

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spol. strojů

## **Využití ultrazvuku v diagnostice**

bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Bohuslav Peterka, Ph.D.

Autor práce: Pavel Čermák

PRAHA 2015

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavel Čermák

Technika a technologie v dopravě a spojích

Název práce

**Využití ultrazvuku v diagnostice**

Anglický název

**The use of ultrasound in the diagnostics**

---

### Cíle práce

Cílem práce je provést formou literární rešerše rozbor problematiky v oblasti ultrazvukové nedestruktivní diagnostiky. Důraz bude kladen zejména na metody využívané v průmyslové praxi. Dalším dílčím cílem je práce je kontaktovat firmu pracující ve zkoumaném oboru a aktivně se zúčastnit praktického měření, jehož průběh bude zdokumentován a okomentován v rámci předložené práce.

### Metodika

Student vyhledá odbornou literaturu a související informační zdroje k tématu práce. Student zpracuje literární rešerši, v které zmapuje současný stav poznání v oblasti zadané problematiky. Dále se student seznámí s pokyny Technické fakulty pro vypracování a odevzdání bakalářské práce. Student bude pracovat systematicky a průběžné výsledky bude konzultovat s vedoucím práce. Student vypracuje čístopis práce a ten v řádném termínu odevzdá na sekretariátu katedry.

**Rozsah textové části**

40-50 stran

**Klíčová slova**

diagnostika, nedestruktivní zkoušení, poškození, ultrazvuk

---

**Doporučené zdroje informací**

BROŽEK, M.: Strojírenská technologie I (návody na cvičení). PRAHA: ČZU, 2008. ISBN 978-80-213-1780-2.  
Kopecký B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, Brno, 2009. 572 s. ISBN 978 8 7204-591 4.

Kreidl, Marcel; Šmíd, Radislav. Technická diagnostika : senzory – metody – analýza signálu. null. Praha : BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.



---

**Vedoucí práce**

Ing. Bohuslav Peterka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 7. 12. 2013

**doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan TF ČZU

V Praze dne 28. 11. 2014

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Bohuslava Peterky, Ph.D.. Ve své práci jsem použil pouze citovanou literaturu a zdroje uvedené v bibliografii.

Podpis:.....

**Poděkování:** Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Bohuslavu Peterkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení prací. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Richardu Regazzovi, CSc. za čas, který mi věnoval pro přiblížení problematiky týkající se ultrazvukové defektoskopie, ukázky praktického měření a za poskytnutí materiálů, které jsem mohl využít ve své bakalářské práci.

## **Využití ultrazvuku v diagnostice**

**Abstrakt:** V této práci jsou popsány základní a nejpoužívanější metody využívané v nedestruktivní defektoskopii materiálů. Ve druhé kapitole jsou tyto metody stručně popsány s výjimkou metody ultrazvuku, která je popsána v samostatné kapitole. Kapitola číslo čtyři popisuje praktické měření zkoumaných předmětů pomocí ultrazvukové defektoskopie. Závěr práce popisuje rozdíly metody ultrazvuku s ostatními metodami.

## **The use of ultrasounds in the diagnostic**

**Abstract:** This bachelor thesis illustrates the basic and most used methods applied in non-destructive testing of materials. The second chapter focuses on these methods and are briefly described with the exception of the ultrasound method, which is described in a separate chapter. The fourth chapter outlines the practical measurements of the examined subjects using ultrasonic testing. The conclusion of this thesis distinguishes the difference between ultrasound methods with that of several other procedures.

**Key words:** diagnostics, non-destructive testing, damage, ultrasound

## Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Základní rozdělení a podstata klasických NDT .....	2
2.1	Zkoušení vizuální metodou.....	2
2.2	Zkoušení kapilární metodou .....	3
2.3	Zkoušení magnetickou práškovou metodou .....	4
2.4	Zkoušení vířivými proudy .....	5
2.5	Zkoušení radiografické .....	7
3.	Zkoušení ultrazvukem .....	9
3.1	Základní pojmy.....	9
3.1.1	Frekvence .....	9
3.1.2	Vlnová délka a impuls.....	9
3.1.3	Kmitání tlumené a netlumené .....	9
3.2	Dělení zvuku dle frekvence kmitání .....	10
3.3	Směr kmitání a vlnoplocha .....	10
3.4	Rychlost šíření ultrazvuku .....	12
3.5	Vazba a akustické rozhraní.....	12
3.6	Akustické rozhraní a odraz lomu .....	13
3.7	Útlum ultrazvuku .....	15
3.8	Ultrazvukové sondy .....	15
3.8.1	Kontaktní a inertní sondy .....	15
3.8.2	Sondy podélných, příčných a povrchových vln .....	18
3.8.3	Jednoměničové, dvouměničové a víceměničové sondy .....	19
3.8.4	Alpha, Delta, Gamma sondy .....	19
3.9	Ultrazvukové přístroje .....	21
3.10	Základy zkoušení ultrazvukem .....	22
3.10.1	Vazba akustická.....	22

3.10.2 Nastavení rozsahu časové základny .....	23
3.10.2. Měření útlumu a rychlosti .....	26
3.10.3 Určení náhradní velikosti vady .....	27
3.10.4 Stanovení velikosti a typu vady .....	27
3.11 Zjistitelnost vad .....	28
3.11.1 Zjistitelnost plošných vad v závislosti na šířce vady a médiu ve vadě .....	29
3.11.2 Zjistitelnost vad v závislosti na odstupu vadového echa od šumu .....	30
3.11.3 Poloha vady .....	32
3.12 Využívané metody .....	32
3.13 Metoda průchodová .....	32
3.14 Metoda odrazová .....	33
3.14.1 Impulsní odrazová zkouška .....	34
3.15 Metoda rezonanční .....	34
3.16 Zobrazení vad – A, B, C .....	35
3.16.1 Zobrazení A .....	35
3.16.2 Zobrazení B .....	36
3.16.3 Zobrazení C .....	36
3.17 Současnost .....	38
4. Firma .....	39
4.1 Zkoušení v praxi .....	41
4.1.1 Kontrola velkých ventilů .....	41
4.1.2 Kontrola odlitku .....	45
5. Závěr .....	49
Seznam citované literatury .....	50
Seznam použitých obrázků .....	52



## 1. Úvod

Nedestruktivní zkoušky materiálů (dále jen NDT – non destructive testing) jsou metody, při kterých se zkoumají vlastnosti polotovarů, výrobků a také součástí pracujících dlouhodobě v provozu. Při zkoušení materiálů, jak už z názvu napovídá, nedojde k jeho porušení. A tím pádem lze kontrolovat veškeré výrobky a dále je využívat, na rozdíl od destruktivních zkoušek, kde se z polotovaru či výrobku musí vyrobít zkoušený materiál a tím pádem je již dále v provozu nepoužitelný a také nedává jistotu, že ostatní výrobky budou bez poruchy.

NDT nezajišťují společně jen ekonomické výhody, ale chrání a minimalizují rizika vzniku tragických nehod např. v letectví, železniční dopravě, u mostů nebo tažných lan lyžařských vleků.

Obvykle lze NDT rozdělit podle výskytu vady, a to na metody zjišťující podpovrchové (vnitřní) vady a na metody zjišťující povrchové vady. Pro tyto metody se obvykle využívá šest základních metod NDT. Všechny tyto metody jsou založeny na různých fyzikálních vlastnostech a využívají specifické vlastnosti zkoušených materiálů. Každá z metod je různě náročná na vybavení zkušeben a na kvalifikaci pracovníků. Při zkouškách není uznáván jen jeden platný postup. Ten se volí podle situace a dostupných prostředků.

NDT zkouškami se v naší historii zabývali velké osobnosti své doby (Newton, Maxwell, Faraday, Foucault, Rentgen, Einstein a další.), kteří tím dali základy dnes používaným metodám. Všechny metody se dále rozvíjely v závislosti s vývojem nových technických možností.

V textu budou krátce popsány všechny základní metody NDT. Dále bude podrobněji popsána NDT ultrazvukem a v poslední části práce praktické měření pomocí ultrazvukové metody. Jednotlivé metody budou doprovázeny obrázky k lepšímu pochopení principu metod. U zkoušky ultrazvukem budou porovnány výhody a nevýhody jejího použití, popsány a porovnány jednotlivé přístroje. A také vysvětleno užívání ultrazvukové zkoušky v praxi.

V závěru se pokusím shrnout základní problematiku NDT a jednotlivé metody.

## 2. Základní rozdělení a podstata klasických NDT

Základní rozdělení nedestructivních zkoušek je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1 - Rozdělení NDT

### 2.1 Zkoušení vizuální metodou

Vizuální metoda se provádí podle norem ČSN EN 1330-10 (ČSN 01 50005), ČSN EN 13018 (ČSN 01 5037), ČSN 05 1180 a některých dalších.

Jde o nejjednodušší defektoskopickou kontrolu, která se využívá ve strojírenské výrobě. Může se použít samostatně nebo jako součást jiných metod. Vizuálně se vyhodnocují výsledky kontroly provedené např. metodou ultrazvuku, vířivými proudy nebo magnetickou metodou práškovou. Při měření lze užít pomůcek, např. lupa, svítilna, fibroskop, inspekční zrcátko, multifunkční měrka pro svářeče, nůž na mřížku, porovnávací měrka drsnosti apod.

Typická ukázka jejího přímého použití je kontrola svarů, provedená ihned po sváření konstrukce samotným svářečem. Přitom kontroluje vzhled strusky, její pravidelnost, vzhled (provaření) kořenu svaru apod. Jiným příkladem použití vizuální metody v praxi může být kontrola provedená svářečem bezprostředně po vyjmutí odlitku z formy. V těchto případech nejsou k jejímu provedení třeba žádné pomůcky ani žádná zařízení. [1]



Obr. 2 - Vada studená trhlina [2]

## 2.2 Zkoušení kapilární metodou

Zkoušení kapilárními metodami vychází z norem ČSN EN ISO 12 706 (ČSN 01 5005), ČSN 01 5016, ČSN EN 571-1 (ČSN EN ISO 3452-2 (ČSN 01 5018) a dalších.

Kapilární metoda je používána pro zjišťování povrchových otevřených trhlin a necelistvostí různých tvarů a trhlin. Tuto metodu nelze použít u materiálů, které jsou pórovité a materiálů, které by se narušovali kapilárními přípravky (některé plasty). Kapilární zkoušku lze provádět u kovových, ale i nekovových materiálů.

- a) kovové materiály (lehké kovy, slitiny lehkých kovů, astenické oceli, barevné, aj.). Materiály mohou být i feromagnetické, ale u těchto materiálů je lepší využít magnetickou práškovou zkoušku.
- b) nekovové materiály (guma, sklo, plasty, keramika, aj.)

Fyzikální princip kapilární metody je založen na povrchovém napětí vlivem sdružených (kohezních) sil u stěn nádoby. [3]

Kapilární metody jsou založeny na využití charakteristických vlastností kapaliny, které jsou označovány jako kapilární jevy. Nejdůležitější z těchto jevů je povrchové napětí, viskozita, krajový úhel, kapilární elevace a kapilární tlak. Princip metody spočívá ve využití sočivosti a vzlínivosti vhodných kapalin (penetrantů), jejich barevnosti a fluorescence. [4]

Postup zkoušení kapilární metodou je složena z pěti bodů.

1. Příprava povrchu – očištění a odmaštění,
2. Nanesení detekční kapaliny,
3. Odstranění přebytečné detekční kapaliny,
4. Nanesení vývojky,
5. Indikace vady vyhodnocení výsledku zkoušky.



Obr. 3 - Postup zkoušení kapilární metodou

### 2.3 Zkoušení magnetickou práškovou metodou

Zkoušení materiálů a výrobků magnetickou práškovou metodou vychází z norem ČSN 01 5015, ČSN EN 10228-1, ČSN EN ISO 9934-1, ČSN EN ISO 9934-2 a ČSN EN ISO 9934-3.

Patří mezi nejpoužívanější povrchové metody – je používána na zjišťování povrchových a těsně podpovrchových vad (do maximální hloubky 5 mm). Lze ji ale použít výhradně na feromagnetických materiálech.

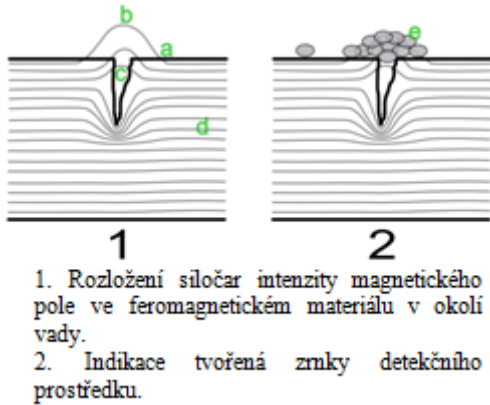
Na povrch předmětu je nanesen feromagnetický prášek. Při zmagnetizování kontrolovaného předmětu je v místě necelistvosti magnetické pole deformováno a vytváří tzv. rozptylové magnetické pole. Toto pole je schopno přitahovat částice detekčního prášku a tím vznikne indikace místa necelistvosti zkoumaného předmětu.

Detekční prášek se na povrch předmětu nanáší dvěma základními způsoby a to suchým nebo mokřým. Při suchém způsobu se detekční prášek na povrch předmětu naprašuje, u mokřého způsobu se nanáší poléváním. Detekční prášek je buďto barevný nebo fluorescenční a pro identifikaci se používá UV světlo.

Zkoušený předmět lze zmagnetizovat podélně, příčně nebo kombinovaně. [1]

Výhody: metoda je citlivá na malé necelistvosti, měřící zařízení může být přenosné, možnost využití v automatických linkách.

Nevýhody: omezení na povrchové a těsně podpovrchové defekty je možno užít jen na feromagnetické materiály, citlivost je závislá na orientaci magnetického pole vůči necelistvosti, povrch předmětu nesmí být hrubý.



Obr. 5 - Působení siločar [5]



Obr. 4 -Ruční elektromagnet [5]

## 2.4 Zkoušení vířivými proudy

Metoda vířivých proudů je spolu metodou ultrazvuku řazena mezi nejpoužívanější NDT zkoušky. Především se používá ve velkých provozovnách, kde jsou časté kontroly v krátkých časových intervalech.

Tato metoda se používá pro:

- Zjišťování vad v materiálu např. trhlin, přeložek, povrchových prasklin, poruch svarů apod.,
- Měření tloušťky stěn, tloušťky laků,
- Vodivosti materiálu,
- Kontrola povrchových vrstev kovů,
- Kontrola změn materiálu, mechanického napětí.

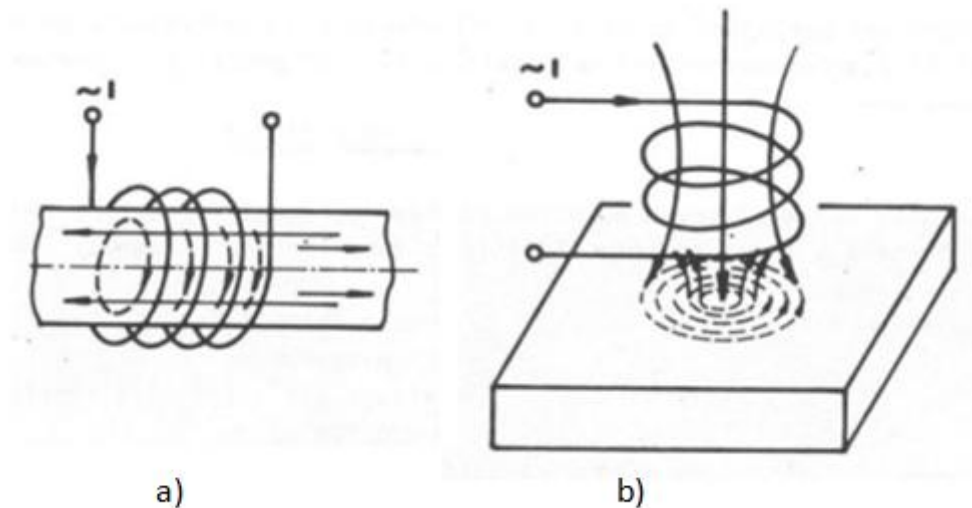
Výhodou této metody je relativně nízká cena s porovnáním např. metodou prozařování. Před provedením zkoušky není potřeba upravovat povrch kontrolovaného předmětu. Využívá poměrně lehkých přenosných měřicích přístrojů, lze ji také zautomatizovat. Patří mezi bezkontaktní metody a umožňuje kontrolu při vysokých teplotách (kontrola za tepla válcovaných materiálů).

