

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta strojní                      Katedra materiálu



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

V Liberci 2009

Martin Švec

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta strojní

Katedra materiálu

**VÝZKUM PORÓZITY KOVOVÝCH SOUSTAV V PRÁŠKOVÉ  
METALURGII METODAMI NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ**

**RESEARCH OF POROSITY OF THE METALLIC SYSTEMS IN  
THE POWDER METALLURGY WITH THE ASSISTANCE OF  
THE NONDESTRUCTIVE PROOFING**

**KMT – B - 141**

Autor: Martin Švec  
Vedoucí BP: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Rozsah práce  
Počet stran : 47  
Počet obrázků : 33  
Počet tabulek : 16  
Počet grafů : 3

V Liberci, červen 2009

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	<b>Martin ŠVEC</b>
Studijní program	<b>B2341 Strojírenství</b>
Obor	<b>3911 R 018 Materiály a technologie</b>
Zaměření	<b>Materiálové inženýrství</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

## **Výzkum porózy kovových soustav v práškové metalurgii metodami nedestruktivního testování**

### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s technickou dokumentací a funkcí konstrukčních součástí vyrobených technologií PM, s jejich strukturou - výrobou.
2. Proveďte rešerši používaných destruktivních a NDT metod stanovení porózy.
3. Navrhnete a ověřte podmínky pro NDT metodiku měření porózy v kompaktních dílech a hlavně hloubky a porózy naspěkaných kluzných vrstev na ocelových podložkách.
4. Vyslovte závěry a naznačte směr dalších prací.

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Ptáček, L. a kol. nauka o materiálu II. CERM s.r.o. BRNO, 2002, ISBN 80-7204-248-3.
- [2] Míšek, B., Ptáček, L. Defektoskopie a provozní diagnostika. Nakladatelství VUT Brno, 1992, ISBN 80-214-0425-6.
- [3] Janovec, Cejp, Steidl. Perspektivní materiály. Vydavatelství ČVUT. 1997, ISBN 80-01-01282-4.
- [4] Výrobní dokumentace TEDOM, ŠKODAAUTO dle doporučení.

Vedoucí bakalářské práce : doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.  
Konzultant bakalářské práce :

doc. Ing. František Stuchlík, CSc  
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr Louda, CSc  
děkan

V Liberci dne 31.10.2008



## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním porózy a tloušťky naspěkané bronzové vrstvy na ložiskových pánvích prostřednictvím nedestruktivních metod testování. Práce vyhodnocuje vhodnost a spolehlivost použitých nedestruktivních metod k odhalování míry porózy.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** poróza, nedestruktivní testování (vířivoproudé a ultrazvukové)

## **ANNOTATION**

This bachelor work deals with the research of porosity and thickness of a cake up bronze layer on the bearing pans with an assistance of a nondestructive proofing. The work evaluates suitability and reliability of the used nondestructive methods for the exposure of an extent of porosity.

**KEY WORDS:** porosity, nondestructive proofing (eddy current and ultrasound)

## **Poděkování**

V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za odbornou pomoc, rady a vedení mé bakalářské práce a Ing. Pavlu Hanusovi, PhD. za pomoc při elektronickém sčítání pórovitosti pomocí programu NIS- Elements 2.30.

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užit své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, které má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 5.6.2009



## Obsah

1. Úvod	9
2. Slinuté kovy	10
2.1. Výroba součástí ze slinutých kovů	10
2.1.1. Výroba kovového prášku	10
2.1.2. Hutnění kovového prášku	13
2.1.3. Slinování	14
3. Defektoskopie spékaných materiálů	16
3.1. Ultrazvuková metoda defektoskopie	16
3.2. Radiografická metoda defektoskopie	19
3.3. Nedestruktivní zkoušení vířivými proudy	20
4. Hodnocení tloušťky a porózy naspékané vrstvy	23
4.1. Měření tloušťky naspékané bronzové vrstvy přístrojem Positector 6000	24
4.2. Měření hloubky trhlin přístrojem Crack Depth Meter JK-1	27
4.3. Měření vad materiálu přístrojem Nortec 1000	29
4.3.1. Zjišťování povrchových a těsně podpovrchových necelistvostí a trhlin	29
4.3.2. Zjišťování vnitřních vad materiálu přístrojem Nortec 1000	31
4.3.3. Zjišťování vnitřních vad materiálu prostřednictvím úbytku vodivosti	32
4.4. Zjišťování pórovitosti materiálu pomocí ultrazvuku	33
4.5. Zjišťování pórovitosti materiálu pomocí programu NIS- Elements 2.30	39
5. Diskuze	41
6. Závěr	46
7. Použitá literatura	47





