

**Univerzita Pardubice**

**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Možnosti využití ultrazvukové diagnostiky**

**Lukáš Jirků**

**Bakalářská práce  
2015**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Jirků**  
Osobní číslo: **D12939**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury:  
Ochrana životního prostředí v dopravě**  
Název tématu: **Možnosti využití ultrazvukové diagnostiky**  
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 :

Student popíše princip a problematiku použití ultrazvukové diagnostiky. Uvede jaké vady materiálu je možné ultrazvukovou diagnostikou detekovat a jaké jsou omezení metody. Při praktickém měření se zaměří na možný vliv teploty diagnostikovaného materiálu na detekci vady.

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

- [1] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [2] KREIDL, M., ŠMÍD, R., MATZ, V., ŠTARMAN, S.: Ultrazvuková defektoskopie, Starmans Electronics s.r.o., Praha 2011, ISBN 978-80-254-6606-3
- [3] REGAZZO, R., REGAZZOVA, M.: Ultrazvuk základy ultrazvukové defektoskopie, BEN, Praha 2013, ISBN 978-80-7300-4
- [4] KOPEC, B., a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2008

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Kukla, Ph.D.**  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **29. května 2015**



doc. Ing. Ivo Drahotský, Ph.D.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2015

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 Kutné Hoře dne 27. 5. 2015

Lukáš Jirků



#### Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Pavlu Kuklovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady a poskytnuté materiály, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za jejich podporu během celého studia.

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zaměřuje na možnosti využití ultrazvukové diagnostiky. V úvodních kapitolách je popsán teoretický princip ultrazvukové diagnostiky a vady materiálů, které je možné detekovat ultrazvukovou defektoskopií. Praktická část je zaměřena na možný vliv teploty diagnostikovaného materiálu na výsledky měření ultrazvukovým defektoskopem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

ultrazvuková diagnostika, nedestruktivní defektoskopie, ultrazvuková sonda, vady materiálů, ultrazvukový defektoskop

## **TITLE**

The possibilities of using ultrasonic diagnostics

## **ANNOTATION**

The thesis focuses on the possibilities of using ultrasonic diagnostics. In the introductory chapter is described theoretical principle of ultrasonic diagnostics and the defects of materials, which can be detected by ultrasonic testing. Practical part is focused on the possible temperature influence of diagnosed material to the measurement by ultrasonic flaw detector.

## **KEYWORDS**

ultrasonic diagnostics, non-destructive testing, ultrasonic probe, defects of materials, ultrasonic flaw detector

# OBSAH

0	ÚVOD.....	12
1	NEDESTRUKTIVNÍ DEFEKTOSKOPIE.....	13
2	PRINCIP ULTRAZVUKOVÉ DIAGNOSTIKY.....	14
2.1	Teoretické základy metody.....	14
2.2	Druhy ultrazvukových vln.....	15
2.3	Zdroje ultrazvukových vln.....	16
2.3.1	Piezoelektrický měnič.....	17
2.3.2	Elektromagnetický měnič (EMAT).....	17
2.4	Ultrazvukové sondy.....	19
2.4.1	Piezoelektrické sondy.....	20
2.5	Metody zkoušení.....	23
2.6	Měření ultrazvukem.....	24
2.6.1	Příprava na měření.....	25
2.6.2	Postup měření.....	25
2.7	Vady materiálů a výrobků.....	27
2.7.1	Třídění vad.....	28
2.7.2	Vady detekované pomocí ultrazvuku.....	28
2.7.3	Vlastnosti vad.....	33
3	UNIVERZÁLNÍ ULTRAZVUKOVÝ DEFEKTOSKOP.....	35
3.1	Stručný popis defektoskopu.....	36
3.2	Přehled menu přístroje.....	38
3.2.1	Konfigurační menu přístroje.....	39
3.2.2	Vstupní menu přístroje.....	39
3.2.3	Pracovní menu přístroje.....	39
4	NÁVRH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	42
5	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	44
5.1	Způsob ohřevu.....	44

5.2	Vlastní měření.....	46
5.2.1	Měření posuvným měřidlem.....	46
5.2.2	Měření ultrazvukovým defektoskopem .....	47
5.3	Analýza měření .....	49
6	ZÁVĚR .....	51
7	POUŽITÁ LITERATURA .....	52

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 – Princip ultrazvukové diagnostiky [5] .....	14
Obr. 2.2 – Podélné (longitudinální) ultrazvukové vlny [1].....	15
Obr. 2.3 – Příčné (transverzální) ultrazvukové vlny [1].....	16
Obr. 2.4 – Povrchové (Rayleighovy) ultrazvukové vlny [1] .....	16
Obr. 2.5 – Deskové (Lambovy) ultrazvukové vlny [1].....	16
Obr. 2.6 – Schématické znázornění kompozitního měniče [2].....	17
Obr. 2.7 – Princip měniče EMAT [1] .....	18
Obr. 2.8 – Hraniční oblast ultrazvukového pole přímé sondy s kruhovým měničem [1].....	19
Obr. 2.9 – Ultrazvukové piezoelektrické sondy: a) přímá, b) dvojitá, c) úhlová [10].....	20
Obr. 2.10 – Příklad přímé sondy s předsádkou [autor].....	21
Obr. 2.11 – Příklad úhlové sondy [autor] .....	21
Obr. 2.12 – Příklad dvojité sondy [autor] .....	22
Obr. 2.13 – Příklad provedení fokusujících sond [1].....	22
Obr. 2.14 – Princip průchodové metody (upraveno) [10].....	23
Obr. 2.15 – Princip odrazové metody (upraveno) [10].....	24
Obr. 2.16 – Kalibrační měrka K1 [13].....	26
Obr. 2.17 – Kalibrační měrka K2 [1].....	27
Obr. 2.18 – Stupňová kalibrační měrka [1] .....	27
Obr. 2.19 – Soustředěná staženina a plynové bubliny v ocelovém ingotu [2] .....	29
Obr. 2.20 – Makrovýbrus příčného řezu kolejnicí se stopami staženiny [2] .....	29
Obr. 2.21 – Vodíková bublina (označena šipkou) v odlitku ze slitiny AlSi10 [15] .....	30
Obr. 2.22 – Vločková trhlina v hlavě kolejnice, která se porušila za provozu [2] .....	30
Obr. 2.23 – Vločky v kolejnici zjištěné detekčním ultrazvukovým vozem [2] .....	30
Obr. 2.24 – Rozložení V–vycezenin v ocelovém ingotu [2] .....	31
Obr. 2.25 – Rozložení segregací jako jednotlivé body ve výkovku [2].....	31
Obr. 2.26 – Podpovrchové vměstky [2].....	32
Obr. 2.27 – Typický vzhled únavového lomu hřídele [2].....	32
Obr. 2.28 – Projev vad a jejich zachycení na obrazovce [2] .....	34
Obr. 3.1 – Ultrazvukový defektoskop DiO 562 [autor].....	35
Obr. 3.2 – Čelní panel defektoskopu [autor] .....	37
Obr. 3.3 – Horní panel defektoskopu [11].....	38
Obr. 3.4 – Zadní strana defektoskopu [autor].....	38

Obr. 3.5 – Konfigurační menu přístroje [11].....	39
Obr. 3.6 – Vstupní menu přístroje [11].....	39
Obr. 3.7 – Časová základna [11].....	40
Obr. 3.8 – Pracovní menu „PARAM“ „MEMO“ a „TOOLS“ [autor] .....	41
Obr. 3.9 – Pracovní menu „GATES“ s vyznačenými oblastmi monitoru [autor] .....	41
Obr. 4.1 – Zkušební vzorek č. 1: a) čelní pohled, b) boční pohled, c) zadní pohled [autor] ....	42
Obr. 4.2 – Zkušební vzorek č. 2: a) čelní pohled, b) boční pohled, c) zadní pohled [autor] ....	43
Obr. 5.1 – Indukční ohřívací přístroj SKF TMBH1 [autor].....	44
Obr. 5.2 – Kontaktní teploměr VOLTCRAFT 302K/J [autor].....	45
Obr. 5.3 – Zkušební vzorek č. 1 se zakreslenými rozměry [autor].....	46
Obr. 5.4 – Zkušební vzorek č. 2 se zakreslenými rozměry [autor].....	47
Obr. 5.5 – Kalibrace na stupňové kalibrační měrce [autor].....	48

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 – Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis [2] .....	28
Tab. 3.1 – Základní technická data přístroje [11] .....	36
Tab. 5.1 – Hodnoty naměřené posuvným měřidlem u vzorku č. 1 .....	46
Tab. 5.2 – Hodnoty naměřené posuvným měřidlem u vzorku č. 2 .....	47
Tab. 5.3 – Hodnoty naměřené ultrazvukem při různých teplotách vzorku č. 1 .....	48
Tab. 5.4 – Hodnoty naměřené ultrazvukem při různých teplotách vzorku č. 2 .....	49

## 0 ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na možnosti využití ultrazvukové diagnostiky. Ultrazvuková diagnostika nás jako jedna z metod nedestruktivní defektoskopie obklopuje v každodenním běžném životě, aniž bychom si to uvědomovali. Cestování autem, vlakem nebo létání letadlem by pro nás nebylo bezpečné, nebýt metod nedestruktivní defektoskopie. Člověk si jich bohužel všimne až při havárii, kdy dojde k selhání stroje následkem zanedbání pravidelné kontroly nedestruktivní defektoskopií.

Ultrazvuková diagnostika je významnou metodou v oboru nedestruktivní defektoskopie. Zkoušení pomocí ultrazvukové metody umožňuje nejen zjistit přítomnost vady, ale také její lokalizaci a velikost. Metoda není časově náročná, jelikož příprava objektu je minimální a výsledky jsou známy bezprostředně po testování. Ultrazvuk nabízí možnost testovat většinu druhů materiálů s velkou citlivostí na necelistvosti uvnitř objektu a zároveň možnost použití pro velké hloubky materiálu. Velkou předností ultrazvukové metody je téměř naprostá hygienická nezávadnost, jelikož ultrazvuk nevyužívá ekologicky zatěžující látky a ani látky emitující nebezpečné záření, proto při ní nevznikají žádné odpady. Naproti tomu jsou problematické malé, tenké, nepravidelné či nehomogenní vzorky. Materiály s hrubozrnnou strukturou mohou zapříčinit špatný přenos signálu a vysoký podíl šumu.

První část práce se zabývá principem a teoretickými základy ultrazvukové diagnostiky. Jsou zde popsány dvě základní metody zkoušení ultrazvukem a vady, které lze detekovat pomocí ultrazvukové diagnostiky.

Druhá část práce je věnována stručnému popisu ultrazvukového defektoskopu a zkušebních vzorků, které byly navrženy a použity pro praktické měření. To bylo hlavní náplní bakalářské práce. Při měření byly testované vzorky ohřívány na stanovené teploty. Při těchto teplotách bylo testováno, zda má teplota testovaného vzorku vliv na výsledky měření ultrazvukovým defektoskopem.



# 1 NEDESTRUKTIVNÍ DEFEKTOSKOPIE

Nedestruktivní defektoskopie, neboli nedestruktivní testování (non–destructive testing – NDT) je diagnostická metoda, při které se kontroluje jakost výrobku v předvýrobní a výrobní etapě, ale také i v provozu. Pomocí této metody se zajišťuje bezporuchovost, spolehlivost, bezpečnost a životnost vysoce namáhaných jednotlivých dílů v oblasti železniční a letecké dopravy. Uplatnění nenajde pouze v dopravě, ale i v dalších odvětvích jako je jaderná energetika, stavebnictví, chemický průmysl atd. [1, 2, 3].

