

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií

Bc. Michal Forman

Diplomová práce

2014

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Forman**  
Osobní číslo: **D12740**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Vliv struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií**  
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Ultrazvuková defektoskopie - teoretické principy, testování materiálů, omezení metody
- 2) Základní struktura kovových materiálů
- 3) Praktická měření a jejich diskuse
- 4) Zhodnocení

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran textu a přílohy  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu I., CERM Brno, ISBN: 80-7204-283-1  
Regazzo, R., Regazzová, M.: Ultrazvuk, základy ultrazvukové defektoskopie.  
BEN 2013, ISBN 978-80-7300-466-8

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.  
Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: 21. února 2014  
Termín odevzdání diplomové práce: 23. května 2014

  
prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.  
děkan

L.S.

  
doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 21. února 2014

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Nové Pace dne 19. 11. 2014

Michal Forman

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Švandovi, PhD. za poskytnuté materiály, věnovaný čas, rady a připomínky k této práci.

## ANOTACE

Diplomová práce se zabývá vlivem struktury na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií. V úvodních kapitolách je popsán teoretický princip ultrazvukové defektoskopie a základní struktura kovových materiálů. V praktické části jsou provedena měření na kovových materiálech s různou základní fázovou strukturou a vyhodnocen vliv struktury na rychlost a útlum ultrazvukových vln.

## KLÍČOVÁ SLOVA

ultrazvuková defektoskopie, kov, struktura, rychlost a útlum ultrazvuku

## TITLE

Influence of material structure to ultrasound testing evaluation

## ANNOTATION

The thesis deals with influence of material to ultrasound testing evaluation. In the opening chapters is described theoretical principle of ultrasonic testing and the basic structure of metallic materials. In the practical part are made measurements on metallic materials with various basic phase structure and evaluated the effect of structure on velocity and attenuation of ultrasonic waves.

## KEYWORDS

ultrasonic flaw detection, metal, structure, velocity and attenuation of ultrasound

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>14</b>
<b>1 ULTRAZVUKOVÁ DEFEKTOSKOPIE</b> .....	<b>15</b>
1.1 Princip ultrazvukových zkoušek .....	15
1.2 Druhy ultrazvukových vln .....	17
1.3 Akustické rozhraní, odraz a lom ultrazvukových vln .....	18
1.3.1 Kolmý dopad.....	18
1.3.2 Šikmý dopad .....	19
1.3.3 Útlum ultrazvuku .....	20
1.4 Ultrazvukové sondy .....	22
1.4.1 Piezoelektrické měniče .....	22
1.4.2 Vyzařování zdroje vlnění.....	23
1.4.3 Druhy piezoelektrických ultrazvukových sond .....	24
1.5 Ultrazvukové přístroje .....	27
1.6 Metody ultrazvukové defektoskopie.....	28
1.6.1 Odrazová metoda .....	28
1.6.2 Průchodová metoda.....	29
1.6.3 Metoda Phased array.....	30
1.6.4 Metoda TOFD.....	31
1.7 Faktory ovlivňující zkoušení .....	32
1.7.1 Akustická vazba.....	32
1.7.2 Povrch zkoušeného objektu .....	34
1.7.3 Zkoušený materiál.....	34
1.7.4 Tvar zkoušeného objektu .....	35
1.7.5 Vlastnosti vad .....	36
<b>2 STRUKTURA KOVOVÝCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>38</b>
2.1 Krystalická struktura kovových materiálů .....	39
2.2 Poruchy krystalické mřížky .....	41
2.3 Mikrostruktura kovových materiálů .....	43
2.4 Vznik struktury kovu .....	44
<b>3 MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVÝM DEFEKTOSKOPEM</b> .....	<b>46</b>
3.1 Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562.....	46

3.2	Vlastní měření.....	47
3.2.1	Parametry sond .....	47
3.2.2	Ověření přesnosti měření a měřící metody.....	48
3.2.3	Měření rychlosti ultrazvuku.....	49
3.2.4	Měření útlumu ultrazvuku .....	50
3.3	Srovnávací měření tvrdosti .....	52
3.4	Zkoušené materiály a naměřené hodnoty .....	53
3.4.1	Souhrn naměřených hodnot .....	64
<b>4</b>	<b>ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>65</b>
4.1	Zhodnocení dosažených výsledků podle mikrostruktury materiálů .....	65
4.2	Zhodnocení dosažených výsledků podle tvrdosti materiálů .....	66
4.3	Porovnání vlivu změny tloušťky materiálu.....	68
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>71</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b> Průběh kmitavého pohybu [1].....	16
<b>Obrázek 2</b> Druhy ultrazvukových vln [12].....	18
<b>Obrázek 3</b> Kolmý dopad na rozhraní [2].....	18
<b>Obrázek 4</b> Šikmý dopad na rozhraní [2].....	19
<b>Obrázek 5</b> Piezoelektrický jev [12] .....	23
<b>Obrázek 6</b> Schematické znázornění piezokompozitového měniče [3].....	23
<b>Obrázek 7</b> Profil akustického svazku [4] (upraveno) .....	24
<b>Obrázek 8</b> Ultrazvukové piezoelektrické sondy [4] (upraveno).....	26
<b>Obrázek 9</b> Blokové schéma ultrazvukového defektoskopu [3].....	27
<b>Obrázek 10</b> Vysílací a přijímací děj [3] .....	28
<b>Obrázek 11</b> Princip odrazové metody [5].....	29
<b>Obrázek 12</b> Identifikace vady průchodovou metodou [5].....	30
<b>Obrázek 13</b> Fázově řízené pole [4].....	31
<b>Obrázek 14</b> Metoda TOFD [4] .....	32
<b>Obrázek 15</b> Druhy vazeb [2] .....	34
<b>Obrázek 16</b> Zkoušení kulatiny [2].....	35
<b>Obrázek 17</b> Zdánlivé vady ve svaru [2] .....	35
<b>Obrázek 18</b> Zkouška svaru z druhé strany [2].....	36
<b>Obrázek 19</b> Příklady vad a jejich projev na obrazovce defektoskopu [3].....	37
<b>Obrázek 20</b> Zjednodušené schéma stavby kovů [7] .....	38
<b>Obrázek 21</b> Základní vazby mezi atomy [7] .....	39
<b>Obrázek 22</b> Čtyři typy základních krystalových buněk:[7].....	40
<b>Obrázek 23</b> Krychlová prostorově středěná struktura [1] (upraveno).....	40
<b>Obrázek 24</b> Krychlová plošně středěná struktura [1] (upraveno) .....	40
<b>Obrázek 25</b> Hexagonální struktura [1] (upraveno).....	41
<b>Obrázek 26</b> Bodové poruchy krystalické mřížky [6] (upraveno).....	42
<b>Obrázek 27</b> Schéma vzniku a šíření hranové dislokace [7].....	42
<b>Obrázek 28</b> Schéma vzniku a šíření šroubové dislokace [7].....	42
<b>Obrázek 29</b> Schéma plošných poruch [9].....	43
<b>Obrázek 30</b> Schéma substitučního tuhého roztoku [7].....	44
<b>Obrázek 31</b> Schéma intersticiálního tuhého roztoku [7] .....	44
<b>Obrázek 32</b> Vznik struktury kovu [10].....	45

<b>Obrázek 33</b> Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562 .....	46
<b>Obrázek 34</b> Ultrazvukové sondy .....	47
<b>Obrázek 35</b> Stupňová měrka .....	48
<b>Obrázek 36</b> Modifikovaná měrka K1 .....	48
<b>Obrázek 37</b> Kolmé prozvučování [13] (upraveno).....	50
<b>Obrázek 38</b> Rozdíl mezi 1. KE a 2. KE [13] (upraveno) .....	50
<b>Obrázek 39</b> Ztráty rozevřením svazku z AVG diagramu [13] (upraveno).....	51
<b>Obrázek 40</b> Obecný AVG diagram [2].....	51
<b>Obrázek 41</b> Tvrdoměr PROCEQ EQUO TIP 2.....	53
<b>Obrázek 42</b> Materiál č. 1 .....	54
<b>Obrázek 43</b> Měřená místa.....	54
<b>Obrázek 44</b> Mikrostruktura materiálu č. 1 .....	54
<b>Obrázek 45</b> Materiál č. 2 .....	55
<b>Obrázek 46</b> Měřené místo .....	55
<b>Obrázek 47</b> Mikrostruktura materiálu č. 2 .....	55
<b>Obrázek 48</b> Materiál č. 3 .....	56
<b>Obrázek 49</b> Měřená místa.....	56
<b>Obrázek 50</b> Mikrostruktura materiálu č. 3 .....	56
<b>Obrázek 51</b> Materiál č. 4 .....	57
<b>Obrázek 52</b> Měřená místa.....	57
<b>Obrázek 53</b> Mikrostruktura materiálu č. 4 .....	57
<b>Obrázek 54</b> Materiál č. 5 .....	58
<b>Obrázek 55</b> Měřená místa.....	58
<b>Obrázek 56</b> Mikrostruktura materiálu č. 5 .....	58
<b>Obrázek 57</b> Materiál č. 6 a jeho měřená místa .....	59
<b>Obrázek 58</b> Mikrostruktura materiálu č. 6 .....	59
<b>Obrázek 59</b> Materiál č. 7 a jeho měřená místa .....	60
<b>Obrázek 60</b> Mikrostruktura materiálu č. 7 .....	60
<b>Obrázek 61</b> Materiál č. 8 a jeho měřená místa .....	61
<b>Obrázek 62</b> Mikrostruktura materiálu č. 8 .....	61
<b>Obrázek 63</b> Materiál č. 9 a jeho měřená místa .....	62
<b>Obrázek 64</b> Mikrostruktura materiálu č. 9 .....	62
<b>Obrázek 65</b> Materiál č. 4 (jiná tloušťka) .....	63
<b>Obrázek 66</b> Měřená místa.....	63

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b> Základní technická data [5] .....	46
<b>Tabulka 2</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 1.....	54
<b>Tabulka 3</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 1 .....	54
<b>Tabulka 4</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 2.....	55
<b>Tabulka 5</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 2 .....	55
<b>Tabulka 6</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 3.....	56
<b>Tabulka 7</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 3 .....	56
<b>Tabulka 8</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 4.....	57
<b>Tabulka 9</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 4 .....	57
<b>Tabulka 10</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 5.....	58
<b>Tabulka 11</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 5 .....	58
<b>Tabulka 12</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 6.....	59
<b>Tabulka 13</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 6 .....	59
<b>Tabulka 14</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 7.....	60
<b>Tabulka 15</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 7 .....	60
<b>Tabulka 16</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 8.....	61
<b>Tabulka 17</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 8 .....	61
<b>Tabulka 18</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 9.....	62
<b>Tabulka 19</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 9 .....	63
<b>Tabulka 20</b> Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u mat. č. 4 (jiná tl.).....	63
<b>Tabulka 21</b> Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 4 (jiná tloušťka) .....	64
<b>Tabulka 22</b> Souhrnná tabulka naměřených hodnot .....	64
<b>Tabulka 23</b> Porovnání vlivu změny tloušťky materiálu .....	68

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1</b> Závislost rychlosti UZ vln na tvrdosti materiálu u první skupiny materiálů.....	66
<b>Graf 2</b> Závislost útlumu UZ vln na tvrdosti materiálu u první skupiny materiálů .....	67
<b>Graf 3</b> Závislost rychlosti UZ vln na tvrdosti materiálu u druhé skupiny materiálů .....	67
<b>Graf 4</b> Závislost útlumu UZ vln na tvrdosti materiálu u druhé skupiny materiálů.....	68

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	poměrná dráha ultrazvuku
$C_1$	konstanta Rayleighova rozptylu
$C_2$	konstanta stochastického rozptylu
$C_3$	konstanta difúzního rozptylu
$C_A$	konstanta absorpce
c	rychlost šíření ultrazvukových vln
$c_L$	rychlost šíření podélných ultrazvukových vln
$c_T$	rychlost šíření příčných ultrazvukových vln
D	koeficient průchodu
$D_0$	jmenovitý průměr měniče
$D_{ef}$	efektivní průměr měniče
dB	decibel
$d_{st}$	střední rozměr zrna
f	jmenovitá frekvence
KE	koncové echo
L, LW	podélná vlna
m	vzdálenost sondy od povrchu
N	délka blízkého pole
P	dopadající akustický tlak
$P_D$	odražený akustický tlak
$P_R$	prošlý akustický tlak
R	koeficient odrazu
s	dráha ultrazvuku
t	čas
t	tloušťka
T	doba kmitu
T, TW	příčná vlna
UZ	ultrazvuk
Z	akustický vlnový odpor
$\alpha$	úhel dopadu
$\alpha_{1,L}$	úhel dopadu a úhel odrazu podélné vlny

$\alpha_{1,T}$	úhel odrazu příčné vlny
$\alpha_{2,L}$	úhel průchodu podélné vlny
$\alpha_{2,T}$	úhel šíření příčné vlny
$\Delta V$	decibelový rozdíl mezi 1. KE a 2. KE
$\Delta V_O$	ztráty odrazem ultrazvukových vln
$\Delta V_S$	ztráty rozevřením ultrazvukového svazku
$\lambda$	vlnová délka
$\kappa$	útlum
$\kappa_A$	útlum absorpcí
$\kappa_R$	útlum rozptylem
$\rho$	měrná hmotnost prostředí
$\varphi_{6\text{ dB}}$	poloviční úhel rozevření svazku pro pokles echa o 6 dB

## ÚVOD

Diplomová práce se zabývá vlivem struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií. Jedná se o porovnání různých struktur kovových materiálů, tedy zjištění, jaký mají jednotlivé struktury vliv na zkoušení pomocí ultrazvukové zkušební metody.

Zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku spadá do oboru nedestruktivního zkoušení a patří již desítky let mezi nejvíce využívané metody. Používá se v oblasti zkoušení a diagnostiky výrobků, výrobních zařízení, dopravních prostředků, konstrukcí atd. Standardně se ultrazvuk používá pro kontrolu základního materiálu, svarových spojů, návarů a pro měření tloušťky stěn.

Práce je tematicky rozčleněna do čtyř základních částí. První část se zaměřuje na samotnou ultrazvukovou defektoskopii. Je zde popsán její základní fyzikální princip, jsou vysvětleny pojmy ohledně vzniku a šíření ultrazvukových vln, dále jsou popsány základní ultrazvukové sondy, zkušební přístroje, metody zkoušení používané v současné době včetně jejich omezení a faktory ovlivňující zkoušení. Druhá část je věnována popisu základní struktury kovových materiálů. Ve třetí části, jež je částí praktickou, je provedeno měření ultrazvukovým defektoskopem na zkušebních kovových materiálech s různou vnitřní strukturou. Vlastní měření spočívá ve zjištění rychlosti šíření ultrazvukových vln a jejich útlumu u jednotlivých materiálů. Pro doplnění je provedeno měření na materiálech s větší tloušťkou a je porovnán vliv změny tloušťky materiálu na změnu rychlosti šíření ultrazvukových vln a na jejich útlum. Na základě zjištěných údajů se vyhodnotí vliv struktury materiálu na měření pomocí ultrazvuku, což je náplní čtvrté závěrečné části této diplomové práce.

# 1 ULTRAZVUKOVÁ DEFEKTOSKOPIE

Ultrazvuková defektoskopie patří mezi základní a nejvýznamnější metody používané k nedestruktivnímu testování materiálů, tedy ke zjišťování jejich stavu z pohledu přítomnosti vnitřních vad, aniž by se tím narušila jejich budoucí použitelnost nebo ovlivnila schopnost plnit požadované funkce. Zkoušení ultrazvukem umožňuje kromě zjištění přítomnosti vady určit také její polohu a velikost [3, 4].

Výhodou zkoušení ultrazvukem je velká citlivost na vnitřní necelistvosti, minimální příprava zkoušeného objektu, okamžité výsledky testu, možnost zkoušení většiny materiálů [3, 4].

Na druhé straně má i určité nevýhody a to, že povrch zkoušeného objektu musí být přístupný a dostatečně hladký pro umístění sondy, citlivost metody závisí na orientaci necelistvosti vůči ultrazvukové vlně, jsou požadovány velké zkušenosti pro nastavení zkušebního přístroje a vyhodnocení výsledků [3, 4].

## 1.1 Princip ultrazvukových zkoušek

Ultrazvuková zkušební metoda je založena na změnách prostupnosti a odrazivosti vysokofrekvenčních zvukových (ultrazvukových) vln vlivem necelistvosti materiálu [4].

Zvuk jsou mechanické vlny, které vznikají jako důsledek vybuzeného (vynuceného) kmitání jednotlivých částic hmoty. V průběhu šíření zvukových vln nedochází k žádnému transportování materiálu, ale částice prostředí kmitají kolem své klidové (rovnovážné) polohy a vlivem soudržných sil působících mezi částicemi se postupně tento pohyb (kmitání) přenáší z jedné částice na všechny okolní, což se navenek projevuje jako vlna (vlnění) šířící se prostředím rychlostí, jež je závislá na mechanických vlastnostech prostředí [2, 3].

Hlavní veličinou charakterizující vlnění je vlnová délka  $\lambda$ . Je to vzdálenost, kterou urazí vlna za dobu jedné periody  $T$  (obr. 1).

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1)$$

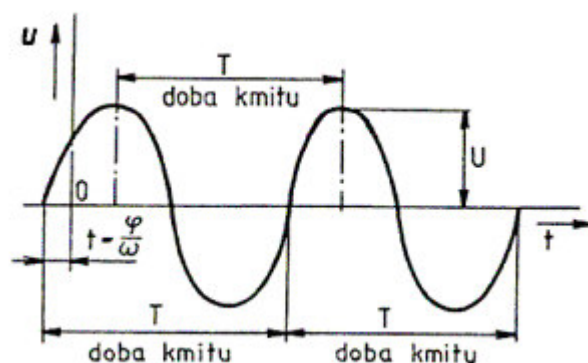
Kde

$\lambda$  – vlnová délka,

$c$  – rychlost šíření vlny,

$T$  – perioda,

$f$  – frekvence.



**Obrázek 1** Průběh kmitavého pohybu [1]

$u$  – výchylka,  $T$  – perioda,  $U$  – amplituda,  $t$  – čas,  $\varphi$  – fázový úhel,  $\omega$  – úhlová rychlost

Pojem „ultra“ se vztahuje k frekvenčnímu rozsahu zvuku, jenž je nad hranicí slyšitelnosti, tj. vnímavostí zvuku lidskými sluchovými orgány. Frekvenční hranice slyšitelnosti zvuku je v rozmezí od 16 Hz do 20 kHz [2].

Ultrazvuk je tedy kmitavý pohyb částic prostředí kolem jejich rovnovážných poloh šířící se v elastickém prostředí ve frekvenčním rozsahu nad 20 kHz. Pro účely defektoskopie se používají vysokofrekvenční zvukové vlny ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 50 MHz, ve výjimečných případech až do 200 MHz [3, 4].