## 1. Úvod

Předmětem bakalářské práce je zkoumání kvality naspěkané bronzové kluzné vrstvy na ložiskových pánvích ojnic pro firmu TEDOM s. r. o., která zaznamenala při užívání tohoto typu ložisek problémy s životností. Během provozu docházelo na ložiskách k defektům, které přímo ohrožovaly provozuschopnost motorů. Vlivem zvýšené výrobní pórovitosti bronzové vrstvy se místa s největší kumulací pórů pod působením tečných smykových sil propojovala v širší dutiny a následně trhliny. To vedlo k praskání, odlupování či k úplnému rozsypaní naspěkané vrstvy.

Příčiny těchto havárií je třeba nejspíše hledat v původu dodávaných materiálů, z nichž se ložiska zhotovují. V současné době trh zaplavují výrobky z Číny, Vietnamu a dalších asijských zemí, které sice drtí evropské výrobce objemem své produkce a nízkou cenou, ale kvalitou se jim vyrovnat nemůžou.

Jelikož i velká část polotovarů, které se zpracovávají v České republice, pochází z asijských zemí, je nutná u finálních výrobků nedestruktivní diagnostika vad, aby byla zajištěna požadovaná jakost výroby.

Cílem bakalářské práce je, prostřednictvím proměřování vzorků 1-5 odebraných z ložiskových pánví vyráběných firmou TEDOM, navrhnout vhodné nedestruktivní diagnostické metody, které by pomáhaly odhalit výrobky s nadměrnou pórovitostí, která způsobuje defekty ložisek.



## 2. Slinuté kovy

V současné době se stále více používají materiály vyrobené práškovou metalurgií. Slinuté kovy mají totiž oproti klasickým materiálům řadu výhod.

S úspěchem se využívají např. u vysokotavitelných kovů a slitin, jejichž roztavení by bylo vzhledem k jejich vysoké teplotě tání značně problematické či zcela nemožné. Dále se mohou používat při výrobě heterogenních směsí kovů s velmi rozdílnou teplotou tání jednotlivých složek nebo chceme-li vytvořit materiál tvořený směsí kovů a nekovů. Nezanedbatelnou výhodou je také vysoká hospodárnost a téměř bezodpadová výroba, což vede ke snižování nákladů.

Nevýhodou je náročnost přípravy prášků pro slinování a vznik porózy ve vyrobených součástkách, který se ovšem dá ovlivnit velikostí lisovacího tlaku. Poróza však nemusí být vždy na závadu. U některých výrobků (např. samomazná ložiska) je naopak žádaná. U těchto ložisek tvoří zhruba 30% celkové pórovitosti pórovitost otevřená, která do sebe absorbuje olej či jiné mazivo, a dává tak ložiskům samočinné mazací schopnosti.

Kromě samomazných ložisek se práškovou metalurgií vyrábí celá řada dalších produktů jako např. třecí materiály (převážně kompozity tvořené ocelí a keramikou- třecí materiály musí splňovat vysoké požadavky na abrazní odolnost a mechanickou pevnost), filtry (což jsou materiály s řízenou velikostí pórů, které se používají pro filtraci tekutin), slinuté karbidy pro obrábění nebo nejrůznější výrobky pro elektrotechniku (magnety, vysoce vodivé kontakty či vlákna pro vedení proudu za vysokých teplot). Z nekovových materiálů se práškovou metalurgií zpracovává především keramika na keramické řezné materiály pro obrábění.

### 2.1. Výroba součástek ze slinutých kovů

Výroba součástek práškovou metalurgií probíhá v několika na sebe navazujících etapách. Nejdříve je potřeba vyrobit kovový prášek, který se následně hutní do tvaru budoucí součástky. Potom dochází k vlastnímu slinování doprovázenému dolisováním výrobku a celý proces je zakončen kalibrací.

#### 2.1.1. Výroba kovového prášku







Kovový prášek může být vyráběn několika způsoby podle charakteru materiálu.

Je-li zpracováváný materiál křehký, nejvhodnějším způsobem výroby prášku je **mechanické drcení**, které se může provádět na drtičích (čelistových nebo kolových)



popřípadě v mlýnech (kladivových či kulových). U kujných materiálů je lepší zvolit některý z jiných způsobů přípravy kovového prášku, přestože i kujné materiály se mohou práškovat pomocí mechanického drcení, využije-li se místo čistého kovu jako výchozí suroviny hydrid daného kovu, který bývá ve většině případů mnohem křehčí. Pak ale musí následovat dehydratace prášku.