Nevýhodou je, že nelze zjistit vady hluboko pod povrchem a také záleží na rozměrech předmětu. [6]

„Střídavé pole snímače indukuje v materiálu vířivé proudy. Dle Lenzova zákona pole vířivých proudů působí proti poli původnímu. Výsledné pole je dáno vektorovým součtem obou polí. Koncový bod výsledného vektoru je zobrazován ve fázové rovině na displeji přístroje. Trhlina na povrchu, kolmo k toku vířivých proudů nejvíce ovlivňuje výsledné pole. Ve fázové rovině měřicího přístroje je koncový bod výsledného vektoru maximálně vzdálen od počátku souřadnic.“ [7]

Metodu vířivých proudů rozlišujeme na dva typy:

- Metodu s průchozí cívkou: Kontrolovaný předmět prochází dvojitým vinutím magnetizačním a měřicím. Primární magnetizační vinutí je napájeno střídavým proudem, vytvářejícím střídavé magnetické pole. [6]
- Metoda s příložnou cívkou: Cívka napájena střídavým proudem se radiálně přikládá na povrch zkoušeného materiálu. Magnetické pole od vířivých proudů zpětně ovlivňuje vlastnosti přiložené cívky – způsobuje změnu její impedance. [6]

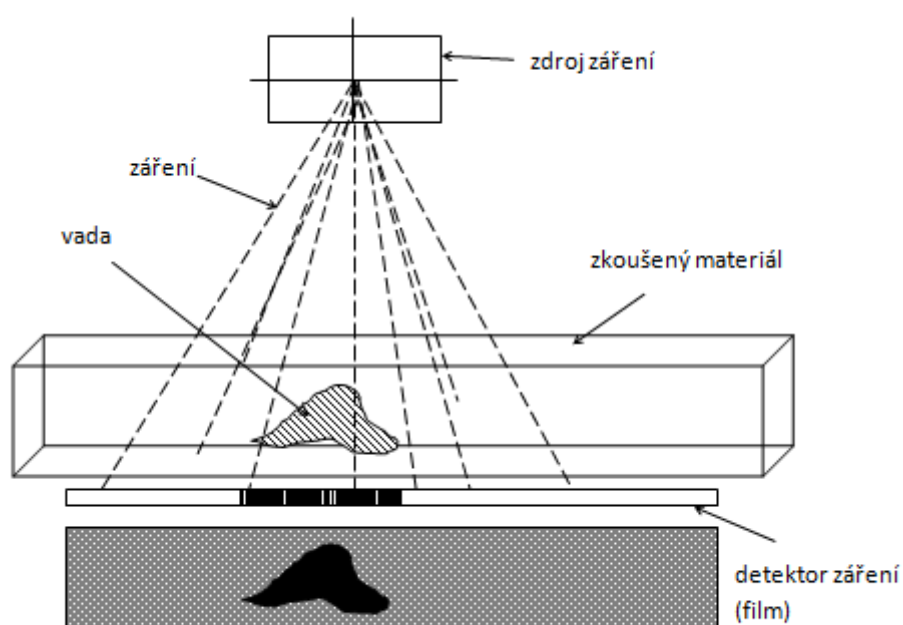


Obr. 6 - Metody vířivých proudů a) s průchozí cívkou, b) s příložnou cívkou

## 2.5 Zkoušení radiografické

Radiologie je vědní obor, který se zabývá výzkumem a využitím ionizujících záření. „To je elektromagnetické záření, při kterém se neutrální atom nebo molekula rozděluje na kladně nabitý ion a jeden nebo více elektronů neboli dochází k ionizaci.“ Obvykle se jedná o radioaktivní záření. [8]

Základem této zkoušky je změna hustoty toku částic prošlého zkoušeným předmětem mezi místem s vadou a místem bez vady. Tento rozdíl bude tím větší, čím větší bude poměr velikosti vady k prozařované tloušťce ve směru záření a čím větší bude rozdíl lineárního koeficientu zeslabení vady a zkoušeného materiálu. [4]



Obr. 7 - Základní schéma zkoušky radiografické

Druhy záření:

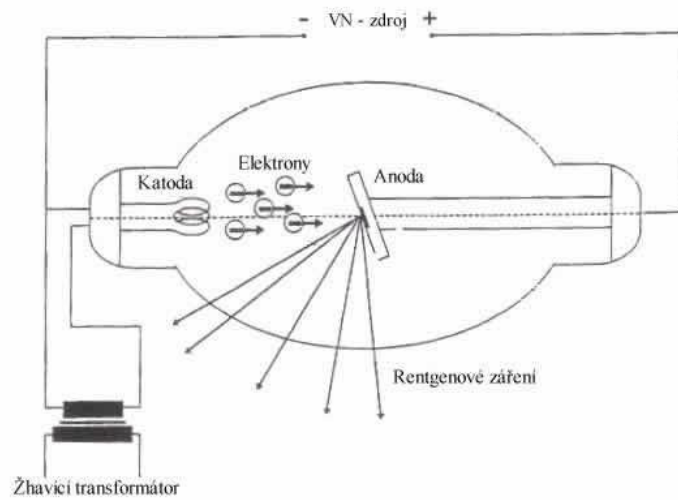
Pojem záření znamená šíření energie prostorem, na který není vázáno, a záření tedy může procházet prázdným i hmotným prostorem. Nositelem zářivé energie mohou být hmotné částice nabitě nebo nenabitě. Pokud nositelem nejsou hmotné částice, jedná se o zářivé vlnění. Záření se vyskytuje v přírodě bez lidského zásahu nebo je vyrobeno uměle např. rentgen. [4]

- Záření rentgenové (X): Elektromagnetické záření složené z brzdného a popřípadě i z charakteristického záření. Vzniká zejména v rentgence při dopadu urychlených

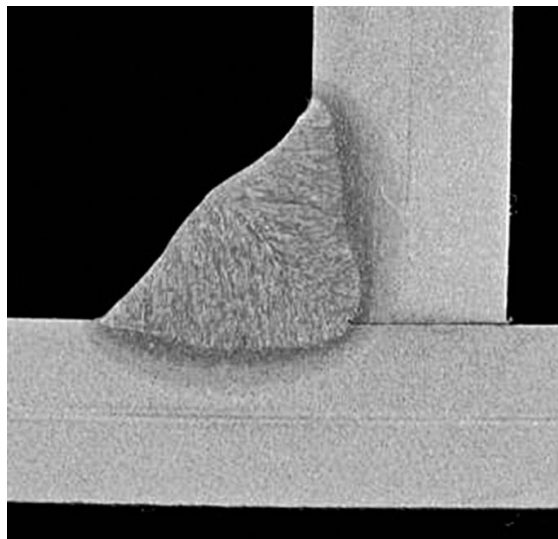
elektronů na látkovou překážku. Používá se v rozmezí vlnových délek od  $10^{-14}$  m do  $10^{-9}$  m. [4] [8]

- Záření gama ( $\gamma$ ): Krátkovlnné fotonové záření, vznikající většinou při přechodu atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího. Používá se v rozmezí vlnových délek od  $5 \cdot 10^{-13}$  m do  $10^{-10}$  m. [6] [8]

Zdrojem rentgenového záření je tak zvaný rentgenek (Coolidgeových trubice). Jedná se o skleněnou vakuovou trubicí, která obsahuje žhavenou katodu a wolframovou anodu. [9]



Obr. 8 - Rentgenka [9]



Obr. 9 - Koutový svar nelegovaného materiálu [10]



### 3. Zkoušení ultrazvukem

Ultrazvuk lze definovat jako: „Mechanické kmitání částic prostředí s frekvencí vyšší než 20 kHz.“  
Z této definice lze vyvodit, že se zvuk nešíří ve vakuu. [11]

#### 3.1 Základní pojmy

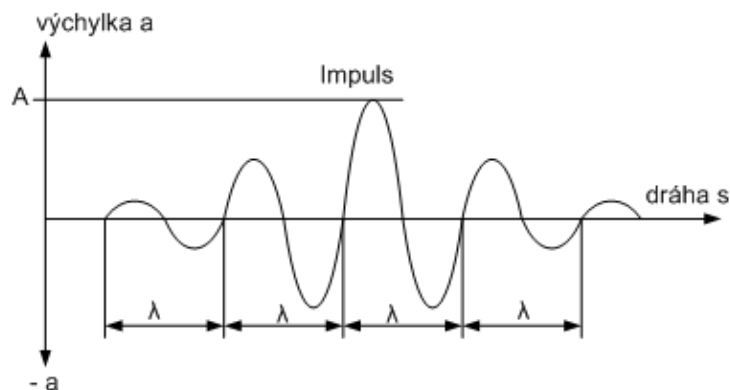
##### 3.1.1 Frekvence

Je převrácená hodnota periody  $T$ . Tedy doby, za kterou se okamžité hodnoty opakují. [4]

##### 3.1.2 Vlnová délka a impuls

„Době jednoho kmitu odpovídá dráha ultrazvuku, která je rovna jedné vlnové délce  $\lambda$ , tím přecházíme ze sekund na mm, neboť v praxi nás nezajímá doba kmitu v  $\mu\text{s}$ , ale vlnová délka v mm.“ [11]

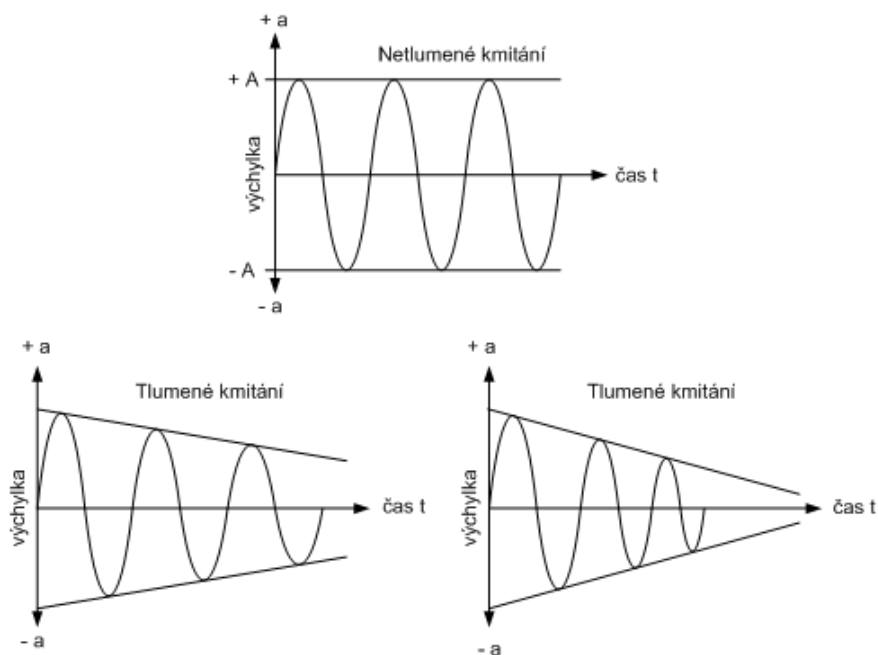
V ultrazvukové defektoskopii se impulsem nazývají takové kmity, které jsou buzené měničem. Impuls tvoří jeden nebo několik kmitů, které mají stejnou dobu kmitu.



Obr. 10 - Vlnová délka a impuls [11]

##### 3.1.3 Kmitání tlumené a netlumené

Výchylka z rovnovážné polohy je základem každého kmitu. Pro překonání odporu prostředí se musí u netlumeného kmitání dodávat energie, která je tímto prostředím spotřebovaná. U netlumených kmitů je výchylka konstantní. Maximální výchylku  $A$  nazýváme amplituda nebo výkmit. Pokud se nedodá energie tak se kmity šíří jako tlumené. Při tlumeném kmitání klesá s časem jenom výchylka anebo výchylka a doba kmitu  $T$ . [11]



Obr. 11 - Netlumené a tlumené kmity [11]

### 3.2 Dělení zvuku dle frekvence kmitání

- Infrazvuk je pod frekvencí 20 Hz,
- Zvuk je mezi frekvencí 20 Hz a 20 kHz,
- Ultrazvuk je nad frekvencí 20 kHz,
- Hyperzvuk je na frekvenci 100 MHz.

### 3.3 Směr kmitání a vlnoplocha

Ultrazvukové vlny se dělí podle:

a) tvaru vlnoplochy,

b) směru kmitání částic prostředí vzhledem k směru šíření vlny. [11]

## **Dělení podle tvaru vlnoplochy**

Vlnoplochy dělíme vlny na kulové, válcové a rovinné.

- Kmitající bod vybudí kulovou vlnu,
- Kmitající válec vybudí válcovou plochu,
- Kmitající deska vybudí rovinou plochu.

**Dále se dá dělit dle směru kmitání částic prostředí vzhledem ke směru šíření vlny.**

Dle toho vlny dělíme na:

- Podélné,
- Příčné,
- Povrchové,
- Deskové. [12]

### **Vlny Podélné**

Ve směru vln kmitají částice prostředí. Tyto vlny se šíří v tuhém, kapalném i plynném prostředí a jsou nejrychlejší. [11]

### **Vlny příčné**

Kolmo ke směru šíření vln kmitají částice prostředí. Tyto vlny se šíří pouze v tuhém prostředí a jsou pomalejší. Předmět, ve kterém se příčná vlna šíří musí mít modul pružnosti ve smyku nulový ( $G \neq 0$ ), protože nesmí přenášet smykové napětí. Vlny jsou polarizované, to znamená, že se šíří v rovině. Tuto rovinu tvoří směr kmitání částic prostředí a osa ultrazvukové vlny. Klasické příčné vlny mají tuto rovinu kolmou k povrchu. [11]

### **Vlny povrchové**

Podélná vlna působí na částice ve směru šíření vlny a příčná vlna ve směru kolmém, proto je výsledný pohyb částic prostředí eliptický v rovině kolmé k povrchu. Rychlost šíření těchto vln je  $c_R = (0,92 \text{ až } 0,94) * c_T$  a jsou pomalejší než příčné vlny. [11]

## Vlny deskové

U deskových vln rozlišujeme dva typy:

- Symetrické,
- Nesymetrické.

Celým průřezem materiálu se šíří vlny, proto minimálně jeden z rozměrů prozvučovaného materiálu musí být shodný s vlnovou délkou, „např. u plechů je to tloušťka plechu nebo u tyčoviny je to průměr tyče.“ [11] V rozsahu frekvencí používaných v defektoskopii mají rychlost šíření proměnlivou. Tato rychlost závisí na součinu frekvence  $f$  a tloušťky desky  $d$  a součinu  $f$  a průměru tyče  $d$  u tyčoviny. Náležící rychlost šíření se určí z nonogramů podle hodnoty  $f \cdot d$  a typu vlny. [11]

### **3.4 Rychlost šíření ultrazvuku**

Rychlost šíření ultrazvuku v tuhých látkách závisí na modulu pružnosti ( $E$  = modul pružnosti v tahu a  $G$  = modul pružnosti ve smyku), Poissonově čísle ( $\mu$ ) a měrné hmotnosti ( $\rho$ ). Pro daný materiál a druh vlnění je rychlost šíření vln konstantní.