Pro zkoušení materiálu ultrazvukem je podstatný akustický tlak, který vyvolá vlnění v prostředí a je úměrný elektrickému napětí na elektrodách ultrazvukové piezoelektrické sondy. Tento akustický tlak je závislý na rychlosti kmitání částic a dále na akustické impedanci (vlnovém odporu) prostředí [3, 4].

$$p = z \cdot v \tag{2}$$

$$z = \rho \cdot c \tag{3}$$

Kde

$p$  – akustický tlak,

$v$  – rychlost kmitání částic okolo rovnovážné polohy,

$z$  – akustická impedance prostředí,

$\rho$  – měrná hmotnost prostředí,

$c$  – rychlost šíření vlny.



## 1.2 Druhy ultrazvukových vln

Podle směru, ve kterém částice prostředí kmitají vzhledem ke směru šíření ultrazvukové vlny, se rozlišují čtyři základní druhy ultrazvukových vln [2, 4]:

- podélné (longitudiální),
- příčné (transverzální),
- povrchové (Rayleighovy),
- deskové (Lambovy).

### Podélné (longitudiální) ultrazvukové vlny

Částice prostředí kmitají ve směru šíření vlny. Jedná se o nejrychlejší vlny a mohou se šířit tuhým, kapalným i plynným prostředím [2, 4].

### Příčné (transverzální) ultrazvukové vlny

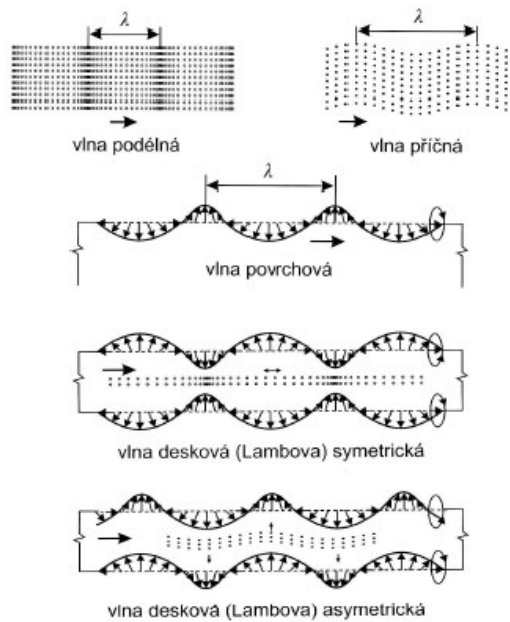
Částice prostředí kmitají kolmo ke směru šíření vlny. Příčné vlny se mohou šířit pouze prostředím, které umožňuje přenášet smyková napětí, tedy jen tuhým prostředím. Jejich rychlost je menší než rychlost podélných vln [2, 3].

### Povrchové (Rayleighovy) ultrazvukové vlny

Částice prostředí kmitají po eliptické dráze v rovině kolmé k povrchu. Povrchové vlny se šíří na povrchu a v těsné blízkosti pod ním. Hloubkový dosah je roven přibližně jedné vlnové délce  $\lambda$ . Tyto vlny se šíří pouze v tuhém prostředí a jejich rychlost je 0,92 až 0,94krát menší než rychlost vln podélných [2, 3].

### Deskové (Lambovy) ultrazvukové vlny

Mohou vznikat v materiálech, u kterých je nejméně jeden rozměr srovnatelný s vlnovou délkou (např. u plechů jejich tloušťka nebo u tyčoviny průměr tyče). V defektoskopii se rozlišují deskové vlny symetrické (dilatační) a nesymetrické (ohybové). Kmitání částic na povrchu je u obou druhů deskových vln stejné jako u povrchových vln. Rozdíl je v kmitání částic uprostřed tloušťky. U symetrických (dilatačních) vln kmitají částice jako u podélných vln, kdežto u nesymetrických (ohybových) jako u vln příčných [2, 4].



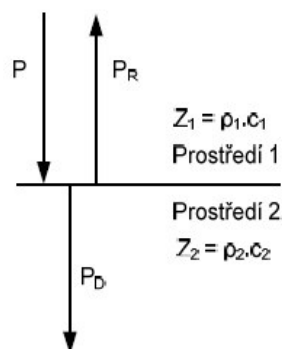
Obrázek 2 Druhy ultrazvukových vln [12]

### 1.3 Akustické rozhraní, odraz a lom ultrazvukových vln

Rozhraní dvou prostředí, přes které se šíří ultrazvukové vlny, tvoří akustické rozhraní. Na tomto rozhraní obecně nastává odraz, lom a transformace vln. Podle úhlu dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní se v defektoskopii rozlišuje kolmý a šikmý dopad [2].

#### 1.3.1 Kolmý dopad

Při kolmém dopadu na rozhraní dvou prostředí se ultrazvuková vlna částečně odrazí a částečně projde rozhraním. Dopadající akustický tlak  $P$  se tedy rozloží na akustický tlak odražený  $P_R$  a prošlý  $P_D$ . Výsledný poměr mezi tlaky  $P_R$  a  $P_D$  závisí na akustických vlnových odporech obou prostředí  $Z_1$  a  $Z_2$  [2].



Obrázek 3 Kolmý dopad na rozhraní [2]

Pro kolmý dopad vln na rozhraní platí pro koeficienty odrazu  $R$  a průchodu  $D$  následující vztahy [2]:

$$R = \frac{P_R}{P} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (4)$$

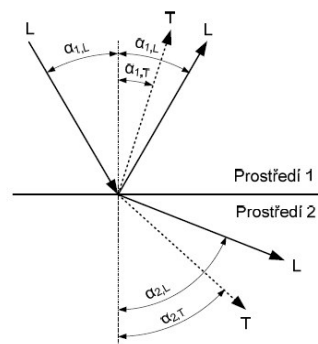
$$D = \frac{P_D}{P} = \frac{2 \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_1)} = 1 + R \quad (5)$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že čím větší bude rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory obou prostředí, tím větší bude koeficient odrazu a vada bude lépe lokalizovatelná. V opačném případě, čím menší bude rozdíl mezi uvedenými akustickými vlnovými odpory, tím větší bude koeficient průchodu a tím více akustického tlaku projde do druhého prostředí a vada bude hůře lokalizovatelná [2].

Pro lokalizaci vady je tedy žádoucí velký rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory zkoušeného materiálu a vady. Naopak pro průchod ultrazvukových vln rozhraním je potřeba malý rozdíl mezi akustickými vlnovými odpory [2].

### 1.3.2 Šikmý dopad

Při šikmém dopadu ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí nastává obecně odraz, lom a transformace těchto vln. Vše je závislé na úhlu dopadu vln na rozhraní a na rychlostech šíření vln v obou prostředích tvořících rozhraní. Například při šikmém dopadu podélné ultrazvukové vlny (L) na rozhraní dvou prostředí se vlna částečně odrazí zpět do prostředí 1 pod stejným úhlem  $\alpha_{1,L}$  a transformuje se na příčnou vlnu (T), která se odráží pod úhlem  $\alpha_{1,T}$ . Dále se vlna částečně láme - přechází do prostředí 2 pod jiným úhlem  $\alpha_{2,L}$  a také se transformuje na příčnou vlnu (T), jenž se šíří pod úhlem  $\alpha_{2,T}$  (obr. 4) [2, 4].



Obrázek 4 Šikmý dopad na rozhraní [2]

Pro šikmo dopadající vlny na rozhraní dvou prostředí platí Snellův zákon:

$$\frac{\sin \alpha_{1,L}}{c_{1,L}} = \frac{\sin \alpha_{1,T}}{c_{1,T}} = \frac{\sin \alpha_{2,L}}{c_{2,L}} = \frac{\sin \alpha_{2,T}}{c_{2,T}} \quad (6)$$

Ze Snellova zákona vyplývá, že siny úhlu dopadu a úhlu lomu jsou ve stejném poměru jako rychlosti ultrazvuku v obou prostředích. Dále z něho vyplývá, že se zvětšujícím se úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu. Existují tzv. kritické úhly dopadu, při kterých je úhel lomu v druhém prostředí roven  $90^\circ$  a ultrazvuková vlna se šíří rozhraním (povrchem prostředím 2). Říká se, že vymizí z prostředí 2 [2, 4].

Pro 1. kritický úhel vymizí z prostředí 2 podélná vlna (tj.  $\alpha_{2,L} = 90^\circ$ ). Po dosažení 2. kritického úhlu vymizí z prostředí 2 i příčná vlna (tj.  $\alpha_{2,T} = 90^\circ$ ). Dosažením 3. kritického úhlu vznikne na rozhraní v prostředí 2 povrchová (Rayleighova) vlna. Překročením 3. kritického úhlu nastává na rozhraní totální odraz dopadající vlny a do druhého prostředí vlna neproniká [2, 4].

### 1.3.3 Útlum ultrazvuku

Při šíření ultrazvukové vlny prostředím se její akustický tlak se vzrůstající vzdáleností od zdroje zmenšuje. Je to způsobené tím, že se energie vlny šíří do většího prostoru a dále tlumením v materiálu. K útlumu v materiálu dochází vlivem [2, 3, 12]:

- 1) **absorpce**, při které dochází k pohlcování energie vlny v důsledku vnitřního tření kmitajících částic, přičemž se ultrazvuková energie mění na energii tepelnou,
- 2) **rozptylu**, při němž dochází na rozhraních ve struktuře materiálu (zrna, póry, fázové přeměny v kovu) k odrazu, ohybu a lomu vlnění. Následkem toho se ultrazvuk šíří do různých směrů a v původním směru energie vlny klesá,
- 3) **divergence** (tj. rozbíhavosti tvaru pole) a **disperze** způsobené různou rychlostí šíření vlny podle jejího módu a frekvence.

Útlum ultrazvuku materiálem se vyjadřuje koeficientem útlumu  $\kappa$ , jenž udává pokles akustického tlaku v dB na jednotku dráhy, kterou v daném materiálu prošel ultrazvuk. Koeficient útlumu se udává v jednotkách dB/mm [3].

Pochopení fyzikální podstaty útlumu ultrazvuku v materiálu je podstatné pro optimalizaci frekvence z hlediska odstupu signálu od šumu, a tím i pro stanovení minimálního rozměru zjizvitelné vady v souvislosti s její vzdáleností od povrchu. Pro strukturu tuhých látek, jako jsou nehomogenní, polykrystalické, hrubozrnné tvrdé slitiny s anizotropní strukturou a jim podobné materiály, je koeficient útlumu určen součtem dvou složek, a to útlumem absorpcí  $\kappa_A$  a útlumem rozptylem  $\kappa_R$ , tj.

$$\kappa = \kappa_A + \kappa_R \quad (7)$$

Útlum  $\kappa_A$ , jak již bylo uvedeno, je způsoben absorpcí vnitřním třením, přičemž se mechanická energie mění v energii tepelnou. Tato složka útlumu je přímo úměrná frekvenci [12].

$$\kappa_A = C_A \cdot f \quad (8)$$

Útlum  $\kappa_R$ , jenž je způsoben rozptylem, závisí jednak na velikosti zrna v materiálu  $d_{st}$  a jednak na frekvenci. Podle velikosti vlny vzhledem k velikosti zrna se u krystalických materiálů rozlišují tři oblasti útlumu [12]:

Rayleighova oblast pro vlnovou délku  $\lambda \gg \pi d_{st}$ , pro kterou platí

$$\kappa_R = C_1 \cdot d_{st}^3 \cdot f^4, \quad (9)$$

stochastická oblast pro vlnovou délku  $\lambda \approx \pi d_{st}$ , pro kterou platí

$$\kappa_R = C_2 \cdot d_{st} \cdot f^2, \quad (10)$$

difúzní oblast pro vlnovou délku  $\lambda \ll \pi d_{st}$ , pro kterou platí

$$\kappa_R = C_3 \cdot d_{st}^{-1}. \quad (11)$$

Hodnoty konstant  $C_A$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  jsou zjištěny experimentálně a závisí na zrnitosti, geometrické a elastické anizotropii, hustotě materiálu a typu vlny (podélná, příčná) [12].

Nízká hodnota frekvence vlny  $f$  a tedy velká vlnová délka  $\lambda$  ( $c = f \cdot \lambda$ ), má za následek velkou hodnotu divergenčního úhlu ultrazvukového svazku sondy a za předpokladu  $\lambda > d_{st}$  dochází k malému rozptylu, ale současně se tím získá malá citlivost a rozlišitelnost při detekci vad. Na druhé straně vysoká hodnota frekvence a tedy malá vlnová délka má za následek malou hodnotu divergenčního úhlu ultrazvukového svazku sondy a při  $\lambda < d_{st}$  nebo  $\lambda \approx d_{st}$  velký rozptyl. Z uvedeného je zřejmé, že je vždy nutné volit kompromis při volbě frekvence [12].

## 1.4 Ultrazvukové sondy

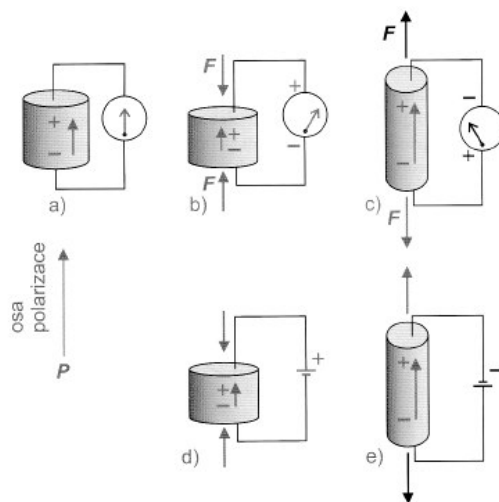
Ultrazvuková sonda je zařízení sloužící k vysílání a přijímání ultrazvukových vln. Jde o elektroakustické zařízení, které v sobě obsahuje jeden nebo více měničů pro transformaci elektrické energie na energii mechanickou (vysílací sonda) a naopak (přijímací sonda) [4].

V klasické defektoskopii se nejčastěji používají sondy s piezoelektrickými měniči. Kromě uvedených piezoelektrických měničů se v některých případech používají sondy s elektromagnetickým měničem [3, 12].

Vzhledem k tomu, že se sondy s piezoelektrickým měničem používají nejčastěji a jsou použity i v praktické části této práce, budou dále popsány pouze tyto sondy.

### 1.4.1 Piezoelektrické měniče

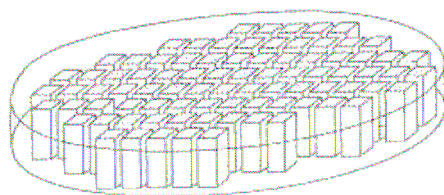
Princip funkce piezoelektrických měničů je založen na přímém a nepřímém piezoelektrickém jevu látek s piezoelektrickými vlastnostmi. Přímý piezoelektrický jev popisuje vznik elektrického náboje na povrchu měniče vlivem jeho mechanické deformace. K deformaci měniče dochází tlakem, který způsobují dopadající ultrazvukové vlny. Opačnou situaci charakterizuje nepřímý piezoelektrický jev, který popisuje vznik deformace měniče vlivem elektrického náboje přivedeného na jeho povrch (obr. 5) [4, 5, 12].



**Obrázek 5** Piezoelektrický jev [12]  
 a) polarizovaný měnič, b), c) přímý piezoelektrický jev,  
 d), e) nepřímý piezoelektrický jev

Konstrukčně se jedná o tenké kruhové nebo obdélníkové destičky z piezoelektrického materiálu (nejčastěji piezokeramika, piezoelektrické polymery), které jsou opatřeny elektrodami. Přiváděním elektrického napětí na elektrody dochází k deformaci destičky (k jejímu protahování a smršťování) ve směru její tloušťky a tím jsou generovány ultrazvukové vlny. V opačném případě při dopadání ultrazvukových vln na destičku dochází k jejímu mechanickému rozkmitání a tím ke vzniku elektrického napětí na elektrodách [3, 4].

Příklad provedení měniče je na obrázku 6. Jedná se o piezokompozitový měnič, který je vyroben z piezokeramických elementů navzájem spojených pomocí epoxidové nebo polymerní výplně [3].

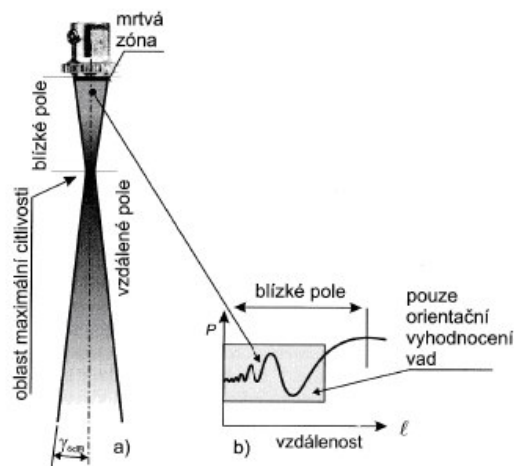


**Obrázek 6** Schematické znázornění piezokompozitového měniče [3]

#### 1.4.2 Vyzařování zdroje vlnění

Zdrojem ultrazvuku, jak již bylo uvedeno, jsou piezoelektrické měniče tvořené tenkou destičkou, která kmitá „hloubkovými“ kmity. Z fyzikálního hlediska se jedná o plošný zdroj, jehož všechny body kmitají se stejnou amplitudou a fází. Podle Huygensova principu vyzařuje každý bod tohoto zdroje elementární kulovou vlnu. Elementární vlny vyzařené

z bodových zdrojů do určité vzdálenosti od měniče, v tzv. blízkém poli, navzájem interferují a vlivem dráhových rozdílů mezi nimi vytvářejí pole s maximy a minimy akustického tlaku. Blízké pole je definováno jako vzdálenost od měniče do posledního maxima akustického tlaku. V blízkém poli v oblasti podstatných změn akustického tlaku je vyhodnocení odražených ech velmi nepřesné. Od posledního maxima akustického tlaku následuje vzdálené pole, ve kterém akustický tlak pozvolna klesá úměrně se vzdáleností jak od měniče, tak od osy vlnového svazku. Ohraničení svazku je dáno body, v nichž klesne výška echa vzhledem k ose svazku o 6 dB. Profil akustického svazku je zobrazen na obrázku 7 [3, 4].



**Obrázek 7** Profil akustického svazku [4] (upraveno)  
a) okraj akustického svazku pro divergenční úhel  $\gamma_6$ ,  
b) kolísání amplitudy akustického tlaku v blízkém poli

### 1.4.3 Druhy piezoelektrických ultrazvukových sond

Piezoelektrické sondy se vyrábějí v různém provedení a pro různé účely. Výběr vhodného typu sondy a zkušební metody rozhoduje o proveditelnosti a kvalitě zkoušky. Existuje mnoho druhů sond, které je možné rozdělit podle druhu vazby, stupně tlumení, konstrukčního provedení, počtu měničů apod. [1].

#### 1) Podle druhu vazby

##### Kontaktní sondy

Kontaktní sondy se přikládají přímo na povrch zkoušeného objektu. Z důvodu ochrany před poškozením mají sondy pod měničem ochrannou destičku nebo folii z materiálu, který opotřebením odolává. Při práci s těmito sondami se používá mezi sondami a povrchem zkoušeného objektu vazební prostředek (ultrazvuk se na vzduchu hned utlumí). Používá se olej, vazelína, voda, aj. [2].