Při defektoskopii dochází k nedestruktivnímu testování struktury, ať už kovových, nebo nekovových materiálů, za účelem odhalení vnitřních nebo povrchových vad materiálu. Účelem není pouze odhalení vady, ale také její lokalizace v objektu, stanovení typu a rozměrů této vady. Při manuálním testování může dojít k lidskému pochybení, proto je především ve výrobě nahrazováno zcela automatizovaným defektoskopickým systémem. Přesto stále nelze nahradit manuální testování např. při revizi letadel a dopravních prostředků [1, 2].

Neexistuje žádná univerzální metoda nedestruktivního testování, která by odhalila všechny typy vad. Obecné rozdělení metod defektoskopie se dělí podle typu vady, kterou chceme hledat, tedy jestli chceme identifikovat povrchovou nebo vnitřní vadu. Rozdělení metod nedestruktivního testování [1, 2]:

Detekce povrchových vad:

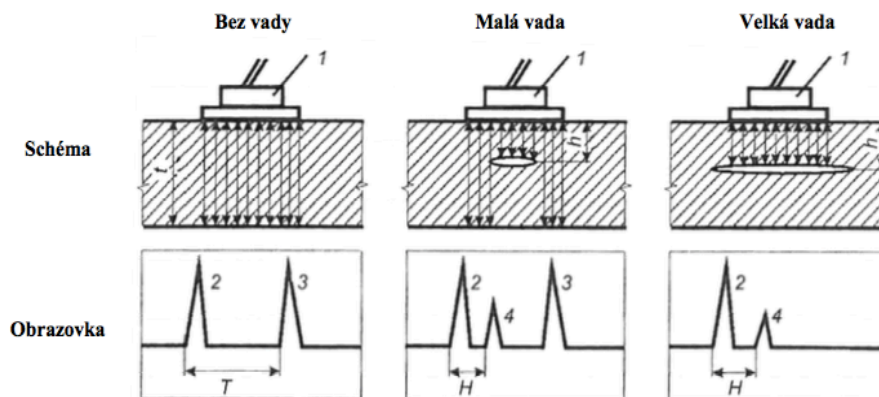
- vizuální metody
- kapilární metody
- magnetické metody
- elektromagnetické metody vířivých proudů

Detekce vnitřních vad:

- ultrazvukové metody
- prozařovací metody

## 2 PRINCIP ULTRAZVUKOVÉ DIAGNOSTIKY

Princip ultrazvukové diagnostiky (obr. 2.1) je založen na prostupnosti a odrazivosti ultrazvukových vln v homogenním materiálu. Ultrazvukové vlny procházejí testovaným materiálem a při dopadu na necelistvost (vadu) nebo rozmezí dvou rozhraní dochází k jejich odrazu zpět do sondy, kde se změní na slabý elektrický signál, který se zobrazí na displeji defektoskopu [1, 4].



Obr. 2.1 – Princip ultrazvukové diagnostiky [5]

1 – okamžik vyslání impulzu, 2 – počáteční pulz, 3 – odražený pulz od protilehlého povrchu, 4 – pulz odražený od vady, T – doba odpovídající dvojnásobné tloušťce materiálu, H – doba odpovídající dvojnásobné vzdálenosti vady od povrchu

### 2.1 Teoretické základy metody

Ultrazvuk je, stejně jako zvuk, mechanické kmitání šířící se v pružném prostředí s frekvenčním rozsahem nad hranicí slyšitelnosti (tedy přes 20 kHz). Frekvenční rozsah ultrazvuku pro defektoskopii se pohybuje od 100 kHz do 50MHz, výjimečně do 200MHz. Ultrazvukové vlny se velice dobře šíří pevnými látkami, proto metoda umožňuje hledání vad i ve velkých hloubkách homogenního materiálu. Podstatou testování ultrazvukem je akustický tlak, který je úměrný elektrickému napětí na polepech ultrazvukové piezoelektrické sondy. Vztah pro výpočet akustického tlaku (1) je následující [1, 5, 6]:

$$p = z \cdot v \quad (1)$$

kde:

p je akustický tlak

z je akustická impedance prostředí

v je rychlost kmitání částic okolo jejich rovnovážné polohy

## 2.2 Druhy ultrazvukových vln

Základním parametrem ultrazvukových vln je vlnová délka  $\lambda$ , která vyjadřuje vzdálenost dvou sousedících bodů kmitajících se stejnou fází ve směru šíření vlnění. Pro výpočet vlnové délky platí vztah [2]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

kde:

$\lambda$  je vlnová délka

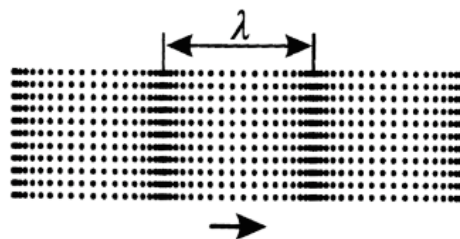
$c$  je rychlost šíření vlny

$f$  je frekvence

Existují čtyři druhy ultrazvukových vln, které se mohou šířit pevnými materiály. Dělí se dle způsobu, jakým se částice prostředí pohybují vzhledem ke směru šíření vlny [1, 2]:

### 1) Podélné (longitudinální) ultrazvukové vlny

Částice prostředí kmitají ve směru šíření vlny. Na obr. 2.2 je vidět, že některé částice se střídavě přibližují a oddalují a tím vznikají tlakové a tahové síly. Výhodou je, že se podélné vlny mohou šířit v tuhém, kapalném a plynném prostředí. Rychlost podélných vln se označuje  $c_L$  [1, 2].

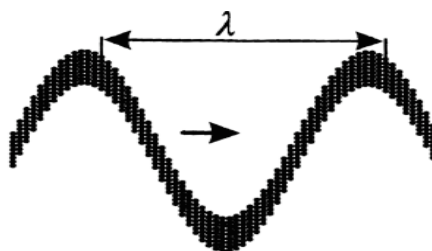


Obr. 2.2 – Podélné (longitudinální) ultrazvukové vlny [1]

### 2) Příčné (transverzální) ultrazvukové vlny

Částice prostředí kmitají kolmo ke směru šíření vlny, přičemž si zachovávají rovný směr v rovině kmitání. Příčné vlny (obr. 2.3) se šíří pouze v tuhém prostředí, které umožňuje

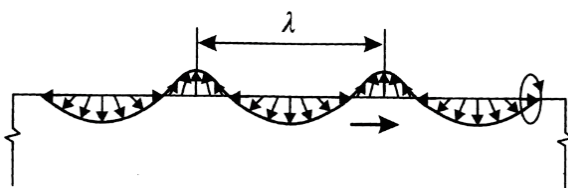
přenášet smykové síly. Rychlost šíření příčných vln se označuje  $c_T$  a je vždy menší než  $c_L$  [1, 2].



Obr. 2.3 – Příčné (transverzální) ultrazvukové vlny [1]

### 3) Povrchové (Rayleighovy) ultrazvukové vlny

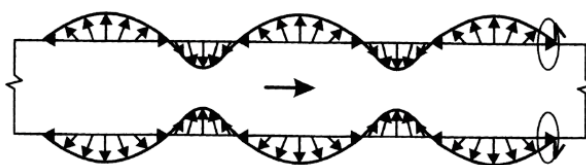
Částice prostředí se u povrchových vln (obr. 2.4) pohybují po eliptické dráze. Vlny se pohybují na povrchu a těsně pod ním do hloubky menší než je vlnová délka  $\lambda$ . Rychlost povrchové vlny se označuje  $c_R$  a její hodnota je 0,8 až 0,9 krát menší než  $c_L$ , neboli rychlost příčné vlny [1, 2].



Obr. 2.4 – Povrchové (Rayleighovy) ultrazvukové vlny [1]

### 4) Deskové (Lambovy) ultrazvukové vlny

Označují se indexem D. Šíří se v materiálech, kde je jeden z rozměrů výrazně menší než zbývající dva rozměry, jako například desky a tenké plechy. Jejich tloušťka je srovnatelná s vlnovou délkou  $\lambda$ . Deskové vlny (obr. 2.5) se mohou dělit na dilatační a ohybové [1, 2].



Obr. 2.5 – Deskové (Lambovy) ultrazvukové vlny [1]

## 2.3 Zdroje ultrazvukových vln

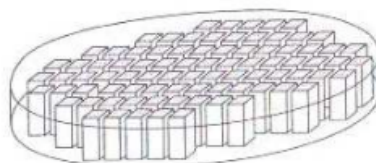
Ultrazvukové sondy jsou zdrojem ultrazvukových vln, které jsou vysílány do testovaného objektu. Za ultrazvukový signál je považován elektrický signál vycházející

z přijímače. Ultrazvuková defektoskopie využívá dva typy měničů, a to piezoelektrické nebo elektromagnetické měniče. Nejvíce se používají sondy s piezoelektrickým měničem [1, 6].

### 2.3.1 Piezoelektrický měnič

Piezoelektrické měniče vypadají jako kruhová nebo obdélníková tenká destička opatřená elektrodami, která je vyrobena z piezokeramického materiálu nebo z piezoelektrického polymeru. Používanějším materiálem je piezokeramika, která je vhodná pro testování materiálu s vyšší teplotou (nad 500 °C). Měnič generuje podélnou nebo příčnou vlnu v závislosti na orientaci směru elektrického pole a polarizaci piezoelektrického materiálu. Body na povrchu měniče kmitají se stejnou amplitudou a fází [1, 2].

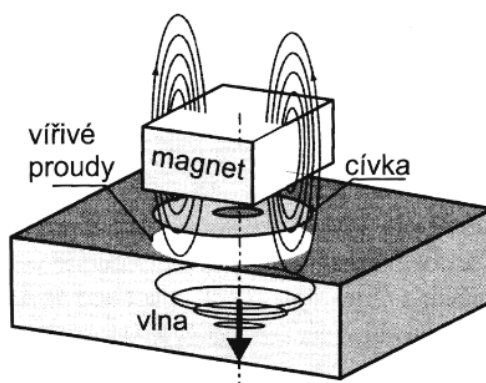
Jestliže přivedeme na elektrody destičky střídavé elektrické napětí, pak dochází k deformaci destičky. Destička se ve směru tloušťky smrští nebo rozšíří a tím dojde k rozkmitání měniče na stejnou frekvenci, jako má přivedené napětí. Ultrazvukové vlny jsou pak dále přenášeny do testovaného materiálu. Měnič funguje i obráceně, kdy zachycuje ultrazvukové vlny, čímž se rozkmitá a vzniká tak na jeho elektrodách elektrické napětí [2, 7].



Obr. 2.6 – Schématické znázornění kompozitního měniče [2]

### 2.3.2 Elektromagnetický měnič (EMAT)

*EMAT (Elektromagnet Acoustic Transducer) se skládá z vodiče nebo plošné cívky (více cívek) a magnetu (více magnetů) umístěného nad objektem (obr. 2.7) [1].*



Obr. 2.7 – Princip měniče EMAT [1]

Jestliže napájíme cívku (vodič) střídavým proudem s požadovanou frekvencí ultrazvukové vlny, pak dojde v elektricky vodivé vrstvě objektu ke vniku elektromagnetického pole do hloubky, která je dána frekvencí proudu. Hloubka vniku elektromagnetického pole vždy musí být menší než vlnová délka  $\lambda$ . V kovovém materiálu v blízkosti cívky pak dochází k indukci vířivých proudů [1, 2, 8].

