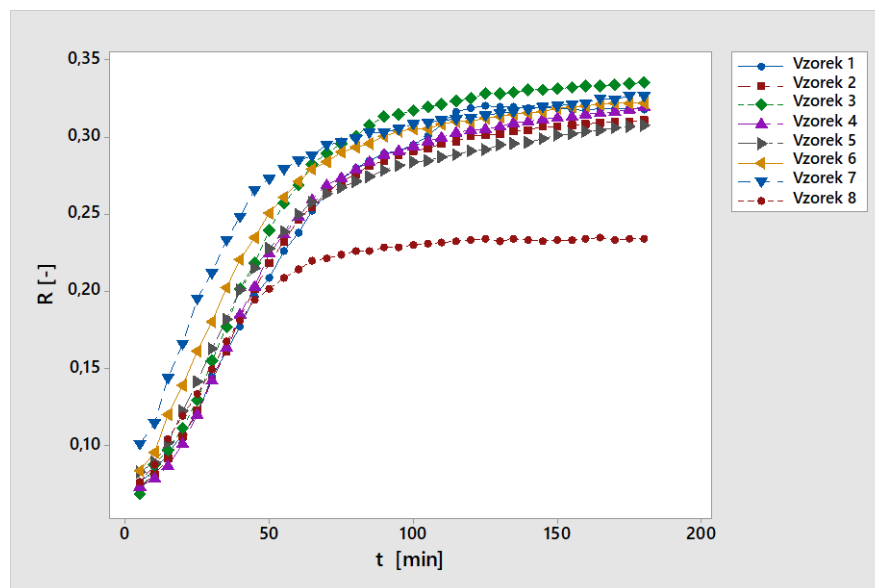
Obrázek 54: Změna amplitudy napětí odražené vlny v závislosti na čase

Na obrázku 54 lze vidět graf, který vyjadřuje závislost amplitudy napětí na čase. Stejně jako u grafu změny teploty na obrázku 52 je vidět ztelně menší hodnota u vzorku 8. Naopak u vzorku 3 není vidět žádné výrazné odchýlení od ostatních 6 měření. U všech měření je také

patrný prudký nárůst amplitudy napětí v rozmezí, který začíná v desáté minutě, ale konec tohoto růstu se u jednotlivých vzorků liší. Tento časový úsek by měl odpovídat průběhu vytvrzovacího děje, jehož projevem nárůst viskozity.

5.2.2.1 Koeficient odrazu a akustická impedance měřeného vzorku

Pro určení koeficientu odrazu je stěžejní znát hodnotu amplitudu akustické tlaku ultrazvukové vlny, která dopadá na rozhraní imerzní vrstvy a zkoumaného vzorku. Ta byla odečtena přímo z ultrazvukového přístroje ve formě amplitudy napětí a v případě všech měření byla určena jako $p_A = 5,521 V$. Po odečtení této hodnoty lze přejít přímo k výpočtu pomocí rovnice 75. Koeficient odrazu v závislosti na čase a růstu amplitudy napětí odražené vlny dle očekávání roste. Na obrázku 54 vyobrazen graf závislosti koeficientu odrazu na čase. Díky tomu, že hodnota amplitudy napětí vysílané ultrazvukové vlny je konstantní, závisí změna koeficientu odrazu pouze na hodnotě naměřené pro odraženou vlnu.

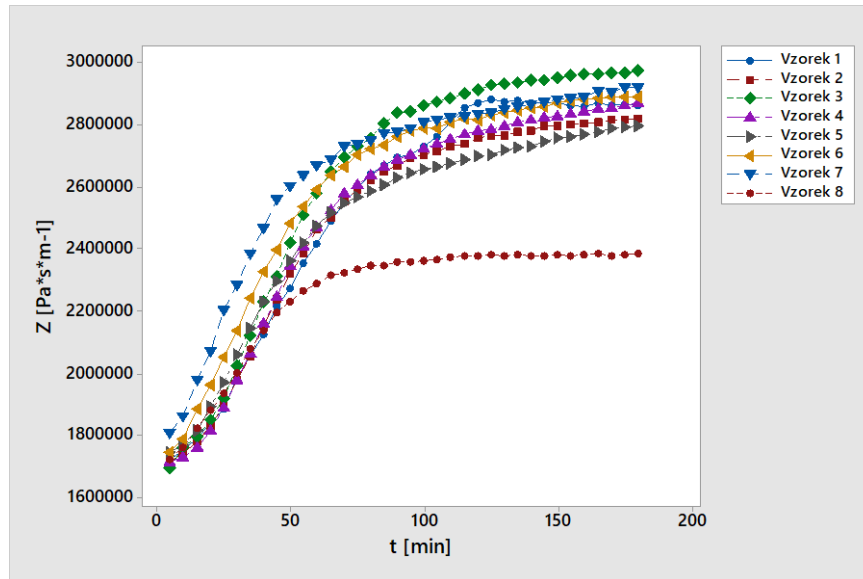


Obrázek 55: Změna koeficientu odrazu v závislosti na čase

V případě určení hodnoty akustické impedance měřeného materiálu je opět použito rovnice 75, která využívá již určených akustických vlastností imerzní vrstvy a znalosti koeficientu odrazu. Tato rovnice je upravena do následujícího tvaru:

$$Z_{mat} = Z_{im} \cdot \left(\frac{1 - R}{1 + R} \right) \quad 85$$

Výsledky získané pomocí tohoto výpočtu v závislosti na čase vykazují ukazuje totožný průběh nárůstu jako tomu bylo u růstu amplitudy napětí a koeficientu odrazu (viz. obrázek 56).