V kapalných látkách se může šířit pouze podélná vlna a její rychlost je závislá na koeficientu adiabatické stlačitelnosti kapaliny, měrné hmotnosti kapaliny a případně i na teple. [6]

### **3.5 Vazba a akustické rozhraní**

Prostor mezi sondou a zkoušeným materiálem se nazývá akustické prostředí.

Dle vzdálenosti sond od zkoušeného předmětu se zkoušení rozlišuje:

- S kontaktní vazbou,
- S mezerovou vazbou,
- S imerzní vazbou.

#### Kontaktní vazba

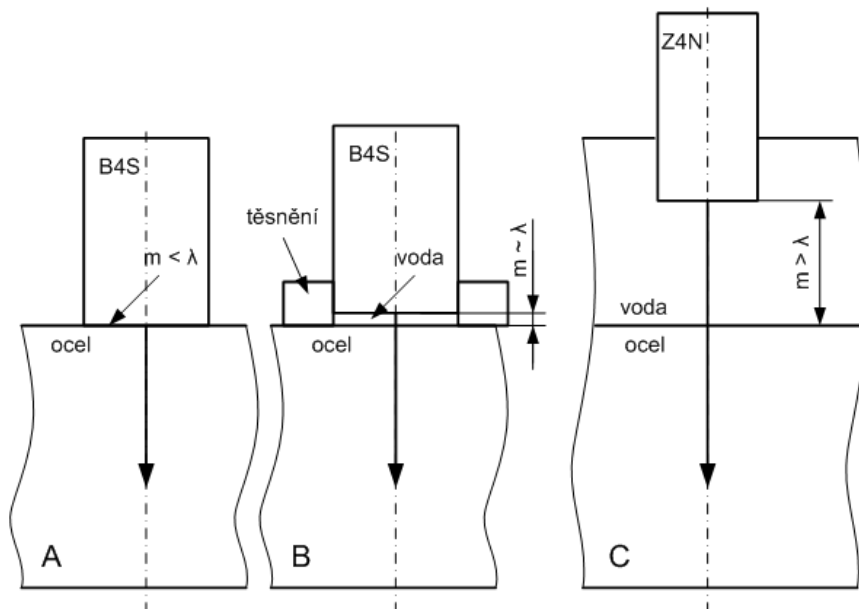
S povrchem zkoušeného materiálu je sonda v přímém kontaktu. Vzdálenost sondy a zkoušeného povrchu je menší než vlnová délka ve vazebním prostředí ( $m < \lambda$ ). [11]

### Mezerová vazba

Mezi povrchem zkoušeného materiálu a sondou je malá vzdálenost, která je vyplněna vazebním prostředkem (olej, voda, Apeko apod.). Vzdálenost zkoušeného povrchu od sondy je zhruba rovna vlnové délce ve vazebním prostředku ( $m \approx \lambda$ ) nebo u sond s vyšší frekvencí je rovna násobku vlnové délky, řesně násobku  $\lambda_L/2$ . [11]

### Imerzní vazba

Mezi sondou a zkušebním povrchem je větší vzdálenost zhruba od 10 mm výše vyplněná vazebním prostředkem (olej, voda), to znamená výrazně větší než je vlnová délka podélných vln v řídkém oleji nebo ve vodě ( $m \gg \lambda$ ). [11]



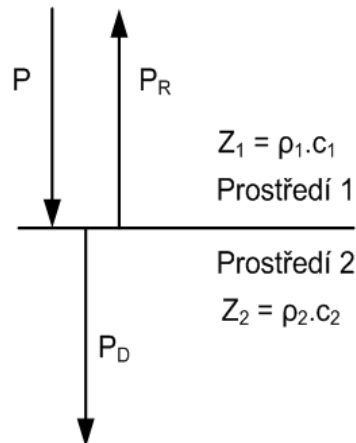
Obr. 12 - Akustické rozhraní [11]

### **3.6 Akustické rozhraní a odraz lomu**

Rozhraní dvou materiálů, přes které se šíří ultrazvukové vlny se nazývá akustické rozhraní. V tomto rozhraní vzniká odraz, obecně lom a transformace. K odrazu a lomu dochází pouze tehdy, je-li velikost rozhraní nebo překážky větší než je vlnová délka vlnění. Podle toho pod jakým úhlem dopadne ultrazvuk na rozhraní, v defektoskopii rozlišujeme dopad na šikmý nebo kolmý. [11] [13]

## Dopad kolmý

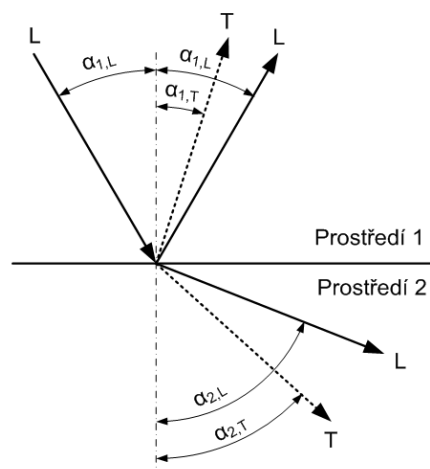
Pokud ultrazvukové vlny dopadnou na rozhraní kolmo tak nastává, na tomto rozhraní dvou prostředí průchod rozhraním a odraz. Akustický tlak  $P$ , který dopadá, se rozkládá na odražený tlak  $P_R$  a prošlý  $P_D$ . Velikost poměru mezi  $P_R$  a  $P_D$  závisí na akustických vlnových odporech obou prostředí. [11]



Obr. 13 - Kolmý dopad na rozhraní [11]

## Dopad šikmý

Pokud ultrazvukové vlny dopadnou na rozhraní šikmo, tak nastává obecně na rozhraní dvou prostředí lom, odraz a transformace. Vše závisí na rychlosti, kterou se šíří vlny v obou prostředích, která tvoří toto rozhraní a pod jakým úhlem dopadnou ultrazvukové vlny. [11]



Obr. 14 - Šikmý dopad na rozhraní [11]

### 3.7 Útlum ultrazvuku

Průchodem ultrazvukových vln prostředím, je jím v závislosti na akustických vlastnostech tohoto prostředí zeslabována. [4]

Útlum rozlišujeme:

- Absorpcí a rozptylem,
- Absorpcí,
- Rozptylem.

Především v závislosti na jmenovité frekvenci sondy se rozhoduje, zda bude rozhodující složka útlum rozptylem nebo absorpcí. U vysokofrekvenčních sond bude rozhodující složkou rozptyl a u nízkofrekvenčních sond bude naopak rozhodující složkou absorpce. [11]

### 3.8 Ultrazvukové sondy

U ultrazvukové metody jsou sondy se používají sondy piezoelektrickými měniči. Ultrazvukové sondy se ve spojení s ultrazvukovými defektoskopy používají pro vysílání a přijímání ultrazvukových vln. Podle účelu použití se rozlišuje mnoho typů ultrazvukových sond a defektoskopů. [12]

#### 3.8.1 Kontaktní a inertní sondy

##### Kontaktní sondy

Kontaktní sondy jsou sondy, které se přímo přikládají na povrch zkoušeného předmětu. Aby nedocházelo k opotřebením sond, sondy jsou vybaveny pod měničem ochrannou folií nebo destičkou z materiálu odolávajícího opotřebením. Tyto prostředky se využívají, protože zkoušený materiál bývá drsný a měnič by se mohl brzy poškodit.

Jelikož u ultrazvuku dochází k jeho útlumu ihned při kontaktu se vzduchem, je mezi povrchem zkoušeného předmětu a sondou vazební prostředek. Tento prostředek může být olej, voda, vazelíny, Apeko, aj.. Pokud se použijí přímé sondy příčných vln, nedá se použít běžný vazební prostředek. Musí se použít speciální, který přenáší smyková napětí (např. sondy a defektoskopů). [11]



Obr. 15 – Sonda K2G [14]



Obr. 16 – B2S [14]

**Sonda K2G o průměru  $D = 24\text{mm}$ :**

K..G - Sonda je vhodná pro testování malých, středních a velkých objektů z různých druhů materiálů (např. ocel, kov, sklo, porcelán keramika).

2 – sonda má frekvenci 2 MHz. [14]

**Sonda B2S o průměru  $D = 24\text{ mm}$ :**

B..S - Jedná se o velmi úzkou toleranční sérii sond s nejvyšší přesností pro většinu existujících testovacích úloh (testování desek, tyčí, čtvercových profilů a také pro testování nádob a strojních součástí, jako jsou šrouby, lahvi) a také pro malé tvarové díly (např. ocel, kov, sklo, porcelán keramika).

2 – sonda má frekvenci 2 MHz. [14]



Obr. 17 – SEB4 [14]



### **Sonda SEB4 o průměru D = 24 mm:**

SEB – Standardní dvojitá sonda pro detekci základních chyb v ingotech, nápravách a hřídelích. Často se používá k detekci malých vad v rámci omezených vad v rozmezích délek středních a velkých objektů.

4 - sonda má frekvenci 4 MHz. [14]



Obr. 18 – Úhlové sondy SIUI [15]

### **Úhlové sondy SIUI:**

Úhlové sondy se vyrábějí v mnoha provedeních (např. měnič 8x9 mm, 14x14 mm, 20x22 mm) a základními úhly 45°, 60°, 70° a 90°.

Frekvence sond jsou 2 MHz a 4 MHz. [15]

### **Sondy imerzní**

Imerzní sondy se využívají pro bezkontaktní zkoušení. To znamená, že mezi povrchem zkoušeného předmětu a sondou je vrstva vazebního prostředku. Nejběžnějším vazebním prostředkem je voda nebo řídký olej. Imerzní sondy nemají proti opotřebení chráněný měnič, jako kontaktní sondy, ale jsou chráněny proti vniku vazebního prostředku. V případě že se tyto sondy použijí místo kontaktních sond, budou zakrátko zničeny. [11]



Obr. 19 – Z4N [14]



Obr. 20 - Imerzní sondy firmy Sonatest [16]

### **Z4N o průměru D = 20 mm:**

Z..N - Sondy vyhrazené pro testování malých až středně velkých objektů, které mají zvýšenou zvukovým útlumem bez velkých nároků na rozlišení.

4 – Frekvence sondy 4 MHz. [14]

### **Imerzní sondy firmy Sonatest:**

Imerzní sondy firmy Sonatest používají sondy o velikostech měniče 5 mm, 10 mm, 15 mm a 25 mm. Měníče se vyrábějí z metaniobátu olova, vysoce tlumené nebo středně tlumené.

Frekvence sond je 2,25 MHz, 5 MHz, 10 MHz a 15 MHz. [16]

## **3.8.2 Sondy podélných, příčných a povrchových vln**

### **Sondy přímé**

Sondy přímé jsou nejčastěji používané a také nejvýkonnější.

Ultrazvuk je vysílán sondami kolmo do zkoušeného objektu. Podélné vlny jsou vysílány měničem, tyto vlny se šíří do zkoušeného objektu po průchodu rozhraním. Přímé sondy se používají jen pro měření útlumu příčných vln nebo měření rychlosti ve zkoumaném materiálu. Pomocí rychlostí šíření příčných a podélných vln a měrné hmotnosti je možné výpočtem určit pružnostní konstanty materiálu, úhly lomu aj. [11] [12]

### **Úhlové sondy příčných vln**

Sondy úhlové vysílají ultrazvuk pod určitým úhlem, to znamená, že se tyto sondy využívají pro zkoušení materiálu šikmým svazkem. Měníčem jsou vysílány podélné vlny, které se přemění na příčné vlny po průchodu rozhraním. Příčné vlny se dále šíří do zkoušeného předmětu. Klasické úhlové sondy lze použít pouze v určitých mezích úhlů dopadu. [11]

### **Úhlové sondy podélných vln**

Pro materiály, které nejsou lehce prozvučitelné, jako např. austenit, šedá litina, plasty, aj., se používají i úhlové sondy podélných vln. Protože tyto sondy vysílají do zkoušeného materiálu podélné i příčné vlny. Úhlové sondy podélných vln lze také použít pouze v určitých mezích úhlů dopadu. [11]

### **Sondy Rayleigho povrchových vln**

Tyto sondy patří do kategorie úhlových sond. Jelikož mají úhel lomu  $90^\circ$  tak se nazývají „sondy povrchových vln“. Vysíláním ultrazvukových podélných vln do rozhraní pod mezními úhly se tyto vlny vybudí. [11]

### **3.8.3 Jednoměničové, dvouměničové a víceměničové sondy**

#### **Jednoměničové sondy**

Tyto sondy mají pouze jeden měnič. Měnič slouží k vysílání ultrazvuku do zkoušeného materiálu a také pro příjem odražených ultrazvukových vln od vad nebo opačného povrchu. [11]

#### **Dvouměničové sondy (dvojité)**

Tyto sondy se nazývají také dvojité. Jak už z názvu napovídá, sondy mají dva měniče. První měnič slouží k vysílání ultrazvuku do zkoušeného předmětu a druhý měnič slouží pro příjem odražených ultrazvukových vln od vad nebo opačného povrchu. [11]

#### **Víceměničové sondy**

Sondy mají více měničů (např. 8, 16, 32,...). Tyto měniče slouží také k vysílání ultrazvuku do zkoušeného materiálu a také pro příjem odražených ultrazvukových vln od vad nebo opačného povrchu. Pro metodu Phased array jsou používány v lékařství a nyní se využívají i v materiálové defektoskopii. [11]

### **3.8.4 Alpha, Delta, Gamma sondy**

Sondy se dělí na Alpha, Delta a Gamma podle toho jestli jsou málo tlumené, středně nebo hodně tlumené. [11]

### **Alpha sondy – vysoce tlumené**

Alpha sondy mají krátký impuls a tedy úzká echa. Tyto sondy se používají tam, kde je nutné vzájemně rozlišit echa nebo jeden jednoznačný vrchol impulsu. Jelikož je impuls krátký, tak se měnič nerozkmitá na svou jmenovitou frekvenci a frekvenční spektrum Alpha sondy je široké.

Tyto sondy je vhodné používat pro zjišťování tloušťek zkoušených předmětů a měření rychlosti [11]

### **Delta sondy - středně tlumené**

Delta sondy mají delší impuls než Alpha sondy a tedy i širší echa. „Tyto sondy se používají, případech, kdy je nutný kompromis mezi rozlišitelností vad, šířkou echa a výkonem sondy.“ [11]

### **Málo tlumené sondy Gamma**

Impuls Gamma sond je nejdelší a má tedy i nejširší echa. Jelikož je impuls Gamma sondy dlouhý, proto měnič rozkmitá na svou jmenovitou frekvenci a frekvenční spektrum sondy Gamma je úzké.

Tyto sondy je vhodné používat pro lokalizaci defektů a pro jejich hodnocení dle AVG diagramu. Gamma sondy jsou považovány v ultrazvukové defektoskopii za nejběžnější a nepoužívanější. [11]

### 3.9 Ultrazvukové přístroje



Obr. 21 - Novější digitální defektoskop USM 35X S [11]



Obr. 22 - Starší analogové defektoskopy USM 3 a USM3S [11]

#### Synchronizátor

Slouží jako zdroj impulzů, který spouští s určitou periodickou frekvencí ostatní obvody defektoskopu. Jmenovitě zdroj časové základny, impulzový generátor a zdroj délkových značek. Tyto obvody synchronizátoru se starají o to, aby bylo navzájem sladěno spouštění časové základny a vysílání impulzů do zkoumaného materiálu. [11]

## **Generátor**

Generátor vysílá s určitou opakovací frekvencí elektrické impulsy na sondu. Pomocí piezoelektrického měniče sondy se radiové vlny přeměňují na ultrazvukové impulsy. Tyto impulsy se dále šíří do zkoušeného předmětu. [11]

Ultrazvukové vlny se ve zkoušeném předmětu odrážejí od protilehlé strany nebo od vady. Tyto vlny dopadají na měnič, kde se znovu přeměňují na elektrické impulsy. Odražené impulsy mají malou amplitudu. Z tohoto důvodu se musejí zesilovat zesilovačem.