Ve stejnosměrném magnetickém poli elektromagnetického měniče je princip založen na působení Lorentzovy síly (3) na částice materiálu, které tvoří dráhu vířivých proudů. Velikost síly závisí na velikosti proudu v materiálu a na magnetické indukci vytvořené vnějším polem. Vztah pro výpočet Lorentzovy síly  $F$  je [2]:

$$F = J \times B \quad (3)$$

kde:

- F, J a B jsou vektory
- F je Lorentzova síla
- J je hustota vířivých proudů
- B je magnetická indukce

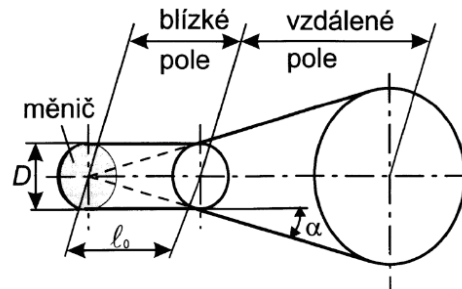
EMAT dokáže nejen generovat ultrazvukové vlny, ale lze jej také použít opačně k transformaci na elektrický signál. Výhodou EMAT měniče oproti piezoelektrickému je, že nepotřebuje vazební prostředí mezi sondou a objektem. Tato mezera nemusí být pouze vzduchová, ale může být například vyplněná ochranným povlakem objektu nebo olejem. EMAT měniče jsou větších rozměrů a v porovnání s piezoelektrickými měniči mají mnohem nižší účinnost. Princip EMAT nelze aplikovat na materiály, které mají elektricky nevodivé

podpovrchové vrstvy materiálu. V takovém případě je u nevodivého materiálu možnost přiložit elektricky vodivou destičku [2].

## 2.4 Ultrazvukové sondy

Jedná se o elektroakustické zařízení obsahující jeden nebo více měničů, které slouží pro transformaci elektrické energie na mechanickou (sonda–vysílač) a mechanické na elektrickou (sonda–přijímač).

Na obr. 2.8 je znázorněna hraniční oblast ultrazvukového pole přímé sondy s kruhovým měničem. Blízké pole (Fresnelova zóna) je vzdálenost od měniče do posledního maxima tlaku a je označováno jako oblast podstatných změn akustického tlaku. Vyhodnocení odražených ech v tomto poli je velmi nepřesné. Proto se používá tzv. plastová předsádka, která odstraňuje negativní vlivy blízkého pole a zároveň chrání sondu před opotřebením. Pro zjišťování vad se používá vzdálené pole. To začíná od poslední maxima tlaku, odkud se také kuželovitě rozšiřuje. Akustický tlak úměrně klesá se vzdáleností od zdroje [1, 9].

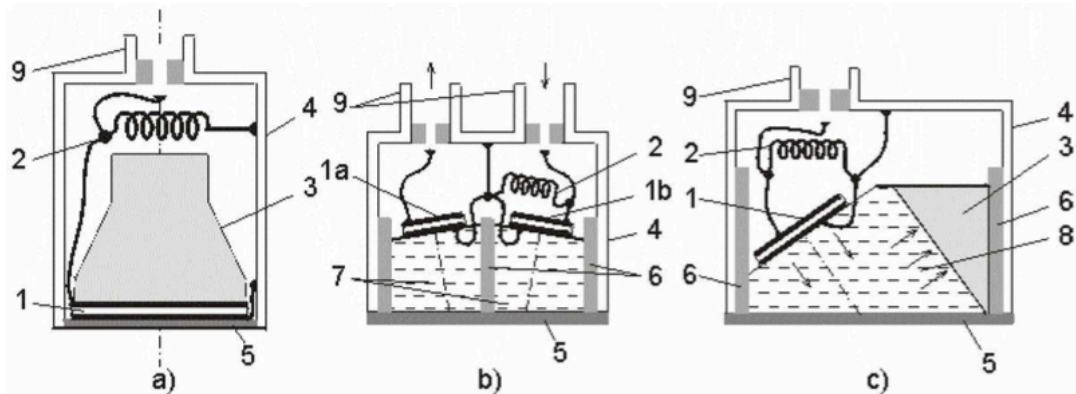


Obr. 2.8 – Hraniční oblast ultrazvukového pole přímé sondy s kruhovým měničem [1]

Pro dosažení co možná nejpřesnějšího měření musí ultrazvukové sondy splňovat určité vlastnosti. Aby bylo možné testovat materiály s velkou tloušťkou při dobrém poměru signálu k šumu, musí sonda generovat impulzy o velké amplitudě. Tato vlastnost je důležitá především pro materiály s velkým útlumem, jako je například litina, austenitická ocel a plasty. Další požadovanou vlastností je, aby sonda vysílala co nejkratší impuls. Tím bude zajištěna dobrá rozlišovací schopnost do hloubky materiálu, ve kterém se nacházejí vady ležící blízko u sebe. Sonda musí být mechanicky odolná a konstrukčně zvládnutá tak, aby nevznikaly parazitní odrazy vnitřní sondy [2].

## 2.4.1 Piezoelektrické sondy

Piezoelektrické sondy jsou nejpoužívanějšími sondami v oboru ultrazvukové defektoskopie. Na obr. 2.9 jsou popsány tři základní typy piezoelektrických sond.



Obr. 2.9 – Ultrazvukové piezoelektrické sondy: a) přímá, b) dvojitá, c) úhlová, 1 – piezoelektrický měnič, 1a – přijímací měnič, 1b – vysílací měnič, 2 – přizpůsobovací cívka, 3 – tlumící cívka, 4 – pouzdro sondy, 5 – ochranná vrstva, 6 – akustická izolace, 7 – předsádka, 8 – lomový klín, 9 – konektor [10]

### A. Přímé sondy

Přímé sondy (obr. 2.9 a)) jsou tvořeny jedním piezoelektrickým měničem určeným k vysílání nebo přijímání ultrazvukových vln (převážně podélných). Vlny jsou vysílány v kolmém směru k povrchu zkoušeného objektu. Povrch tohoto objektu musí být dostatečně rovný a vady nesmí být kolmé k povrchu objektu. Jedná se o nevykonnější a nejpoužívanější sondy. Generátor impulzů je přes oddělovací diody spojen přímo na vstup zesilovače, což má za následek vznik tzv. mrtvé zóny. Mrtvá zóna je oblast, ve které nelze rozpoznat vadové echo. Vznikne prodloužením počátečního echa dokmitávajícího vysílacího impulzu [1, 10].

### B. Přímé sondy s předsádkou

Předsádka představuje vhodné řešení pro odstranění mrtvé zóny. Přímé sondy s předsádkou (obr. 2.10) tak umožňují detekovat i těsně podpovrchové vady. Předsádkou může být například plexisklo, které zároveň chrání sondu před opotřebením, ale také kapalina (např. voda). Předsádka se nachází před měničem a plní úlohu akustické zpoždovací dráhy.



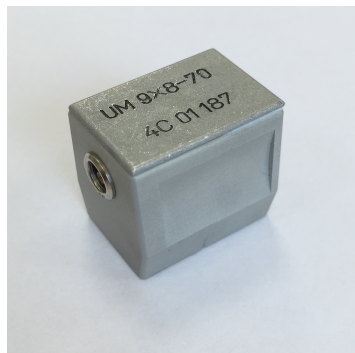
Ta je stanovena tak, aby koncové echo z testovaného objektu dosáhlo měniče později než druhé echo od styčného povrchu předsádky s povrchem [1, 10].



Obr. 2.10 – Příklad přímé sondy s předsádkou [autor]

### C. Úhlové sondy

Úhlové sondy (obr. 2.9 c), obr. 2.11) vysílají ultrazvukové vlny do testovaného objektu pod určitým úhlem ( $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  a  $80^\circ$ ). Úhel udává lomový klín, který je nejčastěji vyráběn ze speciálního plexiskla. Lomový klín s povrchem zkoušeného materiálu tvoří akustické rozhraní, kde dochází k transformaci podélné ultrazvukové vlny na příčnou. Tyto vlny se nesmějí šířit současně, neboť se šíří různou rychlostí a při lokalizaci vady může docházet k chybám [1, 11].



Obr. 2.11 – Příklad úhlové sondy [autor]

### D. Dvojité sondy

V jednom pouzdře jsou umístěny dva akusticky izolované měniče, z nichž jeden slouží výhradně jako vysílač a druhý jako přijímač ultrazvukových vln. Měníč může mít půlkruhový

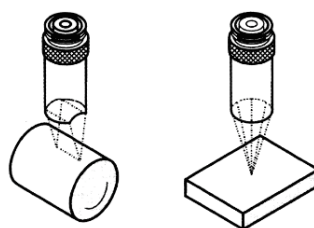
nebo obdélníkový tvar. Jelikož jsou měniče nalepeny na plastové předsádky s určitým sklonem, dochází ke zpoždění průchodu vlny mezi měničem a povrchem zkoušeného materiálu. Tím dochází k odstranění mrtvé zóny. Dvojitě sondy (obr. 2.9 b), obr. 2.12) se využívají pro detekci vad ležících těsně pod povrchem zkoušeného materiálu. Sklon měničů udává citlivost měření u dvojitě sondy [1, 7].



Obr. 2.12 – Příklad dvojitě sondy [autor]

### E. Fokusuující sondy

Akustický svazek fokusuující sondy je soustředěn do malého prostoru (obr. 2.13). Výhodou této sondy je zvýšení citlivosti v místě fokusace ultrazvukového signálu, které je dosaženo tvarovým měničem nebo čočkou (obvykle z plexiskla) [1].



Obr. 2.13 – Příklad provedení fokusuujících sond [1]

### F. Speciální typy sond

Výše uvedené typy sond jsou sondami základními. Existují také speciální typy sond jako například sondy s proměnným úhlem, skupinové sondy, sondy přizpůsobené tvaru povrchu měřeného objektu, imerzní sondy s akustikou impedancí přizpůsobenou vodě, odvalovací sondy aj. [1].

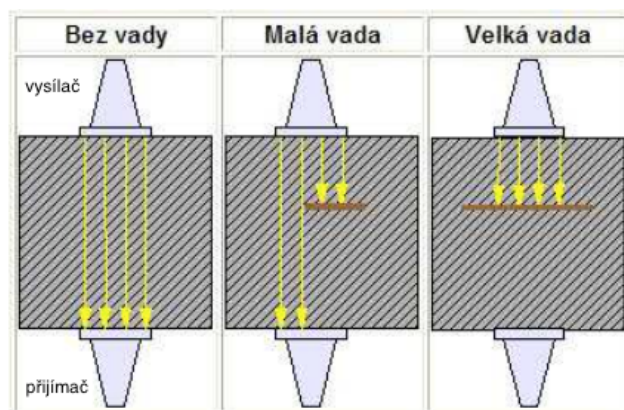
## 2.5 Metody zkoušení

V ultrazvukové defektoskopii se pro detekci vad využívá dvou základních metod zkoušení. V obou těchto metodách dochází k šíření ultrazvukových vln materiálem. Jedna je založena na jejich průchodu materiálem (průchodová) a druhá na jejich odrazu od vady nebo povrchu materiálu (odrazová).

### 1) Průchodová metoda

Při měření se využívá dvou ultrazvukových sond, kde jedna je vysílací a druhá přijímací. Tyto sondy jsou umístěné v ose na protilehlých stranách zkoušeného objektu. Princip průchodové metody (obr. 2.14) je založen na měření poklesu akustického tlaku mezi vysílací a přijímací sondou. Po dopadu ultrazvukových vln na vadu dochází k jejich odrazu, tím za vadou vznikne stín a do přijímací sondy přichází menší množství energie. Během měření dochází k přirozenému útlumu signálu v materiálu, proto se provádí srovnávací měření na místě s vadou a bez vad [1, 5].