## **Imerzní sondy**

Imerzní sondy se používají pro bezkontaktní zkoušení, při kterém je mezi sondou a povrchem zkoušeného objektu sloupec vazebního prostředku (nejčastěji se jedná o vodu nebo řídký olej). Tyto sondy nemají měnič chráněný proti opotřebení, pouze proti vniknutí vazebního prostředku [2].

## **2) Podle stupně tlumení**

### **Širokopásmové sondy**

Tyto sondy mají velký stupeň tlumení, jsou tedy velmi tlumené a mají horší citlivost. Dále se vyznačují dobrou hloubkovou rozlišovací schopností [3].

### **Úzkopásmové**

Mají menší stupeň tlumení. Jsou tedy méně tlumené, mají lepší citlivost, ale horší rozlišovací schopnost [3].

## **3) Podle konstrukčního provedení**

### **Přímé sondy**

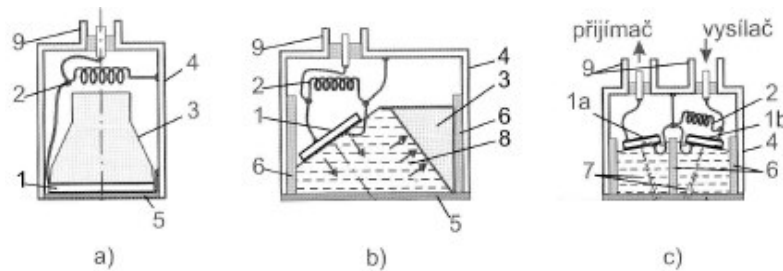
Tyto sondy vysílají ultrazvukové vlny ve směru kolmém k povrchu zkoušeného objektu. Ve většině případů se jedná o sondy s měničem vysílajícím podélné vlny. Používají se ke zkoušení objektů s dostatečně rovným povrchem pro přiložení sondy a s vhodnou orientací vad vzhledem k povrchu. Sondy s měničem vysílajícím příčné vlny se používají pouze pro měření rychlosti nebo útlumu těchto vln v materiálu [2].

### **Úhlové sondy**

Tyto sondy vysílají ultrazvukové vlny do zkoušeného objektu pod určitým úhlem. Uvnitř úhlových sond je lomový klín, jehož dosedací plocha tvoří s povrchem zkoušeného objektu akustické rozhraní, na němž dochází k lomu a k transformaci podélných vln na příčné. Vyrábějí se s úhly lomu 35°, 45°, 60°, 70° a používají se ve velké míře ke zkoušení svarových spojů [2, 3].

Do skupiny úhlových sond spadají také sondy povrchových (Rayleigho) vln. Jejich úhel lomu je 90° a proto se nazývají sondy povrchových vln. Používání těchto sond není rozšířeno a v současné době se sériově nevyrábějí [2].

Oba typy sond, tedy jak sondy přímé tak úhlové, mohou být konstruovány jako jednoměničové nebo dvouměničové (dvojité) [3].



**Obrázek 8** Ultrazvukové piezoelektrické sondy [4] (upraveno)

a) přímá sonda, b) úhlová sonda, c) dvojitá sonda,

1 – piezoelektrický měnič, 1a – přijímací měnič, 1b – vysílací měnič,  
2 přizpůsobovací cívka, 3 – tlumící těleso, 4 – pouzdro sondy, 5 – ochranná vrstva,  
6 – akustická izolace, 7 – předsádka, 8 – lomový klín, 9 - konektor

#### 4) Podle počtu měničů

##### Jednoměničové sondy

Mají jeden měnič sloužící jak pro vysílání ultrazvukových vln do zkoušeného objektu, tak i pro jejich přijímání po odrazu od vad nebo od protilehlého povrchu. Nevýhodou jednoměničových sond je jejich značné tzv. mrtvé pásmo (vzdálenost od sondy v níž nelze zjistit výskyt vady) [2, 3].

##### Dvouměničové (dvojité) sondy

V jednom tělese jsou umístěny dva akusticky oddělené měniče, z nichž jeden měnič slouží pouze jako vysílač ultrazvukových vln a druhý jako jejich přijímač. Výhodou této konstrukce je teoreticky nulové mrtvé pásmo. Proto se tyto sondy používají pro detekci vad ležících blízko pod povrchem zkoušeného objektu a dále k měření tloušťky materiálů [2, 3].

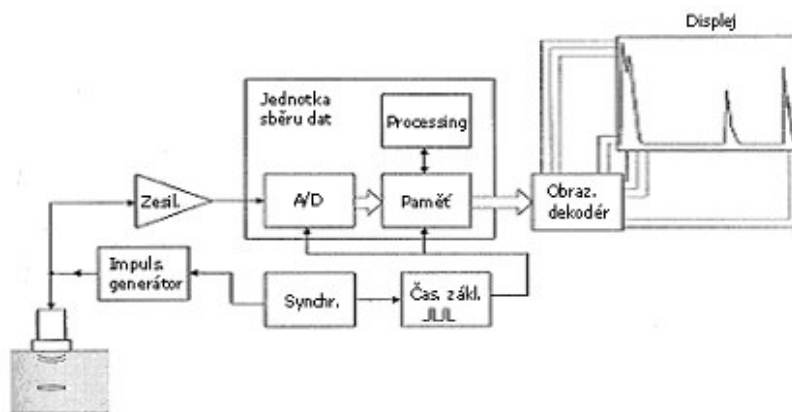
##### Víceměničové sondy

Tyto sondy obsahují více měničů (8, 16, 32, 64,...) pro vysílání ultrazvukových vln do zkoušeného objektu i pro jejich příjem po odrazu od vad nebo od protilehlého povrchu. Víceměničové sondy se v defektoskopii používají například pro zkušební metodu Phased array [2].

Kromě uvedených základních typů sond existují ještě dále také speciální typy sond. Mezi ně je možné zařadit např. sondy s proměnlivým úhlem, fokusující sondy, odvalovací sondy, sondy přizpůsobené tvaru povrchu zkoušeného objektu aj. [4].

## 1.5 Ultrazvukové přístroje

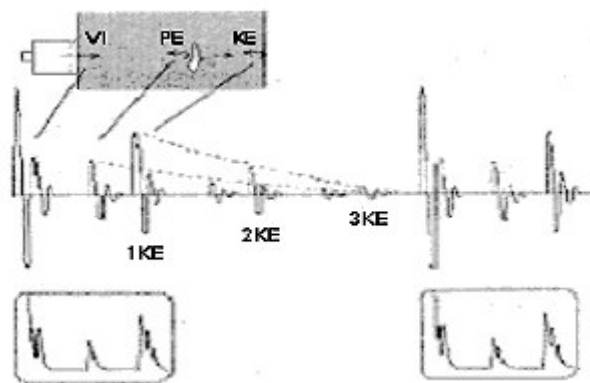
Ultrazvukové přístroje určené ke zjišťování vad v materiálu, a to jak při použití odrazové tak i průchodové metody, se označují jako tzv. univerzální ultrazvukové defektoskopy. Tyto defektoskopy zobrazují echa na principu osciloskopu, tj. časový průběh signálu. V současné době se už vyrábějí pouze digitální ultrazvukové přístroje. Základní blokové schéma ultrazvukového defektoskopu je na obrázku 9 [2, 3].



Obrázek 9 Blokové schéma ultrazvukového defektoskopu [3]

Ultrazvukové defektoskopy obsahují synchronizátor, který je zdrojem impulsů spouštějících s určitou opakovací frekvencí ostatní obvody přístroje (impulsový generátor, zdroj časové základny a délkových značek). Obvod synchronizátoru tedy zajišťuje, aby bylo vysílání impulsů do zkoušeného materiálu a spouštění časové základny navzájem časově sladěné - synchronizované. Defektoskop dále obsahuje generátor, z něhož jsou na ultrazvukovou sondu přiváděny elektrické impulsy, které se v sondě transformují na ultrazvukové impulsy šířící se do zkoušeného materiálu. Odražená echa vracující se ze zkoušeného materiálu mají malou amplitudu, a proto se zesilují v zesilovači. Následně jsou pomocí A-D převodníku předeny do digitální formy potřebné pro zobrazení na obrazovce. Před zobrazením je signál usměrněn pomocí usměrňovacích obvodů, čímž je lépe využit prostor na obrazovce. Signál je prakticky symetrický, a tak není potřeba zobrazovat současně kladnou i zápornou půlvlnu [2, 3].

Celý proces vysílání a přijímání ultrazvukových vln se opakuje tak, jak je to znázorněno na obrázku 10 [3].



**Obrázek 10** Vysílací a přijímací děj [3]

Uvedený způsob zobrazení signálů, při němž je na vodorovné ose monitoru zobrazena dráha šíření ultrazvuku v materiálu a na svislé ose velikost signálu, se nazývá A-zobrazení. Kromě tohoto typu zobrazení signálu existují ještě další typy zobrazení (B, C, D, P a F) [3].

## 1.6 Metody ultrazvukové defektoskopie

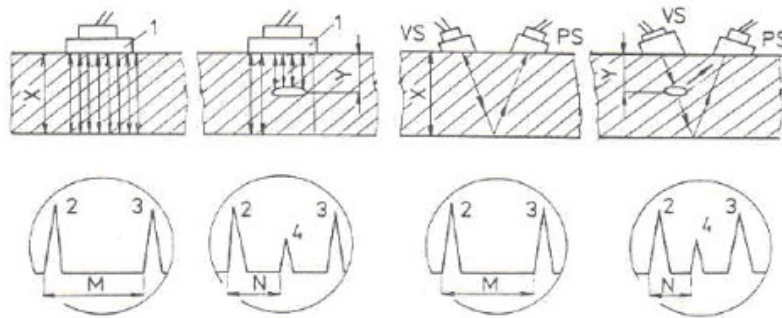
V současné době se pro zkoušení materiálů využívají jak klasické konvenční metody, tak nové modernější zkušební metody. Mezi klasické metody patří metoda odrazová a průchodová. Do moderních zkušebních metod se řadí zejména metody Phased Array a TOFD.

### 1.6.1 Odrazová metoda

Odrazová metoda (obr. 11) je založena na zjišťování odrazů ultrazvukových impulsů (ech), způsobených vadami v materiálu. Do zkoušeného objektu se vysílací sondou vysílají krátké ultrazvukové impulsy, ty se odrážejí od protilehlého povrchu a následně se vracejí zpět na vysílací sondu, která je v případě jednosondového provozu současně i přijímačem, nebo se v případě dvousondového provozu vracejí do samostatné přijímací sondy, kde vytvářejí echo o rozteči  $M$ , jenž je úměrná tloušťce zkoušeného objektu  $X$ . Při výskytu vady ve zkoušeném objektu se mezi vysílacím impulsem (2) a koncovým echem (3) objeví poruchové echo (4). Z doby po vyslání ultrazvukového impulsu do příchodu echa se určuje vzdálenost vady od povrchu zkoušeného objektu ( $Y$ ) a je tedy úměrná vzdálenosti ( $N$ ) mezi vysílacím impulsem (2) a poruchovým echem (4). Z velikosti amplitudy poruchového echa se určuje „velikost“ vady [1, 3, 5].

Výhodami této metody je poměrně přesná lokalizace místa vady, k provedení zkoušky postačuje přístupnost pouze z jedné strany zkoušeného objektu [1, 3].

Mezi její nevýhody patří omezené zjišťování vad ležících v blízkosti povrchu zkoušeného objektu z důvodu existence mrtvého pásma. Proto se tato metoda nehodí na zkoušení tenkých materiálů. Zlepšení zjistitelnosti vad ležících v blízkosti povrchu lze dosáhnout použitím dvojité sondy, která teoreticky nezjišťuje mrtvé pásmo způsobené vysílacím impulsem [1, 3].



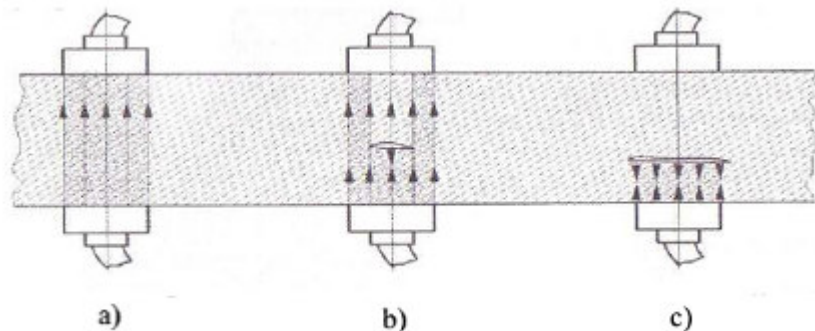
**Obrázek 11** Princip odrazové metody [5]

### 1.6.2 Průchodová metoda

Tato metoda je založena na měření ultrazvukové energie prošlé zkoušeným objektem (obr. 12). Při zkoušení se používají dvě ultrazvukové sondy, které jsou umístěny souose na protilehlých stěnách zkoušeného objektu. Jedna sonda slouží pro vysílání ultrazvukových vln a druhá sonda jako jejich přijímač. Nachází-li se ve zkoušeném objektu vada, dochází na její ploše k odrazu šířících se vln, za vadou se tvoří stín a do přijímací sondy následně přichází menší hodnota ultrazvukové energie. Přítomnost vady se zjišťuje srovnávací metodou, tedy porovnáním hodnot energie prošlé neporušeným místem a místem s vadou [1, 3, 5].

Výhodou metody je, že ultrazvuk prochází poloviční dráhou v porovnání s odrazovou metodou a tím je tedy méně zeslabován. Metoda je tedy vhodná pro zkoušení hůře prozvučitelných materiálů (např. pryž). Hlavní uplatnění nachází zejména při kontrole tenkých plechů, plátovaných materiálů apod. [1, 3, 5].

Nevýhodou metody je její omezenost na zkoušení objektů, které jsou přístupné z obou stran a mají vhodné protilehlé povrchy. Další nevýhodou je, že pokud se vada nachází ve větší vzdálenosti od přijímací sondy a její průřez je menší než průřez ultrazvukového svazku, potom dochází v určité vzdálenosti za vadou následkem ohybu vlnění k uzavření akustického stínu a do přijímací sondy přijde stejná hodnota energie jako v místě bez vady [1, 3, 5].



**Obrázek 12** Identifikace vady průchodovou metodou [5]  
 a) materiál bez vady, b) materiál s vadou menší než je svazek ultrazvukových vln,  
 c) materiál s vadou větší než je svazek ultrazvukových vln

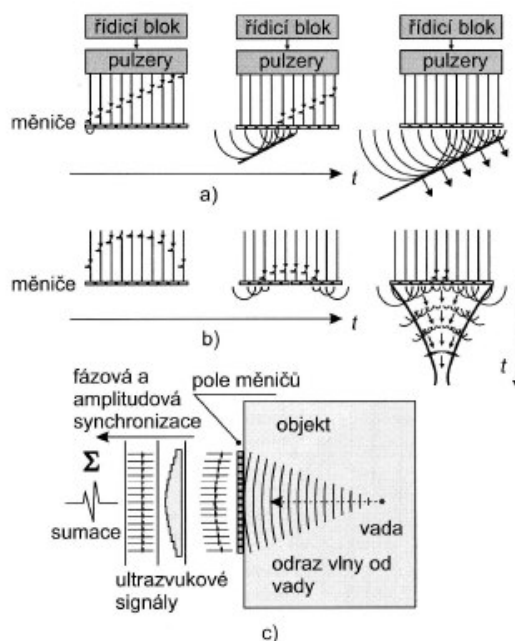
### 1.6.3 Metoda Phased array

Metoda Phased Array (fázového pole) je založena na použití speciálního typu sond, které obsahují soustavu piezoelektrických měničů (8 až 128 měničů). Každý měnič je samostatně připojen na budící a snímací obvody. Vhodným řízením budících impulsů z jednotlivých pulzerů (generátorů mikrosekundových pulsů s elektronicky řízenou energií, šířkou a napětím) lze dosáhnout interferencí ultrazvukových vln zvoleného módu vln a požadovaného profilu ultrazvukového svazku, tj. fokusace svazku s danou ohniskovou vzdáleností nebo volby úhlu s možností natáčení osy ultrazvukového svazku [2, 3].

Ultrazvukové vlny odražené od vady dopadají na pole měničů. Následně jsou amplitudově a fázově synchronizovány a poté přivedeny do sumační jednotky řídicího systému. Výsledný ultrazvukový impuls zvýrazní vadu v ohnisku při současném zeslabení ech od vad, které leží jinde ve zkoušeném objektu [2, 4].

Na generování vysílacích impulsů a zobrazení ultrazvukových nálezů jsou nutné počítače s výkonným systémem [3].

Výhodou této metody je obraz prozvučovaného průřezu v reálném čase. Používá se například pro zkoušení svarů v jaderné energetice [3].



**Obrázek 13** Fázově řízené pole [4]

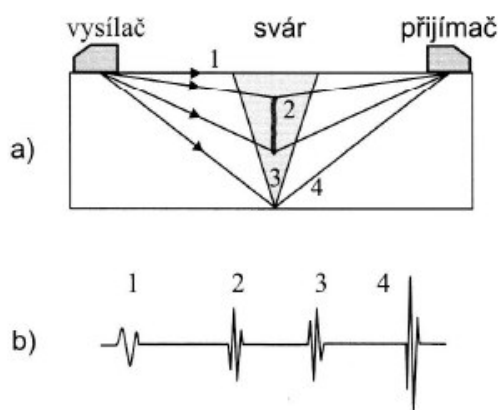
a) stáčení osy ultrazvukového svazku,  
 b) řízená ohnisková vzdálenost fokusujícího pole, c) zpracování odraženého signálu

#### 1.6.4 Metoda TOFD

Metoda TOFD (Time of Flight Diffraction) je založena na difrakci (tj. rozptylu a ohybu) ultrazvukových vln na obou koncích vad. Při zkoušení se pracuje se dvěma úhlovými sondami, z nichž jedna pracuje jako vysílač a druhá jako přijímač ultrazvukových vln. Okraj vady při interakci s ultrazvukovou vlnou emituje difrakční vlny. Z časové difference mezi povrchovou (1) a difrakční vlnou (2) lze určit vzdálenost vady od povrchu zkoušeného objektu. Na základě vyhodnocení rozdílu doby příchodu difrakční vlny (2) emitované horním okrajem a difrakční vlny (3) emitované spodním okrajem vady (trhliny) lze určit velikost (vertikální rozměr) vady [3, 4].

Výhodami metody je zjišťování vad nezávisle na jejich orientaci vzhledem k povrchu zkoušeného objektu a dále určování jejich hloubkových rozměrů [4].

Nevýhodami metody je její nepoužitelnost pro materiál obsahující vměstky nebo pro příliš zrnitý materiál. Dále není vhodná pro určování vad ležících blízko povrchu, protože může docházet ke skrytí echa od vady echem od povrchu zkoušeného objektu. Také nelze zjistit malé vady a to z důvodu rozptýlení ultrazvukového svazku do prostoru, tím se vadové echo nerozliší od šumu. Proto se metoda TOFD kombinuje s klasickými ultrazvukovými metodami [4].