### **3.10 Základy zkoušení ultrazvukem**

#### **Mezi základy zkoušení ultrazvuku patří:**

- Vazba akustická,
- Nastavení rozsahu časové základny,
- Měření útlumu a rychlosti,
- Určení náhradní velikosti vady,
- Stanovení velikosti a typu vady.

#### **3.10.1 Vazba akustická**

Aby se ultrazvuk, který je vysíláný měničem šířil do zkoumaného předmětu, musí být mezi zkoumaným předmětem a sondou akustická vazba. Mezi sondou a zkoumaným předmětem musí být vazební prostředek, protože se v defektoskopii běžně užívá rozsah jmenovitých frekvencí 1 až 5 MHz. Ale pro tento rozsah frekvencí ultrazvuk neprochází vzduchem. U ultrazvukové metody je nutné stále udržovat dobré akustické vazby mezi sondou a kontrolovaným materiálem. [11] [13]

#### **Vazba kontaktní**

Jako vazební prostředek při zkoušení s kontaktní vazbou se ve většině případů používá Apeko, Koramex, Tapetol nebo jiné podobné prostředky, které jsou na bázi škrobu. Tyto prostředky se dají přesně namíchat podle toho v jakém stavu je zkoušený povrch. V případě že je povrch předmětu hladký a vodorovný použije se řidší prostředek a naopak hustší na hrubý a šikmý povrch. Jestliže se na zkoušeném povrchu nechají vazební prostředky delší dobu, můžou způsobit korozi nebo na leštěných površích neestetické mapy. [11]

### **Vazba mezerová a imerzní**

U této zkoušky se většinou používá jako vazební prostředek voda, do které lze přidat změkčovadla a inhibitory koroze. [11]

#### **3.10.2 Nastavení rozsahu časové základny**

Aby se mohla určit poloha vady, musí se nastavit časová základna (č. z.) na obrazovce.

Pro jednoměničovou přímou i úhlovou sondu stačí pouze jedna tloušťka a pro sondu dvouměničovou je třeba nastavit dvě tloušťky.

Výjimkou jsou úhlové sondy podélných vln, protože tyto sondy potřebují k nastavení časové základny dva kvadranty různých poloměrů. Protože ze dvou různých drah lze použít jen první koncová echa. [11]

### **Měrky pro kalibraci časové základny**

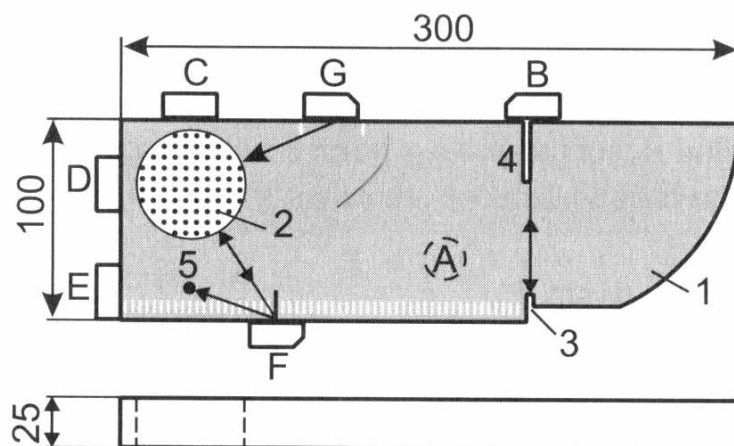
Kalibrační měrky mají úlohu kalibrovat ultrazvukové přístroje a sondy, rovněž slouží k ověření správné činnosti těchto přístrojů a sond. Kalibrační měrky mají přesně definovanou geometrii, materiál, jakost povrchu s příslušnými ČSN EN nebo ANSI/AWS standardy. [17]

#### **Zkoušený kus**

Je-li možné použít zkoušený kus pro nastavení časové základny, je to nejlepší způsob. Na tento způsob je zapotřebí dvou rovinných rovnoběžných protilehlých ploch a také je potřeba mít možnost změřit mechanickým měřidlem tuto vzdálenost.

#### **Kontrolní měrka K1 (ČSN EN 12223)**

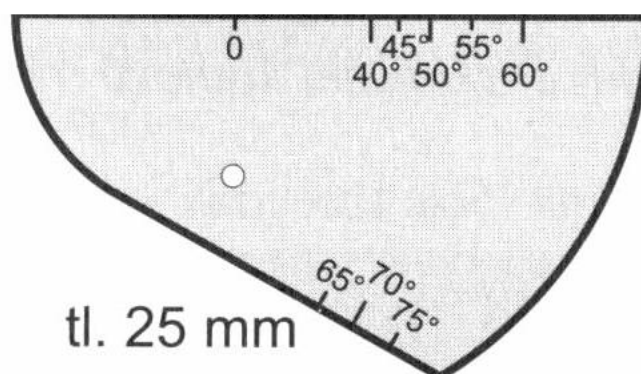
Pomocí měrky K1, která má známou tloušťku, lze kalibrovat časovou základnu (interval násobných ech). „Mrtvé pásmo přímé sondy se ověřuje na základě odrazu od válce 2 nebo otvoru 5 příkládáním do bodů C, D, E a F.“ [17]



Obr. 23 - Kalibrační měrka K1 [17]

### Kontrolní měrka K2 (ČSN EN 27963)

Kontrolní měrka K2 má shodné parametry s kontrolní měrkou K1. Ale měrka K2 je na rozdíl od měrky K1 podstatně menší, lehčí a je tedy vhodná pro využití v provozních podmínkách. „Oproti měrce K1 neumožňuje vyhodnocovat rozlišovací schopnost a maximální dosah vlny.“ [17]

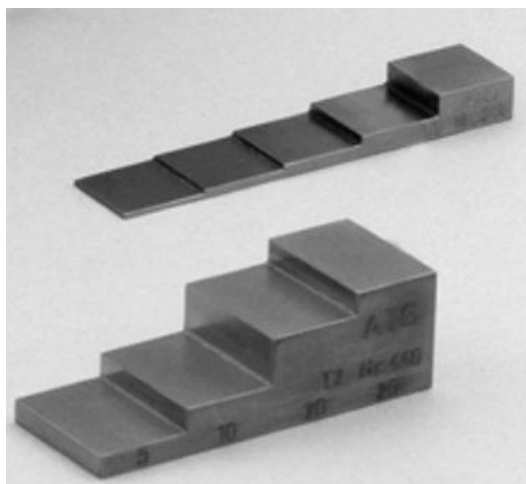


Obr. 24 - Kalibrační měrka K2 [17]

### Schodová měrka

Pro tloušťky materiálů od 10 mm je vhodné použít tzv. schodové měrky 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10 mm nebo 2-4-6-8-10 mm. U tlouštěk do 100 mm je vhodné použít měrky, které mají tloušťku 5-10-20-50-100 mm. [11]





Obr. 25 - Schodové měrky [18]

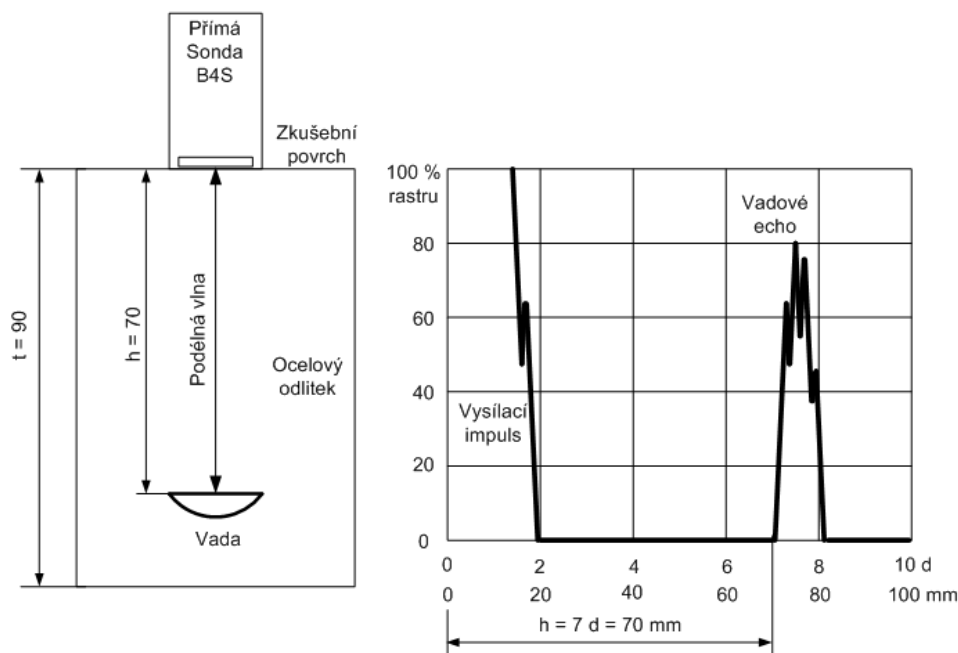
### Spárová měrka

U tloušťek do 1 mm se využívají měrky spárové, které mají tloušťky v rozmezí od 0,05 do 1 mm. Tloušťky těchto měrek jsou odstupňovány po 0,05 mm. [11]



Obr. 26 - Spárové měrky [11]

Na obr. 27 je zobrazeno proč se před zkoušením musí nastavit vhodný rozsah časové základny.



Obr. 27 - Nastavení časové základny [11]

Změnou dB se nastavují koncová echa na stejnou výšku, toto je důležité pro přesné nastavení časové základny. [11]

### 3.10.2. Měření útlumu a rychlosti

#### Měření útlumu podélných vln - $\kappa$

Pro výpočet útlumu se používá vztah  $\kappa = (\Delta V - \Delta V_S - \Delta V_O) / (2 * t)$ .

#### Měření útlumu přímou sondou příčných vln - $\kappa$

Pro výpočet útlumu se používá stejný vztah  $\kappa = (\Delta V - \Delta V_S - \Delta V_O) / (2 * t)$ .

Měření útlumu je od předchozí metody jen v rozdílu použití sondy příčných vln.

#### Měření rychlosti

Měření ultrazvukové rychlosti v materiálu má 4 kroky:

- Pomocí mechanického měřidla změřit tloušťku u zkoušeného předmětu,
- Z kalibrování přístroje pomocí kontrolních měrek, u kterých je známá rychlost šíření ultrazvuku.

c) Přiložení sondy na zkoumaný objekt s neznámou rychlostí ultrazvuku a odečtení z přístroje dráhy ultrazvuku. Tedy zdánlivé tloušťky pro podélné ( $t_X$ ) nebo příčné ( $t_Y$ ) vlny.

d) Výpočet jakou rychlostí se šíří ultrazvuk ve zkoumaném objektu:

- pro podélné vlny  $c_L = c_{L, K1} \cdot t / t_X$ ,
- pro příčné vlny  $c_T = c_{T, K1} \cdot t / t_Y$ . [11]

### **3.10.3 Určení náhradní velikosti vady**

#### **Měření tloušťky**

„U analogového defektoskopu se čte dráha ultrazvuku podle levé náběžné hrany. Optimální je 80 % rastru, kde je dostatečná změna výšky echa se změnou zesílení.

Základní princip měření tloušťky zkoušeného materiálu je v nastavení vhodného nastavení č. z., na zkoušeném objektu v místě, kde lze tloušťku změřit mechanickým měřidlem a odečtení tloušťky podle levé náběžné hrany koncového echa.“ [11]

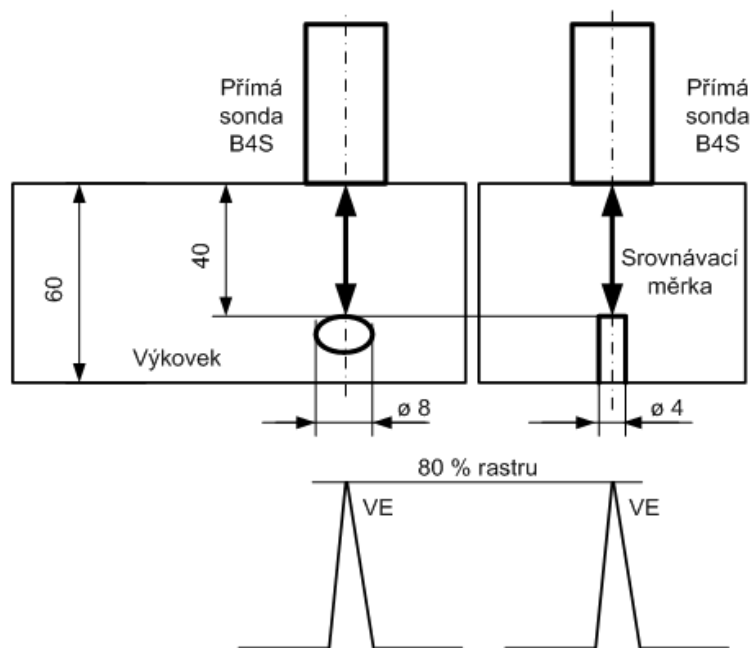
### **3.10.4 Stanovení velikosti a typu vady**

#### **Princip**

Většina norem a předpisů doporučuje pro zkoušení ultrazvukovou metodou hodnotit vady podle jejich náhradních velikostí. [11]

#### **Srovnávací měrky**

Srovnávací měrky se používají pro stanovení náhradní velikosti vady. Náhradní velikost vady znamená, že se vadě přiřadí náhradní velikost, která má vadové echo stejné výšky jako přirozená vada. [11]



Obr. 28 - Použití srovnávací měrky [11]

### 3.11 Zjistitelnost vad

Zjistitelnost vady v materiálu závisí na:

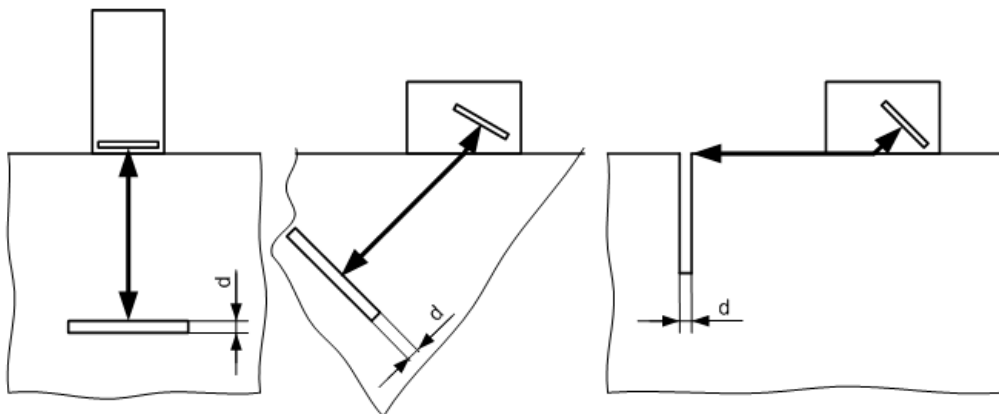
- V jakém směru k prozvučení je vada orientovaná (druhy směru - kolmo, šikmo, rovnoběžně),
- Druhu typu vad (zda je plošná či objemová),
- Rozměru vady (zda je bodová nebo protáhlá),
- Rozměru vady v závislosti na struktuře zkoumaného materiálu, a to menší, stejné nebo větší než velikost zrna,
- Rozměr vady v závislosti na vlnové délce jsou menší, stejná nebo větší než vlnová délka ultrazvuku,
- Mediu, které vyplňuje vadu a to mohou být bubliny, póry, staženiny, vměstky nebo segregace,
- Jakou velikost má šířka vady ve směru kolmém ke směru prozvučování, tuto velikost lze rozdělit na malé, kam patří rozevření trhlin, studené spoje nebo na velké, kam patří objemové vady nebo staženiny,
- Jakou má drsnost odrazová plocha vady v souvislosti s vlnovou délkou ultrazvuku, tento povrch je buď hladký (studené spoje) nebo drsný (staženiny).