Metoda je vhodná pro měření materiálů s velkým útlumem a menších tloušťek (tenké plechy, ložiskové pánve, plátované materiály). Nevýhodou průchodové metody je malá rozlišovací schopnost a nemožnost lokalizovat polohu vady v materiálu. Nutnost přístupu k materiálu z obou stran [1, 6].



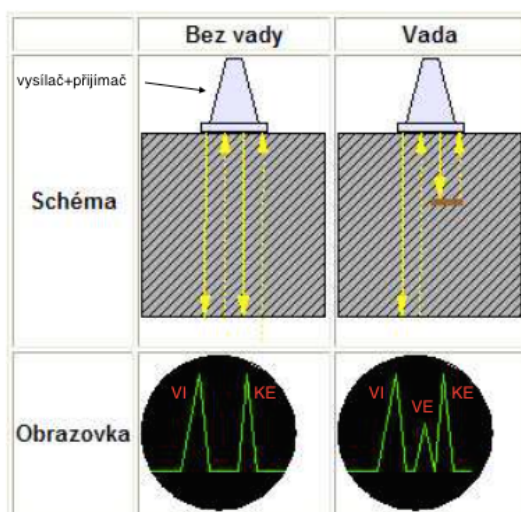
Obr. 2.14 – Princip průchodové metody (upraveno) [10]

### 2) Odrazová metoda

Odrazová metoda (obr. 2.15) je nejpoužívanějším principem ultrazvukové defektoskopie. K měření se většinou využívá jedna sonda se dvěma měniči, která funguje jako

vysílač a přijímač. Pomocí vysílací sondy jsou do materiálu vysílány krátké impulzy, které se odráží od vad a povrchu materiálu zpět materiálem. Vysílací sonda pak zachytí odražené impulzy a z doby, která uplyne mezi vysláním a příjmem impulzů, se určuje vzdálenost vady od měniče. Při vyslání impulzu do materiálu se na obrazovce zobrazí vysílací impulz (VI). Odraz od protilehlé stěny je zobrazen jako koncové echo (KE). Jestliže se na obrazovce měřícího přístroje zobrazí mezi vysílacím impulzem (VI) a koncovým echem (KE) nějaké jiné echo, jedná se o vadu neboli vadové echo (VE). Velikost vady lze přibližně určit z velikosti amplitudy echa.

Výhodami odrazové metody je schopnost poměrně přesně lokalizovat vadu a určit rozsah vady. Na rozdíl od průchodové metody stačí pro zkoušení přístup pouze z jedné strany zkoušeného materiálu. Nevýhodou je tzv. mrtvé pásmo, které neumožňuje detekci těsně podpovrchových vad. Tato metoda byla použita při praktickém měření v kapitole 5 [1, 7, 10].



Obr. 2.15 – Princip odrazové metody (upraveno) [10]

## 2.6 Měření ultrazvukem

Postup měření ultrazvukem se liší dle použité metody (průchodová nebo odrazová), měřeného objektu, typu sond atd. V této kapitole je uvedena příprava na měření a obecný postup měření ultrazvukovou metodou.

### 2.6.1 Příprava na měření

Před samotným měřením testovaného objektu ultrazvukovým defektoskopem je třeba učinit několik nezbytných kroků:

- 1) příprava zkoušeného povrchu – povrch by měl být hladký a rovný, aby bylo možné umístění sondy
- 2) výběr vhodné metody – metoda je vybírána na základě tvaru, struktury materiálu a tloušťky zkoušeného materiálu
- 3) volba sondy – závisí na struktuře zkoušeného materiálu a přístupu ke zkoušenému materiálu
- 4) volba akustické vazby – téměř v každém případě se používá tzv. akustická vazba (viz níže)
- 5) rozsah zkoušení – je dán požadavky zákazníka

### 2.6.2 Postup měření

V této části je popsán obecný postup pro měření ultrazvukovým defektoskopem. Jsou zde vysvětleny pojmy (akustická vazba a kalibrační měřky), které jsou zmíněny v následujícím postupu měření:

1. připojení defektoskopu k síťovému napájení
2. připojení ultrazvukové sondy (ultrazvukových sond) na BNC konektory
3. zapnutí a nastavení přístroje pro měření s příslušnou ultrazvukovou sondou
4. nanesení akustické vazby na povrch měřeného materiálu
5. přiložení ultrazvukové sondy k povrchu zkoušeného materiálu
6. kalibrace přístroje (kalibrační měřky)
7. vlastní měření

#### **Akustická vazba**

Akustická vazba zajišťuje přenos ultrazvukových vln ze sondy do zkoušeného materiálu. Nachází se tedy na rozhraní mezi sondou a povrchem zkoušeného materiálu. Nebýt akustické vazby, z měniče sondy by do povrchu zkoušeného materiálu prošla jen nepatrná

část akustického tlaku. Jako vazbové médium se používá voda, olej a speciální gely. Pro hrubší povrchy se používá např. vazelína a glycerín [2].

## Kalibrační měrky

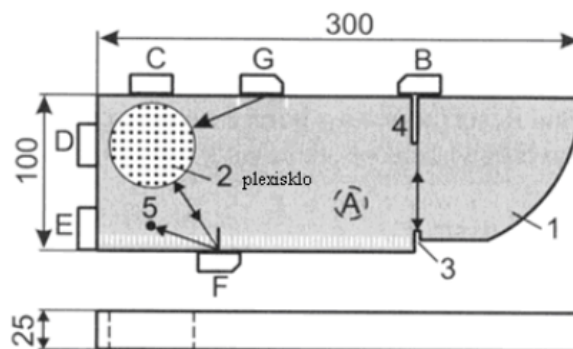
Kalibrační měrky jsou používány pro ověření přesnosti měření ultrazvukových přístrojů a ultrazvukových sond. Měrky by měly být zhotovené z materiálu se stejnými akustickými vlastnostmi, jako má zkoušený materiál. Existují tři základní typy měrek, které mají definovanou geometrii, materiál a jakost povrchu v souladu s normami ČSN EN nebo ANSI/AWS [1, 2, 12].

### 1) Kalibrační měrka K1

Měrka K1 (obr. 2.16), která je používána mezinárodně (ČSN EN 12223) je vyrobena z oceli a má následující parametry:

- rychlost šíření podélných vln:  $c_L = 5920 \text{ m/s}$
- rychlost šíření příčných vln:  $c_T = 3255 \text{ m/s}$
- koeficient útlumu při  $f = 6 \text{ MHz}$ :  $\alpha = 0,05 \text{ dB/mm}$

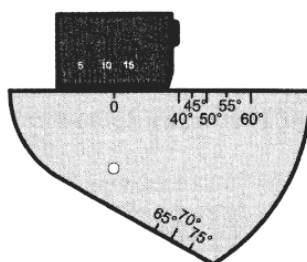
Základní kalibrační měrka K1 umožňuje provádět u přímé sondy tyto úkony: kalibrace rozsahu časové základny, kontrola a nastavení citlivosti podélných a příčných vln, určení maximálního dosahu, určení hloubkové rozlišovací schopnosti a odhad délky mrtvého pásma. U úhlových sond lze také ověřit úhel lomu a označený bod výstupu [1, 13, 14].



Obr. 2.16 – Kalibrační měrka K1 [13]

## 2) Kalibrační měrka K2

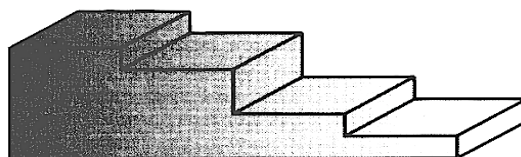
Měrka K2 (ČSN EN 27963) (obr. 2.17) je stejných parametrů, ale menších rozměrů než měrka K1. Je také podstatně lehčí, a proto také vhodná pro provozní podmínky. Není vhodná pro úplnou kontrolu ultrazvukového přístroje. Na rozdíl od měrky K1 neumožňuje vyhodnocovat rozlišovací schopnost a maximální dosah vlny [1, 12].



Obr. 2.17 – Kalibrační měrka K2 [1]

## 3) Stupňové kalibrační měrky

Stupňové měrky (obr. 2.18) jsou vyráběny z oceli v různém provedení (různý počet stupňů, tloušťky a šířky). Jsou určeny pro kalibraci dvojitých sond, ale lze je také použít pro ověřování přesnosti měření tloušťky materiálu [1].



Obr. 2.18 – Stupňová kalibrační měrka [1]

## 2.7 Vady materiálů a výrobků

Vada je obecně odchylka provedení výrobku (rozměru, tvaru a polohy, povrchu, nečelistvosti apod.) od vlastností, které jsou předepsány v technických normách nebo v jiných technických dokumentech, podle nichž je výrobek zkoušen a prodáván. Obdobné názvy pojmu vada jsou diskontinuita, nečelistvost, nehomogenita, apod. Některé vady mohou vzniknout již při výrobě, jiné zase při provozu.

Opravitelnou vadu výrobku lze opravit vhodným způsobem, který je předepsán v technických normách nebo v jiných dokumentech, dle kterých je výrobek zkoušen a dodáván [2, 13].

### 2.7.1 Třídění vad

V tab. 2.1 je uvedeno základní třídění podle druhu vad, nicméně vady výrobků lze také třídit dle různých hledisek: příčin vzniku, způsobu, stádia jejich zjišťování atd. Třídění dle druhu vad je přehledný a v technické dokumentaci je obvyklé [2].

Tab. 2.1 – Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis [2]

Skupina vad		Všeobecná charakteristika
číslo	název	
1	Vady rozměrů	Nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku a jejich mezní úchyly
	Vady tvaru a polohy	Nedodržení požadavků na vzdálenosti vyjadřující polohu posuzované plochy, osy nebo roviny souměrnosti výrobku, vzhledem k její jmenovité poloze
2	Vady povrchu	Nedodržení požadavku na předepsané provedení povrchu
3	Necelistvosti	Necelistvosti hmoty výrobku
4	Vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami	Nedodržení požadavků na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktury, mikrostruktury apod.

### 2.7.2 Vady detekované pomocí ultrazvuku

Ultrazvuková defektoskopie umožňuje zjišťování vnitřních vad materiálů a výrobků. Vady, které lze detekovat pomocí ultrazvukové diagnostiky, jsou makroskopické vady a necelistvosti:

- dutiny
  - staženiny
  - bubliny
- vločkové trhliny
- vycezeniny (segregace)
- makroskopické nekovové vměstky

#### Dutiny

Mezi dutiny spadají především:

- staženiny
- bubliny



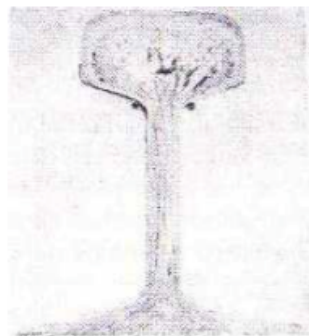
## Staženiny [2]

Vznikají při tuhnutí oceli v kokilách vlivem zmenšování objemu. Staženina ve válcových výrobcích má vzhled rozsáhlé necelistvosti, nepravidelné dutiny nebo nepravidelně tvarované i rozvětvené trhliny u tyčí a drátů. U ploché oceli a tlustých plechů mohou také vypadat jako rozdvojení. Staženiny jsou zpravidla orientovány v podélném směru osy výrobku a mohou být také vyplněny struskou nebo plyny (obr. 2.19).

Detekce staženin pomocí ultrazvukové metody je operativnější, bezpečnější i levnější než při detekci prozařovací metodou. Oproti tomu interpretace výsledků není tak jednoznačná jako u metod prozařovacích.