Dalším způsobem výroby prášku je **chemická příprava**, jejíž princip spočívá v chemické reakci, při níž se ze suroviny přímo oddělí čistá složka kovu ve formě prášku. Výhodou této metody je, že za výchozí surovinu nám slouží surová ruda daného kovu a odpadá tedy náročná mezifáze, kdy se nejdříve ruda přeměňuje na kov a teprve poté se z kovu vyrábí prášek.

typ zrna	poměr $\frac{l_{\max}}{l_{\min}}$	přibližný tvar zrna
kulovitý	1,0- 1,2	
oválný	1,2- 2,0	
hranatý	2,0- 5,0	
tyčovitý	5,0- 25,0	
jehlicovitý	nad 25,0	
dendritický	-	

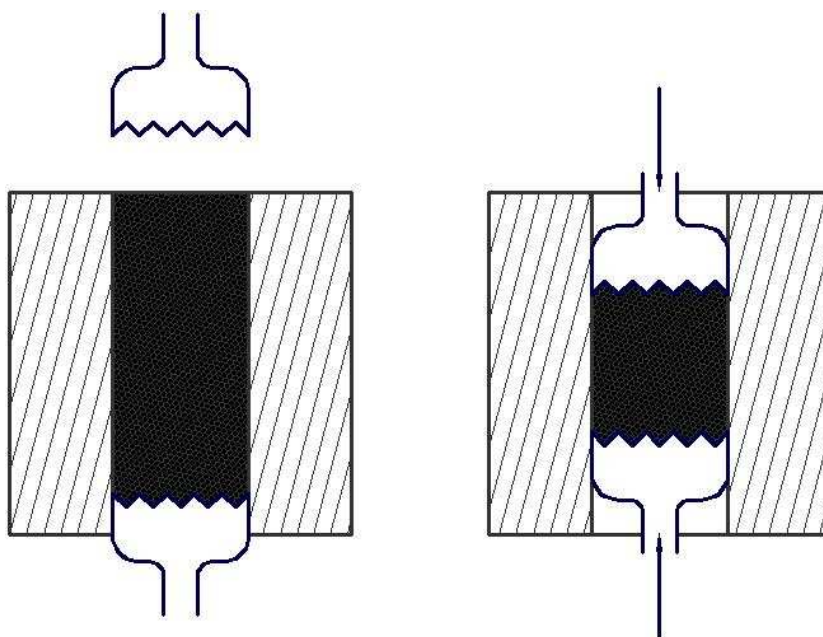
Obr. 1- Základní typy tvarů částic prášků



Nejrozšířenější metodou výroby prášku je **rozprašování kovové taveniny**. Tavenina kovu prochází přes rozprašovací hlavici, z níž je vyfukována ve formě kapiček buď vodou nebo plynem. Vyfukovací médium (voda, plyn) zároveň slouží k ochlazení taveniny na teplotu, při níž už nedochází ke změnám vlastností vzniklého prášku. Přitom voda taveninu ochlazuje rychleji než plyn, a je jí tedy potřeba menší množství, z čehož vyplývá, že použití vody je hospodárnější než použití plynu.

Kovové prášky, ať vyrobené mechanickým drcením, chemicky, rozprašováním taveniny nebo některou z méně obvyklých technologií, se musí před další etapou zpracování (hutnění) upravovat. Je potřeba se zbavit např. tvrdých zrněk, což se může zabezpečit vyžiháním prášku na měkko. Dále je třeba odstranit z prášku nečistoty. To může být provedeno kupříkladu mechanicky, ale daleko častěji se provádí magnetické odlučování, při němž se magnetické nečistoty „vychytají“ přiblížením magnetu k prášku.