### Veliký vliv má rovněž prozvučitelnost a struktura zkoumaného materiálu:

- Velikost zrna, čistota oceli
  - Jemnozrnná ocel je výborně prozvučitelná s malým útlumem a používají se sondy o vyšší frekvenci,
  - Hruboizrnná ocel je špatně prozvučitelná s velkým útlumem a používají se sondy o nízké frekvenci,
- Druhy zrn
  - Lamelární grafit se vyskytuje v šedé litině, je špatně prozvučitelný s velkým útlumem a používají se sondy o nízké frekvenci ,
  - Globulární grafit se vyskytuje v tvárné litině, je dobře prozvučitelný s malým útlumem a používají se sondy o vyšší frekvenci,
- Čistota oceli
  - Vysoká čistota způsobuje nízkou úroveň šumu a dobrou prozvučitelnost,
  - Nízká čistota způsobuje zvýšenou úroveň šumu a horší prozvučitelnost. [11]

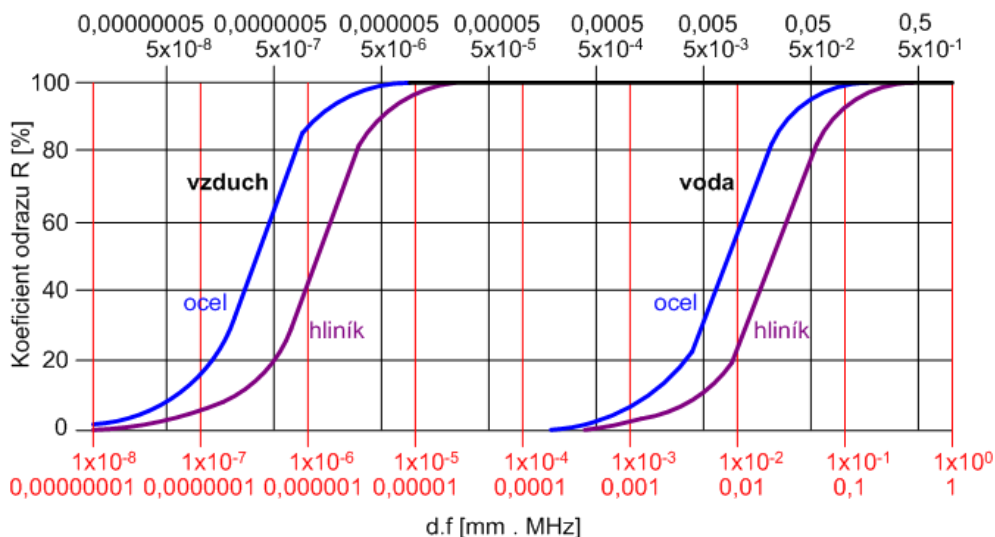
#### **3.11.1 Zjistitelnost plošných vad v závislosti na šířce vady a médiu ve vadě**

„Sevřené plošné vady se zjistí od mezery o určité šířce, která je jiná pro vzduch a vodu v trhlině a prozvučovaný materiál.“ [11]



Obr. 29 - Zjistitelnost plošných vad [11]

Pomocí diagramu na obr. 28 se posuzuje, od jaké šířky mezery lze zjistit vadu při kolmém dopadu ultrazvuku na vadu. [11]



Obr. 30 - Diagram pro zkoušení s kontaktní, mezerovou i imerzní vazbou [11]

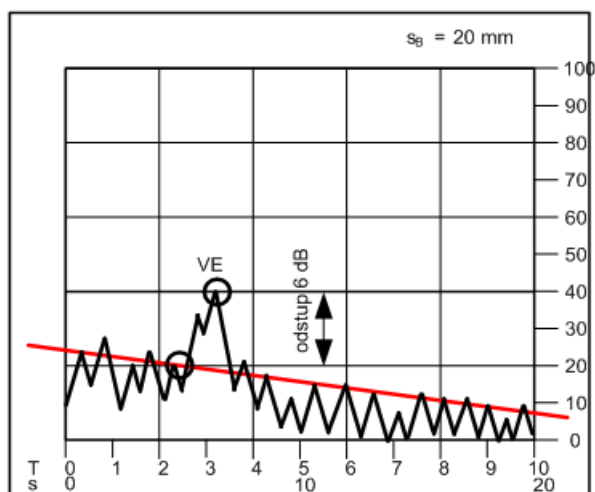
### 3.11.2 Zjistitelnost vad v závislosti na odstupu vadového echa od šumu

#### Odstup vadového echa od úrovně šumu 6 dB

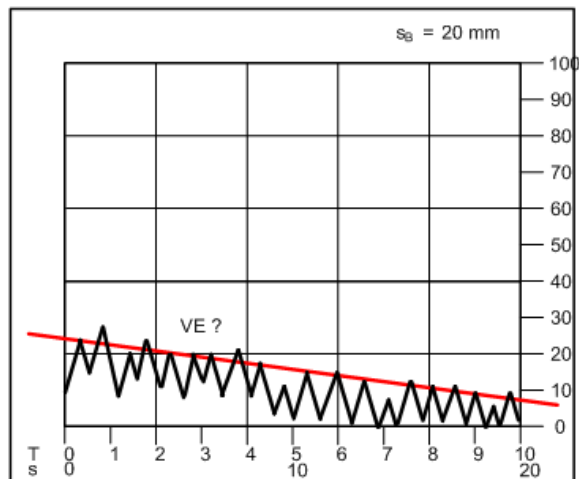
Podle norem a předpisů by měla mít minimální zjistitelná vada odstup od úrovně šumu 6 dB. Protože 6 dB znamená dvojnásobnou výšku echa než je úroveň šumu. [11]

#### **Posouzení reálnosti zkoušení s odstupem od šumu 6 dB**

V reálné praxi zkoušení s odstupem od šumu 6 dB není reálné. Když u minimální vady s odstupem od šumu 6dB, poklesne vadové echo o 6 dB, tak se nacházíme na hranici šumu. A nelze tedy zjistit konec vady a tím její náhradní rozměry metodou poloviční výšky. [11]



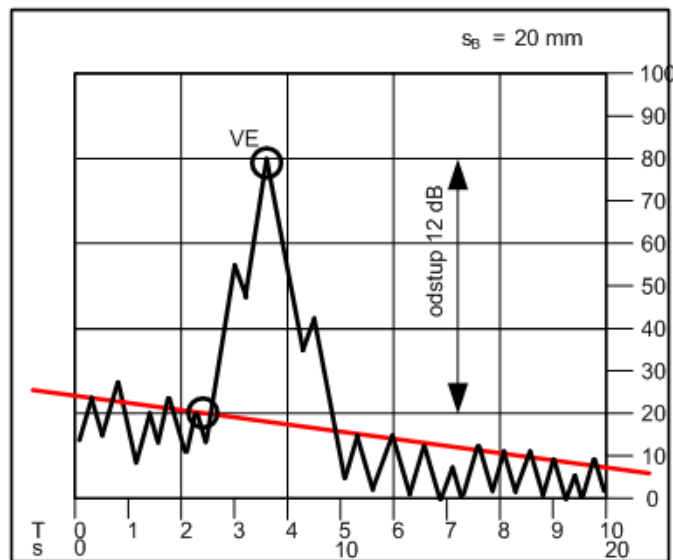
Obr. 31 - Odstup od šumu 6 dB [11]



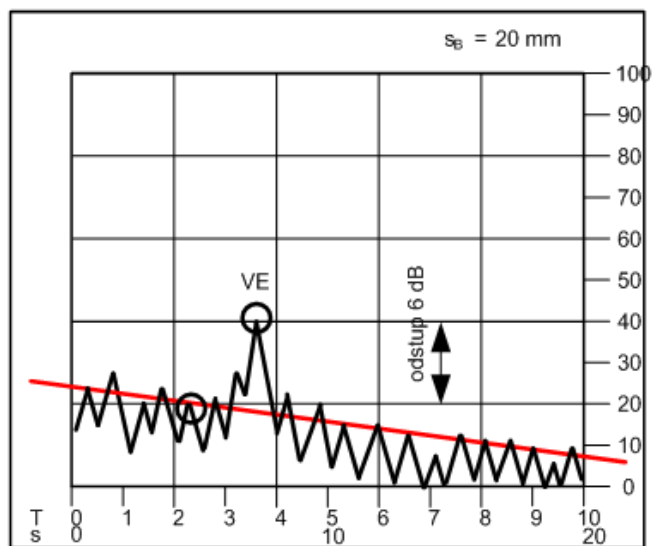
Obr. 32 - Na úrovni šumu [11]

**Odstup vadového echa od úrovně šumu 12dB = doporučený minimální odstup**

Pro zjistitelnost minimální vady se doporučuje odstup od úrovně šumu 12dB. To znamená čtyřnásobnou výšku echa. Odstup 12 dB od šumu je pro praxi optimální. [11]



Obr. 33 - Odstup šumu o 12 dB [11]



Obr. 34 - Pokles vadového echa o 6 dB [11]

### 3.11.3 Poloha vady

Náhradní velikosti vad se nazývají náhradní, protože všechny rozměry vad, které jsou určeny ultrazvukem, jsou jen přibližné. Jako například náhradní délka, výška, šířka. Pokud chceme zjistit reálné rozměry vad, musí se použít destruktivní zkoušení materiálů.

Před každým měřením rozměrů a poloh vad se musí zvolit souřadnicový systém. [11]

### 3.12 Využívané metody

- Metoda průchodová,
- Metoda odrazová,
- Metoda rezonanční.

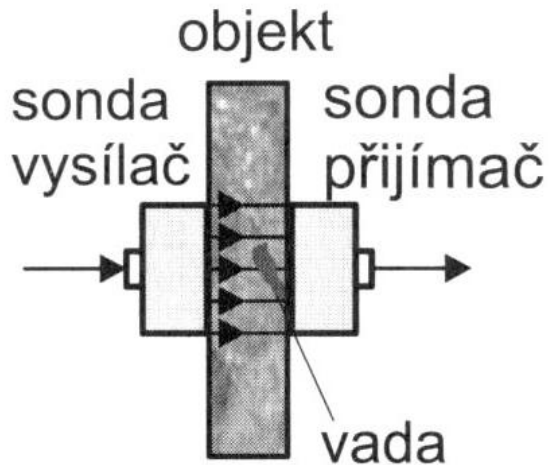
### 3.13 Metoda průchodová

Průchodová metoda spočívá v měření ultrazvukové energie, která prošla zkoušeným materiálem. Ultrazvukové vlny, které jsou vysílány sondou vysílací, jsou na druhé straně zkoušeného předmětu přijímány sondou přijímací. Sondy jsou s předmětem v kontaktní vazbě nebo v bezkontaktní vazbě. U této metody se převážně používají podélné vlny. Metoda průchodová používá ultrazvukový svazek, ale i impulsní. Při použití impulsního provozu lze měřit kromě útlumu také rychlost šíření ultrazvuku v prostředí. Tato metoda má výhodu ve

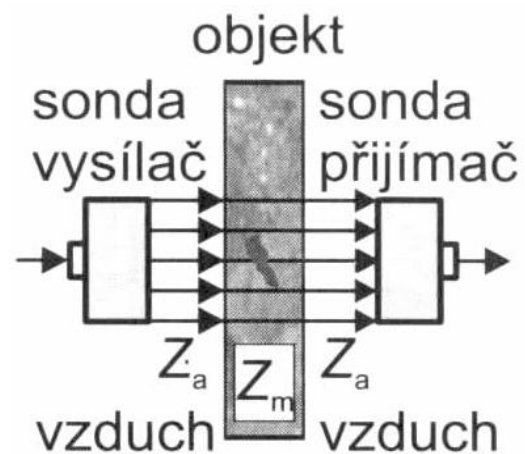


své jednoduchosti a využití jednodušších přístrojů. Ale nevýhodou je její malá citlivost, nelze zjistit hloubku vady. Dále je nutné mít přístup k oběma stranám zkoušeného předmětu a zajištění sousostí sond. [4]

Tato metoda se používá především na trhliny o délce  $L$  do 3 mm směrem do materiálu. Ale také se tato metoda používá pro trhliny o délce  $L$  větší než 3 mm. [11]



Obr. 35 - Průchodová metoda s kontaktní vazbou [11]



Obr. 36 - Průchodová metoda s bezkontaktní vazbou [11]

### 3.14 Metoda odrazová

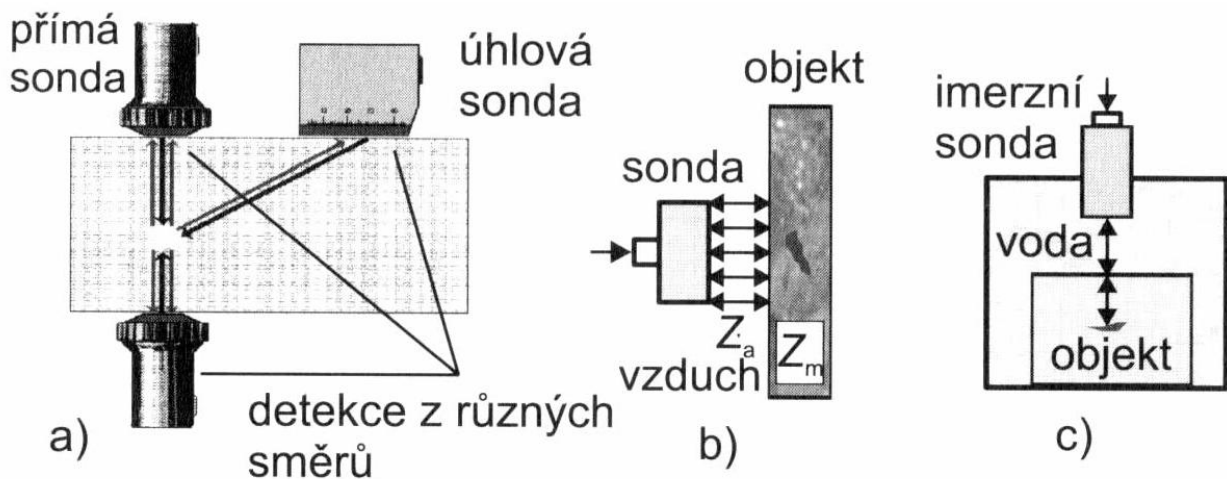
Odrazová metoda spočívá v odrazu ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí. Ultrazvukový svazek je vysílán buď spojitě, nebo impulsově. V dnešní době se spojitě vysílání nevyužívá. Tato metoda umožňuje měřit materiály, které jsou přístupné pouze z jedné strany. Ale při vyhodnocování se musí brát v úvahu, že dráha ultrazvuku je dvojnásobná na rozdíl od metody průchodové. Pomocí odrazové metody impulsové získáváme o zkoušeném předmětu nejvíce informací, a proto je v defektoskopii nejvíce používána. [4]

Tato metoda se používá na trhliny o délce  $L$  větší než 3 mm. Rozmezí 3 mm je mezi metodami pouze orientační, jelikož záleží na šířce ech. [11]

### 3.14.1 Impulsní odrazová zkouška

Impulsní zkouška odrazová spočívá v průchodu ultrazvukového impulsu zkoušeným předmětem. Tento impuls se na rozhraní dvou prostředí (např. voda – zkoušený materiál, okolní prostředí – zkoušený materiál) odrazí a vrátí zpět. Pomocí přístroje není jen zaznamenávána doba průchodu ultrazvukového impulsu, ale také jeho úbytek energie. Z těchto údajů lze určit výskyt vady a vzdálenost vady od povrchu předmětu. Také lze do určité míry usuzovat velikost a tvar vady.