**Obrázek 14** Metoda TOFD [4]

a) princip metody, b) ultrazvukový signál s označením jednotlivých vln

## 1.7 Faktory ovlivňující zkoušení

Výsledek ultrazvukových zkoušek je závislý na více faktorech. Kromě samotných přístrojů a sond jsou nejvýznamnější tyto faktory: akustická vazba, povrch objektu, zkoušený materiál, tvar zkoušeného objektu a vlastnosti vad [3].

### 1.7.1 Akustická vazba

V ultrazvukové defektoskopii akustická vazba zajišťuje přenos akustické energie a je dána prostředím mezi sondou a zkoušeným materiálem [12].

Pro přenos ultrazvuku do zkoušeného objektu nestačí pouze přiložit sondu na suchý povrch objektu, protože by byl na jejich rozhraní přítomný vzduch a koeficient odrazu na rozhraní tuhého a plynného média je blízký číslu 1 (100 %). Tím by do zkoušeného objektu pronikla nepatrná část akustického tlaku vytvořeného měničem sondy. Jiná situace nastane při nanesení vrstvy kapaliny na povrch. Například na rozhraní ocele a vody je koeficient přechodu ultrazvuku přibližně 0,12, takže v tomto případě přejde do zkoušeného objektu asi 12 % akustického tlaku, což je to skoro 1000krát více než v případě suché vazby. Proto se při zkoušení ultrazvukem používá kapalná vazba (pro hladké povrchy např. voda, olej, speciální gely a pro hrubé povrchy např. vazelína nebo glycerín) [3, 12].

Rozdělení akustické vazby je dáno jejími vlastnostmi, tj. rychlostí šíření ultrazvuku, akustickým odporem a poměrem tloušťky vazební vrstvy k vlnové délce. Akustická vazba se tedy rozděluje na kontaktní, bezkontaktní a imerzní [12].



### **Kontaktní akustická vazba**

Ultrazvuková sonda je v těsném kontaktu s povrchem zkoušeného objektu, přičemž vazební prostředí pouze vyplňuje nerovnosti povrchu. Tloušťka vrstvy vazby je menší než vlnová délka ( $m < \lambda$ ). Jako vazební prostředí se používají různé kapaliny, jako např. hustý olej, glycerin, petrolej, želatina, různé druhy vazelín a past, speciální kapaliny s optimálními vlastnostmi nebo také tuhé látky. Všechny uvedené látky mají své výhody a nevýhody, ale jednu společnou vlastnost, a to obtížnou aplikaci na zkoušený povrch [2, 12].

Vazební prostředí pro kontaktní zkušební metody by mělo splňovat následující požadavky [12]:

- akustický odpor musí způsobit minimální ztráty energie,
- během měření musí mít neměnné vlastnosti (včetně tloušťky),
- nesmí ovlivňovat vlastnosti zkoušeného objektu včetně koroze povrchu,
- nesmí být toxické,
- po ukončení zkoušení musí být snadno odstranitelné,
- musí mít vhodnou viskozitu z hlediska smáčení povrchu sondy i povrchu zkoušeného objektu,
- nesmí obsahovat mechanické nečistoty nebo bublinky.

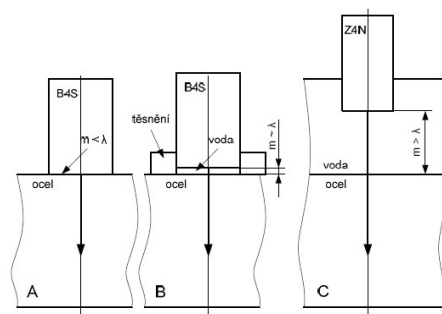
### **Mezerová akustická vazba**

Ultrazvuková sonda není v přímém kontaktu s povrchem zkoušeného objektu, ale mezi sondou a povrchem objektu je malá mezera vyplněná vazebním prostředkem (voda, olej apod.). Tloušťka vrstvy vazby je přibližně rovna vlnové délce ( $m \approx \lambda$ ) nebo pro sondy o vyšší frekvenci násobku vlnové délky. Používá se v případech, kde je zaručena stálá geometrie povrchu a její výhodou je malá potřeba vazebního prostředku [2, 3].

### **Imerzní akustická vazba**

Mezi ultrazvukovou sondou a povrchem zkoušeného objektu je velká mezera vyplněná vazebním prostředkem, jehož tloušťka je mnohem větší než vlnová délka ( $m \gg \lambda$ ). Při testování je zkoušený objekt ponořen do speciální nádrže s kapalinou (nejčastěji s vodou). Použití této vazby je vhodné pro testování materiálů s hrubým nebo tvarovaným povrchem. Nevýhodou imerzní vazby je nutnost umístit objekt do speciální nádrže. Omezení při této metodě spočívá ve vzniku bublinek, které způsobují parazitní odrazy ultrazvukových vln. Další možností testování s imerzní vazbou je použití speciální sondy s kapalinovou

předsádkou, ve které je sloupec vody uzavřen a oddělen od zkoušeného objektu membránou. Tento způsob testování se používá pro defektoskopii svarů [2, 12].



**Obrázek 15** Druhy vazeb [2]  
A) kontaktní vazba, B) mezerová vazba, C) imerzní vazba

### 1.7.2 Povrch zkoušeného objektu

Kvalita povrchu zkoušeného objektu má výrazný vliv na přesnost vyhodnocení vad. Povrch, který je velmi drsný nebo povrch s okujemi, případně s nepřilnutým nátěrem má vliv na ztráty akustického tlaku při vstupu ultrazvuku do materiálu. Pro zaručení dobrého přenosu ultrazvuku ze sondy do materiálu musí být povrch hladký, tzn. zbavený barvy a všech nečistot. Způsob čištění povrchu je závislý na druhu použité zkoušky. Ve většině případů postačuje očištění povrchu ocelovým kartáčem. Při náročnějších zkouškách se musí opatrně obrousit [3].

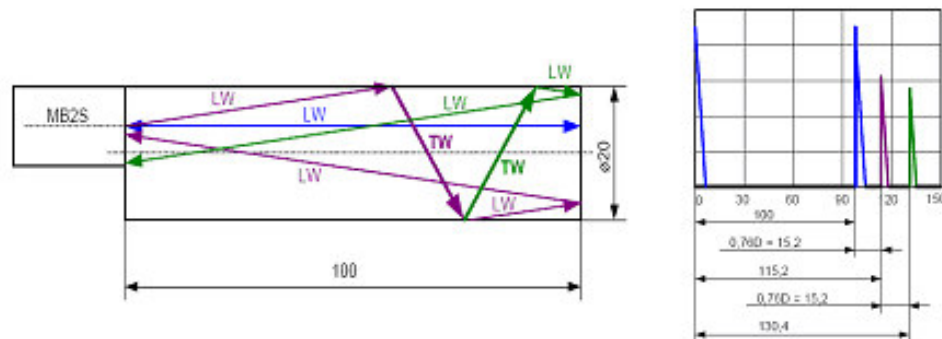
### 1.7.3 Zkoušený materiál

Většina kovových materiálů, které přicházejí do úvahy pro zkoušení ultrazvukem mají polykrystalickou strukturu a při výrobním procesu procházejí pochody, jejichž následkem je anizotropie. Anizotropní materiál má v jednom směru výrazně odlišné vlastnosti než v jiných směrech (např. velké výkovky a tvárné polotovary). Není neobvyklé, že materiály s výraznou anizotropií jsou prozvučitelné jen v určitém směru. Kromě orientace zrn má vliv na prozvučitelnost také střední velikost zrna. Při prozvučování se zrnitost materiálu projevuje typickým obrazem – šumem od struktury, tj. náhodnými echy v celém zobrazovaném úseku, které připomínají „trávu“. Je to způsobené rozptylem (odrazem) ultrazvukových vln na hranicích zrn. Na testování hrubozrnných materiálů je proto nutné volit sondy o nízké frekvenci, čímž samozřejmě klesá rozlišovací schopnost. Ze železných materiálů jsou nejlépe prozvučitelné nelegované nebo nízkolegované ocele, naopak nejhůře austenitické ocele a šedá litina [3].

### 1.7.4 Tvar zkoušeného objektu

Tvar zkoušeného objektu bývá příčinou vzniku ech, které nejsou způsobeny vadami. Tato echa se nazývají nepravá nebo tvarová a někdy mohou být nesprávně vyhodnocena jako vadová. Jako příklad může být uvedeno zkoušení kulatiny (obr. 16) [3].

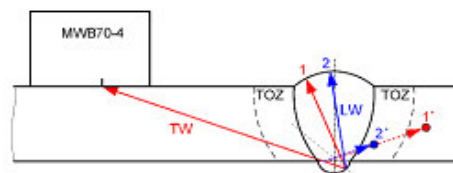
Při zkoušení dlouhého úzkého válce přímou sondou z čelního povrchu dochází vlivem rozevření ultrazvukového svazku k dopadu vln na boční stěny pod takovým úhlem, že transformací vzniklá příčná vlna se šíří napříč k druhé straně, kde dochází opět k její transformaci na podélnou vlnu až se nakonec vrátí zpět do sondy. Následkem toho, že tato dráha je delší než dráha osového paprsku, který se odráží přímo od protilehlého povrchu a vrací se zpět jako koncové echo, se objeví za koncovým echem ještě echa tvarová [2, 3].



Obrázek 16 Zkoušení kulatiny [2]

První echo (modré) je 1. koncové echo, druhé (fialové) a třetí (zelené) echo je tvarové

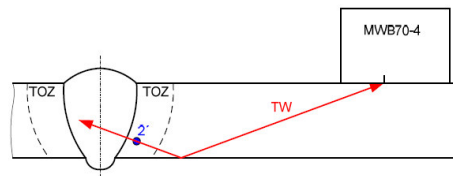
Velmi často vznikají nepravé indikace vad při zkoušení svarových spojů (obr. 17), které jsou způsobeny odrazem příčné vlny (TW) od převýšení svaru (1) a transformované podélné vlny (LW) od převýšení svaru (2) po odrazu od kořene svaru. Nepravá vada 1' (TW – TW) je mimo tepelně ovlivněnou zónu (TOZ) a nehodnotí se. Nepravá vada 2' (TW – LW) vychází v TOZ a když se hodnotí, opravují se dobré svarové spoje na neexistující vadu. Příčinou je neznalost šíření ultrazvuku svarem [2, 3].



Obrázek 17 Zdánlivé vady ve svaru [2]

Při dodržení zásady, že se svar hodnotí pouze do osy svaru a případné vady vycházející za osou svaru se z této strany nehodnotí, bude pozice nepravé vady 2'

vyhodnocena správně při zkoušce z druhé strany svaru (obr. 18). Tím bude jednoznačně rozlišena skutečná vada od vady nepravé [2].



**Obrázek 18** Zkouška svaru z druhé strany [2]

Z uvedených příkladů vyplývá, že při zkoušení nesmí být zanedbán vliv tvaru objektu a ultrazvukového svazku, vzhledem k možné transformaci vln při odraze a záměnu tvarových (nepravých) ech s echy od skutečných vad. Při zkoušení objektů komplikovaných tvarů je potřebné prostudovat výkresovou dokumentaci a vypočítat na časové základně pravděpodobnou polohu tvarových ech [3].

### 1.7.5 Vlastnosti vad

Z vlastností vad, které mají vliv na odraz ultrazvukových vln jsou nejpodstatnější [3]:

- velikost, orientace a poloha vady vzhledem k ultrazvukovému svazku,
- tvar vady,
- drsnost povrchu vady.

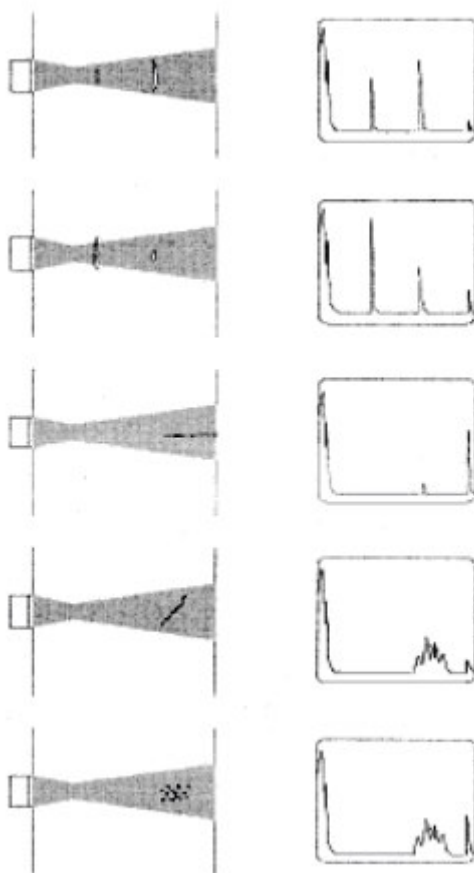
Při zkoušení ultrazvukem jsou všechny rozměry vad určené pouze přibližně. Přesné rozměry skutečných vad v materiálu lze určit jen destruktivně. Velikost vady se ve většině případů hodnotí podle velikosti echa. Vychází se tedy ze zásady, že silný odraz (velké echo) musí být způsoben velkou vadou. Obráceně však tato závislost neplatí, tedy původcem slabého odrazu (malého echa) může být i velká vada. Je to způsobené tvarem a orientací vady vzhledem k dopadajícímu ultrazvukovému svazku. Nejvhodnější je, když je povrch vady orientován kolmo na dopadající vlnění a dojde tedy k odrazu největší části akustického tlaku zpět do sondy (největší echa). Na velikost echa má dále vliv vzdálenost (poloha) vady od sondy a to nejen z důvodu útlumu materiálu, ale i kvůli divergenci svazku ve vzdáleném poli. Vada ležící na konci blízkého pole sondy může vyvolávat podstatně větší echo než vada, která je rozměrově větší, ale leží ve vzdáleném poli [3].

Tvar vady ovlivňuje rozptyl ultrazvukových vln na vadě. Oblé vady (např. bubliny) způsobují odraz ultrazvuku v širokém úhlu a následkem toho se jen malá část odraženého

akustického tlaku vrátí zpět do sondy. Proto jsou echa od takových chyb malá a jejich výška se při prozvučování z různých směrů mění jen málo. Jiná situace nastane u plošných vad, které způsobují vysoká echa při prozvučování z jednoho směru a v případě změny směru dopadu ultrazvuku jejich výška klesá [3].

Drsnost povrchu vady resp. jeho mikronerovnosti mají při zkoušení pozitivní vliv. Malé mikronerovnosti povrchu totiž způsobují, že se malá část vlnění odrazí zpět do sondy i v případech nevhodné orientace vady. Jako příklad může být uveden šikmý dopad ultrazvuku na plošnou vadu. Na vadě s ideálně hladkým povrchem by nastal totální odraz mimo sondu, ale v případě povrchu s mikronerovnostmi se uplatní i rozptyl a díky tomu se malá část vlnění odrazí zpět do sondy [3].

Pro ilustraci uvedených jevů jsou na následujícím obrázku znázorněné příklady vad a jejich projev na obrazovce defektoskopu [3].

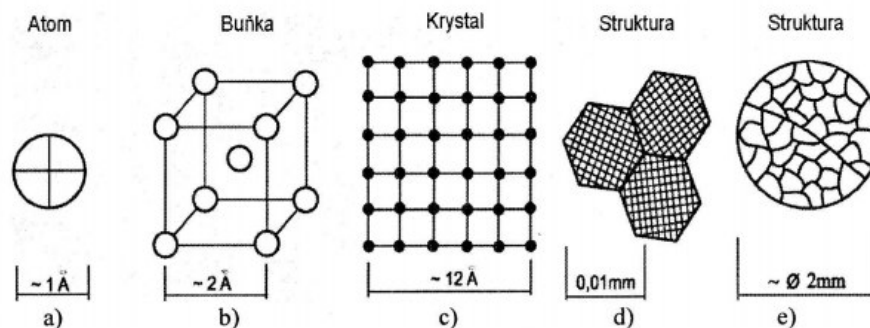


**Obrázek 19** Příklady vad a jejich projev na obrazovce defektoskopu [3]

## 2 STRUKTURA KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Kovové materiály patří k nejdůležitějším technickým materiálům, které jsou využívány ve všech odvětvích lidské činnosti. Hlavní složkou kovových materiálů je kovový prvek (Fe, Cu, Al atd.) a může se jednat buď o čisté kovy nebo slitiny více kovů (např. Al-Cu), popřípadě kovů s nekovy (Fe-C). Vlastnosti těchto materiálů jsou určeny jejich složením a vnitřní stavbou, tedy jejich strukturou [6].

Strukturou se obecně rozumí uspořádání určitých stavebních jednotek v prostoru. Jedná se tedy o široký pojem a je možné o ní uvažovat v různých úrovních. Na úrovni elektronů hovoříme o tzv. elektronové struktuře, která rozhoduje např. o elektrické vodivosti materiálu. Další úroveň souvisí s uspořádáním atomů či molekul. Většina kovů a jejich slitin má pravidelné uspořádání atomů v prostoru. Toto uspořádání se nazývá krystalická struktura a obvykle se popisuje pomocí krystalické mřížky. Složením atomů vznikají tzv. fáze, což jsou útvary, které se vzájemně liší svou krystalickou strukturou, chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi. Pozorováním fázového složení (velikost fází, jejich tvar a rozložení), jakož i poruch struktury (mikrotrhliny, póry, vměstky atd.) pomocí mikroskopu, hovoříme o mikrostruktuře materiálu [6].



**Obrázek 20** Zjednodušené schéma stavby kovů [7]  
a) atom, b) elementární krystalová buňka, c) monokrystal,  
d) tři monokrystal, e) polykrystalická struktura

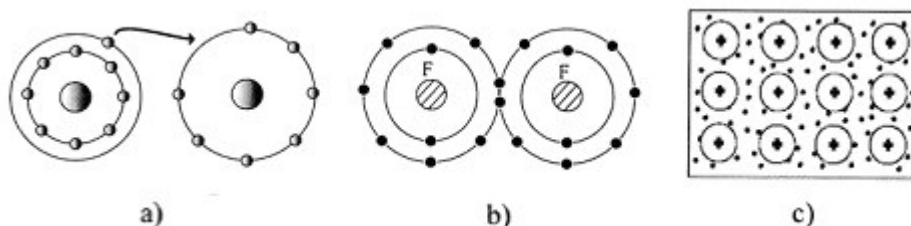
Jak bylo uvedeno, strukturou se rozumí určité uspořádání atomů. Ty jsou k sobě vázány vazebnými silami. Jde o síly elektrostatického původu, jež jsou ovlivněny uspořádáním elektronů v atomovém obalu. Rozlišují se následující druhy vazeb mezi atomy:

**Iontová vazba** vzniká mezi atomy se značně odlišnou elektronegativitou. Je založena na předání valenčních elektronů jednoho atomu prvku s menší elektronegativitou sousednímu atomu s vyšší elektronegativitou. Elektrony se předávají podle Kosselovy teorie za účelem

doplnění valenčního orbitu na úroveň příslušného inertního plynu. Následkem toho vzniknou z obou původně elektricky neutrálních atomů ionty (kationt a aniont). Tyto dva opačně nabitě ionty na sebe vzájemně působí elektrostatickými přitažlivými silami [1, 7].