Aby nevznikaly mezi jednotlivými zrnky prášku příliš velké dutiny, prosévá se prášek na řadě sít o různé velikosti. Tím se roztrídí zrna podle tvaru a velikosti do několika skupin. Reálné prášky nemají zrna konstantních rozměrů, a tak se charakterizují svojí délkou, objemem, tvarem atd. Dle ČSN 42 0890 se zrna prášku vyhodnocují buď poměrem největšího a nejmenšího lineárního průmětu částice  $\frac{l_{\max}}{l_{\min}}$  (využívá se při ručním třídění prášku na



*Obr. 2- Jednoosé lisování*



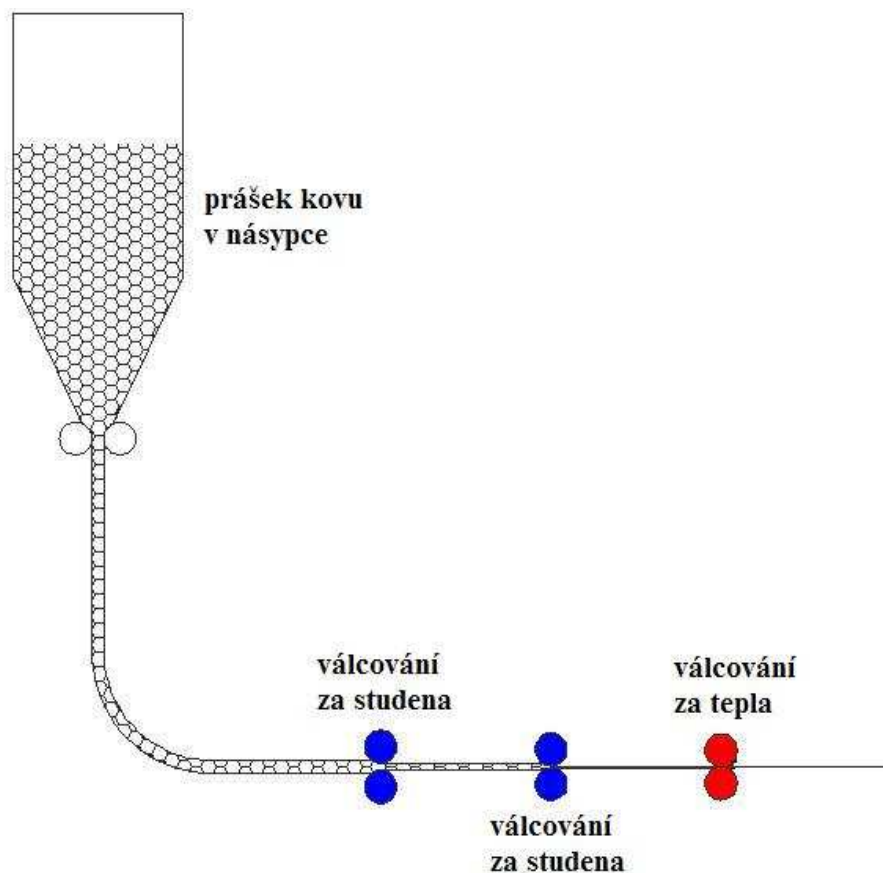
stínítku- viz obr. 1), nebo poměrem kvadrátu obvodu průmětu částice ku ploše průmětu  $\frac{o^2}{S}$   
(tento způsob je vhodný u automatického analyzátoru).<sup>1</sup>

### 2.1.2. Hutnění kovového prášku

Ve druhé fázi výroby spékaných produktů se kovovému prášku, zbavenému nečistot, tvrdých částic atd., musí dát tvar finálního výrobku.

Prášek se proto nasype do dutiny formy, která je negativem budoucího výrobku a slisuje se silou o velikosti 2- 30 MN. Přitom lisovnice působí v jedné ose proti sobě, aby se dosáhlo dostatečného prolisování prášku v celém objemu (viz obr. 2).

Kromě jednoosého lisování se používá izostatické lisování (CIP). Při CIP je zajištěno dostatečné zhutnění prášku všestranným tlakem, jemuž je polotovar vystaven v tlakové nádobě, která pracuje v rozmezí tlaků od 300 do 350 MPa.



Obr. 3- Válcování  
prášku

<sup>1</sup> PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999.  
ISBN 80 – 7204 – 130 - 4



Pro výrobu slinovaných plechů se provádí hutnění prášku válcováním. Hutnění probíhá postupně na několikrát mezi dvojicemi válců, přičemž je ke zvýšení hutnosti kombinováno válcování za studena a za tepla (*viz obr. 3*).