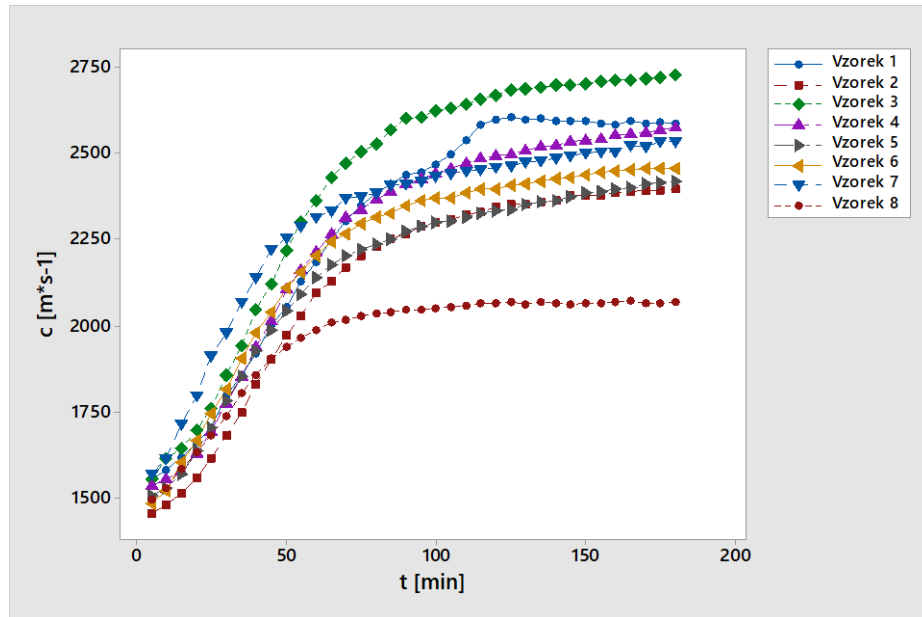
Obrázek 56: Změna akustické impedance materiálu v závislosti na čase

5.2.2.2 Rychlost ultrazvukové vlny

Rychlost šíření ultrazvukové vlny daným materiálem je možno určit z jeho akustické impedance pomocí rovnice 41. Výslednou rychlost šíření ultrazvukové vlny v materiálu lze nalézt spolu s ostatními akustickými veličinami v tabulce 23.

Tabulka 23: Výsledné akustické vlastnosti měřeného materiálu

Vzorek	Z_{\max} [Pa·s·m ⁻¹]	ρ [kg·m ⁻³]	Výsledné c [m·s ⁻¹]
1	2864219	1106,296	2589,02
2	2819929	1175,926	2399,75
3	2976839	1091,481	2727,34
4	2873049	1114,815	2577,15
5	2798352	1156,296	2420,1
6	2891351	1176,296	2458,01
7	2923029	1152,593	2536,05
8	2387003	1151,852	2072,32
Průměr	2816721	1140,7	2472,5
Směrodatná odchylka	182421	32,3	193,4



Obrázek 57: Změna rychlosti šíření ultrazvukové vlny v závislosti na čase

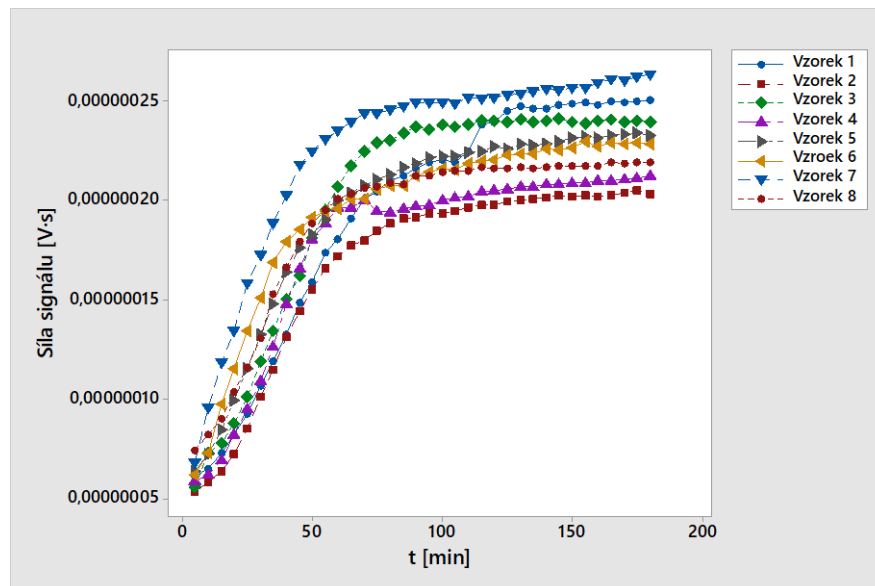
Na obrázku 56 lze je vyobrazen graf znázorňující změnu rychlosti šíření ultrazvukové vlny v daném vzorku. Stejně jako u předchozích posuzovaných akustických vlastností, i v tomto případě vykazuje vzorek 8 podstatně menší hodnoty, než je tomu u ostatních měřených vzorků. Při posouzení této závislosti se výrazněji projevují všechny odchylky mezi jednotlivými měřeními, což je zejména nápadné zejména u křivky znázorňující průběh změny u vzorku 1, kde je v čase přibližně 110 minut vykázan prudký nárůst rychlosti šíření ultrazvukové vlny a její následný pokles směrem k hodnotám ostatních vzorků.

5.2.3 Síla signálu odražené vlny

Síla odraženého signálu je určena jako numerická integrace absolutní hodnoty ultrazvukové vlny pomocí lichoběžníkového pravidla. Cílem této úpravy je u naměřených dat omezit ovlivnění čteného signálu v podobě jeho disperze.