**Kovalentní vazba** se vytváří, jestliže u atomů dojde k překrytí valenčních orbitů za vzniku elektronového páru. Elektronový pár již nepatří určitému atomu, ale je společný pro oba vzájemně vázané atomy [1, 7].

**Kovová vazba** je modifikovaná kovalentní vazba. Atomy kovu předávají valenční elektrony ke společnému sdílení všem atomům a mění se na kladné ionty (kationty). Elektrony se volně pohybují mezi kladnými ionty a tvoří tzv. elektronový plyn. Elektrostatické síly mezi kladně nabitými ionty a záporně nabitým elektronovým plynem, který vyplňuje prostor krystalické mřížky kovového krystalu, vytvářejí pevnou vazbu. Kovová vazba je na rozdíl od kovalentní vazby nesměrová a výsledkem toho je vznik těsně uspořádaných krystalických struktur, jež jsou u kovů velmi časté. Charakter kovové vazby a chování volných elektronů má za následek dobrou elektrickou a tepelnou vodivost [1, 6, 7].



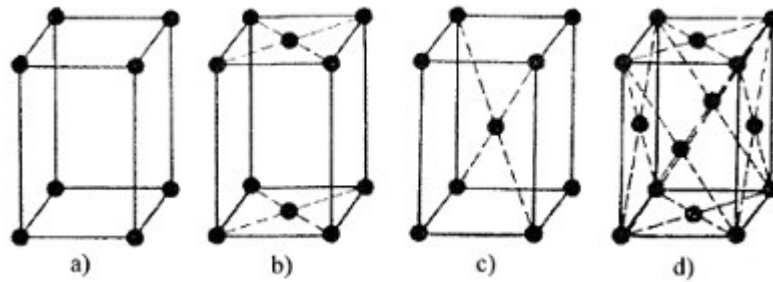
**Obrázek 21** Základní vazby mezi atomy [7]  
a) iontová vazba, b) kovalentní vazba, c) kovová vazba

## 2.1 Krystalická struktura kovových materiálů

Z hlediska struktury patří naprostá většina technických kovových materiálů mezi krystalické látky. Jedná se o látky s charakteristickým pravidelným uspořádáním částic (atomy nebo ionty) v prostoru a toto uspořádání se nazývá krystalická struktura. Existují i slitiny s nepravidelným uspořádáním částic, jež jsou označovány jako tzv. kovová skla [6, 9].

Krystalická struktura se obvykle popisuje pomocí krystalické mřížky. Jde o geometrickou abstrakci nahrazující atomy nebo jiné částice (ionty, molekuly) nehmotnými body, které tvoří tzv. uzlové body mřížky. Nejmenší část prostorové krystalické mřížky, která obsahuje nejmenší možný počet uzlových bodů, se nazývá elementární krystalová buňka. Všechny elementární buňky, jež tvoří prostorovou mřížku, jsou stejné geometrické útvary

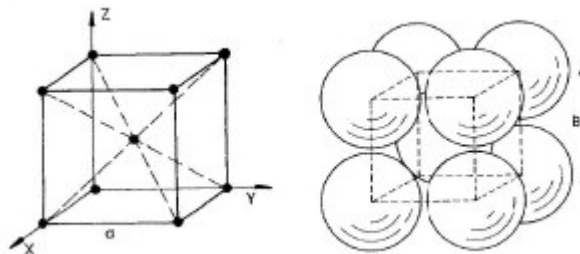
a každý uzlový bod má identické okolí. Druhy elementárních krystalových buněk jsou zobrazeny na obrázku 22 [6, 8, 9].



**Obrázek 22** Čtyři typy základních krystalových buněk:[7]  
a) prostá, b) bazálně středěná, c) prostorově středěná, c) plošně středěná

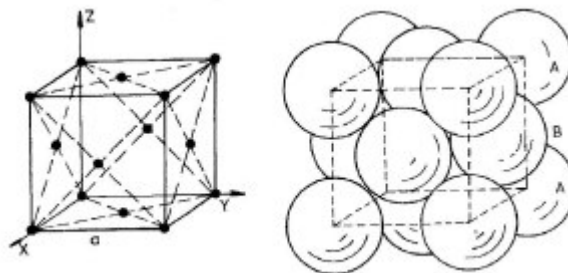
Vzhledem ke stejným silám mezi atomy vznikají u většiny kovů maximálně souměrné krystalové buňky s co nejtěsnějším seskupením atomů. Kovy nejčastěji krystalizují ve strukturách s krychlovou (prostorovou nebo plošně středěnou) nebo hexagonální krystalovou mřížkou [1, 7].

**Krychlová prostorově středěná struktura** má elementární buňku tvořenou krychlí s atomy umístěnými ve vrcholech a v průsečíku tělesových úhlopříček (obr. 23). Tato struktura je charakteristická např. pro Fe- $\alpha$ , Fe- $\delta$ , Cr, Mo, W, V atd. [6, 8].



**Obrázek 23** Krychlová prostorově středěná struktura [1] (upraveno)

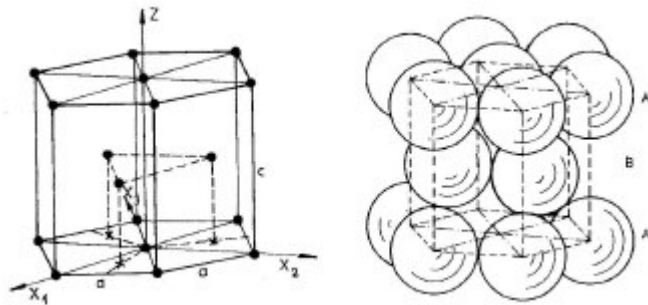
**Krychlová plošně středěná struktura** má elementární buňku tvořenou krychlí s atomy umístěnými ve vrcholech a ve středech všech stěn (obr. 24). Tato struktura je typická např. pro Al, Cu, Ni, Pb, Fe- $\gamma$ , Au, Ag, Pt atd. [6, 8].



**Obrázek 24** Krychlová plošně středěná struktura [1] (upraveno)



**Hexagonální struktura** má elementární buňku tvořenou šestibokým hranolem s atomy umístěnými ve vrcholech a ve středech obou základů, přičemž tři atomy leží ještě uvnitř elementární buňky (obr. 25). Tuto strukturu mají např. Mg, Zn, Cd, Co, Ti atd. [6, 8].



**Obrázek 25** Hexagonální struktura [1] (upraveno)

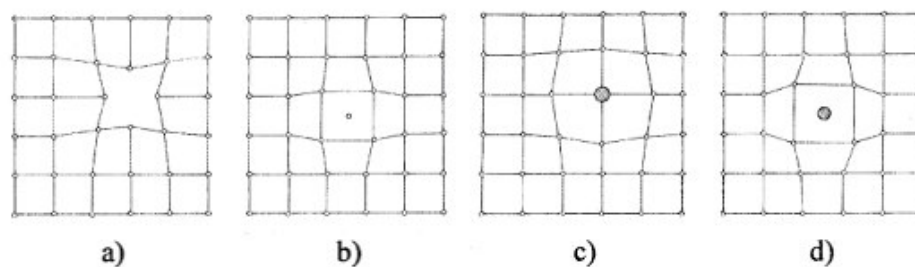
Důležitou materiálovou vlastností krystalických látek je polymorfie. Polymorfii definujeme jako jev spočívající v přeměně mřížky překrytací nebo alotropickou přeměnou v závislosti na teplotě. Jednotlivé krystalické stavy se nazývají modifikace a označují se písmeny řecké abecedy [6, 7].

Kov, jenž má v celém objemu pravidelně prostorově orientované základní krystalické buňky, se nazývá monokrystal. Reálné kovy jsou polykrystalické látky, tzn. látky tvořené větším množstvím krystalů s různou prostorovou orientací. Takové krystaly se nazývají zrna [6, 7].

## 2.2 Poruchy krystalické mřížky

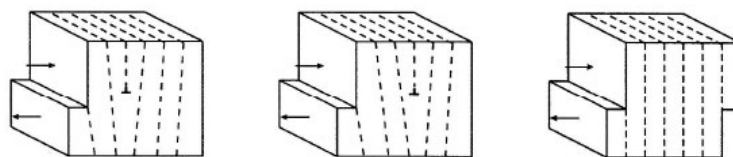
Představa stavby kovových materiálů jako pravidelně prostorově se opakujících základních krystalových buněk je zidealizovaná. Ve skutečnosti se setkáváme s velkým množstvím nepravidelností prostorového uspořádání v krystalické mřížce, které se označují jako mřížkové poruchy. Tyto poruchy mají ve svém důsledku vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti kovů. Z hlediska geometrie můžeme mřížkové poruchy rozdělit na bodové, čárové, plošné a prostorové [7, 9].

**Bodovými poruchami** jsou vakance, intersticiál, substituce a adice (obr. 26). Vakance je neobsazený uzlový bod mřížky včetně jejího blízkého okolí deformované mřížky. Intersticiálem je mřížkový atom (iont) umístěný v poloze mimo uzlový bod. Substituce je nahrazení původního atomu atomem příměsi a adice je substituce v intersticiální poloze [1, 6].

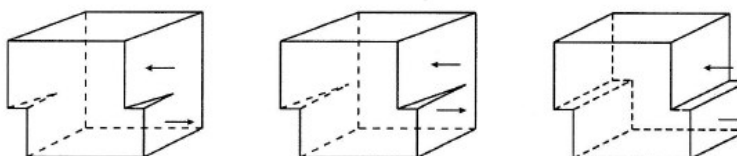


**Obrázek 26** Bodové poruchy krystalické mřížky [6] (upraveno)  
a) vakance (chybějící atom), b) intersticiál (vmezežený atom),  
c) substituce (atom příměsi), d) adice (atom příměsi v intersticiální poloze)

**Čárové poruchy** nazývané také dislokace vznikají přesunutím (dislokováním) určitého množství atomů při skluzovém pohybu vzhledem k sousední vrstvě atomů. Podle vzniku a způsobu šíření se dislokace dělí na hranové a šroubové. Hranová dislokace způsobuje přesunutí části krystalu současně po celé jeho délce (obr. 27) a šroubová dislokace postupně (obr. 28). Téměř výhradně se oba typy dislokací vyskytují společně a vytvářejí tak smíšené dislokace [1, 7].



**Obrázek 27** Schéma vzniku a šíření hranové dislokace [7]



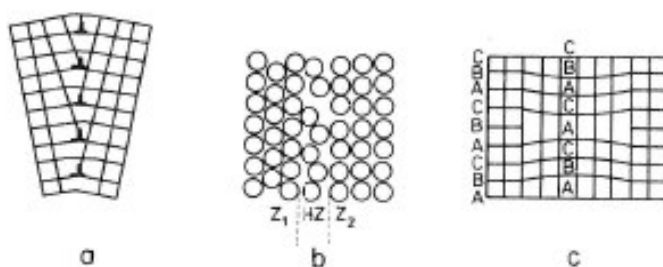
**Obrázek 28** Schéma vzniku a šíření šroubové dislokace [7]

**Plošné poruchy** jsou dvojrozměrné poruchy a řadí se mezi ně vrstevné poruchy, hranice zrn a hranice subzrn (obr. 29).

*Vrstevné poruchy* jsou poruchy pravidelného sledu poloh atomových rovin ve struktuře krystalu. V pravidelně se opakujícím systému atomových rovin jsou vynechány nebo jsou do systému vloženy atomové roviny. Atomy v oblasti vrstvené poruchy nezaujímají přesně rovnovážnou polohu, a proto zde vzniká vnitřní pnutí [7].

*Hranice zrn* oddělují jednotlivá zrna polykrystalické látky a jedná se o oblasti s výrazně porušenou pravidelností krystalické stavby vlivem vysoké hustoty dislokací, případně nečistot a vakancí [9].

*Hranice subzrn* (subzrna jsou části zrn vzájemně pootočené o malé úhly) je hranice mezi oblastmi s pravidelnou orientací krystalické mřížky. Lze si je představit jako dislokační stěny, tedy dislokacemi uspořádanými nad sebou [9].



**Obrázek 29** Schéma plošných poruch [9]  
a) dislokační model hranice subzrn, b) hranice zrn ( $Z_1$ ,  $Z_2$  – atomy v zrnech, HZ – atomy v místě hranice), c) porucha vrstvení

**Prostorové (objemové) poruchy** jsou trojrozměrné útvary, jenž jsou vlastně jinou fází. Mezi tyto poruchy řadíme mikro dutiny, mikrotrhliny, vměstky apod. Často vznikají shlukováním např. vakancí nebo dislokací (vznik mikro dutiny nebo mikrotrhliny), nebo substitucí či adicí (vyloučí se cizí fáze, tzv. precipitát) apod. [6].

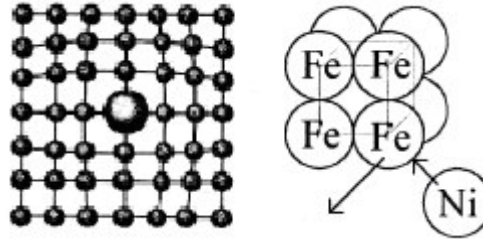
### 2.3 Mikrostruktura kovových materiálů

Mikrostrukturou materiálu se rozumí tvar a uspořádání jeho složek (fází, poruch atd.), které lze sledovat mikroskopem. Materiál, jenž má stejné chemické složení, může mít v závislosti na použitém výrobním postupu a zpracování různou mikrostrukturu a tedy i různé výsledné vlastnosti [6].

Ideální **čisté kovy** v tuhém stavu mají mikrostrukturu tvořenou jednou fází (jednofázové materiály). Jsou to polykrystalické materiály, složené z jednotlivých zrn. Velikost a tvar zrn výrazně ovlivňuje vlastnosti kovů [6].

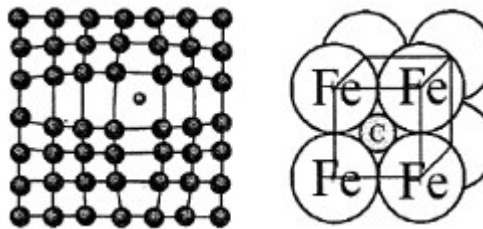
**Slitiny**, tedy směsi dvou a více kovů nebo kovů a nekovů, mohou být v tuhém stavu jednofázové nebo vícefázové. Jejich mikrostruktura závisí na množství přidávaného (legujícího) prvku k základnímu kovu. Při malém množství se prvek rozpouští v základním kovu v tuhém stavu a vzniká tzv. tuhý roztok (označují se řeckými písmeny). Podle umístění částic (atomů) rozpouštějícího se přídavného prvku v krystalické mřížce základního kovu se rozlišují dva základní typy tuhých roztoků [6, 9].

**Substituční tuhý roztok** – atomy přídavného prvku jsou umístěny v uzlových bodech mřížky základního kovu, kde zaujímají místa atomů základního kovu (obr. 30). Předpokladem je, že velikosti atomů a typ krystalické mřížky obou komponent jsou podobné [2, 9].



**Obrázek 30** Schéma substitučního tuhého roztoku [7]

**Intersticiální tuhý roztok** – atomy přídatného prvku jsou umístěny v meziuzlových (intersticiálních) polohách mřížky základního kovu (obr. 31). Tento druh roztoku nejčastěji vytvářejí malé atomy prvků H, B, C, N, Be [7, 9].



**Obrázek 31** Schéma intersticiálního tuhého roztoku [7]

Vzniklá slitina je jednofázová a polykrystalická, tzn., že obsahuje zrna tuhého roztoku a její mikrostruktura se podobá mikrostruktuře čistého kovu. Zvýšením obsahu přídatného prvku nad jeho maximální rozpustnost v základním kovu v tuhém stavu, se nadbytečné množství po ztuhnutí slitiny objevuje v její mikrostruktuře jako nová fáze. Taková to slitina obsahuje kromě tuhého roztoku legujícího prvku v základním kovu ještě další fázi (nebo více fází), a je tedy vícefázovým (polyfázovým) a polykrystalickým materiálem. Vznikají tzv. intermediální fáze, tedy sloučeniny základního kovu s legujícím prvkem [6].

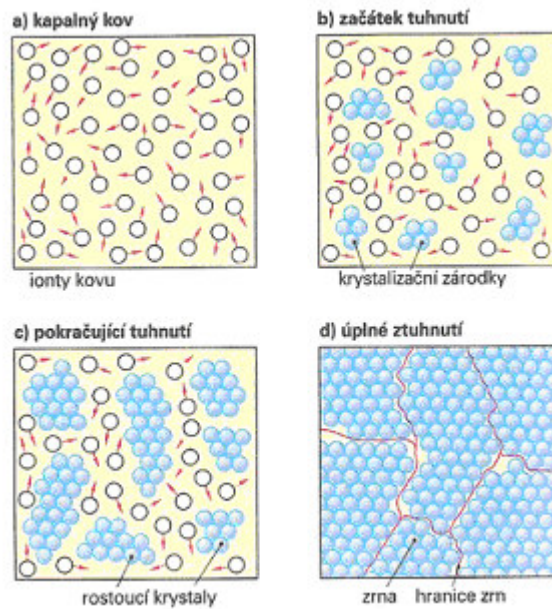
Intermediální fáze se obvykle odlišují svoji krystalickou strukturou i fyzikálními vlastnostmi jak od základního kovu tak od legujícího prvku, a proto výrazně mění vlastnosti slitin. Vhodnými postupy lze měnit tvar, velikost a rozložení částic intermediálních fází a tím měnit mechanické vlastnosti slitin v poměrně širokém rozmezí [6, 7].

Základní informace o fázovém složení a morfologii jednotlivých fází daného systému poskytuje rovnovážný stavový (fázový) diagram tohoto systému.

## 2.4 Vznik struktury kovu

V kovové tavenině se ionty kovů a volné elektrony pohybují neuspořádaně. Ochlazováním taveniny dochází v místech, kde byla dosažena teplota tuhnutí, k přechodu

jednotlivých částic z kapalného do pevného skupenství. Ionty kovů se usazují, vytvářejí krystalizační zárodky a následně krystalové mřížky. Krystaly narůstají tak dlouho, dokud nenarazí na sousední krystaly a jejich další růst není možný. Vzniklé nepravidelně ohraničené krystaly, nazývané zrna, spolu sousedí svými hranicemi a vytvářejí strukturu kovu [10].



**Obrázek 32** Vznik struktury kovu [10]

### 3 MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVÝM DEFEKTOSKOPEM

Náplní této části diplomové práce je měření ultrazvukovým defektoskopem DIO 562 na železných vzorcích s různou vnitřní strukturou. U jednotlivých zkoušených vzorků se určí rychlost šíření ultrazvukových vln a jejich útlum. V rámci zkoušení se ještě u jednotlivých materiálů provede měření tvrdosti pomocí mobilního tvrdoměru, které bude sloužit jako jedno z vyhodnocovacích kritérií. Druhým kritériem pro vyhodnocení bude základní fázová struktura, tedy mikrostruktura jednotlivých materiálů. Pro doplnění bude porovnán vliv změny tloušťky materiálu na změnu rychlosti šíření ultrazvukových vln a na jejich útlum.