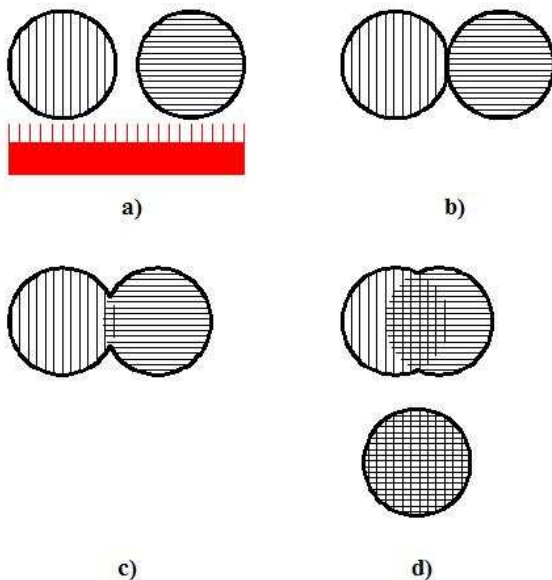
Po dokončení druhé fáze (fáze hutnění) dostává polotovár finální, ale nezafixovaný tvar budoucího výrobku. Pro zafixování tvaru se musí prášek ještě slinovat.<sup>2</sup>

### 2.1.3. Slinování

Poslední fází při výrobě produktů práškovou metalurgií je tepelné zpracování, které se v tomto případě nazývá slinování nebo též spékání.

Mechanismus slinování je založen na difúzi atomů kovového prášku. Zrnka prášku mají velkou povrchovou energii, kterou se vzájemným splýváním snaží snížit. Uvolněná energie potom slouží jako hnací síla procesu, čili čím jsou zrnka kovu menší, tím víc energie se uvolní a tím rychleji také probíhá slinování.

Proces difúze se nastartuje dodáním potřebné aktivační energie, kterou je v případě spékání teplo (*viz obr. 4a*). Je-li výrobek dostatečně zahřán, zrna se k sobě začnou přibližovat a jejich povrchy navzájem přilnou (*viz obr. 4b*). Působí-li teplo dál, nastane povrchová difúze zrn, kdy se styčné plochy prášku, které v předchozí etapě slinování k sobě navzájem přilnuly, spojují v jeden celek (*viz obr. 4c*). Při vyšší teplotě se uskutečňuje i objemová difúze, při níž dochází k prolínání zrn, díky čemuž se výrobek zhutňuje a ubývá dutin a mezer (*viz obr. 4d*).



Obr. 4- Proces slinování

- a) dodání aktivační energie
- b) adheze zrn prášku
- c) povrchová difúze zrn prášku
- d) objemová difúze zrn prášku

<sup>2</sup> PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999.  
ISBN 80 – 7204 – 130 - 4



Během slinování se na kovový prášek působí tlakem pro dosažení vyššího zhutnění materiálu. Se zhutňováním výrobku souvisí samozřejmě také výrazné snižování procenta porózy.

Ohřev kovového prášku se může provádět buď přímo, nebo nepřímo. Při **přímém ohřevu** se do vylisku pouští elektrický proud, jehož průchodem se materiál zahřívá na vysoké teploty. Proto se tohoto způsobu užívá především pro vysokotavitelné kovy jako wolfram či osmium. Výhodou této metody je, že za vysokých teplot dochází k odpařování škodlivých, nežádoucích prvků z materiálu, a tedy k proudovému očištění prášku. Přímý ohřev se ale dá použít pouze pro výrobky jednoduchého tvaru s nepříliš velkým průřezem (s ohledem na průřez tělesa musíme volit dostatečnou intenzitu proudu).

Druhou variantou ohřevu je **ohřev nepřímý**, kdy teplo je dodáváno prostřednictvím topného tělesa zvenčí. Mezi výhody nepřímého ohřevu se řadí schopnost dosažení rovnoměrného rozdělení teploty v celém výrobku. Použitelnost této metody je však omezena maximální teplotou 2500°C.

Pro vylisky, které ve fázi hutnění nedosáhnou požadované hutnosti, se používá tzv. **slinování pod tlakem lisovníku**, kdy se materiál ohřívá na slinovací teplotu a zároveň se na něj působí tlakem lisu, což má za následek snazší slinování zrn.

Potřebuje-li se dosáhnout u výrobku nulové pórovitosti, nejvhodnějším (ale ne nejlevnějším) způsobem spékání je tzv. **hipování** (izostatické lisování za tepla). V tomto případě je během slinování vyvíjen na materiál všestranný tlak až 200 MPa při teplotách kolem 1800°C. Ekonomická nevýhoda tohoto způsobu spočívá v nutnosti speciální přípravy kovového prášku, kdy se potřebuje docílit toho, aby zrna prášku měla kulovitý tvar. Výrobky se zhotovují ve formách (tzv. patronách), které musí počítat se smrštěním materiálu po hipování v důsledku mizení pórovitosti, a proto se musí správně nadimenzovat. Je-li patrona dobře nadimenzována, výrobky mají vysokou rozměrovou přesnost a zanedbatelné vnitřní pnutí.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999.  
ISBN 80 – 7204 – 130 - 4



### 3. Defektoskopie spékaných materiálů

Doprovodným (nežádoucím) jevem u spékaných materiálů je pórovitost, která zásadně ovlivňuje vlastnosti materiálu. Celková pórovitost se skládá z pórovitosti uzavřené (póry mezi částicemi uvnitř materiálu a póry uvnitř jednotlivých zrn) a otevřené (póry, které vystupují až na povrch výrobku).