Tabulka 24: Výsledky naměřené síly signálu

Vzorek	Konečná síla signálu [V·s]
1	$2,50559 \cdot 10^{-7}$
2	$2,03708 \cdot 10^{-7}$
3	$2,39906 \cdot 10^{-7}$
4	$2,12455 \cdot 10^{-7}$
5	$2,33273 \cdot 10^{-7}$
6	$2,28449 \cdot 10^{-7}$
7	$2,6339 \cdot 10^{-7}$
8	$2,1963 \cdot 10^{-7}$
Průměr	$2,3142 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka	$0,1978 \cdot 10^{-7}$



Obrázek 58: Závislost síly odraženého signálu na čase

Při posouzení křivek závislosti síly signálu na čase lze zpozorovat, že naměřená data jednotlivých vzorků v závislosti na čase opět vykazují prudký nárůst během první hodiny měření, což odpovídá procesu vytvrzování v tomto časovém intervalu. Ve druhé hodině měření poté nastává postupný útlum nárůstu, který vyústí, k již malému či nulovému nárůstu sledované

síly signálu ve třetí hodině měření. U vzorku 1 je v čase $t = 110 \text{ min}$ zaznamenán prudký nárůst, který je nejspíše zapříčiněn částečným překrytím signálu získaného od první odražené vlny druhou odraženou vlnou, která odpovídá rozhraní mezi měřeným vzorkem a dnem kelímky, ve kterém bylo měření prováděno.

5.3 Určení poločasu děje

Díky esovitému tvaru naměřených závislostí lze pomocí matematického postupu, obdobnému Avramiho rovnici určující kinetiku krystalizace, odvodit poločas sledovaného děje. V podstatě se jedná o lineární regresi normalizovaného a následně logaritmičsky transformovaného úseku esovité křivky v intervalu největšího gradientu nárůstu hodnocené veličiny neboli oblasti, kde se předpokládá průběh vyšetřovaného děje.

Pro naměřená data je určen odpovídající časový interval $t = \langle 10; 65 \rangle \text{ min}$. Normalizace dat je provedena přepočtem nárůstu sledovaného parametru od začátku měření tak, že naměřená data začínají v nule. Poté jsou data normalizována jako poměrný nárůst. Toho je docíleno postupným vydělením všech hodnot přírůstků konečnou hodnotou na sledovaném intervalu. Takto normalizovaná data jsou vyjádřena následující rovnicí, kdy X charakterizuje sledovaný děj a t čas. Hodnoty K a n jsou koeficienty, které je potřeba určit pomocí regresní analýzy daného intervalu.

$$X = 1 - e^{-K \cdot t^n} \quad 86$$

V případě dat, která jsou získána měřením akustických vlastností daného materiálu je rovnice 86 upravena do následujícího tvaru:

$$\log \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right] = \log K + n \cdot \log t \quad 87$$

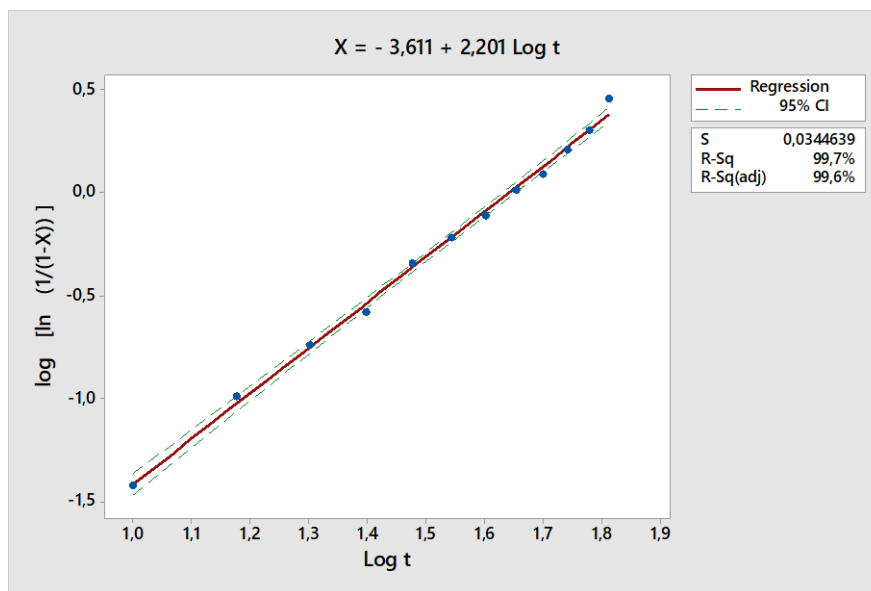
Takto transformovaná data jsou poté vynesena do grafu, kde je na ose x hodnota $\log t$ a na ose y hodnota $\log \left[\ln \left(\frac{1}{1-X} \right) \right]$. Regresní analýzou vynesené závislosti jsou určeny koeficienty n (směrnice regresní křivky) a K (absolutní regresní koeficient).

Výsledná hodnota poločasu děje je určen pomocí následující rovnice: (15) (16)

$$t_{0,5} = \sqrt[n]{\frac{\ln 2}{K}} \quad 88$$

5.3.1 Amplituda napětí

Při zpracování naměřených křivek způsobem popsáním v úvodu kapitoly 5.3 je pomocí logaritmických hodnot již předem zamýšleno, že výsledkem regresní analýzy bude lineární regrese. Příklad takové lineární regrese je vyobrazen na obrázku 59.



Obrázek 59: Regresní analýza pro amplitudu napětí vzorku 1

Všechny jednotlivé vzorky jsou samostatně vyhodnoceny a hodnoty regresních koeficientů a hodnoty určujících kvalitu proložení vyhodnocovaných dat jsou vypsány v tabulce 25.

Tabulka 25: Určené regresní koeficienty a kvalita regrese změny amplitudy napětí

Vzorek	Abs	x	S	R	R ²	MEP	AIK
1	-3,6112	2,2007	0,03446	0,998	0,9965	0,00148	-79,016
2	-3,6864	2,2705	0,02612	0,999	0,9981	0,00087	-85,663
3	-3,1698	1,9711	0,07274	0,99	0,9812	0,00944	-61,089
4	-4,0621	2,4907	0,01711	0,999	0,9993	0,00036	-95,819
5	-3,6448	2,2892	0,03904	0,998	0,9959	0,00252	-76,023
6	-3,172	2,0312	0,04835	0,996	0,9921	0,00399	-70,89
7	-2,6707	1,7649	0,05268	0,995	0,9895	0,00565	-68,831
8	-3,0576	1,9908	0,03953	0,996	0,9913	0,00247	-68,838

U vyhodnocení regresní křivky je prvním posuzovaným kritériem, zdali jsou příslušné regresní koeficienty statisticky významné či ne. U všech určených hodnot je pomocí Silenova pravidla prokázáno, že jejich regresní koeficienty jsou s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ statisticky významné.