#### 3.1 Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562

Defektoskop DIO 562 (obr. 33) je lehký a kompaktní ultrazvukový zkušební přístroj, který je určen pro [11]:

- lokalizaci vady v materiálu a určení její velikosti,
- měření tloušťky stěny,
- možné použití pro mechanizované či poloautomatizované zkušební zařízení,
- zkoušení spojení materiálů.



Obrázek 33 Univerzální ultrazvukový defektoskop DIO 562

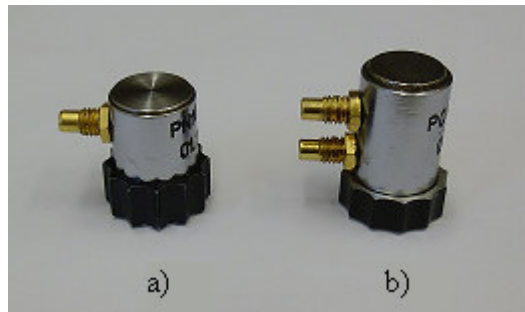
#### Základní technická data

Tabulka 1 Základní technická data [5]

Specifikace	Hodnota
Rozměry	235 x 145 x 55 mm
Teplotní rozsah	- 20° C až + 40° C
Rozlišení měření	0,01 mm
Rozsah nastavení rychlosti šíření UZ vln	1000 m/s až 9999 m/s

## 3.2 Vlastní měření

Měření bylo prováděno výše popsaným ultrazvukovým defektoskopem DIO 562, který pracuje na principu odrazové zkušební metody s kontaktní akustickou vazbou, jež byla podrobně popsána v kapitole 1.6.1. Pro měření rychlosti šíření ultrazvukových vln byly použity sondy PQ 10-4C a PN 10-4C (obr. 34). Měření útlumu ultrazvukových vln v jednotlivých zkoušených materiálech bylo provedeno sondou PN 10-4C.



**Obrázek 34** Ultrazvukové sondy  
a) PN 10-4C, b) PQ 10-4C

### 3.2.1 Parametry sond

Zde je uveden popis obou použitých měřících sond a jejich základní parametry, jak jsou uvedeny v technické příručce k ultrazvukovému defektoskopu.

Sonda PQ 10-4C je přímá dvouměničová ultrazvuková sonda s jmenovitým průměrem měniče 10 mm a jmenovitou frekvencí 4 MHz.

Sonda PN 10-4C je přímá jednoměničová ultrazvuková sonda s jmenovitým průměrem měniče 10 mm a jmenovitou frekvencí 4 MHz.

Pro potřeby měření útlumu ultrazvukových vln je z dalších parametrů sondy PN 10-4C důležitá především délka blízkého pole a s ní související efektivní průměr měniče potřebný k jejímu výpočtu.

- 1) **Efektivní průměr měniče  $D_{ef}$**  – udává akusticky účinnou plochu měniče. Oproti skutečnému průměru měniče  $D_0$  je menší, protože v důsledku upnutí nebo přitmelení je měnič na okrajích tlumen a tím nekmitá celá jeho plocha se stejnou amplitudou. Amplituda kmitání směrem k okraji měniče klesá [13].

$$D_{ef} = 0,97 \cdot D_0 \quad (12)$$

- 2) **Délka blízkého pole N** – vzdálenost od měniče sondy, ve které je svazek podélných vln nejužší a akustický tlak maximální. Pro přímé sondy s kruhovým měničem se délka blízkého pole vypočítá podle vztahu [13]:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot c_L} \quad (13)$$

Kde

$D_{ef}$  – efektivní průměr měniče,

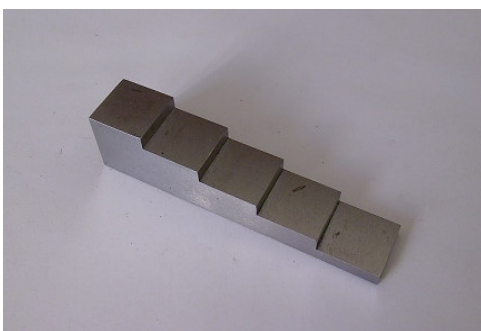
$f$  – jmenovitá frekvence sondy,

$c_L$  – rychlost podélných ultrazvukových vln.

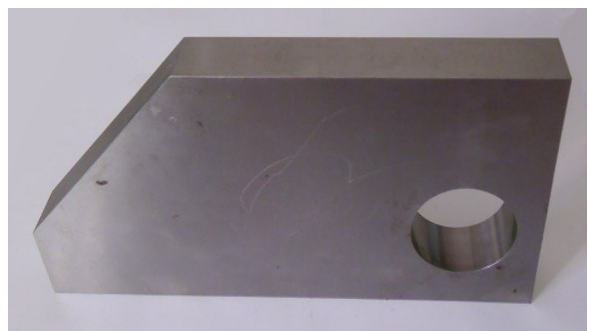
### 3.2.2 Ověření přesnosti měření a měřící metody

Pro zajištění přesnosti měření se ultrazvukové přístroje a ultrazvukové sondy ověřují prostřednictvím kalibračních měrek. Tyto kalibrační měrky mají definovanou geometrii, materiál a jakost povrchu v souladu s příslušnými normami ČSN EN nebo ANSI/AWS.

Pro účely našeho měření byla použita stupňová kalibrační měrka (obr. 35), tj. měrka s odstupňovanou tloušťkou (odstupňování po 5 mm). Jedná se o kalibrační měrku vhodnou pro ověřování přesnosti při měření tloušťky. Jako pomocná měrka byla použita modifikovaná měrka K1 (obr. 36).



**Obrázek 35** Stupňová měrka



**Obrázek 36** Modifikovaná měrka K1

Kalibrace na kalibračních měrkách a měření na zkoušených vzorcích bylo provedeno podle dvou zkušebních metod.



První metodou je měření podle prvního koncového echa. Jde o měření od nulového bodu časové základny k první hraně prvního koncového echa. Tato metoda se využívá u hůře prozvučitelných materiálů, kdy není možné získat zřetelná násobná koncová echa.

Druhou metodou je měření podle dvou koncových ech. Konkrétně jde o metodu "hrana – hrana", kdy se měří vzdálenost od přední hrany prvního koncového echa k přední hraně druhého koncového echa. Metoda měření podle dvou koncových ech je přesnější a její hlavní předností je, že měření tloušťky není ovlivněno změnou mezery mezi sondou a zkoušeným vzorkem.

Jako prostředek akustické vazby byla při měření použita vazelína. Při její aplikaci je třeba dbát na to, aby byla vždy nanášena rovnoměrně a o stejné tloušťce. Dále je třeba při měření dbát na to, aby byla měřící sonda přitlačována na zkoušený povrch stejnou silou.

### **3.2.3 Měření rychlosti ultrazvuku**

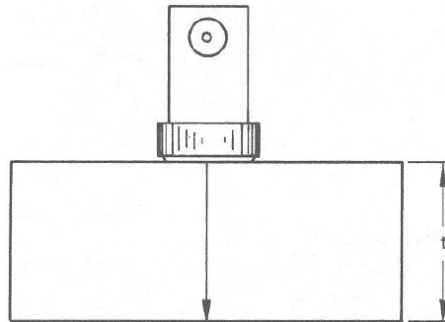
Rychlost šíření ultrazvuku v tuhých látkách závisí na modulu pružnosti, měrné hmotnosti a Poissonově čísle. Pro daný materiál a druh vlnění je rychlost šíření ultrazvuku konstantní [3].

#### **Postup měření rychlosti ultrazvuku v materiálu [2]:**

- 1) Změření tloušťky zkoušeného vzorku v měřeném místě posuvným měřidlem. K měření bylo použito digitální posuvné měřidlo s přesností měření 0,01 mm. Pro zajištění co nejpřesnějšího zjištění rozměrů a eliminaci možných chyb měření bylo každé měření provedeno třikrát.
- 2) Kalibrace na měrce se známou rychlostí šíření ultrazvuku. Pro kalibraci byla použita stupňová kalibrační měrka a modifikovaná kalibrační měrka K1.
- 3) Přiložení sondy na zkoušený vzorek s neznámou rychlostí ultrazvuku, změření tloušťky a nastavení takové rychlosti, až bude čtena skutečná tloušťka podle hodnoty naměřené posuvným měřidlem.
- 4) Odečtení skutečné hodnoty rychlosti šíření ultrazvukových vln z obrazovky defektoskopu.

### 3.2.4 Měření útlumu ultrazvuku

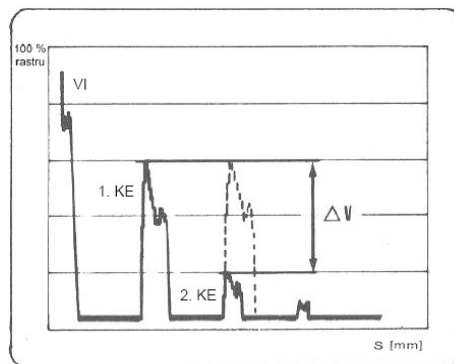
Při zkoušení ultrazvukem hraje útlum často podřadnou roli, tzn. je zanedbatelně malý. Avšak ne vždy se smí přehlédnout. Je zde použita metoda, která s pomocí AVG diagramu umožňuje určit koeficient útlumu ultrazvuku  $\kappa$  dostatečně přesně. Konkrétně jde o měření útlumu podélných vln při kolmém prozvučování, kdy se vybudí násobné koncové echo z rovnoběžné protilehlé strany zkoušeného materiálu, jehož tloušťka je  $t$  (obr. 37) [2, 13].



Obrázek 37 Kolmé prozvučování [13] (upraveno)

#### Postup měření útlumu ultrazvuku v materiálu [2, 13]:

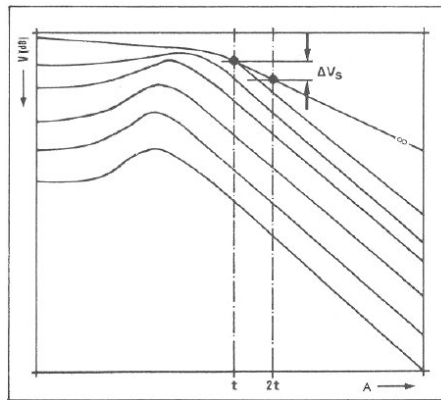
- 1) Přiložení sondy na povrch zkoušeného materiálu a vybudení násobného koncového echa z rovnoběžné protilehlé strany zkoušeného materiálu.
- 2) Změření rozdílu mezi výškami prvního a druhého koncového echa pomocí atenuátoru v dB. Rozdíl je  $\Delta V$  (obr. 38).



Obrázek 38 Rozdíl mezi 1. KE a 2. KE [13] (upraveno)

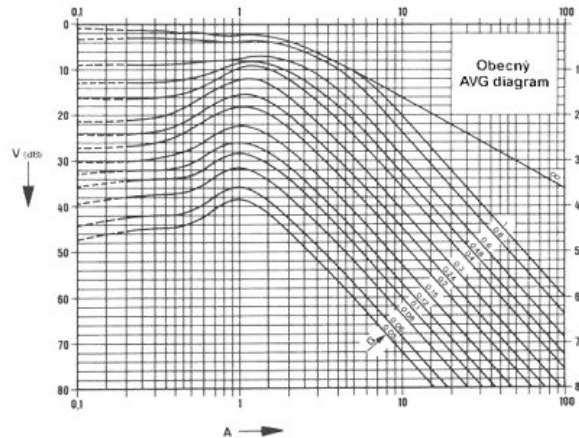
- 3) Odečtení ztrát rozevřením svazku z AVG diagramu.
  - a) Pro tloušťku  $t = t_1$  menší než trojnásobek délky blízkého pole  $t < 3N$  se ztráty rozevřením svazku  $\Delta V_S$  odečtou z AVG diagramu vždy pro dráhy  $s_1 = t$  pro 1. KE a  $s_2 = 2t$  pro 2. KE na křivce pro KE ( $\infty$ ).

- b) Pro tloušťku  $t = t_1$  rovnou nebo větší než trojnásobek délky blízkého pole,  $t \geq 3N$  a  $t_2 = 2t_1$ , je  $\Delta V_S = 6$  dB.



**Obrázek 39** Ztráty rozevřením svazku z AVG diagramu [13] (upraveno)

Při měření jsem neměl k dispozici AVG diagram pro použitou sondu, a tak byl použit obecný AVG diagram (obr. 40), kde je na vodorovné ose místo dráhy ultrazvuku zobrazena poměrná dráha ultrazvuku  $A$ . Na svislé ose je zesílení  $V$  v dB.



**Obrázek 40** Obecný AVG diagram [2]

Poměrná dráha ultrazvuku pro přímé sondy se vypočítá ze vztahu:

$$A = \frac{s}{N} \tag{14}$$

Kde

A – poměrná dráha ultrazvuku,

s – dráha ultrazvuku,

N – délka blízkého pole.

- 4) Zahrnutí vlivu ze ztrát odrazem. Při měření útlumu s konstantní vazbou na jedné tloušťce (t) materiálu podle násobných koncových ech (1. KE a 2. KE) jsou ztráty odrazem  $\Delta V_O$  v rozsahu 0,5 až 2 dB. Ztráty odrazem nejsou zanedbatelné a pro měření útlumu s konstantní vazbou uvažujeme jejich hodnotu 1 dB. Tato hodnota byla zvolena na základě souboru měření  $\Delta V_O$  v roce 1978 v SVÚM Praha.
- 5) Výpočet koeficientu útlumu podle vztahu

$$\kappa = \frac{\Delta V - \Delta V_s - \Delta V_o}{2 \cdot t} \quad (15)$$

### 3.3 Srovnávací měření tvrdosti

Srovnávací měření tvrdosti bylo provedeno pomocí tvrdoměru pro kovové materiály PROCEQ EQUOTIP 2 (obr. 41). Jde o elektronický přenosný přístroj s výměnnými tzv. rázovými jednotkami podle druhu materiálu a je založen na dynamické metodě měření tvrdosti (měří 1000 násobek podílu odrazové a nárazové rychlosti). Podle převodních křivek, které jsou nainstalovány ve vnitřním software indikačního přístroje, lze nastavit přímo odečet hodnot pro tvrdosti podle Vickerse, Brinella, Rockwella a Shoreho [14].

Při měření je důležité, aby se zkoušený materiál nacházel na tvrdém a stabilním podkladu. Jestliže tomu tak nebude, nikdy nedojde k naměření správných hodnot tvrdosti. V krajním případě nemusí dojít k naměření žádných hodnot. Povrch zkoušeného materiálu by měl být čistý a jemně zbrošený.

Měření tvrdosti bylo u jednotlivých zkoušených materiálů provedeno vždy ve stejných místech, ve kterých bylo provedeno měření ultrazvukovým defektoskopem.



Obrázek 41 Tvrdoměr PROCEQ EQUO TIP 2

### 3.4 Zkoušené materiály a naměřené hodnoty

Pro své měření jsem měl k dispozici devět materiálů, jejichž povrch byl upraven pro potřeby měření pomocí ultrazvukového defektoskopu.

Na každém materiálu bylo podle jeho rozměrů provedeno měření na různých místech, jež jsou vždy u daného materiálu vyznačena. Všechny naměřené hodnoty, tedy tvrdost, rozměry změřené posuvným měřidlem a ultrazvukovým defektoskopem, rychlosti ultrazvukových vln a jejich útlum, jsou uvedeny v tabulkách u příslušného materiálu. Tabulky dále obsahují další hodnoty potřebné pro určení útlumu ultrazvukových vln, jako je délka blízkého pole sondy, dráha a poměrná dráha ultrazvuku, ztráty rozevřením ultrazvukového svazku a naměřený rozdíl mezi prvním a druhým koncovým echem. Pro výpočet útlumu je použit aritmetický průměr rozdílu mezi prvním a druhým koncovým echem. V tabulkách není uvedena ztráta odrazem ultrazvuku, která je pro všechna má měření 1 dB a dále v nich není uveden efektivní průměr měniče sondy, jenž byl vypočítán podle vzorce (12) a jeho hodnota je 9,7 mm.

U každého materiálu je dále kromě výše uvedených informací zobrazena také fotografie jeho mikrostruktury.