Do materiálu je ultrazvukový impuls vyslán vysílačem a po odrazu přijímán přijímačem. Jelikož je mezi vysláním a příjmem impulsu dostatečný časový odstup, lze pro vysílání a přijímání použít pouze jeden elektroakustický měnič. Výhodou metody je, že udává všechny informace o vadě a materiálu. Je ale nutné použít složitějších přístrojů. [4]



Obr. 37 - Odrazová metoda impulsní [11]

### 3.15 Metoda rezonanční

Metoda rezonanční spočívá ve změně frekvence ultrazvukových vln o okamžiku, kdy tloušťka zkoušeného materiálu je rovna celému násobku jedné poloviny celé délky. V tuto chvíli v materiálu vzniká stojatá vlna, která je zaznamenávána přístrojem. Přístroje určené pro rezonanční zkoušku jsou uváděny do rezonance ručně nebo elektrickým automatickým obvodem. U této metody je ultrazvukový svazek ve většině případů vyslán spojitě a tedy impulsně jen ve výjimečných případech. Tuto metodu je vhodné použít pro kontrolu rovnoběžných ploch, které jsou přístupné jen z jedné strany. Tloušťka kontrolovaných stěn může být v rozmezí od 0,1 do 100 mm. Změna tloušťky stěny nebo přítomnost vady

rovnoběžné s povrchem způsobí, že rezonující vlna vypadne z rezonance, tato změna je zaregistrována přístrojem. Nevýhodou je, že z údajů o výpadku nelze určit hloubku nebo velikost vady, dále musí být dodržena rovnoběžnost ploch. [4]

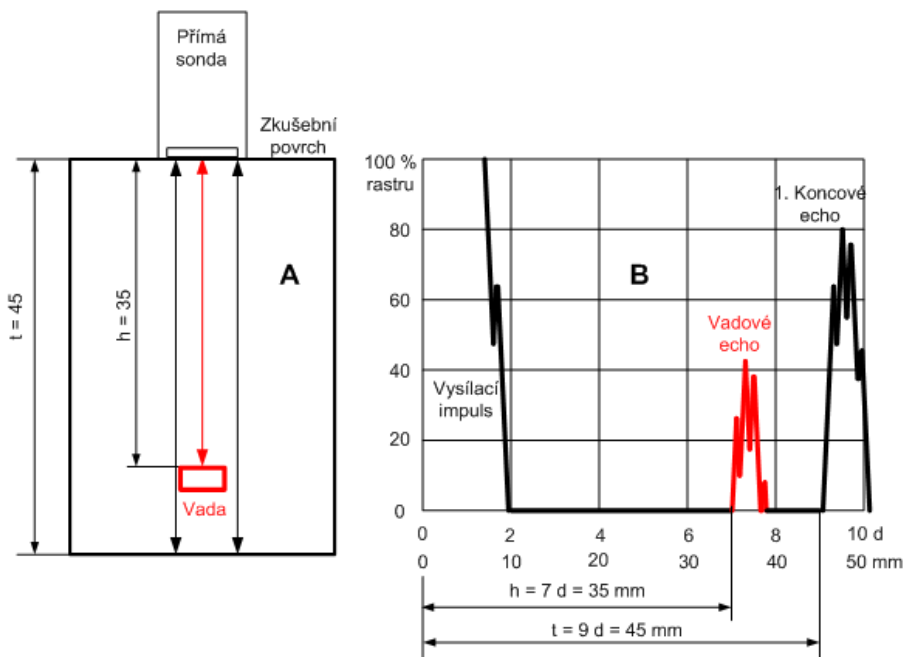
Rezonanční metoda se dá použít pro zjištění vad rovnoběžných s povrchem. Také se dá měřit tloušťka stěn nebo rychlost šíření ultrazvuku v předmětu. [4]

### 3.16 Zobrazení vad – A, B, C

#### 3.16.1 Zobrazení A

Zobrazení A obr. 38. je základním zobrazením ultrazvukových přístrojů. V případě, že se časová základna nastaví ve stejném měřítku, jako je tloušťka zkoušeného materiálu, je možné rovnou odčíst vzdálenost vady od povrchu. [12]

- A je příklad lokalizace vnitřní vady v kvádru 30x45x45 mm přímou sondou,
- B je echogram (= zobrazení A). Na vodorovné ose je dráha ultrazvuku a na svislé ose výška echa. Z dráhy ultrazvuku získáme informaci o poloze vady v materiálu a z výšky echa přibližnou informaci o velikosti vady, přesněji informaci o velikosti odrazové plochy. [11]

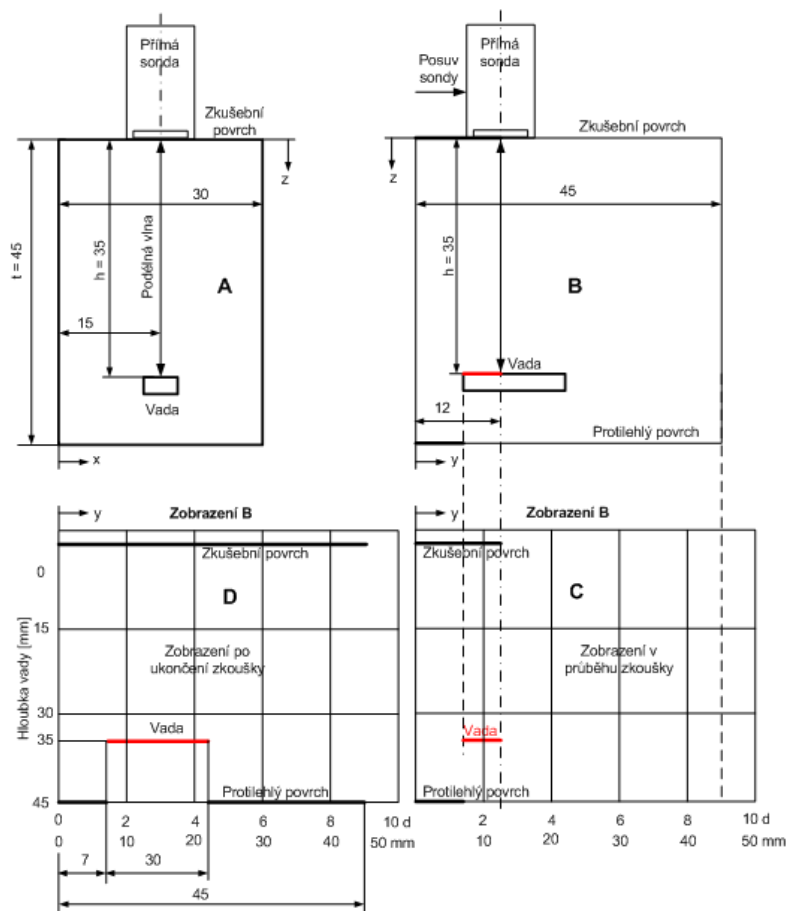


Obr. 38 - Zobrazení A [11]

### 3.16.2 Zobrazení B

Zobrazení B obr. 39 je zobrazení dvojrozměrné a zobrazuje diagnostikovaný objekt v řezu. Měřicí sonda se pohybuje po přímce podél povrchu tělesa. [12]

- A je příklad lokalizace vnitřní vady v kvádru 30x45x45 mm přímou sondou,
- B je posuv sondy ve směru osy y a sonda nakreslena v poloze  $Y = 12$  mm,
- C je B-zobrazení vady pro tuto polohu sondy,  $X = 15$  mm a  $Y = 12$  mm,
- D je B-zobrazení po dokončení zkoušky, tj. kompletní záznam hloubkového profilu vady na souřadnici  $X = 15$  mm. [11]



Obr. 39 - Zobrazení B [11]

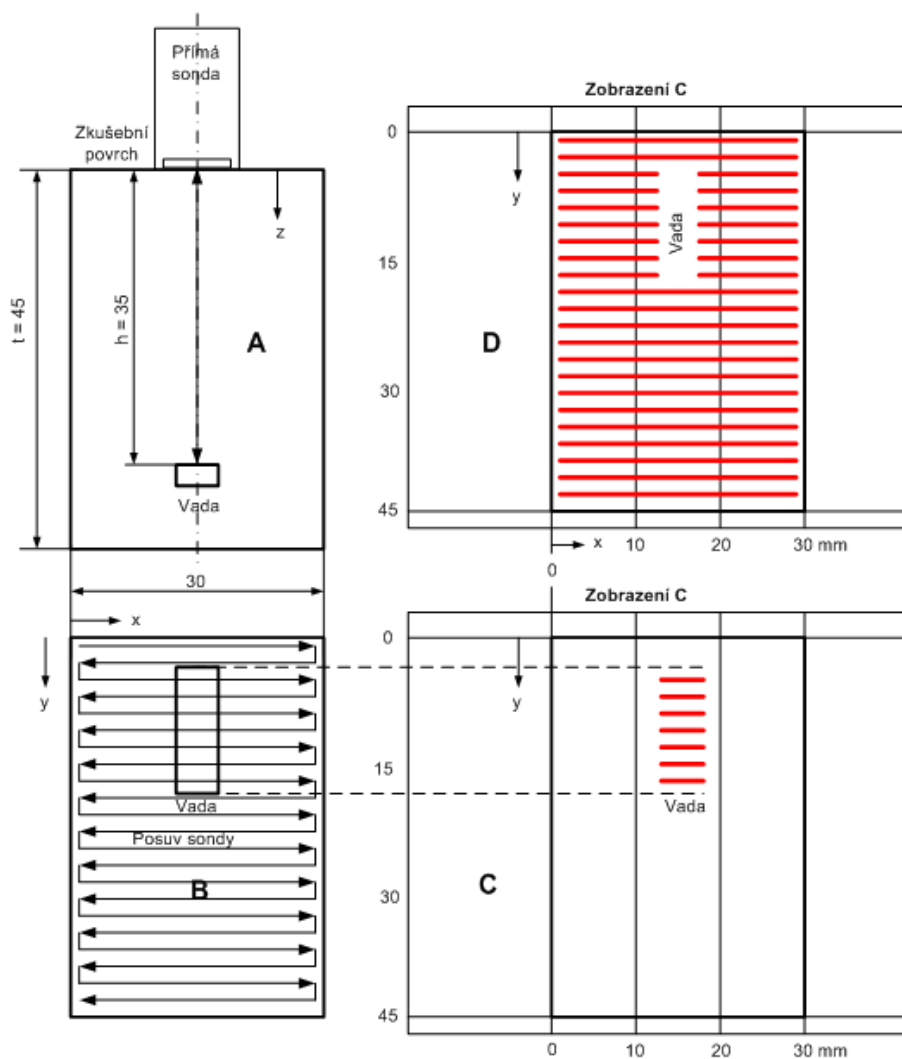
### 3.16.3 Zobrazení C

Zobrazení C obr. 40 je zobrazení dvojrozměrné, jako zobrazení B, ale navíc je zobrazeno plošné zviditelnění defektů. Při tomto zobrazení získáme informaci o velikosti vady

v souřadnicích x-y bez informace o hloubce vady (přesněji o hloubce odrazových míst pro jednotlivé polohy sondy). [12] [11]

- A je příklad lokalizace vnitřní vady v kvádru 30x45x45 mm přímou sondou,
- B je znázorněn meandrovitý pohyb sondy ve směru x-y,
- C a D jsou dvě varianty C-zobrazení.

C-zobrazení je výhodné například při mapování zdvojenin v uhlíkových kompozitních materiálech (CFRP), které mají malou tloušťku, když není rozhodující mezi kterými vrstvami je zjištěná dvojitost. [11]



Obr. 40 - Zobrazení C [11]

### 3.17 Současnost

V dnešní době se využívají skenovací vany nebo mobilní skenery, které jsou řízené počítačem. Data, která jsou získána při skenování zkoušeného předmětu, jsou ukládána do vnitřní paměti počítače. Pro každou polohu zkoušející sondy se zjišťují a ukládají data, která jsou požadována.

Příklady ukládajících dat:

- Veškeré echogramy,
- Dráhy ultrazvuku a maximální výšky ech, které k nim přísluší,
- Další sledované parametry, jako například úroveň šumu, poklesy vadových a koncových ech a jiné.

Následné zpracování těchto dat je pak pouze na znalostech ultrazvukové technika v oblasti výpočetní techniky. Záleží také na programovém vybavení ultrazvukové zkušební jednotky.

Výsledky zkoušek lze zobrazit:

- Pomocí nárysu, půdorysu, bokorysu,
- V kosoúhlém zobrazení, musí se zvolit vhodné úhly osy  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a příslušný souřadnicový systém,
- V axonometrickém zobrazení. [11]

„Získané zobrazení při správné metodě zkoušení (volba sondy, technika prozvučování, nastavení defektoskopu a výpočetní jednotky, typ vazby aj.) představuje vysokou úroveň zobrazení vad ultrazvukem a zpracování dat.

Kvalitní ultrazvukové zkušební jednotky:

- S počítačem řízeným posuvem sondy nebo sond ve směrech  $x, y, z$ , rotací sondy a natáčením,
- S kvalitním a hlavně ultrazvukovým technikem volitelným počítačovým zpracováním odečtených dat,
- S dostatečně jemným posuvem sondy ve směrech  $x, y, z$ , rotací sondy a natáčením sondy,

- S dobrou přesností pohybu sondy ve všech 5 směrech, bez vůlí, při obrácení smyslu pohybu sondy,
- S kvalitním hardwarem a softwarem.“

K tomu lze poznamenat, že tyto zkušební jednotky jsou velmi drahé. [11]

#### 4. Firma

Součástí zadání mé bakalářské práce bylo kontaktovat firmu, která pracuje ve zkoumaném oboru a účastnit se měření.

Mnou kontaktovaná firma se jmenuje R&R NDT.

##### R&R NDT

Firma byla založena dne 1. 5. 1991 a zakladatelé navázali na více než dvacetiletý výzkum v oblasti ultrazvukové nedestruktivní defektoskopie ve Státním výzkumném ústavu materiálu v Praze. Předmětem jejich činnosti je nedestruktivní kontrola materiálů a výrobků ultrazvukem. [19]

##### Rozsah činnosti:

Zjišťování vad ve svarech, výkvcích, vývalcích, odlitcích, zdvojenin v plechách, pórovitosti v odlitcích, vad v pájených spojích, elektrických kontaktech, izolátorech, ventilech, pístech, měření tloušťky materiálů, korozního úbytku, elastických konstant materiálu, hloubky povrchových trhlin, aj. [19]

##### Oblast působení:

Automobilový průmysl: ventily, písty, svary, hřídele, ojnice, ložiskové výstelky, spojovací hřídele, svislé čepy aj.

Letecký průmysl: polotovary a výrobky z hliníkových slitin, kompozity, voštinové konstrukce, písty, ojnice aj.

Elektrotechnický průmysl: ventily, písty, svary, hřídele, ojnice, ložiskové výstelky, spojovací hřídele, svislé čepy aj.

Lehký a těžký průmysl: kotle, nádrže, reaktory, výměníky, potrubní řady, výkovky, odlitky, plechy, tyčovina, trubky, lokomotivní kola a nápravy, svary plynovodů, ropovodů, pájené spoje, turbínové lopatky, šrouby, nýty aj.

- Metodiky: Vypracování metodiky ultrazvukového zkoušení různých výrobků i návrh vybavení pracoviště pro její realizaci.
- Školení a zkoušky: Školení na ultrazvukových kurzech UT1, UT2, UT3 pro obor ultrazvuk podle EN ISO 9712 ve školícím středisku Testima Praha, na toto školení navazují zkoušky pro získání 1., 2. nebo 3. kvalifikačního stupně pro obor ultrazvuk podle EN ISO 9712 ve zkušebním středisku Testima Praha pro získání certifikátu od COP TÜV NORD Praha. [19]

Zakladatelé firmy jsou Ing. Richard Regazzo, CSc. a Marcela Regazzová. Sídlo firmy se nachází v Zelenči.