Dalším hlediskem, které se u regresních křivek posuzuje je samotná kvalita regrese sledovaných dat. Pro tento účel je vyhodnocena směrodatná odchylka reziduí S, vícenásobný korelační koeficient R, koeficient determinace R^2 , střední kvadratická chyba predikce MEP a Akaikeho informační kritérium AIK. Pro získání těchto hodnot je použito programu QC Expert.

Dle těchto parametrů je jako nejkvalitnější proložení dat určena regresní křivka pro vzorek 4. Ta vykazuje nejmenší směrodatnou odchylku reziduí ze všech posuzovaných regresních křivek. Stejně tak je tomu u MEP a AIK, kde je hledána nejnižší určená hodnota. Naopak vícenásobný korelační koeficient a koeficient determinace dosahují téměř hodnoty 1, což říká, že určená regresní křivka, z 99,9 % charakterizuje hodnoty vyhodnocovaných bodů.

Dalšími kontrolovanými parametry regresní analýzy je test regresního tripletu. U všech provedených analýz není prokázána žádná odchylka, která by dle tohoto testu vyhodnotila danou regresní křivku jako nevyhovující.

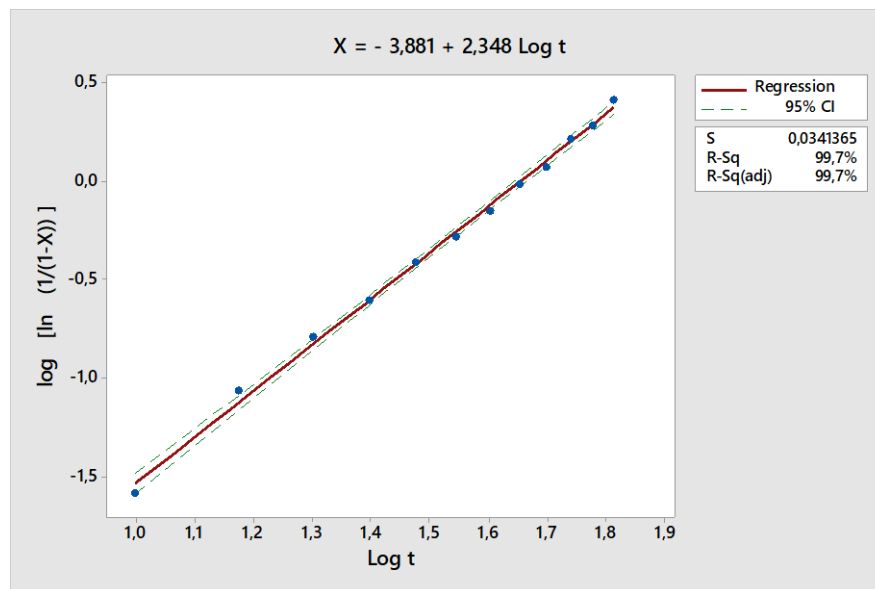
Tabulka 26: Určení hodnoty poločasu děje pro data amplitudy napětí

Vzorek	Log K	K	n	$t_{0,5}$ [min]
1	-3,6112	0,00025	2,2007	30,35
2	-3,6864	0,00021	2,2705	29,77
3	-3,1698	0,00068	1,9711	27,06
4	-4,0621	$8,7 \cdot 10^{-5}$	2,4907	31,4
5	-3,6438	0,00023	2,2892	28,12
6	-3,1722	0,00067	2,0312	25,19
7	-2,6707	0,00213	1,7649	21,51
8	-3,0576	0,00088	1,9908	23,79

Vyhodnocený poločas děje je pro každé měření vyneseno do tabulky 26. Primárně by pozornost měla být zaměřena na výsledky pro vzorek 4, jelikož regresní analýza jeho dat vyšla jako nejkvalitnější. Nicméně i u hodnot ostatních regresních analýz není kvalita výsledků nijak výrazně odlišná. Při tomto přístupu lze brát průměrnou hodnotu $\bar{t}_{0,5} = 27,15 \text{ min}$ jako relevantní.

5.3.2 Síla signálu odražené vlny

Pro vyhodnocení poločasu děje dle dat transformovaných z naměřené síly signálu je použito stejného postupu jako tomu bylo u dat získaných z amplitudy napětí. Opět se se jedná o lineární regresi normalizovaného úseku esovité křivky v intervalu největšího gradientu nárůstu hodnocené veličiny.



Obrázek 60: Regresní analýza pro sílu signálu vzorku 1

V tabulce 27 jsou vyneseny hodnoty jednotlivých regresních koeficientů a vyhodnocení kvality jednotlivých regresních křivek. Stejně jako v případě amplitudy napětí jsou jednotlivě regresní analýzy dat získaných z hodnot změny síly signálu testována Silenovým pravidlem a regresním tripletem. Všechna vyhodnocení s pravděpodobností $1 - \alpha = 0,95$ prokázala, že uvedené regresní koeficienty jsou statisticky významné a regresní analýzy nevykazují žádný parametr, který by je označil jako nevyhovující.

Tabulka 27: Určené regresní koeficienty a kvalita regrese změny síly signálu

Vzorek	Abs	x	S	R	R ²	MEP	AIK
1	-3,881	2,3482	0,03414	0,999	0,997	0,001873	-79,2452
2	-4,0087	2,4967	0,03586	0,999	0,9971	0,002259	-78,0601
3	-3,0006	1,8476	0,09407	0,982	0,9648	0,015886	-54,9176
4	-4,2881	2,6898	0,03636	0,999	0,9974	0,00153	-77,7312
5	-3,2991	2,1068	0,02375	0,999	0,9982	0,000706	-87,9505
6	-3,0433	2,0597	0,0694	0,992	0,9843	0,008174	-62,2161
7	-2,4386	1,6387	0,02356	0,998	0,9956	0,000898	-80,6364
8	-3,6365	2,3183	0,02741	0,999	0,9987	0,000407	-86,3345

Při posouzení hodnot vynesných v tabulce 27 se jako nejkvalitnější proložení posuzovaných dat jeví regresní křivka, která náleží vzorku 5. Tento vzorek vykazuje nejmenší hodnotu AIK, které je při vyhodnocení přikládána nejvyšší váha.