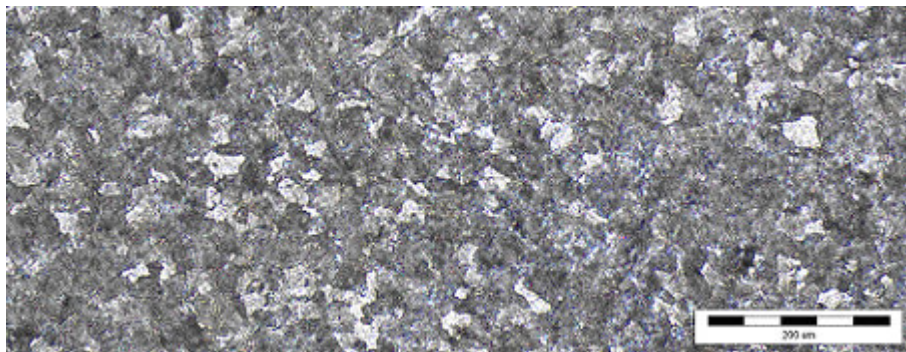
## Materiál č. 1 – Ocel 19312 žíhaná na měkko



Obrázek 42 Materiál č. 1



Obrázek 43 Měřená místa



Obrázek 44 Mikrostruktura materiálu č. 1 – vysokopopouštěný perlit

Tabulka 2 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 1

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	195	197	15,77	15,773	15,740	5938
	202		15,77			
	193		15,78			
2	199	195	15,58	15,587	15,555	5938
	193		15,59			
	192		15,59			
3	196	195	16,14	16,143	16,111	5938
	195		16,14			
	194		16,15			

Tabulka 3 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 1

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	15,845	15,773	0,995	2	3,9-4,0	3,95	0,030
2	15,845	15,587	0,984	2	3,8-4,0	3,9	0,029
3	15,845	16,143	1,019	2	3,9-4,0	3,95	0,029

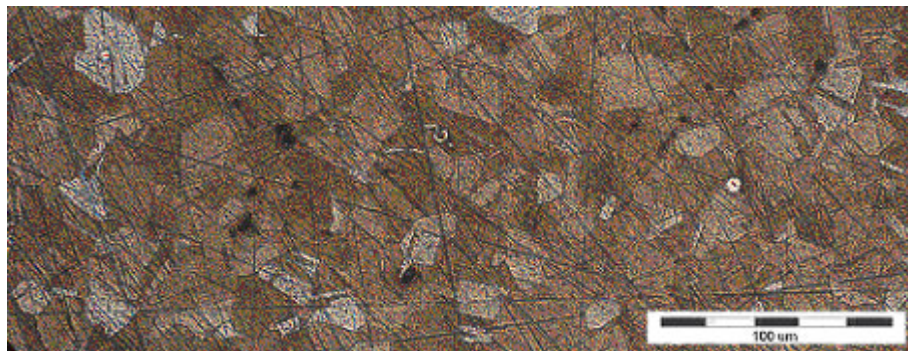
## Materiál č. 2 – Ocel 17240



Obrázek 45 Materiál č. 2



Obrázek 46 Měřené místo



Obrázek 47 Mikrostruktura materiálu č. 2 – austenit

Tabulka 4 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 2

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	202	201	13,00	13,000	13,518	5699
	195		13,00			
	206		13,00			

Tabulka 5 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 2

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,510	13,000	0,787	0,5	4,1-4,2	4,15	0,102



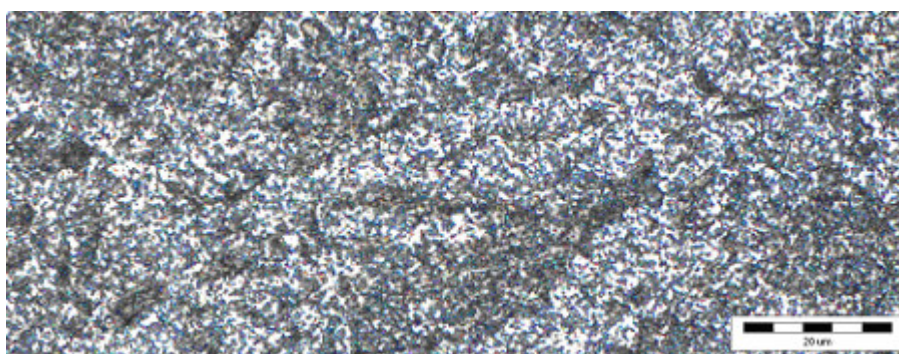
### Materiál č. 3 – Žebírková výztuž do betonu



Obrázek 48 Materiál č. 3



Obrázek 49 Měřená místa



Obrázek 50 Mikrostruktura materiálu č. 3 – směs perlitu a bainitu

Tabulka 6 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 3

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	224	199	12,60	12,603	12,592	5930
	185		12,61			
	187		12,60			
2	202	205	12,32	12,323	12,314	5930
	208		12,32			
	206		12,33			
3	207	203	12,97	12,970	12,963	5930
	191		12,96			
	212		12,98			

Tabulka 7 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 3

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	15,867	12,603	0,794	0,5	2,0-2,2	2,1	0,024
2	15,867	12,323	0,777	0,5	2,0-2,2	2,1	0,024
3	15,867	12,970	0,817	0,5	2,0-2,2	2,1	0,023



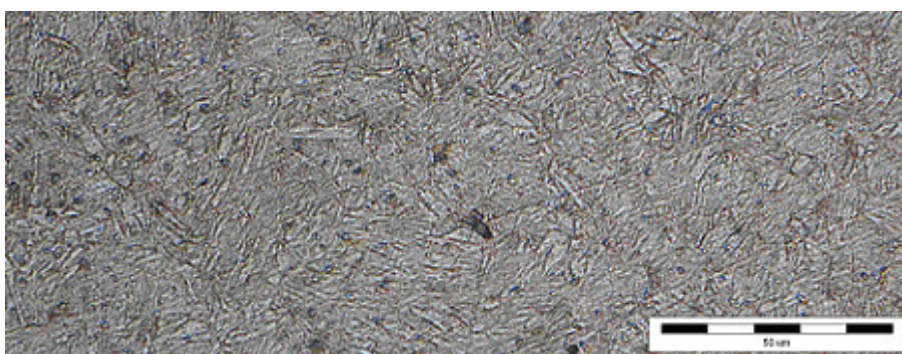
## Materiál č. 4 – Hadfieldova ocel zpracovaná na bainit



Obrázek 51 Materiál č. 4



Obrázek 52 Měřená místa



Obrázek 53 Mikrostruktura materiálu č. 4 – bainit

Tabulka 8 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 4

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	368	364	9,46	9,460	9,537	5879
	360		9,46			
	365		9,46			
2	353	364	9,47	9,460	9,537	5879
	365		9,45			
	373		9,46			
3	360	366	9,46	9,460	9,537	5879
	372		9,46			
	366		9,46			

Tabulka 9 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 4

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,004	9,460	0,591	0	1,2-1,4	1,3	0,016
2	16,004	9,460	0,591	0	1,2-1,4	1,3	0,016
3	16,004	9,460	0,591	0	1,3-1,4	1,35	0,018

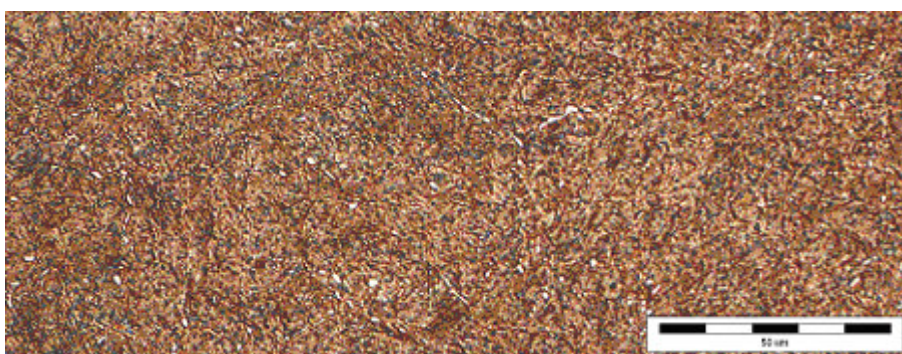
## Materiál č. 5 – Ocel 19312 kalená



Obrázek 54 Materiál č. 5



Obrázek 55 Měřená místa



Obrázek 56 Mikrostruktura materiálu č. 5 – martenzit (nepouštěný)

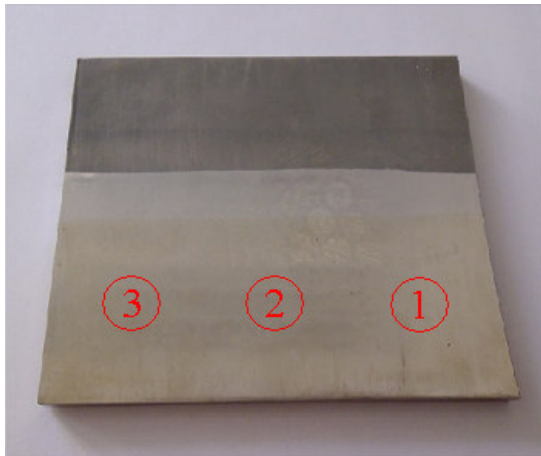
Tabulka 10 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 5

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	721	708	15,32	15,330	15,555	5840
	716		15,34			
	686		15,33			
2	712	708	15,33	15,330	15,555	5840
	698		15,33			
	714		15,33			
3	703	706	15,52	15,513	15,740	5840
	713		15,51			
	703		15,51			

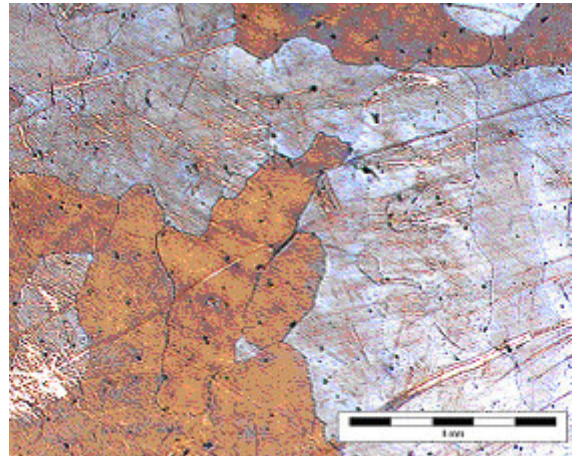
Tabulka 11 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 5

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,111	15,330	0,952	1	2,3-2,4	2,35	0,011
2	16,111	15,330	0,952	1	2,3-2,4	2,35	0,011
3	16,111	15,513	0,963	1	2,3-2,5	2,4	0,013

## Materiál č. 6 – Hadfieldova ocel



Obrázek 57 Materiál č. 6 a jeho měřená místa



Obrázek 58 Mikrostruktura materiálu č. 6 – austenit

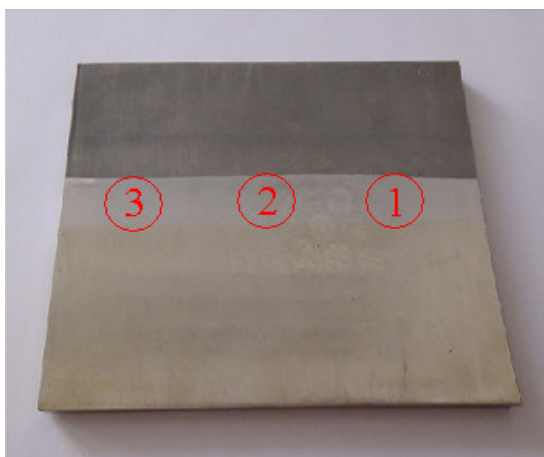
Tabulka 12 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 6

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	189	191	8,91	8,913	9,259	5705
	190		8,92			
	195		8,91			
2	190	193	8,92	8,913	9,259	5705
	191		8,91			
	199		8,91			
3	191	192	8,91	8,913	9,259	5705
	189		8,91			
	196		8,92			

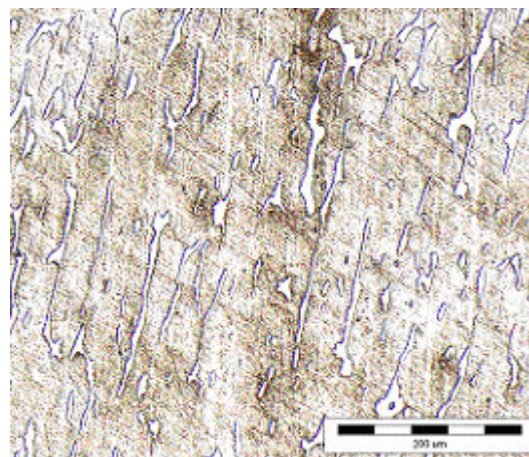
Tabulka 13 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 6

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,493	8,913	0,540	0	7,0-7,2	7,1	0,342
2	16,493	8,913	0,540	0	7,1-7,2	7,15	0,345
3	16,493	8,913	0,540	0	7,0-7,2	7,1	0,342

## Materiál č. 7 – Austenitická slitina CrNiMn (18/8/6)



Obrázek 59 Materiál č. 7 a jeho měřená místa



Obrázek 60 Mikrostruktura materiálu č. 7 vysokolegovaný austenit s vyloučenou intermetalickou fází

Tabulka 14 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 7

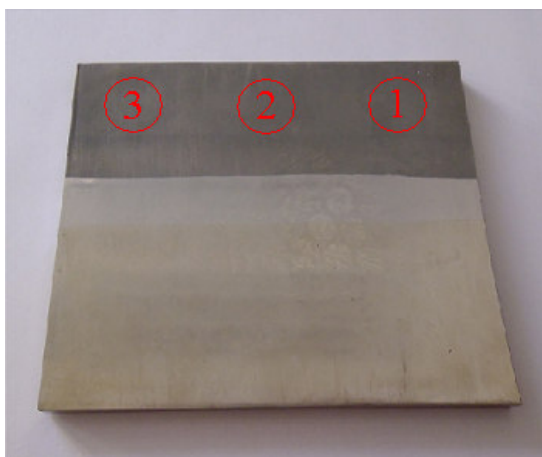
Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	131	134	8,98	8,980	9,259	5747
	133		8,98			
	139		8,98			
2	133	135	8,97	8,980	9,259	5747
	137		8,99			
	136		8,98			
3	136	133	8,98	8,980	9,259	5747
	130		8,98			
	134		8,98			

Tabulka 15 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 7

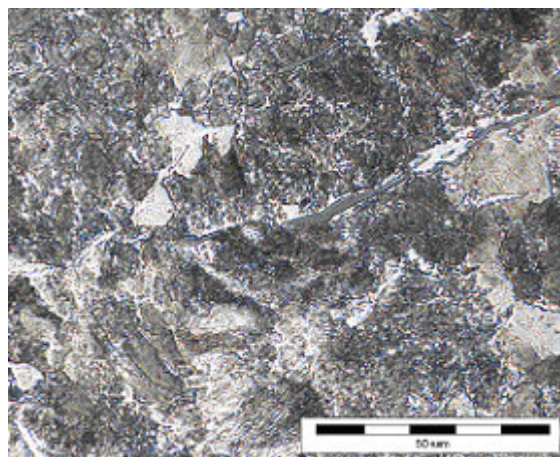
Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku $\Lambda$	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,372	8,980	0,548	0	5,7-5,9	5,8	0,267
2	16,372	8,980	0,548	0	5,7-5,8	5,75	0,265
3	16,372	8,980	0,548	0	5,7-5,9	5,8	0,267



## Materiál č. 8 – Ocel UIC 900A



Obrázek 61 Materiál č. 8 a jeho měřená místa



Obrázek 62 Mikrostruktura materiálu č. 8 feriticko perlitická ocel

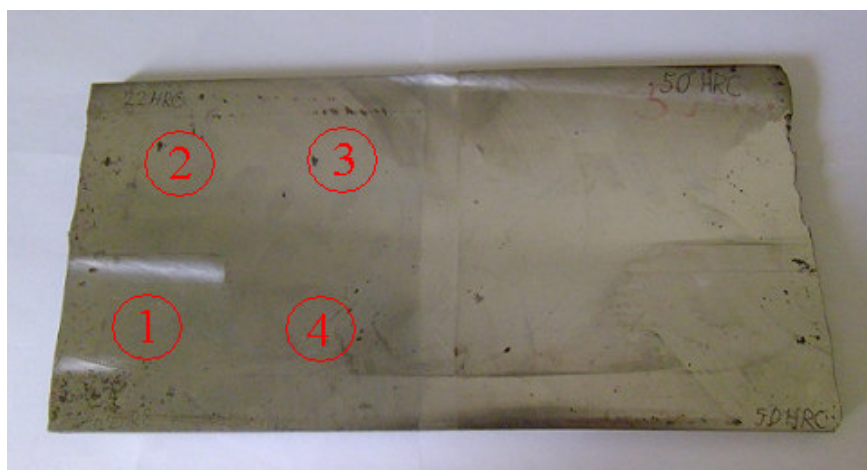
Tabulka 16 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 8

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	235	234	9,07	9,073	9,074	5925
	234		9,07			
	233		9,08			
2	237	234	9,07	9,073	9,074	5925
	232		9,08			
	233		9,07			
3	229	231	9,07	9,073	9,074	5925
	233		9,07			
	230		9,08			

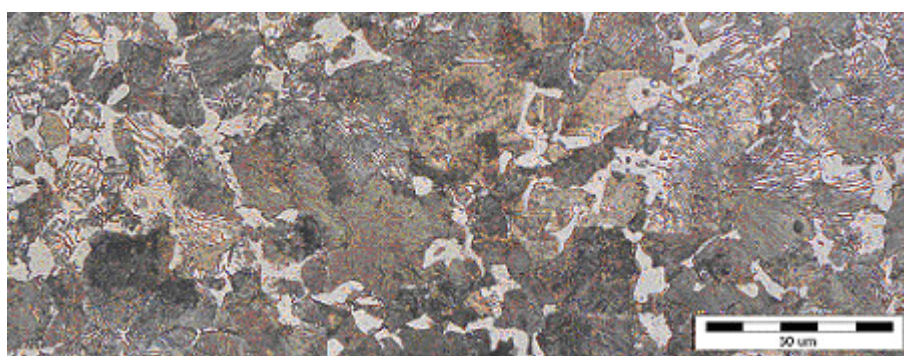
Tabulka 17 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 8

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	15,880	9,073	0,571	0	1,5-1,7	1,6	0,033
2	15,880	9,073	0,571	0	1,5-1,6	1,55	0,030
3	15,880	9,073	0,571	0	1,5-1,7	1,6	0,033

## Materiál č. 9 – Ocel 12050



Obrázek 63 Materiál č. 9 a jeho měřená místa



Obrázek 64 Mikrostruktura materiálu č. 9 – feriticko perlitická ocel

Tabulka 18 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 9

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	285	284	14,43	14,433	14,444	5922
	283		14,43			
	284		14,44			
2	293	282	14,43	14,433	14,444	5922
	280		14,44			
	274		14,43			
3	286	285	14,61	14,620	14,629	5922
	284		14,63			
	284		14,62			
4	285	285	14,44	14,433	14,444	5922
	284		14,43			
	287		14,43			

**Tabulka 19 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 9**

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	15,888	14,433	0,908	1	2,5-2,7	2,6	0,021
2	15,888	14,433	0,908	1	2,5-2,7	2,6	0,021
3	15,888	14,620	0,920	1	2,6-2,7	2,65	0,022
4	15,888	14,433	0,908	1	2,5-2,7	2,6	0,021

#### Materiál č. 4 – Hadfieldova ocel zpracovaná na bainit (jiná tloušťka)

Předmětem při měření na materiálech o větší tloušťce bylo zjistit, jestli se projeví vliv změny tloušťky materiálu na rychlosti ultrazvukových vln a na jejich útlumu. Jednalo se pouze o doplňkové měření, které nebylo cílem této práce, a proto není podrobněji řešeno.



**Obrázek 65** Materiál č. 4 (jiná tloušťka)



**Obrázek 66** Měřená místa

**Tabulka 20 Naměřené hodnoty tvrdosti a rychlosti ultrazvukových vln u materiálu č. 4 (jiná tloušťka)**

Měřené místo	Srovnávací tvrdost [HV]	Arit. průměr srovnávací tvrdosti [HV]	Rozměr naměřený posuvným měřidlem [mm]	Arit. průměr rozměrů naměřených posuvným měřidlem [mm]	Rozměr naměřený UZ def. [mm]	Rychlost UZ vln [m/s]
1	369	367	104,17	104,167	106,188	5879
	365		104,17			
	368		104,16			
2	359	365	104,16	104,167	106,188	5879
	365		104,17			
	371		104,17			
3	366	368	104,53	104,537	106,562	5879
	371		104,54			
	368		104,54			

**Tabulka 21 Naměřené hodnoty útlumu ultrazvukových vln u materiálu č. 4 (jiná tloušťka)**

Měřené místo	Délka blízkého pole N [mm]	Dráha ultrazvuku s [mm]	Poměrná dráha ultrazvuku A	$\Delta V_s$ [dB]	$\Delta V$ [dB]	Arit. průměr $\Delta V$ [dB]	Útlum $\kappa$ [dB/mm]
1	16,004	104,167	6,509	6	10,5-10,7	10,6	0,017
2	16,004	104,167	6,509	6	10,5-10,7	10,6	0,017
3	16,004	104,537	6,532	6	10,6-10,8	10,7	0,018

### 3.4.1 Souhrn naměřených hodnot

Pro lepší přehlednost a pro následné zhodnocení byly naměřené hodnoty tvrdosti, rychlosti ultrazvukových vln a útlumu ultrazvukových vln u jednotlivých zkoušených materiálů zpracovány do souhrnné tabulky. Výsledné hodnoty tvrdosti jednotlivých materiálů jsou určeny z aritmetického průměru hodnot uvedených u daného materiálu a zaokrouhleny na celé číslo, stejně jako u použitého tvrdoměru. Hodnoty rychlostí ultrazvukových vln jsou zapsány tak, jak byly naměřeny pomocí ultrazvukového defektoskopu. Výsledné hodnoty útlumu ultrazvukových vln jsou stejně jako u vyhodnocení tvrdosti určeny z aritmetického průměru hodnot útlumu daného materiálu a pro větší přesnost zaokrouhlena na tři desetinná místa. Součástí souhrnné tabulky je pro závěrečné zhodnocení i základní fázová struktura (mikrostruktura) daných materiálů.