Obr. 2.19 – Soustředěná staženina a plynové bubliny v ocelovém ingotu [2]

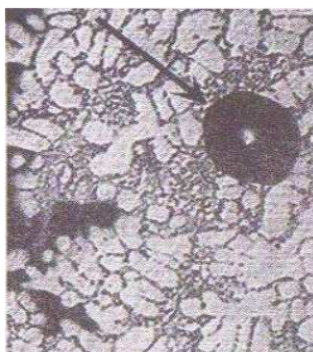


Obr. 2.20 – Makrovýbrus příčného řezu kolejnicí se stopami staženiny [2]

## Bubliny [15]

Vznikají například při intenzivním přelévání taveniny, kdy se do odlitku dostane plyn (vzduch, vodík apod.). Tento plyn se pak nestihne uvolnit z taveniny a zůstane ve ztuhlém odlitku (obr. 2.21).

Detekce bublin je v případech, kdy vada zasahuje do čelní plochy vývalku, možná vizuální metodou. V kompaktních vývalcích lze bubliny detekovat pomocí ultrazvukové a prozařovací defektoskopie.



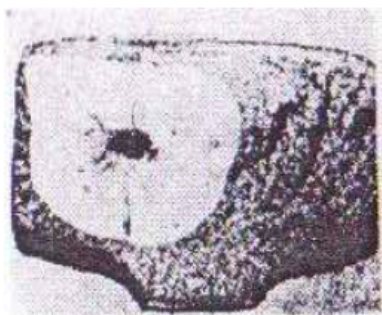
Obr. 2.21 – Vodíková bublina (označena šipkou) v odlitku ze slitiny AlSi10 [15]

### Vločkové trhliny [2]

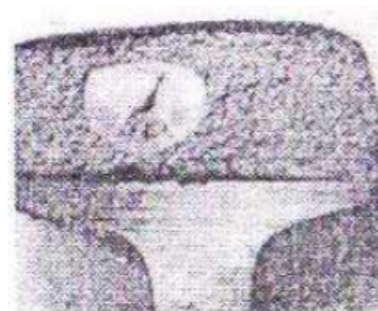
Jsou to vnitřní plošné necelistvosti vzhledem připomínající vločky, které zpravidla nejsou na řezech výrobku bez zvláštní přípravy viditelné. Vločkové trhliny (obr. 2.22, obr. 2.23) neboli vločky se zpravidla nacházejí v ocelích s vyšší pevností (600 MPa a více) a větších průřezů (od 50 mm výše). Na lomové ploše jsou obdélníkového nebo eliptického tvaru, vzhledově stříbřitě lesklé plošky. Jsou ohraničené od okolní strusky lomu a jejich průměr je několik milimetrů, ale mohou být i velké až 15 – 20 mm.

Vločky vznikají společným působením makroskopického hnutí a mikropnutí, které je vyvoláno uvolňováním vodíku při chladnutí vývalku. Zabránit vzniku vloček lze vakuováním tekuté oceli před odlitím nebo řízeným ochlazováním vývalku.

Vločky se nejspolehlivěji detekují pomocí dvojitého čelních sond, použití šikmých sond není vhodné. Podélné a šikmé vločky jsou zjišťovány při detekci z boku vývalku. Z čela vývalku lze zjistit příčné vločky. Na osciloskopu jsou zobrazeny jako výrazná vadová echa ve středové oblasti materiálu. Oproti ostatním vadám detekovaným ultrazvukem (staženiny, vycezeniny nebo tvářecí trhliny) se vločky při pohybu sondy zobrazují a mizí skokově.



Obr. 2.22 – Vločková trhlina v hlavě kolejnice, která se porušila za provozu [2]



Obr. 2.23 – Vločky v kolejnici zjištěné detekčním ultrazvukovým vozem [2]

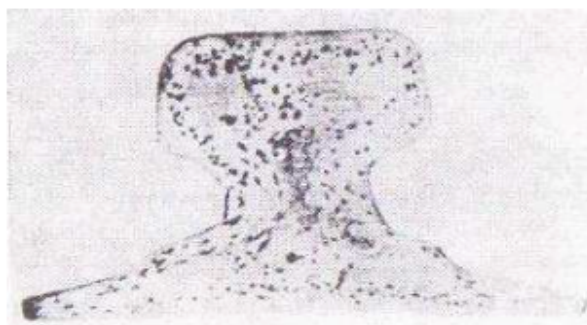
## Vycezeniny (segregace) [2]

Vznikají zákonitým důsledkem segregáčních dějů při krystalizaci oceli, ale za vadu jsou považovány až po přesáhnutí rozsahu, který je stanoven technickými podmínkami. Vycezeniny (obr. 2.24, obr. 2.25) jsou makroskopické oblasti, které obsahují zvýšený hladiny vměstků, fosforu, síry, uhlíku a dalších prvků. V neuklidněných ocelích se nacházejí ve středové oblasti a jsou zřetelně ohraničeny obvodovou vrstvou čistého kovu. V uklidněných ocelích jsou naopak rozptýleny po průřezu nebo jsou soustředěny do osové oblasti podle charakteru tuhnutí ingotu. Množství a intenzita vycezenin se směrem k hlavě ingotu zvyšují. Příčinami zvýšeného výskytu vycezenin může být vyšší obsah fosforu a síry, velké naplynění oceli, použití nevhodného tvaru kokily a teploty a rychlosti lité.

Ultrazvukovou diagnostikou je přítomnost výraznějších vycezenin zaznamenána vadovými echy, které jsou zpravidla členité, s plynule se měnící polohou a intenzitou při pohybu sondy po délce vývalku.



Obr. 2.24 – Rozložení V–vycezenin v ocelovém ingotu [2]

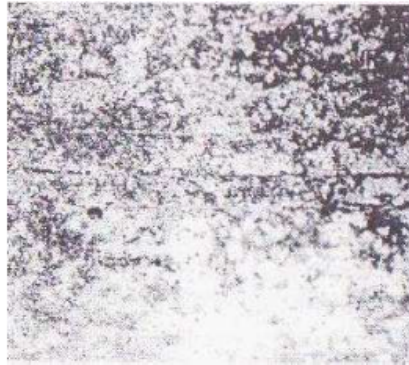


Obr. 2.25 – Rozložení segregací jako jednotlivé body ve výkovku [2]

## Makroskopické nekovové vměstky [2]

Jsou to cizorodé nekovové částice, shluky, žíly nebo řetězce částic, které se vyskytují uvnitř (obr. 2.26), ale i na povrchu materiálu. Povrchové vměstky jsou viditelné pouhým okem, zatímco uvnitř materiálu jsou zjišťovány pomocí ultrazvuku.

Vznik makroskopických nekovových vměstků pochází ze žáruvzdorné hmoty, která přichází do styku s ocelí během výroby a hlavně během odlévání. Dalšími zdroji vměstků jsou pecní i kokilová struska a menší částice odtavované proudem tekuté oceli reagující s desoxidacími zplodinami.



Obr. 2.26 – Podpovrchové vměstky [2]

### Únavový lom [2]

Ultrazvuková diagnostika je také využívána pro kontrolu rotujících součástí strojů jako jsou hřídele, osy a nápravy. Při každé otáčce jsou tyto součásti vystaveny cyklicky se opakujícímu namáhání, při němž se tahové napětí mění na tlakové a naopak. U takto namáhaných součástí dochází často k únavě materiálu a následně ke vzniku únavového lomu (obr. 2.27).



Obr. 2.27 – Typický vzhled únavového lomu hřídele [2]

### 2.7.3 Vlastnosti vad [2]

Nejpodstatnějšími vlastnostmi, které mají vliv na odraz ultrazvukových vln jsou:

- skutečná velikost vady
- tvar vady
- povrch vady (drsnost)
- poloha a orientace vady vůči svazku ultrazvukových vln

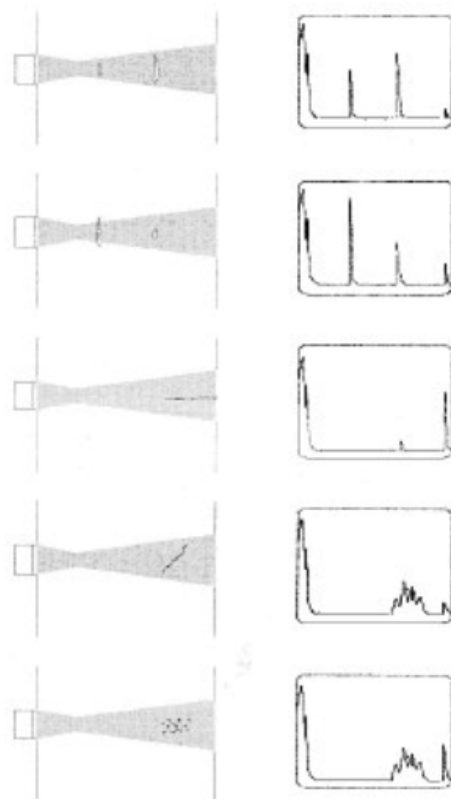
Ultrazvuková diagnostika umožňuje pouze přibližné určení vad. Pro přesné určení velikosti vad v materiálu je zapotřebí destruktivní zkoušky. Při vyhodnocení velikosti vady závisí na velikosti echa, které je od vady odražené. Velké echo je způsobeno silným odrazem od vady, ale neplatí to obráceně. Malé echo nemusí nutně znamenat malou vadu, může se jednat o vadu velkou, která je zkreslená tvarem a orientací vady vůči dopadajícímu svazku.

Rozptyl ultrazvukových vln je závislý na tvaru vady. Po dopadu vln na kulaté vady (bubliny) dochází k jejich odrazu v širokém prostorovém úhlu a pouze malá část vln se vrací zpět do sondy. Echa těchto vad jsou malá a při detekci z více stran se jejich výška příliš nemění. Jinak je tomu u plošných vad, kde jsou echa při kolmém dopadu svazku podstatně větší. Při změně směru dopadu ultrazvuku výška echa rychle klesá.

Drsnost povrchu vady resp. mikronerovnosti se při zkoušení projevují pozitivně. Jestliže je totiž vada nevhodně orientována, mikronerovnosti způsobí, že se malá část dopadajícího akustického tlaku vrátí zpět do sondy. Příkladem může být šikmý dopad ultrazvuku na plošnou chybu, kde by v případě ideálního hladkého povrchu došlo k odrazu mimo sondu. V případě, kdy jsou na povrchu vady mikronerovnosti, se uplatní rozptyl a malá část vlnění se tak odrazí zpět do sondy.

Pokud je to možné, volíme umístění sondy tak, aby šíření vlnění bylo kolmé na směr předpokládaných vad. Při kolmém dopadu svazku na vadu dochází k největšímu odrazu akustického tlaku zpět do sondy (největší echo). Vzdálenost (poloha) vady od sondy má také vliv na velikost echa a to nejen kvůli útlumu materiálu, ale také z důvodu divergence svazku ve vzdáleném poli. Chyba nacházející se v blízkém poli se může jevit větším echem, než rozměrově větší chyba, která se nachází se v poli vzdáleném.

Na obr. 2.28 jsou zachycené vady, které byly zmíněny v této kapitole. V pravé části obrázku je jejich zobrazení na obrazovce.