Tabulka 28: Určení hodnoty poločasu děje pro data amplitudy napětí

Vzorek	Log K	K	n	t _{0,5} [min]
1	-3,881	0,000132	2,3482	31,96
2	-4,0087	0,000098	2,4967	29,93
3	-3,0006	0,000999	1,8476	26,97
4	-4,2881	0,000515	2,6898	30,14
5	-3,2991	0,000502	2,1068	25,82
6	-3,0433	0,000905	2,0597	21,77
7	-2,4386	0,003643	1,6387	19,79
8	-3,6365	0,000231	2,3183	27,06

U vyhodnocení konečného poločasu děje je opět zvolen přístup, kdy se díky kvalitativní rovnocennosti určených regresních křivek, lze odkázat na průměrnou hodnotu určenou ze všech 8 měření $\bar{t}_{0,5} = 26,68 \text{ min}$.

5.4 Diskuze výsledků

Prvním posuzovaným údajem je změna akustických vlastností imerzní vrstvy v závislosti na jejím ohřevu díky exotermnímu charakteru dějů probíhajících ve zkoumaném vzorku. Z naměřených údajů pro teplotu je znatelné, že ohřev imerzní vrstvy probíhá v časovém intervalu $t = \langle 0; 50 \rangle \text{ min}$. Při porovnání tohoto údaje s hodnotami naměřenými prostřednictvím ultrazvuku vykazuje měření akustických veličin o deset a patnáct minut delší interval.

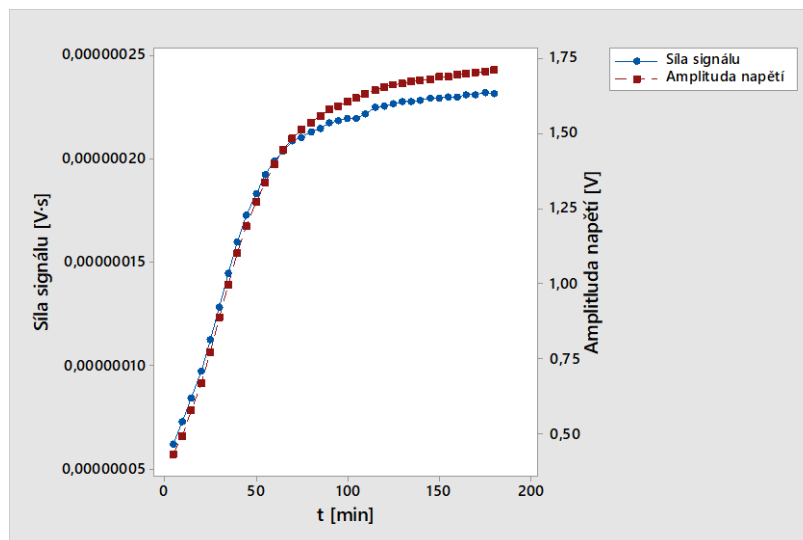
Jednotlivé akustické veličiny zkoumaného materiálu vyhodnocené z hodnoty amplitudy napětí lze posuzovat z pohledu výsledné rychlosti šíření ultrazvukové vlny, která je na všech ostatních akustických veličinách závislá a od nich odvozená. Tato veličina průměrně dosahuje na konci měření $\bar{c} = 2472,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá obdobnému pokusu pomocí průchodové metody. [14]

Posouzením odlišností jednotlivých měření z pohledu amplitudy napětí a síly signálu odražené vlny, lze metodu vyhodnocení síly signálu odražené ultrazvukové vlny, díky nižšímu koeficientu variace brát jako stabilnější.

Tabulka 29: Statistické veličiny pro konečné hodnoty naměřených závislostí

Veličina	Amplituda napětí [V]	Síla signálu [V·s]
Počet hodnot n	8	8
Průměr \bar{x}	1,7084	$2,3142 \cdot 10^{-7}$
Směrodatná odchylka s	0,1742	$0,1978 \cdot 10^{-7}$
Rozptyl s^2	0,0303	$0,0391 \cdot 10^{-7}$
Nejistota měření μ_α	0,0616	$0,0699 \cdot 10^{-7}$
Koeficient variace V_x	10,19	8,55
Medián \tilde{x}	1,759	$2,3086 \cdot 10^{-7}$
Variační rozpětí R	0,559	$0,5968 \cdot 10^{-7}$

Vzájemné porovnání průměrných hodnot amplitudy napětí a síly signálu odražené vlny je patrné, že v intervalu $t = \langle 0; 70 \rangle$ min dosahují hodnoty totožného růstu. Po překročení hranice sedmdesáti minut klesá přírůstek amplitudy napětí pomaleji, než je tomu u síly signálu odražené vlny. Tento růst obou měřených veličin je zobrazen na obrázku 61.



Obrázek 61: Porovnání růstu průměrné amplitudy napětí a síly signálu

Posledním posuzovaným parametrem byl poločas zkoumaného děje. Ten při posouzení z pohledu amplitudy napětí a síly odražené ultrazvukové vlny vychází u obou vyhodnocovacích metod přibližně $t_{0,5} = 27$ min.