Dle ČSN 42 0891 se celková pórovitost stanoví ze vztahu:

$$P_{\text{celková}} = P_{\text{uzavřena}} + P_{\text{otevřena}} = \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma_{\text{kompaktní}}}\right) \cdot 100 [\%]$$

kde  $\gamma$  je hustota slinutého výrobku a  $\gamma_{\text{kompaktní}}$  je hustota zcela nepórovitého materiálu o stejném chemickém složení.

Hustotu slinutého výrobku  $\gamma$  určíme ze vztahu  $\gamma = \frac{m}{V}$ , kde  $m$  je hmotnost vzorku na vzduchu a  $V$  určíme z úbytku hmotnosti výrobku při ponoření do vody  $V = m_{\text{na\_vzduchu}} - m_{\text{ve\_vodě}} \cdot 4$

Při nedestruktivní defektoskopii se užívá řada metod k odhalení vad ve výrobcích, ale uzavřená pórovitost se dá spolehlivě indikovat pouze dvěma způsoby. Buď pomocí elektromagnetického vlnění (rentgenové či gama záření) nebo ultrazvukem.<sup>5</sup>

#### 3.1. Ultrazvuková metoda defektoskopie

Nedestruktivní zkoumání materiálu ultrazvukem patří v dnešní době mezi nejrozšířenější způsoby nedestruktivní defektoskopie, protože umožňuje spolehlivě odhalit vady ve vnitřní struktuře materiálu a navíc určit jejich rozsah a hloubku pod povrchem.

Při zkoumání materiálu ultrazvukem se může postupovat několika způsoby. První defektoskopická ultrazvuková metoda využívá průchodu vln skrz celou šířku materiálu a nazývá se tedy **průchodovou metodou**. Pro tuto metodu jsou potřeba dvě sondy, které se umístí v ose na protilehlé strany zkoušeného vzorku. Jedna ze sond potom vysílá ultrazvukové vlnění a druhá ho přijímá, přičemž se měří rozdíl mezi vyslanou a přijatou energií (měřicí zařízení zaznamenává akustický tlak vyslaných a přijatých vln, který se posléze převádí na elektrické napětí).

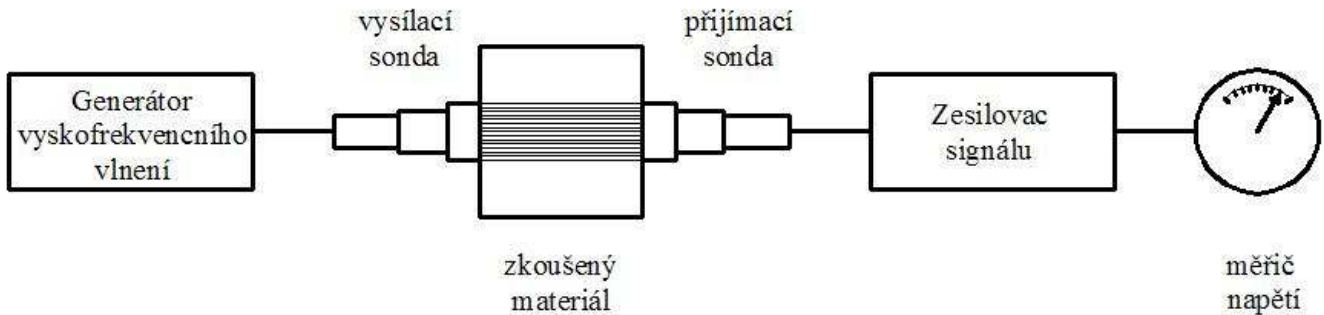
<sup>4</sup> Česká státní norma ČSN 42 0891: Část 1- Prášková metalurgia. 1995

<sup>5</sup> PTÁČEK, L., MÍŠEK, B. Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení. 1. vydání. SNTL: Praha 1968.