Při mé návštěvě mne s problematikou a měřením seznámil pan Ing. Richard Regazzo, CSc.

Pan Ing. Richard Regazzo, CSc. je:

- „Soudní znalec pro obory: strojírenství, stavebnictví, hutnictví, keramika, energetika
- Specializace: ultrazvuková defektoskopie,
- Člen Komory soudních znalců ČR,
- Lektor na ultrazvukových kurzech od roku 1970,
- 3. kvalifikační stupeň pro obor ultrazvuk,
- Od roku 1968 výzkum a praxe v oboru“. [19]

Samotné praktické měření mi bylo představeno pouze v prostorách firmy, protože firmy a podniky, které využívají tyto metody defektoskopie, neumožňují vstup osobám bez ověření nebo proškolení.

Zajímalo mě jaký je rozdíl mezi ultrazvukem využívaném ve strojírenství a v lékařství. Dozvěděl jsem se, že rozdíl je pouze v ceně a typu používaných sond a přístrojů. Ale princip činnosti je v obou odvětvích stejný. Například pan Regazzo spolupracoval s očním primářem, kde používali ultrazvuk na měření dioptrií. K tomu byla ještě potřeba sonda s nástavcem, který se přiložil na lidské oko.

Při měření jsme používali přístroj USM 35X S. Jedná se o jeden z nejmodernějších přístrojů používaných v ultrazvukové defektoskopii. V praxi např. při měření velikosti vady se nastaví maximální přípustná velikost vady. Aby měřící technik nemusel koukat na obrazovku, zda se signál pohybuje pod maximální povolenou hranicí, je přístroj vybaven alarmem. Dále lze do přístroje nahrát signál měřeného předmětu, kde jsou předdefinovány výbrusy nebo vývrty. A tedy pokud se najede sondou na tyto výbrusy a vývrty není na přístroji hlášena chyba.



## 4.1 Zkoušení v praxi

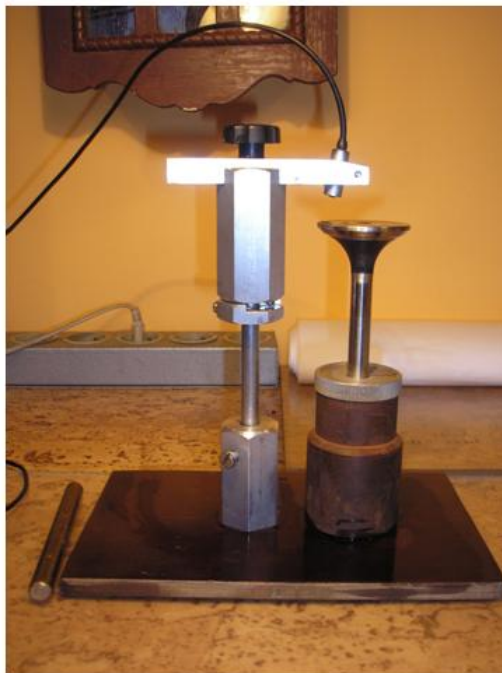
### 4.1.1 Kontrola velkých ventilů

Před samotným měřením jsem byl seznámen se základními pravidly pro zkoušení ventilů:

- Dodržování optimální vzdálenosti sondy od zkoušeného ventilu je v rozmezích 10 - 15 mm.
- Mechanicky chránit sondu, aby nebyla poškozena ventilem při vkládání nebo vyjímání ventilu z imerzní vaničky.
- Náplň ve vaničce (voda) musí být pravidelně měněna. Náplň se musí měnit, protože ve vaničce mohou zůstat nečistoty, které by mohly znehodnotit zkoušku.
- Na pracovní čelo sondy se usazují nečistoty, musí tedy být pravidelně čištěno.

Pro měření jsme použili defektoskop USM 35XS Krautkrämer (viz. Obr. 21 na str. 21) a imerzní sondu L10M Krautkrämer. Poté jsme nastavili registrační zesílení.

Pro měření jsme použili speciální přípravek pro zkoušení ventilů.



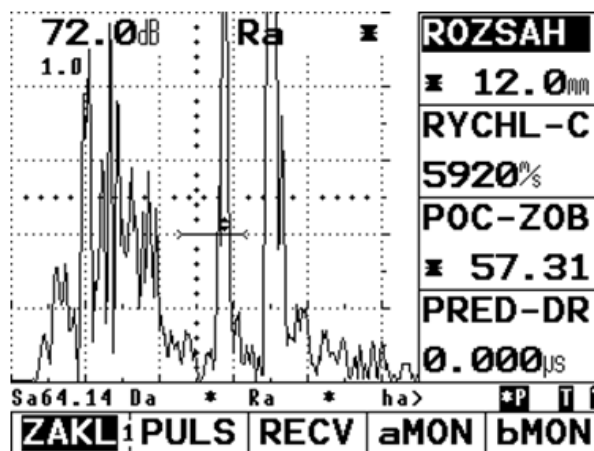
Obr. 41 - Přípravek pro zkoušení ventilů

Postup nastavení:

1) Nejprve se musí nalézt vzájemná pozice sondy a ventilu, ve které má vadové echo od rovinného dna vývrtu  $\varnothing$  2 mm (náhradní vady). To se provádí posuvem sondy a otáčením etalonového ventilu.  $D_{KSR} = 2$  mm, maximální výšku.

2) Vadové echo se nastaví na 40 % rastru pomocí zesílení.

3) Toto zesílení se zvýší o 12 dB. Tímto zesílením je nastavena zkušební citlivost. Registrační úroveň je 40 % rastru. Registrační úroveň je  $D_{KSR} = 1$  mm pro výšku echa 40 % rastru při zvýšení zesílení o 12 dB. Toto zesílení lze vidět na obr. 42.



Obr. 42 - Nastavení registračního zesílení

4) Pootočením etalonovým ventilem se zkontroluje úroveň šumu mimo oblast vývrtu. Úroveň tohoto šumu nesmí překročit 20 % rastru.

5) Hodnocení ventilů při zkušební citlivosti:

**vyhovující**, pokud výška vadového echa nepřekračuje 40% rastru,

**nevyhovující**, pokud výška vadového echa překračuje 40 % rastru obrazovky.

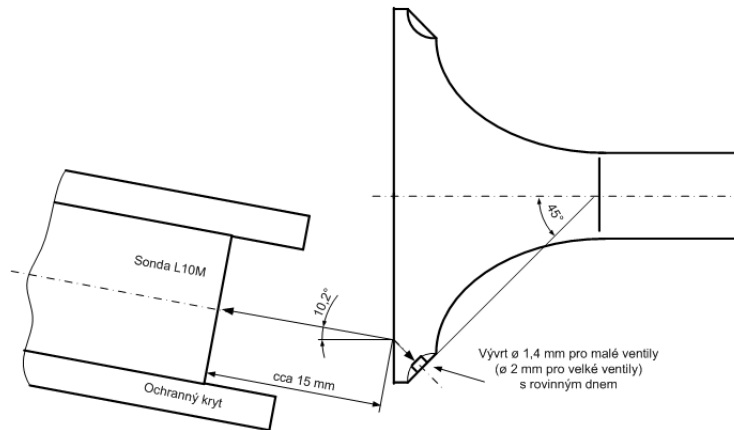
### Vzájemná poloha sondy a ventilu

Pro ventil s pracovní plochou pod úhlem  $45^\circ$  je vzájemná poloha sondy a ventilu zobrazena na obr. 43. Výpočtem podle Snellova zákona je úhel dopadu ultrazvukové podélné vlny na rozhraní je  $10,2^\circ$ .

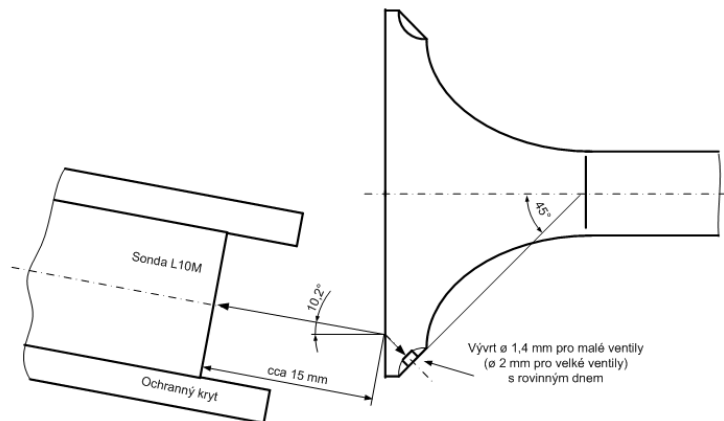
$$\text{arc sin } \alpha = \frac{1483}{5920} \cdot \sin 45^\circ = 10,2^\circ$$

Pro ventil s pracovní plochou pod úhlem  $60^\circ$  je vzájemná poloha sondy a ventilu zobrazena na obr.44. Výpočtem podle Snellova zákona je úhel dopadu ultrazvukové podélné vlny na rozhraní je  $7,1^\circ$ .

$$\text{arc sin } \alpha = \frac{1483}{5920} \cdot \sin 30^\circ = 7,1^\circ$$

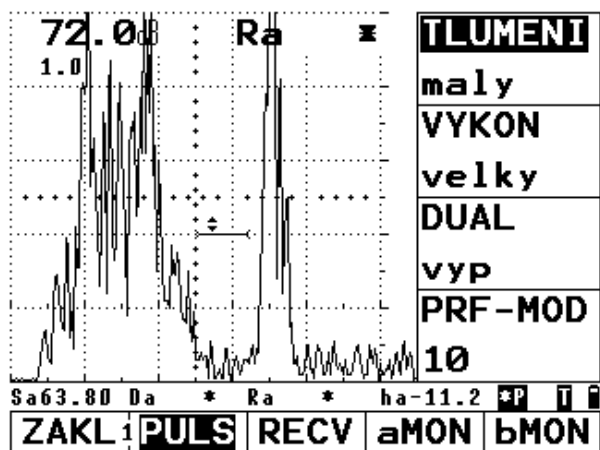


Obr. 43 - Ventil s pracovní plochou  $45^\circ$

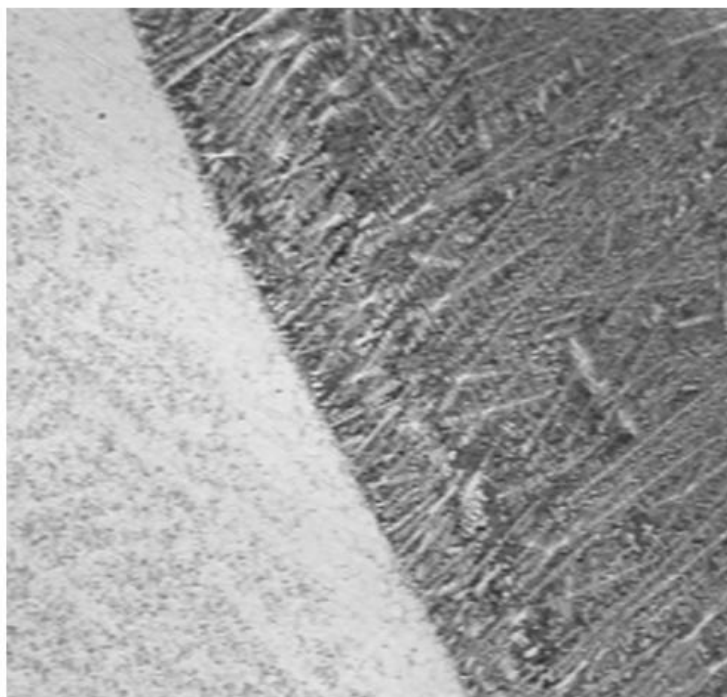


Obr. 44 - Ventil s pracovní plochou  $60^\circ$

Na obr. 45 je vidět pozice sondy v oblasti ventilu bez vad a na obr. 46 je vidět 100x zvětšený výbrus v oblasti bez vad. Na tomto výbrusu se správným spojem je vidět dostatečné prohřátí základního materiálu = světlejší oblast v základním materiálu.

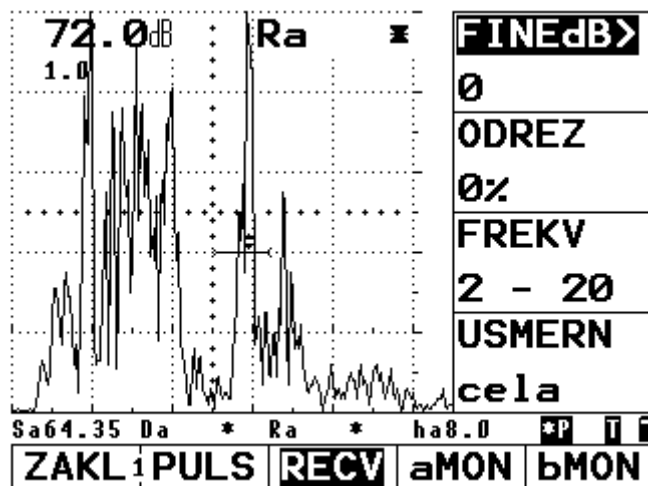


Obr. 45 - Ventil OK

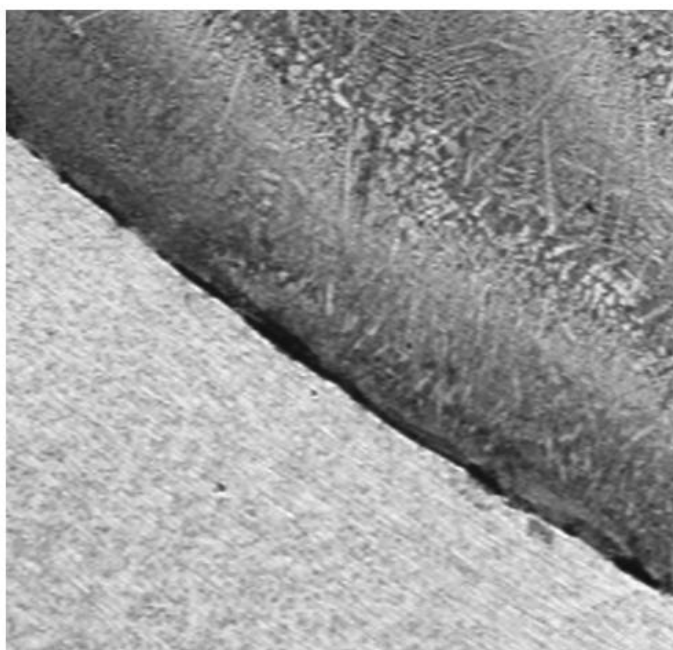


Obr. 46 - 100x zvětšený výbrus ventilu

Na obr. 47 je vidět pozice sondy L10M pro 1. řez, výška vadového echa > 80 % rastru, tzn.  $D_{KSR} > 1,4$  mm. A na obr. 48 je vidět 100x zvětšený výbrusu studeného spoje, který prokazuje nedostatečné prohřátí základního materiálu, a poretita ve svaru.



Obr. 47 - Výška vadového echa > 80 % rastru



Obr. 48 - 100x zvětšený výbrusu studeného spoje

#### 4.1.2 Kontrola odlitku

Zkoušený odlitek má parametry OD 717/ID 565 x 123 mm z hliníkového bronzu.