Obr. 2.28 – Projev vad a jejich zachycení na obrazovce [2]



### 3 UNIVERZÁLNÍ ULTRAZVUKOVÝ DEFEKTOSKOP

Pro praktické měření byl využit univerzální ultrazvukový defektoskop DiO 562 (obr. 3.1) od firmy Starmans [11]. Ultrazvukový defektoskop DiO 562 je malý, lehký a kompaktní přístroj, který je určen pro:

- detekci a lokalizaci vady v materiálu
- určení velikosti vady
- měření tloušťky stěny
- zkoušku spojů (svárů) materiálů
- možné použití pro mechanizované nebo poloautomatizované zkušební zařízení



Obr. 3.1 – Ultrazvukový defektoskop DiO 562 [autor]

#### Vlastnosti defektoskopu:

- malá váha a rozměr
- možnost polohování přístroje
- lehká údržba (čištění) ovládací plochy displeje
- možnost ukládání nastavení a naměřených dat do paměti přístroje
- přenos dat z přístroje do PC a zpět pomocí linky RS 232

## Základní technická data defektoskopu

V tab. 3.1 jsou vybrány pouze nejdůležitější technická data přístroje (všeobecné, zobrazovací jednotka, zesilovač a atenuátor).

Tab. 3.1 – Základní technická data přístroje [11]

Specifikace	Hodnota
<b>Všeobecné:</b>	
rozměry	235 x 145 x 55 mm
hmotnost	2,4 kg
druh napájení	akumulátorové, síťové
typ zásuvky pro sondy	BNC
teplotní rozsah	-20 °C až +40 °C
<b>Zobrazovací jednotka:</b>	
počet dílků vertikální osy	5 (po 20 % výšky)
počet dílků horizontální osy	dle zkušebního rozsahu
odřez šumu	0 % až 90 %
rozmezí rychlosti	1000 m/s až 9999 m/s
zpoždění v krytí nebo plexiklínu sondy	0,0 $\mu$ s až 100,0 $\mu$ s
<b>Zesilovač a atenuátor:</b>	
rozsah zesílení	0,0 až 80,0 dB
krok zesílení (volitelné)	0,1 dB; 0,5 dB; 1,0 dB a 6,0 dB
mrtvá doba za vysílacím impulzem	cca 10 $\mu$ s při tlumení 30 $\Omega$

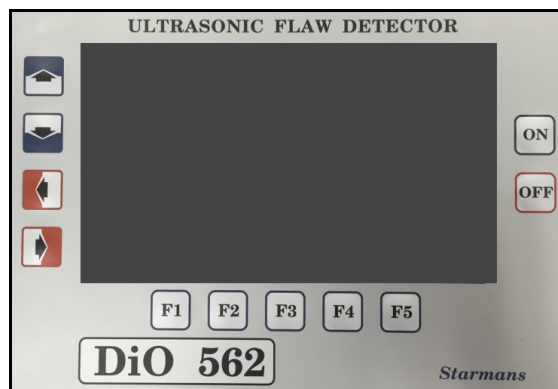
### 3.1 Stručný popis defektoskopu

Ultrazvukový defektoskop DiO 562 je zabudovaný do kovového pouzdra. Je ovládán pomocí membránových tlačítek na čelním panelu.

#### A. Čelní panel

Čelní panel defektoskopu (obr. 3.2) je tvořen displejem a ovládacími membránovými tlačítky, která se nacházejí kolem displeje.





Obr. 3.2 – Čelní panel defektoskopu [autor]

### **Tlačítka „ON“ a „OFF“**

Základní tlačítka, která slouží pro zapnutí („ON“) a vypnutí („OFF“) přístroje. Jsou umístěna vpravo od displeje.

### **Tlačítka kurzoru „↑ ↓ ← →“**

Tyto tlačítka mají naznačený směr a slouží pro pohyb kurzoru a pro práci v menu. Jsou umístěna vlevo od displeje.

Tlačítko „↑“ slouží k pohybu kurzoru směrem nahoru. Tlačítko „↓“ slouží pro pohyb kurzoru směrem dolů. Tlačítko „←“ umožňuje snižování vybrané hodnoty a také funguje jako tlačítko „OFF“ (vypíná nastavenou funkci). Tlačítko „→“ funguje opačně, umožňuje tedy zvyšování vybrané hodnoty a také může fungovat jako tlačítko „ON“ (zapíná nastavenou funkci).

### **Funkční tlačítka „, F1, F2, F3, F4, F5“**

Tyto tlačítka lze uživatelsky naprogramovat pro urychlení nastavování přístroje. Po stisknutí tlačítka se kurzor přemístí na předem naprogramovanou polohu (např. „ZESIL“). Funkční tlačítka se nacházejí pod displejem.

## **B. Horní panel**

Na horním panelu (obr 3.3) se nachází konektor pro přívod napájení z vnějšího stejnosměrného zdroje 12 V / 500 mA, konektory pro připojení ultrazvukových sond a konektor komunikační sériové linky RS232, která slouží pro přenos dat do počítače. Nachází

se zde také slot na paměťovou kartu typu PCMCIA, na kterou jsou ukládány všechna nastavení (tzv. „setupy“), echogramy a případně i zvukové poznámky.

Sondy s jedním měničem (přímé, uhlové) jsou připojovány do BNC konektor „IN“ (vstup), kdežto sondy se dvěma měniči do BNC konektorů „OUT“ (výstup) a „IN“ (vstup).



Obr. 3.3 – Horní panel defektoskopu [11]

### C. Zadní strana přístroje

Zadní stranu přístroje tvoří pouze akumulátory, které jsou v ochranném kovovém pouzdře.



Obr. 3.4 – Zadní strana defektoskopu [autor]

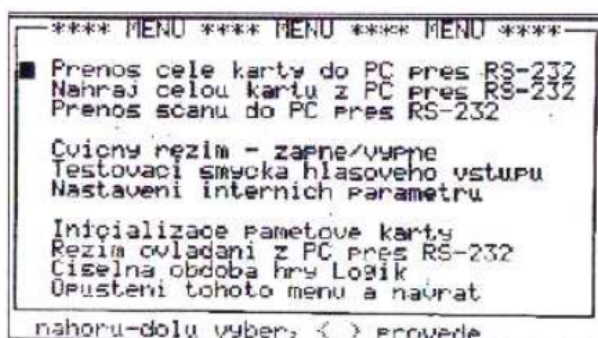
## 3.2 Přehled menu přístroje

Ultrazvukový defektoskop DiO 562 má tři typy menu:

- Konfigurační menu
- Vstupní menu
- Pracovní menu

### 3.2.1 Konfigurační menu přístroje

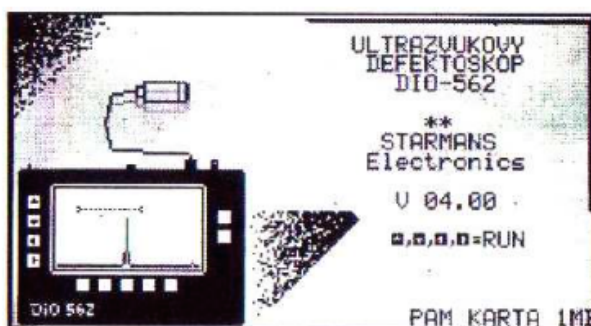
„Konfigurační menu“ (obr. 3.5) lze spustit při zapnutí přístroje současným stiskem tlačítka „ON“ a tlačítka „↑“. Slouží především pro komunikace s PC přes linku RS 232.



Obr. 3.5 – Konfigurační menu přístroje [11]

### 3.2.2 Vstupní menu přístroje

„Vstupní menu“ (obr. 3.6) se objeví na displeji přístroje ihned po jeho spuštění. Toto menu je pouze informační. Jsou zde informace o verzi softwaru přístroje a základní informace o paměťové kartě. Stiskem jednoho z tlačítek kurzoru přístroj přejde do „Pracovního menu“.



Obr. 3.6 – Vstupní menu přístroje [11]

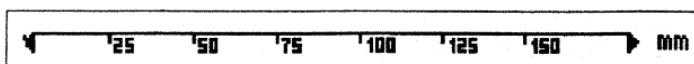
### 3.2.3 Pracovní menu přístroje

Po stisku libovolného tlačítka kurzoru ve „vstupním menu“ se na obrazovce objeví „Základní pracovní menu“ („PARAM“). Přístroj má ještě další tři pracovní menu („MEMO“, „TOOLS“ a „GATES“). Pracovní menu a nabídka parametrů, která se nachází v pravé části obrazovky se nazývá podmenu („submenu“).

V případě, že je kurzor na názvu menu (tj. první položka v menu), lze mezi těmito submenu přepínat pomocí tlačítek „←“ a „→“. Pohyb po jednotlivých položkách vybraného

submenu je možný tlačítka „↑“ a „↓“. Zapnutí nebo vypnutí vybrané funkce a hodnotu vybrané položky lze skokově měnit pomocí „←“ a „→“.

V každém pracovním menu je v pravém dolním rohu symbol baterie ukazující kapacitu akumulátorů. Pod časovou základnou (obr. 3.7) se nacházejí symboly („◀“ a „▶“), které umožňují pomocí kurzoru ovládnutí lupy a nastavení časové základny (měřicího rozsahu). Na pravé straně časové základny jsou uvedeny jednotky („mm“ nebo „ $\mu s$ “), kterými lze měřit dráhu ultrazvuku.



Obr. 3.7 – Časová základna [11]

### **Pracovní menu**

V této části jsou stručně popsány jednotlivá pracovní menu („PARAM“, „MEMO“, „TOOLS“ a „GATES“).

#### **„PARAM“**

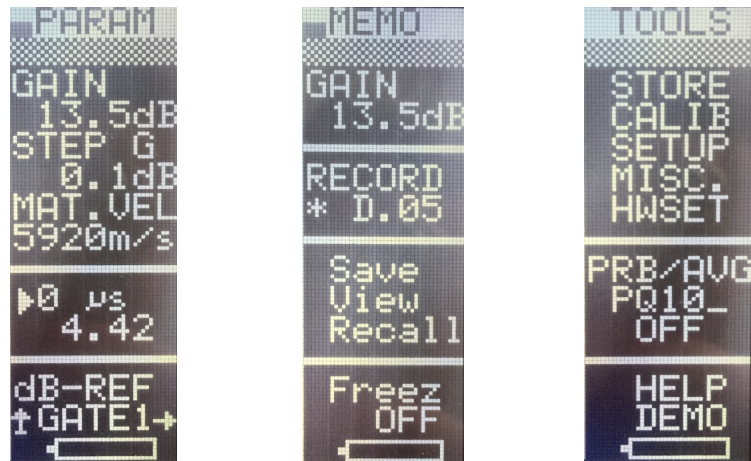
„Základní pracovní menu“ (obr. 3.8 vlevo) umožňuje nastavení základních parametrů přístroje pro měření (např. zesílení, krok zesílení, rychlost šíření ultrazvuku v materiálu a nastavení zpoždění v krytí sondy, předsázce nebo v plexiklínu u úhlových sond).

#### **„MEMO“**

Menu „Echograf“ (obr. 3.8 uprostřed) slouží k ukládání echografů na paměťovou kartu PCMCIA, vyvolání uložených záznamů beze změny nastavení přístroje nebo se změnou celkového nastavení přístroje.

#### **„TOOLS“**

Z menu „Pomůcky“ (obr. 3.8 vpravo) je možný přístup do čtyř pracovních submenu a tří pomocných submenu, které slouží pro nastavení přístroje.