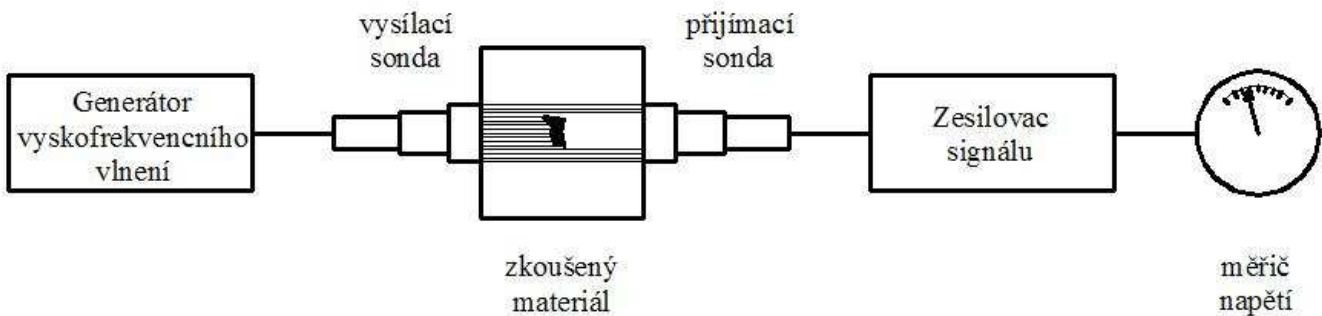




## Materiál bez vady



## Materiál s vnitřní vadou



Obr. 5- Ultrazvuková průchodová metoda

Je-li materiál celistvý, bez vad, hodnota akustického tlaku (resp. elektrického napětí) vyslaných a přijatých vln je stejná. Vyskytne-li se však ve výrobku dutina, bublina či pór, dochází na jejich rozhraní k odrazu vlnění, což má za následek, že snímací sonda přijme menší počet vln, než kolik by jich prošlo celistvým materiálem, a naměří tedy nižší hodnotu akustického tlaku (viz obr. 5). Jak je patrné z obrázku, základními částmi zařízení určeného pro měření ultrazvukovou průchodovou metodou je generátor vysokofrekvenčního vlnění, dále dvě sondy (obě stejné konstrukce, vyrobené nejčastěji z křemíku) a zesilovač, který má za úkol zesílit přijaté signály na takovou hodnotu, kterou bude měřič napětí schopen zobrazit (u moderních přístrojů se výstupní signál zobrazuje digitálně na stínítku obrazovky).

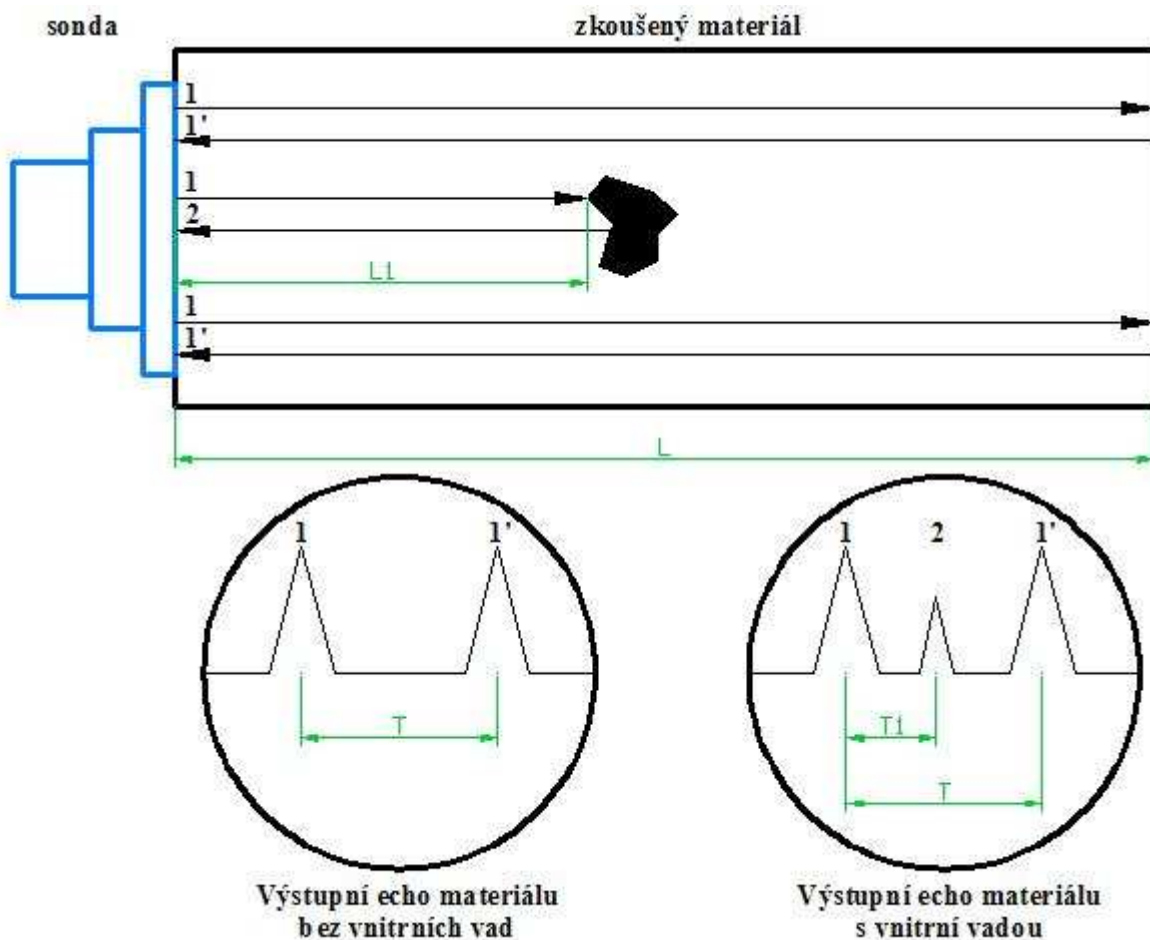
Průchodová metoda je vhodná pro kontrolu tenkých výrobků, které musí být přístupné z obou stran kvůli instalaci dvojice sond. Aby byla splněna podmínka souososti sond, musí být protilehlé povrchy vzorku nejen volně přístupné, ale také rovnoběžné. Z výčtu omezení