**Tabulka 22 Souhrnná tabulka naměřených hodnot**

Materiál	Mikrostruktura	Tvrdost [HV]	Rychlost UZ vln [m/s]	Útlum UZ vln [dB/mm]
č. 1 – Ocel 19312 žíhaná	perlit	196	5938	0,029
č. 2 – Ocel 17240	austenit	201	5699	0,102
č. 3 – Žebírková výztuž do betonu	perlit	202	5930	0,024
č. 4 – Hadfieldova ocel zpracovaná na bainit	bainit	365	5879	0,017
č. 5 – Ocel 19312 kalená	martenzit	707	5840	0,012
č. 6 – Hadfieldova ocel	austenit	192	5705	0,343
č. 7 – Austenitická slitina CrNiMn (18/8/6)	austenit	134	5747	0,266
č. 8 – Ocel UIC 900A	perlit	233	5925	0,032
č. 9 – Ocel 12050	perlit	284	5922	0,021



## 4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Zhodnocení dosažených výsledků měření bude spočívat v porovnání naměřených hodnot v souvislosti s tvrdostí a základní fázovou strukturou (mikrostrukturou) jednotlivých zkoušených materiálů. Jako doplnění bude zhodnocen vliv změny tloušťky zkoušených materiálů na rychlost ultrazvukových vln a jejich útlum.

### 4.1 Zhodnocení dosažených výsledků podle mikrostruktury materiálů

Podle dostupných informací a na základě vytvořených fotografií mikrostruktur byla u materiálu č. 1 (žháná ocel 19312), č. 3 (žebírková výztuž do betonu), č. 8 (ocel UIC 900A) a č. 9 (ocel 12050) identifikována perlitická struktura. Nejednalo se o čistě prlitickou strukturu, ale směs perlitu s různým malým množstvím feritu. Rychlost ultrazvukových vln se u této struktury pohybovala v rozmezí od 5922 m/s do 5938 m/s. Z naměřených hodnot vychází průměrná rychlost pro perlitickou strukturu 5928,75 m/s a průměrná odchylka jednotlivých rychlostí od průměrné rychlosti pro tuto strukturu 5,25 m/s, což je 0,09 %. Útlum ultrazvukových vln se u této struktury pohyboval v rozmezí od 0,021 dB/mm do 0,032 dB/mm. Z toho vychází průměrná hodnota útlumu 0,027 dB/mm a průměrná odchylka jednotlivých hodnot útlumů od průměrné hodnoty útlumu 0,004 dB/mm, což je 14,81 %. Rozptyl hodnot jak u rychlosti ultrazvukových vln, tak i u jejich útlumu mohl být způsoben přítomností různého malého množství feritu.

U materiálu č. 2 (ocel 17240), č. 6 (Hadfieldova ocel) a č. 7 (austenitická slitina CrNiMn) se jednalo o austenitickou strukturu. Rychlost ultrazvukových vln se u této struktury pohybovala v rozmezí od 5699 m/s do 5747 m/s. Z naměřených hodnot vychází průměrná rychlost pro austenitickou strukturu 5717 m/s a průměrná odchylka jednotlivých rychlostí od průměrné rychlosti 20 m/s, což činí 0,35 %. Útlum ultrazvukových vln se pro tuto strukturu pohyboval od 0,102 dB/mm do 0,343 dB/mm. Průměrná hodnota útlumu byla 0,237 dB/mm a průměrná odchylka jednotlivých hodnot útlumů od průměrné hodnoty útlumu 0,09, což je 37,97 %. V literatuře (viz. zdroj [3]) se pro austenitické ocele uvádí rychlost ultrazvukových vln od 5200 m/s do 5800 m/s, což mnou zjištěné hodnoty splňují.

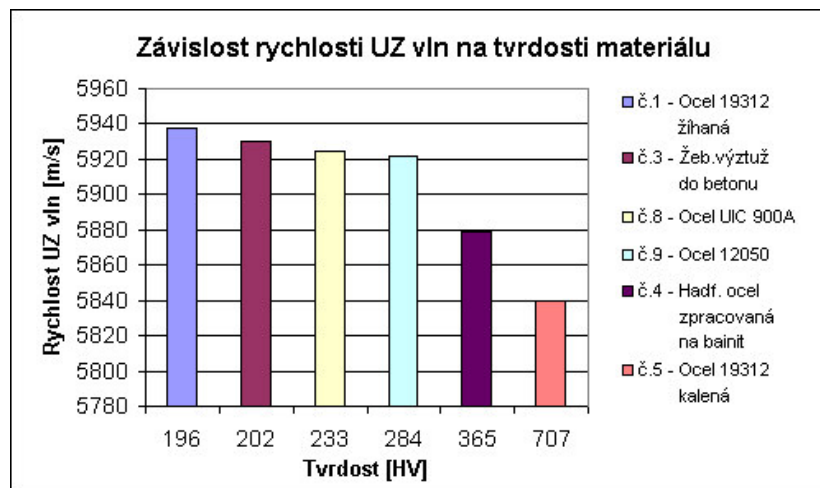
Materiál č. 4 (Hadfieldova ocel zpracovaná na bainit) má bainitickou strukturu. Naměřená rychlost ultrazvukových vln byla pro tuto strukturu 5879 m/s a útlum 0,017 dB/mm.

U materiálu č. 5 (kalená ocel 19312) se jednalo o martenzitickou strukturu. Naměřená rychlost ultrazvukových vln byla 5840 m/s a útlum 0,012 dB/mm. Martenzitická struktura vykazovala nejmenší hodnotu útlumu ze všech měřených struktur.

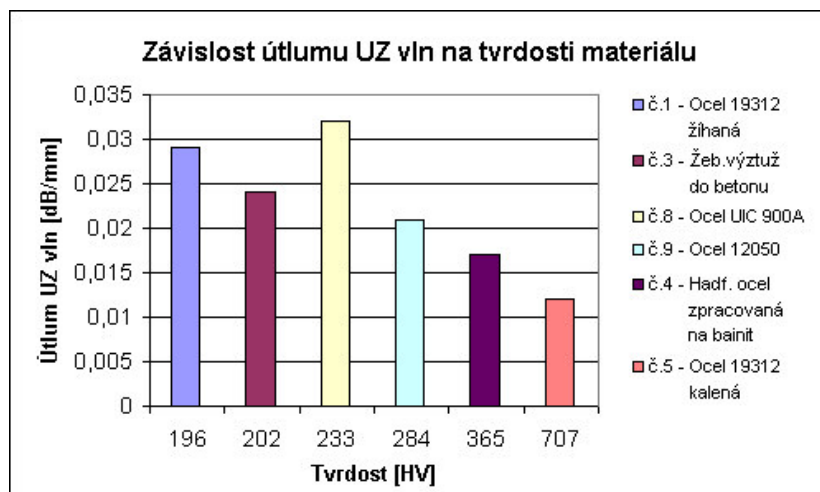
## 4.2 Zhodnocení dosažených výsledků podle tvrdosti materiálů

Pro zhodnocení dosažených výsledků měření podle tvrdosti jsem rozdělil měřené materiály do dvou skupin podle základní krystalové mřížky. První skupinu tvoří materiály s tělesově centrovanou kubickou mřížkou (BCC; perlitická, bainitická a martenzitická základní fázová struktura). Druhou skupinu tvoří materiály se stěnově centrovanou kubickou mřížkou (FCC; austenitická základní fázová struktura).

V rámci první skupiny materiálů lze podle naměřených hodnot rychlosti ultrazvukových vln vzhledem k tvrdosti materiálu konstatovat, že s rostoucí tvrdostí materiálu docházelo k poklesu rychlosti ultrazvukových vln. Podobného výsledku bylo dosaženo i u hodnot útlumu ultrazvukových vln, kde také s rostoucí tvrdostí materiálu docházelo k poklesu útlumu ultrazvukových vln s výjimkou materiálu č. 8 (ocel UIC 900A), u něhož byla naměřena největší hodnota útlumu. Nicméně je však tato hodnota útlumu blízká ostatním hodnotám naměřených u materiálů s perlitickou strukturou.

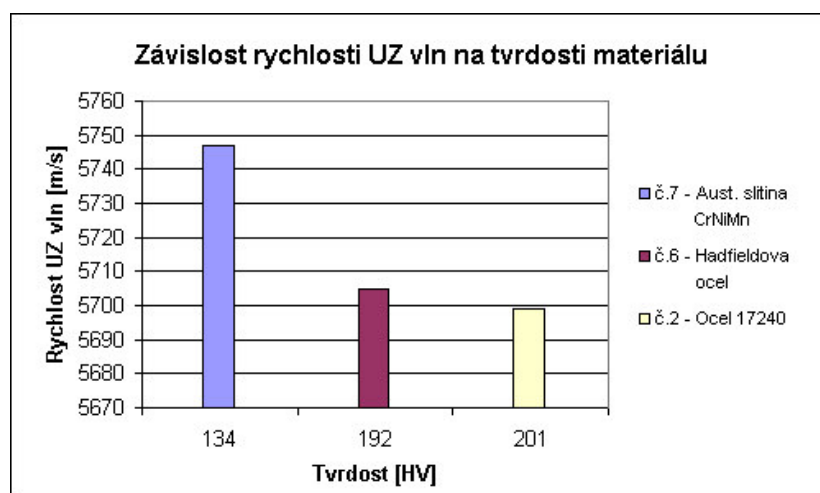


Graf 1 Závislost rychlosti UZ vln na tvrdosti materiálu u první skupiny materiálů

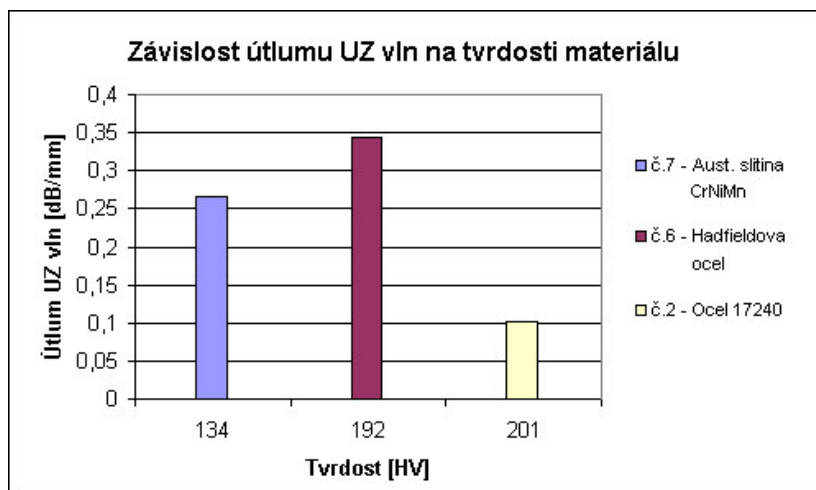


**Graf 2** Závislost útlumu UZ vln na tvrdosti materiálu u první skupiny materiálů

V rámci druhé skupiny materiálů lze stejně jako u první skupiny konstatovat, že podle naměřených hodnot docházelo k poklesu rychlosti ultrazvukových vln s rostoucí tvrdostí materiálu. Pokles hodnot útlumu ultrazvukových vln s rostoucí tvrdostí materiálu nastal u této skupiny s výjimkou materiálu č. 6 (Hadfieldova ocel), který měl podobnou tvrdost jako materiál č. 2 (ocel 17240), ale více jak trojnásobnou hodnotu útlumu. Hadfieldova ocel vykazovala největší hodnotu útlumu ze všech měřených struktur.



**Graf 3** Závislost rychlosti UZ vln na tvrdosti materiálu u druhé skupiny materiálů



Graf 4 Závislost útlumu UZ vln na tvrdosti materiálu u druhé skupiny materiálů

### 4.3 Porovnání vlivu změny tloušťky materiálu

Jak jsem již uvedl, bylo pro doplnění provedeno měření na stejných materiálech o větší tloušťce, abychom zjistili, jestli se nějakým způsobem projeví vliv změny tloušťky na měřené hodnoty. Jelikož se jednalo pouze o doplňkové měření uvádím zde pouze jeden materiál, a to materiál s největší tloušťkou. V tabulce 23 jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených hodnot.

Tabulka 23 Porovnání vlivu změny tloušťky materiálu

Materiál č. 4 – Hadfieldova ocel zpracovaná na bainit	Rychlost UZ vln [m/s]	Útlum UZ vln [dB/mm]
Tloušťka materiálu 9,46 mm	5879	0,017
Tloušťka materiálu 104,29 mm	5879	0,017

Jak vyplývá z tabulky 23, tak nedošlo změnou tloušťky materiálu ke změně rychlosti šíření ultrazvukových vln ani ke změně útlumu ultrazvukových vln. Na základě toho lze konstatovat, že se změna tloušťky materiálu do 100 mm neprojevila na naměřených hodnotách rychlosti a útlumu ultrazvukových vln. Z důvodu neprojevení výrazného vlivu tloušťky materiálů na naměřené hodnoty nebyla tato problematika dále podrobněji studována.

### **Dodatek k měření útlumu ultrazvukových vln**

Všechna měření byla prováděna s kontaktní akustickou vazbou. Při této vazbě je měřicí sonda přitlačována konstantní silou. Toho lze dosáhnout pouze za použití speciálních lepidel. To znamená, že aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, musí být měřicí sonda při každém měření přitlačovaná na povrch zkoušeného materiálu stejnou silou. Výsledek měření je tedy do určité míry ovlivněn měřícím pracovníkem a jeho zkušeností, což se mohlo projevit na mnou naměřených hodnotách útlumu. Další možnou příčinou nepřesností mohlo být použití méně kvalitního prostředí akustické vazby.

## 5 ZÁVĚR

V diplomové práci jsem se zabýval vlivem struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií. Jednalo se o porovnání různých struktur železných materiálů, tedy zjištění, jaký mají jednotlivé struktury vliv na zkoušení pomocí ultrazvukové zkušební metody. Konkrétně šlo o vliv struktury materiálu na rychlost šíření ultrazvukových vln a na jejich útlum.

Znalost rychlosti šíření ultrazvuku ve zkoušeném materiálu je důležitá z důvodu správné lokalizace vad a určení jejich přibližných rozměrů. Dále je znalost rychlosti šíření ultrazvuku důležitá při měření tloušťky materiálů pro kvalitní posouzení stavu mnohých zařízení vystavených koroznímu prostředí jako jsou například tlakové nádoby, potrubí apod. Znalost struktury materiálu a její útlum má význam pro zvolení optimální zkušební metody, měřicí sondy a nastavení ultrazvukového defektoskopu.

Pro dané základní fázové struktury byla stanovena rychlost šíření ultrazvukových vln a jejich útlum danou strukturou. Podle naměřených hodnot bylo zjištěno, že s rostoucí tvrdostí materiálu docházelo ke snižování rychlosti ultrazvukových vln a jejich útlumu, s výjimkou útlumu u oceli UIC 900A, která vykazovala největší hodnotu útlumu z materiálů s perlitickou základní fázovou strukturou. Nicméně však byla tato hodnota útlumu blízká ostatním hodnotám naměřených u materiálů s perlitickou strukturou, jenž byly vyhodnoceny společně s materiály s bainitickou a martenzitickou základní fázovou strukturou. U materiálů s austenitickou strukturou rovněž docházelo s rostoucí tvrdostí k poklesu rychlosti a útlumu ultrazvukových vln, s výjimkou útlumu u Hadfieldovy ocele.

Výsledkem je, že na základě znalosti základní fázové struktury a tvrdosti materiálu jsme schopni odhadnout rychlost šíření ultrazvukových vln a naopak.

Pro doplnění bylo provedeno měření na materiálech s větší tloušťkou, aby se zjistilo, jestli se nějak projeví větší tloušťka materiálu na naměřených hodnotách rychlosti ultrazvukových vln a jejich útlumu. Měřeny byly materiály do tloušťky přibližně 100 mm a žádné výrazné změny v rychlosti šíření ultrazvuku a ani v jeho útlumu jednotlivými materiály nebyly zaznamenány.

## 6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*. Brno : CERM, s.r.o. 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
- [2] REGAZZO, R., REGAZZOVÁ, M. *Ultrazvuk, základy ultrazvukové defektoskopie*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2013. 290 s. ISBN 978-80-7300-466-8
- [3] KOPEC, B. a kol. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno : CERM, 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [4] KREDL, M.; ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2006. 408 s. ISBN 80-7300-158-6
- [5] FORMAN, M. *Využití ultrazvukové defektoskopie v materiálovém inženýrství*. [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z WWW: <[http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/46541/2/FormanM\\_VyuzitiUltrazvukove\\_PS\\_2012.pdf](http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/46541/2/FormanM_VyuzitiUltrazvukove_PS_2012.pdf) >
- [6] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. Praha : VŠCHT, 2012. 190 s. ISBN 978-80-7080-568-8
- [7] MACHEK, V.; SODOMKA, J. *Nauka o materiálu - 1.část: Struktury kovových materiálů*. Praha : ČVUT, 2006. 177 s. ISBN 80-01-03379-1
- [8] LEJČEK, P.; NOVÁK, P. *Fyzika kovů*. [online]. Praha, 2008 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z WWW: <[http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/studijni\\_materialy/fyzika\\_kovu/fyzika\\_kovu.pdf](http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/studijni_materialy/fyzika_kovu/fyzika_kovu.pdf)>
- [9] SKOČOVSKÝ, P. a kol. *Náuka o materiálu*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1992. 208 s. ISBN 80-05-01018-4

- [10] GSCHEIDLE, R. a kol. *Příručka pro automechanika*. 2. vyd. Praha : Sobotáles, 2002. 640 s. ISBN 80-85920-83
- [11] STARMANS, Technická příručka a návod k obsluze univerzálního ultrazvukového defektoskopu DIO 562
- [12] KREIDL, M., ŠMÍD, R., MATZ, V., ŠTARMAN, S. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha : Starmans electronics s.r.o., 2011. 217 s. ISBN 978-80-254-6606-3
- [13] REGAZZO, R., REGAZZOVÁ, M., BARTULÍK, L. *Výklad k tabulce dat v „Datovém listu“ sond firmy Krautkrämer*. [online]. Zeleneč, 2013 [cit. 2014-10-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.testima.eu/4-128-soubory-ke-stazeni.html>>
- [14] ČAMBULA, J., ŠINDLER, D. *Zjišťování pevnosti výztuže tvrdoměrem Proceq*. [online]. Praha, 2008 [cit. 2014-10-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/2\\_1/Cambula\\_Jaroslav\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/2_1/Cambula_Jaroslav_CL.pdf)>