Tabulka 30: Statistické veličiny pro hodnoty poločasu děje

Veličina	Amplituda napětí [°C]	Síla signálu [°C]
Počet hodnot n	8	8
Průměr \bar{x}	27,15	26,68
Směrodatná odchylka s	3,44	4,19
Rozptyl s^2	11,87	17,57
Nejistota měření μ_α	1,22	1,48
Koeficient variace V_x	12,69	15,71
Medián \tilde{x}	27,59	27,02
Variační rozpětí R	9,89	12,17

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce bylo praktické zkoumání možnosti detekovat změnu viskoelastických vlastností materiálu pomocí ultrazvuku. Toto bádání se cíleně zabývalo měřením pomocí imerzní odrazové metody a získáním co nejvíce informací o aktuálním stavu zkoumaného materiálu z první odražené vlny. Výhodou takového přístupu je eliminace podmínky mít pevnou odrazovou plochu ve známé vzdálenosti od ultrazvukové sondy.

V teoretické části byly popsány fyzikální principy zvukového vlnění a základních akustických veličin, sloužících k popisu ovlivnění ultrazvukové vlny prostředím, kterým vlna prochází. Ve druhé polovině teoretické části byly popsány metody použití ultrazvuku pro měření a zejména pro defektoskopii.

První polovina praktické části je věnována výběru a nastavení vhodné metody měření pomocí ultrazvuku. Stěžejním problémem, který je v této části řešen, je eliminace problému s mísitelností imerzní vrstvy s měřenými vzorky ve tekutém stavu. Tento problém byl vyřešen pomocí překrytí vzorku tenkou fólií z LDPE, která splňuje podmínku zamezení přístupu imerzní vrstvy ke vzorku a zároveň má minimální dopad na vlastnosti procházející ultrazvukové vlny.

Druhá polovina praktické části se již zabývá zkoumáním změny viskoelastických vlastností během síťování polymerního materiálu. Jako vyhodnocovací parametr byly použity hodnoty amplitudy napětí a síly signálu odražené ultrazvukové vlny od rozhraní imerzní vrstvy a zkoumaného materiálu. Díky exotermnímu charakteru probíhající reakce v měřeném materiálu se během měření měnily akustické vlastnosti imerzní vrstvy. Na základě určení aktuální akustické impedance imerzní vrstvy a koeficientu odrazu na povrchu měřeného vzorku bylo poté možné určit aktuální akustickou impedanci zkoumaného materiálu. Při její znalosti bylo již možné vypočítat rychlost šíření ultrazvukové vlny v daném vzorku.

Měření všech vzorků bylo provedeno po dobu 180 minut. Naměřené závislosti amplitudy napětí a síly signálu na čase od iniciace síťování vykazovaly vždy esovitý průběh. Měřený proces lze dle tohoto průběhu rozdělit na tři úseky.

První úsek v intervalu přibližně mezi nulou a šedesátou minutou byl charakteristický prudkým nárůstem měřených veličin a z nich odvozených akustických veličin zkoumaného materiálu. Tento nárůst by měl podle všech předpokladů odpovídat i nárůstu viskozity a modulu pružnosti v tahu.

Pro druhý úsek trvající dalších 60 minut bylo vykazováno postupné zpomalení nárůstu měřené veličiny až téměř do zastavení. V tomto úseku docházelo k úplnému vytvrzení.

Posledních 60 minut byl vykazován minimální nárůst měřených veličin. V tomto úseku by již mělo docházet k minimálním změnám viskoelastických vlastností.

Díky esovitému charakteru naměřených křivek bylo také možné určit poločas procesu vytvrzování sledovaného materiálu. Pomocí lineární regrese normalizovaného úseku esovité křivky v intervalu největšího gradientu nárůstu hodnocené veličiny byl následně určen poločas děje jako $t_{0,5} = 27 \text{ min}$.

Z provedených měření sice bylo možné sledovat změnu viskoelastických vlastností zkoumaného materiálu, ale pro číselné vyjádření již metoda zkoumající první odraženou ultrazvukovou vlnu od povrchu vzorku nestačí. Bohužel takto nelze určit koeficient akustického útlumu daného materiálu. Ten je primárně měřen pomocí průchodové metody. V návaznosti na tuto práci by bylo možné provést pomocí této metody měření akustického útlumu a poté se pokusit nalézt jeho souvislost se silou signálu odražené ultrazvukové vlny. Dalším možným jevem, který lze pozorovat, je kvalita zkoumaného povrchu. Při použití přesného měření imerzní odrazovou metodou by teoreticky bylo možné na základě disperze ultrazvukové vlny přisoudit jednotlivé hodnoty amplitudy napětí k hodnotám drsnosti zkoumaného povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. KREIDL, Marcel. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha : Starmans electronics, 2011. ISBN 978-80-254-6606-3.
2. REGAZZO, Richard a Marcela, REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. Senzory neelektrických veličin. Praha : BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-466-8.
3. ŠVEHLA, Štefan, ABRAMOV, Oleg a CHORBENKO, Ivan. *Využitie ultrazvuku v strojárstve a metalurgii*. Bratislava : Alfa, 1986.
4. ŠVEHLA, Štefan a Zdenko, FIGURA. *Ultrazvuk v technológii*. Edícia elektrotechnickej literatúry. Bratislava : Alfa, 1984.
5. OBRAZ, Jaroslav. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Praha : SNTL, 1984.
6. VĚCHET, Mojmír. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 8003001005.
7. Linke, Heinz Börner, Jörg Heß, Ralf. (2016). *Cylindrical Gears - Calculation-Materials-Manufacturing - 6.7.1.1 Introduction and Important Acoustic Terminology*. Hanser Publishers. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CRTKX3/cylindrical-gears-calculation/introduction-important>
8. Randall, Robert H. (2005). *Introduction to Acoustics - 2.5 The Differential Equation for Plane Waves*. Dover Publications. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011AI8S6/introduction-acoustics/plane-wave-differential>
9. Braun, Simon G. Ewins, David J. Rao, Singiresu S. (2002). *Encyclopedia of Vibration, Volumes 1-3 - Basic Theory*. Elsevier. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004QS7M8/encyclopedia-vibration/radiation-by-basic-theory>
10. Saxena, Vimal Krief, Michel Adam, Ludmila. (2018). *Handbook of Borehole Acoustics and Rock Physics for Reservoir Characterization - 1.3 Elasticity and Displacement*. Elsevier. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PW0Q3/handbook-borehole-acoustics/elasticity-displacement>
11. *Kontrola potahu trupu letadel na trhliny ze Scribe line* [online]. 2018 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47076>
12. Society of Plastics Engineers. (2015). *ANTEC® 2015 - Proceedings of the Technical Conference & Exhibition, Orlando, Florida, USA March 23-25, 2015 - Study on the Relationship*

between the Degree of Crystallinity and the Ultrasonic Velocity for Poly(lactic Acid) (PLA) Parts. Society of Plastics Engineers.

Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010QWIB2/antec-2015-proceedings/injection--study-relationship>

13. Karbhari, Vistasp M. (2013). *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites - Techniques and Applications - 7.1 Introduction.* Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00TSUWD1/non-destructive-evaluation/non-destru-introduction-6>
14. F, Lionetto, Rizzo R, Luprano V. A. M a Maffezzoli A. Phase transformations during the cure of unsaturated polyester resins. *Materials Science and Engineering: A.* 2004, **2004**(370), 4. ISSN 0921-5093. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.07.025>.
15. LEDNICKÝ, František. *Mikroskopie a morfologie polymerů.* V Liberci: Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7372-487-0.
16. M. Hribova, F. Rybnikar & P. H. Geil (2009) The Effect of Solid Sheet Fillers on Poly-p-Oxybenzoate Polymerization, Crystallization and Structure, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 48:3, 562-572, DOI: 10.1080/00222340902837709
17. ČSN ISO 80000-2 (011300) *A Veličiny a jednotky.* Část 8, Akustika Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

boPET	Biaxiálně orientovaný polyethylenetereftalát
HDPE	vysokohustotní polyethylen
LDPE	nízkozhustotní polyehylen
LLDPE	linearizovaný nízkohustotní polyethylen
PVC	polyvinylchlorid
A	amplituda výchylky
a	ztrátové číslo
a_k	absolutní součinitel koncentrace
b	teplotní součinitel
c	rychlost zvuku
c_L	rychlost šíření podélné vlny
c_R	rychlost šíření Rayleighovy vlny
c_T	rychlost šíření příčné vlny
D	součinitel průchodu
dB	decibel
E	modul pružnosti v tahu
f	frekvence
G	modul pružnosti ve smyku
H_A	alternativní hypotéza
Hz	herz
H_0	nulová hypotéza
I_a	intenzita ultrazvukové vlny
K	adiabatický modul objemové pružnosti
k	vlnočet

L_I	hladina intenzity
L_p	hladina akustického tlaku
L_v	hladina akustické rychlosti
L_W	hladina akustického výkonu
m	metr
N	měrný akustický výkon
P	výkon
P	tlak
Pa	Pascal
q	Koncentrace
R	součinitel odrazu
r	poloměr
S	plocha
s	sekunda
T	teplota, perioda
t	čas
V	objem, volt
v	rychlost
W	watt
w	energie akustického vlnění
Z	akustická impedance
α	útlum
β_{ad}	adiabatický koeficient stlačitelnosti
β_{iz}	izotermický koeficient stlačitelnosti
η	dynamická viskozita
κ	Poissonova konstanta

λ	vlnová délka
μ	Poissonovo číslo
ρ	hustota
φ	fázový úhel
ω	úhlová rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Závislost výchylky y, rychlosti v a zrychlení a kmitavého pohybu hmotného bodu na čase t (3)</i>	13
<i>Obrázek 2: Časové rozvinutí harmonického kmitání (3)</i>	13
<i>Obrázek 3: Šíření ultrazvukové vlny v plynném nebo kapalném prostředí</i>	15
<i>Obrázek 4: Rovinná vlna (5)</i>	16
<i>Obrázek 5: Válcová vlna (5)</i>	16
<i>Obrázek 6: Kulová vlna (5)</i>	17
<i>Obrázek 7: Podélná vlna (6)</i>	18
<i>Obrázek 8: Příčná vlna (6)</i>	18
<i>Obrázek 9: Rayleighova vlna (6)</i>	19
<i>Obrázek 10: Loveovy vlny (6)</i>	19
<i>Obrázek 11: Asymetrické Lambovy vlny (6)</i>	20
<i>Obrázek 12: Symetrické Lambovy vlny (6)</i>	20
<i>Obrázek 13: Měřicí plocha akustického výkonu</i>	24
<i>Obrázek 14: Vliv disperze při šíření ultrazvukového impulzu (1)</i>	32
<i>Obrázek 15: Fázová a grupová rychlost (1)</i>	33
<i>Obrázek 16: Nomogram pro určení fázové rychlosti (1)</i>	34
<i>Obrázek 17: Nomogram pro určení grupové rychlosti (1)</i>	34
<i>Obrázek 18: Kolmý dopad ultrazvukové vlny a rozhraní dvou prostředí (1)</i>	38
<i>Obrázek 19: Přejed ultrazvukové vlny z hustšího do řidšího prostředí (5)</i>	39
<i>Obrázek 20: Přejed ultrazvukové vlny z řidšího do hustšího prostředí (5)</i>	40
<i>Obrázek 21: Kolmý průchod a odraz ultrazvukové vlny tenkou vrstvou (1)</i>	40
<i>Obrázek 22: Šikmý dopad podélné ultrazvukové vlny (5)</i>	41
<i>Obrázek 23: Testování trupu letadla pomocí ultrazvukového zařízení (11)</i>	43
<i>Obrázek 24: Typy akustických vazeb A – kontaktní, B – mezerová, C – imerzní (2)</i> ..	44
<i>Obrázek 25: Průchodová metoda (13)</i>	45
<i>Obrázek 26: Odrazové metoda s imerzní akustickou vazbou (12)</i>	46
<i>Obrázek 27: Využití průchodové metody pro defektoskopii (1)</i>	47
<i>Obrázek 28: Využití impulzní odrazové metody s imerzní akustickou vazbou (1)</i>	47
<i>Obrázek 29: Odečtený ultrazvukový signál</i>	50
<i>Obrázek 30: Zapojení sestavy měřicích zařízení</i>	51
<i>Obrázek 31: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí referenčního vzorku</i>	54