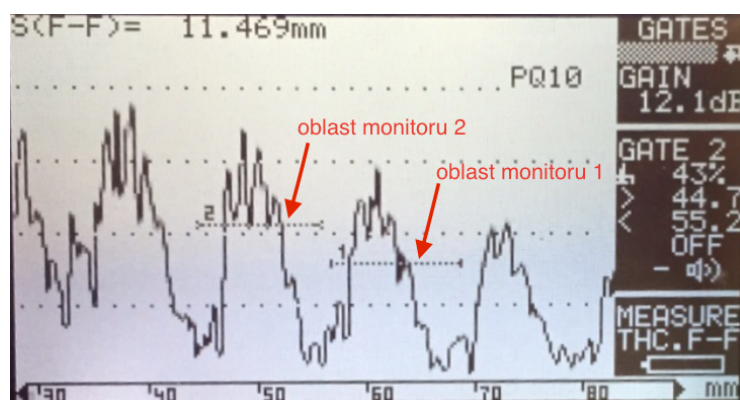


Obr. 3.8 – Pracovní menu (zleva) „PARAM“ „MEMO“ a „TOOLS“ [autor]

## „GATES“

Pracovní menu „Monitor“ (obr. 3.9) slouží především pro práci až se třemi monitory. Tyto monitory jsou navzájem nezávislé, proto mohou být jejich parametry nastaveny individuálně. Pro každou oblast monitoru („GATE X“) lze nastavit spínací úroveň monitoru (v % výšky displeje), začátek („přední hranu“) a konec („zadní hranu“) monitoru nebo zapínání a vypínání vybraného monitoru. Je zde také výběr způsobu měření („MEASURE“):

- VYP = měření vypnuto
- BOK – BOK (F – F) = měří se náběžná a náběžná hrana echa
- MAX – MAX = měří se vrcholy echa
- 0 – BOK (0 – F) = měření od počátku (nuly) a náběžná hrana echa
- A,0 – MAX = amplituda echa a vrchol echa



Obr. 3.9 – Pracovní menu „GATES“ s vyznačenými oblastmi monitoru [autor]

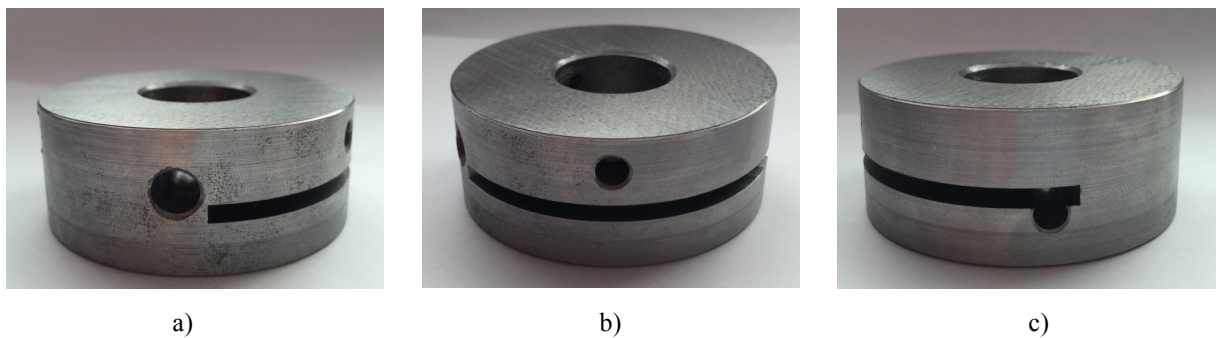
## 4 NÁVRH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Pro praktické měření byly navrženy a zhotoveny dva zkušební vzorky (obr. 4.1 a obr. 4.2). Vzorky jsou z odlišného materiálu, mají různý tvar a rozměry. Do vzorků byly nejprve vyvrtány kulaté díry různých velikostí simulující vady (necelistvosti) materiálu. Při měření se však ukázalo, že vady s takto kulatým povrchem nejsou vhodné pro detekci ultrazvukovým defektoskopem použitým v praktickém měření. Při dopadu vln na necelistvost s kulatou plochou totiž dochází k rozptylu vln do materiálu. Pro potřeby měření byly tedy do vzorků pomocí pásové pily navíc vyrobeny vady ploché. Tyto uměle vytvořené vady již bylo možné detekovat.

Oba vzorky mají ve svém středu zhotovenou díru o průměru 25 mm, která je určena pro indukční ohřev materiálu, o tom více v kapitole 5.1.

### Zkušební vzorek č. 1

Vzorek č. 1 je vyroben z oceli. Na obr. 4.1 jsou vidět vyvrtané díry různých velikostí a následně vytvořený zářez pásovou pilou. Pro lepší přenos akustického tlaku ze sondy do zkoušeného materiálu je povrch vzorku z obou stran zbrúšen do hladka.

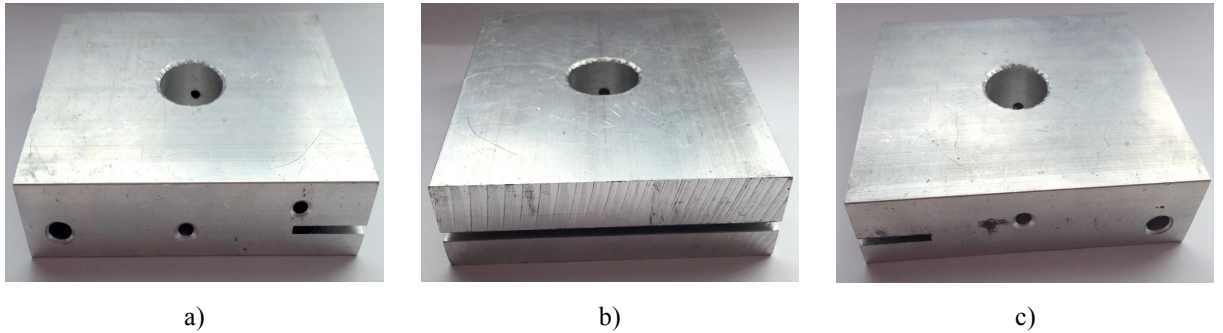


Obr. 4.1 – Zkušební vzorek č. 1  
a) čelní pohled, b) boční pohled, c) zadní pohled [autor]



## Zkušební vzorek č. 2

Vzorek č. 2 (obr. 4.2) je vyroben z hliníku. I v tomto vzorku jsou vyvrtány díry a vyroben zářez pásovou pilou po celé šíři vzorku. Jelikož povrch hliníku je hladký, nebylo nutné jej upravovat.



Obr. 4.2 – Zkušební vzorek č. 2  
a) čelní pohled, b) boční pohled, c) zadní pohled [autor]

## 5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Praktické měření zkušebních vzorků bylo prováděno pomocí ultrazvukového defektoskopu DiO 562, který byl již popsán v kapitole 3. Uměle vytvořené vady vzorků byly změřeny při různých teplotách. Zkušební vzorky byly nejprve schlazeny na nižší teplotu (0 °C) a následně byly ohřívány a testovány při vyšších teplotách (20 °C, 40 °C a 60 °C). Cílem měření bylo zjistit, zda má teplota zkoušeného materiálu vliv na výsledky měření.

### 5.1 Způsob ohřevu

Zkušební vzorky byly ohřívány pomocí indukčního ohřívacího přístroje TMBH1 (obr. 5.1) od firmy SKF. Tento přístroj slouží výhradně k ohřevu ložisek, ale lze jej také využít k ohřevu jakékoliv jiné součástky, která je vyrobena z kovu a tvoří uzavřený obvod. K přístroji jsou připojeny ohřívací kleště a snímač teploty, který je magnetický a lze jej tedy přichytit na ohříváný vzorek, pokud je rovněž magnetický [16].



Obr. 5.1 – Indukční ohřívací přístroj SKF TMBH1 [autor]



Jelikož přístroj nabízí dvě možnosti ohřevu, je jeho obsluha velice jednoduchá. První možností je ohřev vzorku na uživatelem nastavenou teplotu („teplotní mód“). Druhou možností je nastavení doby ohřevu („časový mód“).

### Ohřev zkušebního vzorku č. 1

Vzorek č. 1 byl vložen do ohřívacích kleští a pomocí tlačítka volby módu byl zvolen „teplotní mód“. V „teplotním módu“ se snímač teploty přichytil pomocí magnetu ke zkušebnímu vzorku. Poté se pomocí tlačítek „+“ a „-“ navolila požadovaná teplota, na kterou má být vzorek ohříván a stiskem tlačítka „START“ se spustil ohřev. Na displeji se zobrazila aktuální teplota vzorku. Po dosažení požadované teploty zazněl zvukový signál a ohřev se vypnul.

### Ohřev zkušebního vzorku č. 2

Jelikož vzorek č. 2 není magnetický, nebylo možné použít teplotní snímač a využít „teplotní mód“. Stiskem tlačítka volby módu byl přepnut na „časový mód“. V tomto módu se pomocí tlačítek „+“ a „-“ nastavila doba ohřevu vzorku (v minutách) a spustila se tlačítkem „START“. Aktuální teplota byla snímána pomocí kontaktního teploměru (obr. 5.2), který byl během ohřevu přiložen ke vzorku. Po dosažení požadované teploty vzorku se ohřev vypnul pomocí tlačítka „STOP“.



Obr. 5.2 – Kontaktní teploměr VOLT-CRAFT 302K/J [autor]

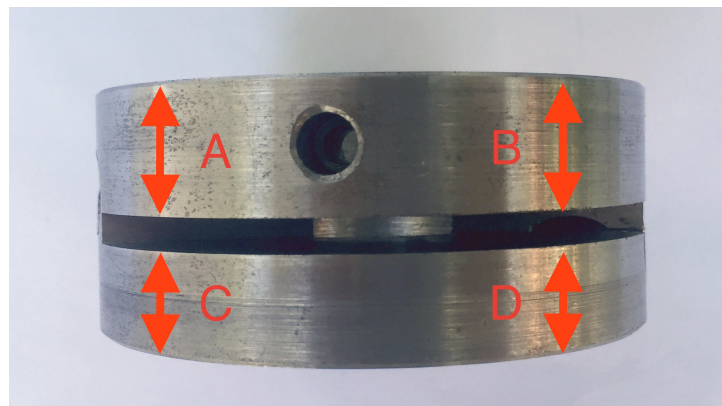
## 5.2 Vlastní měření

U zkušebních vzorků byly měřeny vzdálenosti vady od povrchu testovaného vzorku. Pro ověření přesnosti měření ultrazvukem byly vzdálenosti vad nejprve změřeny pomocí digitálního posuvného měřidla a následně ultrazvukovým defektoskopem DiO 562. Všechny naměřené hodnoty byly zapsány do příslušných tabulek. Na obr. 5.3 a obr. 5.4 jsou zakresleny vzdálenosti vad od povrchu (A, B, C, D), ve kterých byly měřeny.

### 5.2.1 Měření posuvným měřidlem

Pro získání přesnějších hodnot měření vad a eliminaci chyb měřením bylo měření digitálním posuvným měřidlem provedeno třikrát. Z těchto tří měření byl vytvořen aritmetický průměr.