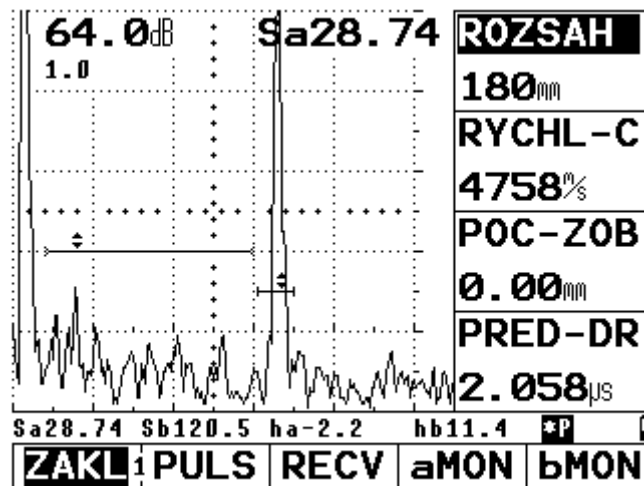
Pro měření jsme použili ultrazvukový defektoskop USM 35XS Krautkrämer (viz. Obr. 21 na str. 21), ultrazvukovou sondu K1SM Krautkrämer, kontrolní měрку K1 podle ČSN EN ISO 2400. Zkoušení probíhalo ručně s kontaktní vazbou a vazebním prostředkem plastické mazivo MOGUL K3.

Ultrazvukovou zkoušku jsme provedli z čelního a vnějšího povrchu v rozsahu 100 % přímou sondou K1SM. Zkouška byla provedena pro nejpřísnější kritérium, tedy pro minimální odstup 6 dB vadového echa od úrovně šumu. A pomocí metody poloviční výšky echa jsme měřili rozměry vad.



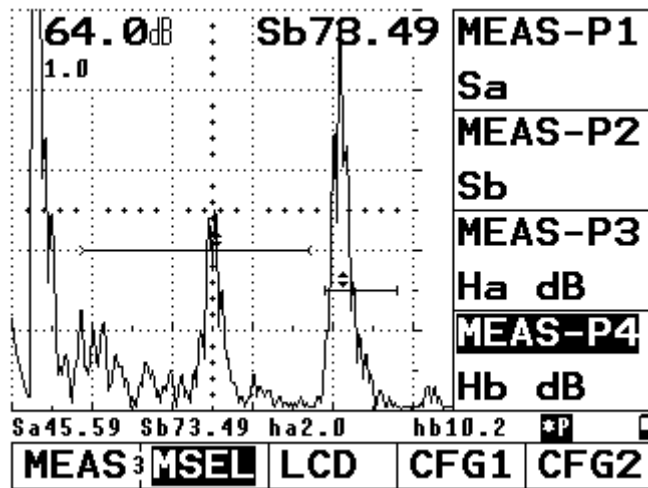
Obr. 49 - Dokumentace vady odlitku

Obr. 50 – Echogram oblasti bez vad. Zkoušku z čelního povrchu s úrovní šumu 20 až 30 % BSH.



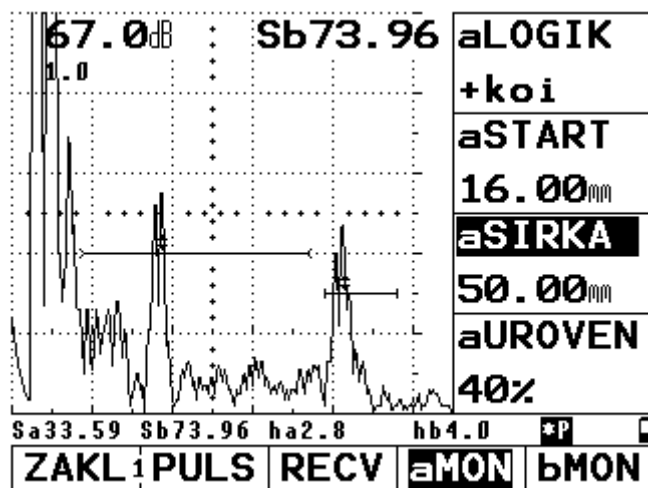
Obr. 50 - Echogram oblasti bez vady

Obr. 51 – Echogram lokalizace vady. Vadové echo v dráze 45,59 mm, z toho vyplývá, že pod vnějším válcovým povrchem je v této hloubce vada. Tloušťka odlitku 1. KE v dráze 73,49 mm.



Obr. 51 - Echogram lokalizace vady 1

Obr. 52 - Echogram lokalizace vady. Vadové echo v dráze 33,59 mm, z toho vyplývá, že pod vnitřním válcovým povrchem je v této hloubce vada. Tloušťka odlitku 1. KE v dráze 73,96 mm.

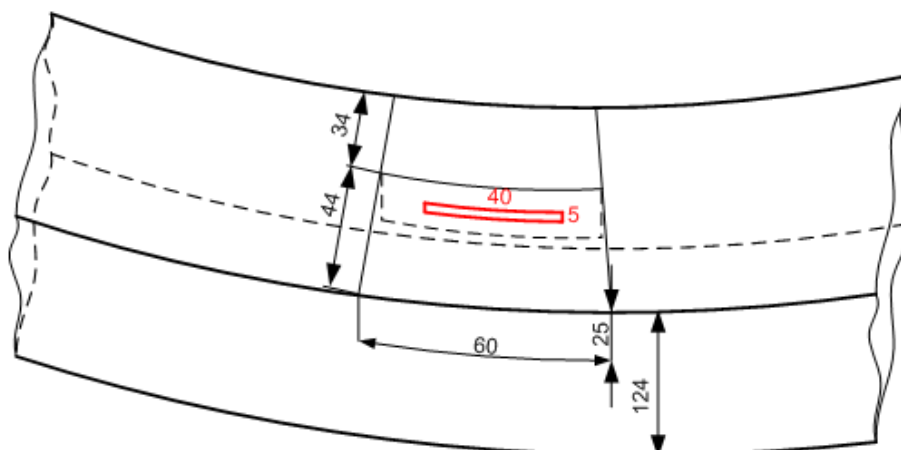


Obr. 52 - Echogram lokalizace vady 2

Hodnocení zkoušky:

Ve zkoušeném odlitku byla zjištěna jedna plošná vada. Vada se lokalizuje z vnějšího i vnitřního válcového povrchu nikoli z čelního povrchu. Vada není objemová, ale plošná tenká úzká spojitá vada, protože ultrazvuk prochází skrz vadu. Dále bylo zjištěno, že je orientovaná rovnoběžně s osou odlitku.

Na obr. 53 je zobrazena vada ve zkoušeném odlitku.



Obr. 53 - Zobrazení vady v odlitku



## 5. Závěr

Nedestruktivní zkoušení materiálu má v dnešní době veliký význam, protože jak už bylo napsáno výše, při zkouškách nedochází ke znehodnocení zkoušeného předmětu. Proto se dají předměty kontrolovat v provozu nebo těsně před zapojením do provozu. Ani jedna z uvedených nedestruktivních zkoušek není bez limitů. Každá metoda má tedy své klady i zápory. Ale jako jednu z nejlepších metod bych hodnotil metodu zkoušení ultrazvukem. Jelikož na rozdíl od metody vizuální nebo metody kapilární lze zjišťovat vady uvnitř zkoumaného předmětu. Metodou magnetickou práškovou lze zjišťovat podpovrchové vady, ale pouze do hloubky 5 mm a jen u předmětů, které jsou feromagnetické. To u ultrazvukové zkoušky lze zkoušet téměř libovolný materiál (kovy, pryže, keramika,..). Ultrazvuk v porovnání s metodou prozařování je, podle mého názoru, na tom lépe. Obě metody dokážou zjišťovat necelistvosti hluboko pod povrchem, ale prozařovací metodu nelze použít ve stejné škále materiálů jako ultrazvuk. Jako hlavní nevýhodu metody prozařovací bych viděl rentgenové záření, kterému je pracovník vystaven. Poslední metoda je metoda vířivých proudů, tato metoda patří s ultrazvukovou k nejpoužívanějším, ale také nedokáže zjišťovat vady hluboko pod povrchem.

U ultrazvukové metody vidím jako velikou výhodu, že dokáže zkoušet téměř libovolný materiál, při nastavení správného rozsahu impulsu dokáže prozvučit libovolně tlustý materiál. Přístroje využívané na tuto metodu mají relativně malé rozměry a není škodlivý k pracovníkům, kteří ho využívají. Jako nevýhodu bych viděl citlivost sond, nutnost využívání etanolů, také cenu přístrojů a sond. U zjištěných vad nelze zjistit přesné rozměry, ale pouze jejich náhradní velikosti.

Podle mého názoru ultrazvuková metoda má ze všech přítomných metod největší využití a možnost dalšího vývoje spojené s technickým pokrokem, a to ať v materiálové defektoskopii nebo v lékařství.

## Seznam citované literatury

- [1] BROŽEK, Milan. *Strojírenská technologie I (návody ke cvičení)*. 2. vydání, přepracované, rozšířené. Praha : Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, katedra materiálu a strojírenské technologie, 2008. str. 80. ISBN 978-80-213-1780-2.
- [2] Ing. Jiří Barták, CSc. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *CWS ANB*. [Online] 1. 3 2012. [Citace: 29. 11 2014.] <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>.
- [3] [www.NDT.cz](http://www.NDT.cz). *ndt.cz*. [Online] 22. 2 2009. [Citace: 4. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/20/princip\\_metody.pdf](http://ndt.cz/prilohy/20/princip_metody.pdf).
- [4] Větech, Mojmír. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1989. str. 323. ISBN 80-03-00100-5.
- [5] Magnetická prášková metoda. *cs.wikipedia.org*. [Online] 11. 8 2014. [Citace: 3. 12 2014.] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1\\_pr%C3%A1kov%C5%A1\\_kov%C3%A1\\_metoda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1_pr%C3%A1kov%C5%A1_kov%C3%A1_metoda).
- [6] Kopec, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno : Akademie nakladatelství CERN, s.r.o., 2008. str. 571. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [7] [www.NDT.cz](http://www.NDT.cz). *ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 6. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/33/principy\\_EC.pdf](http://ndt.cz/prilohy/33/principy_EC.pdf).
- [8] [www.NDT.cz](http://www.NDT.cz). *ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 15. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/54/rt\\_principy.pdf](http://ndt.cz/prilohy/54/rt_principy.pdf).
- [9] [www.NDT.cz](http://www.NDT.cz). *ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 15. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/56/zdroj\\_zareni.pdf](http://ndt.cz/prilohy/56/zdroj_zareni.pdf).
- [10] Zdeněk, Ing. Štorkán. Problematika hodnocení svarových spojů. *KONSTRUKCE odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství*. [Online] 9. 12 2014. [Citace: 9. 1 2015.] <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>.
- [11] Richard, Regazzo a Marcela, Regazzová. *ZÁKLADY ULTRAZVUKU*. Zeleneč : R & R NDT, 2015.

- [12] Marcel, Kreidl. *Diagnostické systémy*. 1. Vyd. Praha : Editační středisko ČVUT, 1995. str. 152. ISBN 80-01-01334-0.
- [13] Dubenský, Rudolf, Václav, Minařík a František, Čermák. *Defektoskopie - nedestruktivní zkoušení*. Vyd. 2. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1992. str. 206. ISBN 80-01-00844-4.
- [14] Company, General Eletrics. The total probe range for your ultrasonic equipment. *GE Inspection technologies*. 2005. GEIT - 20101GB (02/05).
- [15] TESTIMA. Ultrazvukové sondy SIUI. *testima.eu*. [Online] [Citace: 25. 3 2015.] <http://www.testima.eu/prilohy/334/katalog%20siui.pdf>.
- [16] Ultrazvukové sondy a příslušenství firmy SONATEST Plc. *atg.cz*. [Online] [Citace: 25. 3 2015.] [http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ultrazvukove\\_sondy\\_sonatest.pdf](http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ultrazvukove_sondy_sonatest.pdf).
- [17] *www.NDT.cz*. *www.ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 22. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/47/uz\\_merky.pdf](http://ndt.cz/prilohy/47/uz_merky.pdf).
- [18] ATG. *ww.atg.cz*. [Online] 2. 9 2008. [Citace: 23. 2 2015.] [http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ut\\_merky.pdf](http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ut_merky.pdf).
- [19] *www.regazzo.cz*. *R&R NDT Ultrasonic Testing*. [Online] [Citace: 8. 3 2015.] <http://www.regazzo.cz/>.
- [20] *www.NDT.cz*. *www.ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 22. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/41/uz\\_vlny.pdf](http://ndt.cz/prilohy/41/uz_vlny.pdf).
- [21] *www.NDT.cz*. *www.ndt.cz*. [Online] 28. 2 2009. [Citace: 22. 2 2015.] [http://ndt.cz/prilohy/43/metody\\_zkouseni\\_uz.pdf](http://ndt.cz/prilohy/43/metody_zkouseni_uz.pdf).

## Seznam použitých obrázků

- Obr. 1 - Rozdělení NDT
- Obr. 2 - Vada studená trhлина [2]
- Obr. 3 - Postup zkoušení kapilární metodou
- Obr. 4 - Ruční elektromagnet [5]
- Obr. 5 - Působení siločar [5]
- Obr. 6 - Metody vířivých proudů a) s průchozí cívkou, b) s příložnou cívkou
- Obr. 7 - Základní schéma zkoušky radiografické
- Obr. 8 - Rentgenka [9]
- Obr. 9 - Koutový svar nelegovaného materiálu [10]
- Obr. 10 - Vlnová délka a impuls [11] [11]
- Obr. 11 - Netlumené a tlumené kmity [11]
- Obr. 12 - Akustické rozhraní [11]
- Obr. 13 - Kolmý dopad na rozhraní [11]
- Obr. 14 - Šikmý dopad na rozhraní [11]
- Obr. 17 – SEB4 [12]
- Obr. 15 – Sonda K2G [12]
- Obr. 16 – B2S [12]
- Obr. 18 – Úhlové sondy SIUI [13]
- Obr. 19 – Z4N [12]
- Obr. 20 - Imerzní sondy firmy Sonatest [14]
- Obr. 21 - Novější digitální defektoskop USM 35X S [11]
- Obr. 22 - Starší analogové defektoskopy USM 3 a USM3S [11]
- Obr. 23 - Kalibrační měrka K1 [12]
- Obr. 24 - Kalibrační měrka K2 [12]
- Obr. 25 - Schodové měrky [13]
- Obr. 26 - Spárové měrky [11]
- Obr. 27 - Nastavení časové základny [11]
- Obr. 28 - Použití srovnávací měrky [11]
- Obr. 29 - Zjistitelnost plošných vad [11]
- Obr. 30 - Diagram pro zkoušení s kontaktní, mezerovou i imerzní vazbou [11]
- Obr. 31 - Odstup od šumu 6 dB [11]
- Obr. 32 - Na úrovni šumu [11]

Obr. 33 - Odstup šumu o 12 dB [11]  
Obr. 34 - Pokles vadového echa o 6 dB [11]  
Obr. 35 - Průchodová metoda s kontaktní vazbou [11]  
Obr. 36 - Průchodová metoda s bezkontaktní vazbou [11]  
Obr. 37 - Odrazová metoda impulsní [11]  
Obr. 38 - Zobrazení A [11]  
Obr. 39 - Zobrazení B [11]  
Obr. 40 - Zobrazení C [11]  
Obr. 41 - Přípravek pro zkoušení ventilů  
Obr. 42 - Nastavení registračního zesílení  
Obr. 43 - Ventil s pracovní plochou 45°  
Obr. 44 - Ventil s pracovní plochou 60°  
Obr. 45 - Ventil OK  
Obr. 46 - 100x zvětšený výbrus ventilu  
Obr. 47 - Výška vadového echa > 80 % rastru  
Obr. 48 - 100x zvětšený výbrusu studeného spoje  
Obr. 49 - Dokumentace vady odlitku  
Obr. 50 - Echogram oblasti bez vady  
Obr. 51 - Echogram lokalizace vady 1  
Obr. 52 - Echogram lokalizace vady 2  
Obr. 53 - Zobrazení vady v odlitku