<i>Obrázek 32: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ referenčního vzorku</i>	54
<i>Obrázek 33: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z LDPE</i>	56
<i>Obrázek 34: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z LDPE.....</i>	56
<i>Obrázek 35: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z LLDPE</i>	58
<i>Obrázek 36: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z LLDPE</i>	58
<i>Obrázek 37: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z HDPE.....</i>	60
<i>Obrázek 38: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z HDPE.....</i>	60
<i>Obrázek 39: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z PVC.....</i>	62
<i>Obrázek 40: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z PVC</i>	62
<i>Obrázek 41: Histogram a Box-plot pro amplitudu napětí fólie z boPET.....</i>	64
<i>Obrázek 42: Histogram a Box-plot pro sílu signálu $\cdot 10^7$ fólie z boPET</i>	64
<i>Obrázek 43: Srovnání výsledných Box – plot digramů amplitudy napětí odraženého vlny</i>	65
<i>Obrázek 44: Games – Howellův diagram podobnosti jednotlivých materiálů.....</i>	66
<i>Obrázek 45: Vyhodnocení výsledků amplitudy napětí pomocí Scheffého metody</i>	66
<i>Obrázek 46: Časový diagram měření amplitudy napětí pro vybrané materiály krycí fólie.....</i>	67
<i>Obrázek 47: Dendrogram výsledků vybrané materiály krycí fólie.....</i>	67
<i>Obrázek 48: Srovnání výsledných Box – plot digramů síly signálu odražené vlny</i>	68
<i>Obrázek 49: Games – Howellův diagram podobnosti jednotlivých materiálů.....</i>	69
<i>Obrázek 50: Vyhodnocení výsledků síly signálu pomocí Scheffého metody.....</i>	69
<i>Obrázek 51: Časový diagram měření síly signálu pro vybrané materiály krycí fólie</i>	70
<i>Obrázek 52: Dendrogram výsledků vybrané materiály krycí fólie.....</i>	70
<i>Obrázek 53: Změna teploty imerzní vrstvy v závislosti na čase</i>	74
<i>Obrázek 54: Změna amplitudy napětí odražené vlny v závislosti na čase.....</i>	75
<i>Obrázek 55: Změna koeficientu odrazu v závislosti na čase</i>	76
<i>Obrázek 56: Změna akustické impedance materiálu v závislosti na čase</i>	77
<i>Obrázek 57: Změna rychlosti šíření ultrazvukové vlny v závislosti na čase.....</i>	78
<i>Obrázek 58: Závislost síly odraženého signálu na čase</i>	79
<i>Obrázek 59: Regresní analýza pro amplitudu napětí vzorku 1</i>	81
<i>Obrázek 60: Regresní analýza pro sílu signálu vzorku 1</i>	83
<i>Obrázek 61: Porovnání růstu průměrné amplitudy napětí a síly signálu.....</i>	86

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Rozdělení zvuku dle vyvolaného kmitání prostředí (2)</i>	12
<i>Tabulka 2: Rozdělení ultrazvukového pole dle jeho intenzity (4)</i>	23
<i>Tabulka 3: Referenční hodnoty hladin akustických veličin dle ČSN EN ISO 80000–8: Akustika (17)</i>	25
<i>Tabulka 4: Použité zařízení pro měření</i>	51
<i>Tabulka 5: Nastavení ultrazvukového přístroje</i>	51
<i>Tabulka 6: Naměřené údaje pro referenční vzorek</i>	53
<i>Tabulka 7: Bodové odhady statistických veličin referenčního vzorku</i>	53
<i>Tabulka 8: Naměřené údaje pro fólii z LDPE</i>	55
<i>Tabulka 9: Bodové odhady statistických veličin fólie z LDPE</i>	55
<i>Tabulka 10: Naměřené údaje pro fólii z LLDPE</i>	57
<i>Tabulka 11: Bodové odhady statistických veličin fólie z LLDPE</i>	57
<i>Tabulka 12: Naměřené údaje pro fólii z HDPE</i>	59
<i>Tabulka 13: Bodové odhady statistických veličin fólie z HDPE</i>	59
<i>Tabulka 14: Naměřené údaje pro fólii z PVC</i>	61
<i>Tabulka 15: Bodové odhady statistických veličin fólie z PVC</i>	61
<i>Tabulka 16: Naměřené údaje pro fólii z boPET</i>	63
<i>Tabulka 17: Bodové odhady statistických veličin fólie z boPET</i>	63
<i>Tabulka 18: Souhrn statistických veličin pro amplitudu napětí [V]</i>	65
<i>Tabulka 19: Souhrn statistických veličin pro sílu signálu $\cdot 10^{-7}$ [V·s]</i>	68
<i>Tabulka 20: Složení vzorku pro měření</i>	72
<i>Tabulka 21: Fyzikální vlastnosti vzorku a vzdálenost ultrazvukové sondy</i>	73
<i>Tabulka 22: Hodnoty fyzikálních vlastností imerzní vrstvy při T_{max}</i>	75
<i>Tabulka 23: Výsledné akustické vlastnosti měřeného materiálu</i>	77
<i>Tabulka 24: Výsledky naměřené síly signálu</i>	79
<i>Tabulka 25: Určené regresní koeficienty a kvalita regrese změny amplitudy napětí</i>	81
<i>Tabulka 26: Určení hodnoty poločasu děje pro data amplitudy napětí</i>	82
<i>Tabulka 27: Určené regresní koeficienty a kvalita regrese změny síly signálu</i>	84
<i>Tabulka 28: Určení hodnoty poločasu děje pro data amplitudy napětí</i>	84
<i>Tabulka 29: Statistické veličiny pro konečné hodnoty naměřených závislostí</i>	85
<i>Tabulka 30: Statistické veličiny pro hodnoty poločasu děje</i>	86