#### Zkušební vzorek č. 1

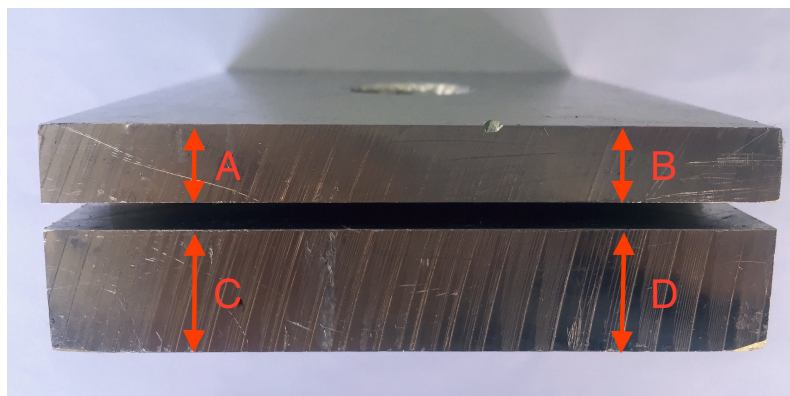


Obr. 5.3 – Zkušební vzorek č. 1 se zakreslenými rozměry [autor]

Tab. 5.1 – Hodnoty naměřené posuvným měřidlem u vzorku č. 1

Rozměr	Hodnoty naměřené posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr měření [mm]
	1.	2.	3.	
A	14,43	14,47	14,48	14,46
B	14,31	14,38	14,36	14,35
C	11,43	11,45	11,41	11,43
D	11,55	11,53	11,54	11,54

## Zkušební vzorek č. 2



Obr. 5.4 – Zkušební vzorek č. 2 se zakreslenými rozměry [autor]

Tab. 5.2 – Hodnoty naměřené posuvným měřidlem u vzorku č. 2

Rozměr	Hodnoty měření posuvným měřidlem [mm]			Aritmetický průměr měření [mm]
	1.	2.	3.	
A	10,84	10,86	10,85	<b>10,85</b>
B	10,69	10,68	10,64	<b>10,67</b>
C	17,65	17,69	17,67	<b>17,67</b>
D	17,96	17,94	17,98	<b>17,96</b>

### 5.2.2 Měření ultrazvukovým defektoskopem

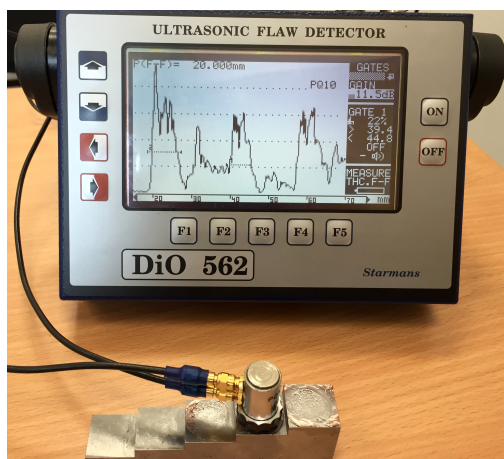
Při měření ultrazvukovým defektoskopem DIO 562 byla použita dvojitá (dvouměničová) čelní sonda PQ10-4C, (obr. 2.12). Tato sonda byla vybrána, protože má nulové mrtvé pásmo a umožňuje detekci vad ležících blízko pod povrchem. Měření bylo prováděno odrazovou metodou, která byla popsána v kapitole 2.5. Tato metoda je založena na odrazu vln od vad a povrchu materiálu.

Po celou dobu měření byla teplota zkoušeného vzorku snímána kontaktním teploměrem (obr. 5.2), který byl již zmíněn v kapitole výše. Pro ověření výsledků naměřených ultrazvukovým defektoskopem bylo měření pro každou teplotu provedeno dvakrát.

#### Postup měření:

- nastavení přístroje pro měření s UZ sondou PQ10-4C
- nastavení rychlosti šíření ultrazvukových vln (v m/s)

- c) nastavení zpoždění v předsádce sondy (v  $\mu\text{s}$ )
- d) nastavení rozsahu časové základny
- e) kalibrace pomocí stupňové kalibrační měrky (obr. 5.5)
- f) měření hodnot



Obr. 5.5 – Kalibrace na stupňové kalibrační měrce [autor]

### Měření zkušebního vzorku č. 1

Vzorek č. 1 byl nejprve schlazen a testován při teplotě  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , následně byl indukčním ohřívacem ohříván a testován při teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro ověření výsledků bylo měření provedeno ještě jednou.

Rychlost šíření ultrazvukových vln byla pro vzorek č. 1 nastavena na  $5920\text{ m/s}$ .

Tab. 5.3 – Hodnoty naměřené ultrazvukem při různých teplotách vzorku č. 1

Rozměr	Měření	Hodnota naměřená ultrazvukem při teplotě vzorku: [mm]				Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]
		$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$	
A	1.	14,43	14,43	14,46	14,48	14,46
	2.	14,45	14,47	14,44	–	
B	1.	14,42	14,43	14,39	14,45	14,35
	2.	14,43	14,39	14,45	–	
C	1.	11,46	11,47	11,51	11,50	11,43
	2.	11,48	11,44	11,49	–	
D	1.	11,52	11,54	11,50	11,58	11,54
	2.	11,52	11,56	11,53	–	

## Měření zkušebního vzorku č. 2

Vzorek č. 2 byl stejně jako vzorek č. 1 nejprve schlazen na teplotu 0 °C a následně byl indukčním ohřivacím přístrojem ohříván na 20 °C a 40 °C. Vzorek č. 2 byl, z důvodu horší tepelné vodivosti než vzorek č.1, zahříván na nižší teploty.

Rychlost šíření ultrazvukových vln hliníkovým materiálem byla při kalibraci stanovena na 6311 m/s.

Tab. 5.4 – Hodnoty naměřené ultrazvukem při různých teplotách vzorku č. 2

Rozměr	Měření	Hodnota naměřená ultrazvukem při teplotě vzorku: [mm]			Aritmetický průměr hodnot naměřených posuvným měřidlem [mm]
		0 °C	20 °C	40°C	
A	1.	10,85	10,87	10,84	10,85
	2.	10,85	10,85	10,88	
B	1.	10,62	10,67	10,64	10,67
	2.	10,65	10,69	10,64	
C	1.	17,66	17,68	17,71	17,67
	2.	17,66	17,62	17,70	
D	1.	17,81	17,82	17,88	17,96
	2.	17,85	17,83	17,81	

## 5.3 Analýza měření

Aritmetický průměr hodnot, který byl naměřen posuvným měřidlem, se liší od hodnot naměřených ultrazvukem v řádu desetiny milimetrů. Tyto rozdíly mohou být dány jednak nepřesnostmi při měření posuvným měřidlem (špatné přiložení ramen měřítka k povrchu vzorku) nebo nepřesnostmi při měření ultrazvukovým defektoskopem (viz odstavec níže).

Z tab. 5.3 a tab. 5.4 je zřejmé, že hodnoty změřené ultrazvukovým defektoskopem se při stanovených teplotách vzorků liší pouze v řádu setin milimetrů. Příčinou těchto rozdílů může být rozdílná síla přitlaku sondy k povrchu měřeného vzorku, nezkušenost při odečítání hodnot z ultrazvukového defektoskopu nebo použití méně kvalitního akustického prostředí (vazelíny). Z hodnot naměřených ultrazvukem lze konstatovat, že neexistuje žádná úměrnost mezi rostoucí teplotou zkušebních vzorků a naměřenými hodnotami.

Maximální teplota vzorku, při které bylo prováděno měření ultrazvukovým defektoskopem, byla limitována ultrazvukovou sondou. Maximální doporučená teplota testovaného vzorku pro měření ultrazvukovou sondou PQ10-4C je 60 °C. Po překročení této teploty by mohlo k poškození sondy.

## 6 ZÁVĚR

V první části bakalářské práce je popsán princip ultrazvukové diagnostiky, možnosti jejího využití, vady, které lze pomocí ultrazvukové diagnostiky detekovat a dvě nejpoužívanější metody zkoušení ultrazvukem.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo ověření, zda má teplota testovaného materiálu vliv na výsledky měření ultrazvukovou metodou. To bylo realizováno měřením ultrazvukovým defektoskopem DiO 562.

Pro měření, popsaném v druhé části práce, byly vyrobeny dva zkušební vzorky z odlišného materiálu (ocel a hliník), do kterých byly nejprve vyvrtány díry. Při měření se však ukázalo, že kulaté díry nejsou vhodné pro měření ultrazvukovým defektoskopem. Po dopadu vln na nečelistvost s kulatou plochou docházelo k rozptylu vln do vzorku a nebylo tak možné je přesně změřit. Proto byly následně pásovou pilou vytvořeny ploché zářezy, které již bylo možné testovat.

Maximální teplota vzorků při měření vad ultrazvukovým defektoskopem DiO 562 byla limitována teplotním rozsahem ultrazvukové sondy (60 °C), která byla pro měření použita.

Při teplotním rozsahu vzorku č. 1 (0 °C – 60 °C) a vzorku č. 2 (0 °C – 40 °C) byly naměřeny hodnoty s minimálními rozdíly v řádu maximálně setin milimetrů. Pro ověření výsledků naměřených ultrazvukovým defektoskopem bylo měření při stanovených teplotách provedeno dvakrát. Na základě realizovaných měření lze konstatovat, že teplota zkoušeného materiálu v rozsahu 0 °C – 60 °C, nemá pro zkoušené materiály podstatný vliv na výsledky měření.

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 406 s. ISBN 80-7300-158-6
- [2] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [3] Laboratoř nedestruktivního testování. *Ústav termomechaniky AV ČR: Akademie věd České republiky* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/cs/d4/1042>
- [4] Basic Principles of Ultrasonic Testing. *NDT Resource center* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>
- [5] *Zkoušky bez porušení materiálu* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska\\_ultrazvukem.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_ultrazvukem.pdf)
- [6] FORMAN, Michal. *Využití ultrazvukové defektoskopie v materiálovém inženýrství* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: [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). Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [7] FORMAN, Michal. *Vliv struktury materiálu na hodnotitelnost ultrazvukovou defektoskopií* [online]. Pardubice, 2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z: [http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/58959/3/FormanM\\_VlivStruktury\\_PS\\_2014.pdf](http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/58959/3/FormanM_VlivStruktury_PS_2014.pdf). Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [8] Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). *NDT Resource center* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/emats.htm>



- [9] *Určení vady v materiálu pomocí ultrazvukového defektoskopu* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z:  
[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Mbey5FiuQ-QJ:if.vsb.cz/Studium/FS/Fyzikalni\\_mereni/uloha15.doc](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Mbey5FiuQ-QJ:if.vsb.cz/Studium/FS/Fyzikalni_mereni/uloha15.doc)
- [10] JELÍNEK, Petr. *Nedestruktivní zkoušení zařízení jaderných elektráren elektrickými metodami* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:  
[https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3927/DP\\_JELINEK.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/3927/DP_JELINEK.pdf?sequence=1).  
Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] STARMANS, Technická příručka a návod k obsluze univerzálního ultrazvukového defektoskopu DiO 562
- [12] ŠKROBÁNKOVÁ, Zuzana. *Možnosti využití ultrazvukové impulsní metody ve stavební praxi* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=76423](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=76423).  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] ŠIMEČEK, Radek. *Moderní metody v nedestruktivním zkoušení pomocí ultrazvuku* [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-05-27]. Dostupné také z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39250](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39250).  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] *Ultrazvukové měřky* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z:  
[http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ut\\_merky.pdf](http://www.atg.cz/cz/pdf/katalogy/UT/ut_merky.pdf)
- [15] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 185 s. ISBN 80-7080-600-1
- [16] Indukční ohřívací přístroj TMBH 1. *SKF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z:  
[http://www.exvalos.cz/soubory/File/SKF/SKF\\_INDU\\_TMHB\\_1.pdf](http://www.exvalos.cz/soubory/File/SKF/SKF_INDU_TMHB_1.pdf)
- [17] KREIDL, Marcel. *Ultrazvuková defektoskopie*. Praha: Starmans electronics, 2011, 217 s. ISBN 978-80-254-6606-3

- [18] REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 290 s. ISBN 978-80-7300-466-8
- [19] *TechMagazín: měsíčník pro technické obory, vědu, výzkum, strojírenství, plastikářský a automobilový průmysl, IT a technické školství* [online]. Praha: Tech Media Publishing, 2011 [cit. 2015-05-26]. ISBN 1804-5413. ISSN 1804-5413. Dostupné z: [http://www.techmagazin.cz/ke\\_stazeni/T082011M.pdf](http://www.techmagazin.cz/ke_stazeni/T082011M.pdf)