pro průchodovou metodu tedy vyplývá, že se hodí především ke kontrole plechů nebo výrobků podobného charakteru.

Univerzálnější metodou, jejíž princip spočívá v odrazu vln na defektních místech, je ultrazvuková **metoda odrazová**. Při zkoumání odrazovou metodou se pracuje pouze s jednou sondou a odpadá tedy podmínka rovnoběžnosti protilehlých povrchů i přístupnosti vzorku z obou stran. Navíc zde není omezení použitelnosti tloušťkou materiálu.

Sonda vyšle do výrobku vlnu, která se odráží od všech akustických rozhraní, tedy od povrchu předmětu i vnitřních vad. Časový průběh signálu se zaznamenává na obrazovce (viz obr. 6). Nevyskytne-li se v materiálu žádná vada, projde vlna skrz celý výrobek a urazí dvojnásobnou dráhu  $L$  (tam a zpět) za čas  $T$  (odpovídá echu  $I-I'$ ). Dostane-li se však vlna na defektní rozhraní uvnitř materiálu, dojde k jejímu odražení a na obrazovce se objeví



Obr. 6- Ultrazvuková odrazová metoda



poruchový signál 2. Vlna 2 tedy urazí pouze dvojnásobnou dráhu  $L_1$  ( $L_1 < L$ ), k čemuž jí postačí kratší čas  $T_1$ , což se ve výstupním echu projeví zobrazením mezisignálu 2.

Vzájemným porovnáním vzdáleností signálů v neporušeném a defektním materiálu (tj.  $T$  a  $T_1$ ) se může určit i v jaké hloubce pod povrchem se vada nachází. Rychlost vlnění je v obou případech stejná  $v = \frac{s}{\tau}$ . Dáme-li echo 1 a echo 2 do rovnosti, dostaneme vztah  $\frac{L}{T} = \frac{L_1}{T_1}$ ,

z něhož vyjádříme hloubku vady pod povrchem  $L_1 = \frac{T_1}{T} \cdot L$ , kde  $T$  a  $T_1$  odečteme ze stínítka obrazovky a  $L$  je známá tloušťka materiálu.

Podle velikosti poruchového echa je možno určit také rozsah vady. Odrazová metoda nám tudíž poskytuje informace jak o poloze, tak i o rozsahu defektu.

Třetí variantou ultrazvukové defektoskopie je **rezonanční metoda**. Tato metoda je založena na vývinu stojatého vlnění v materiálu. Sonda vysílá do zkoumaného vzorku ultrazvukové vlny o nestejně frekvenci, které vyvolávají v materiálu stojaté vlnění za předpokladu, že tloušťka výrobku odpovídá násobku poloviny vlnové délky vlny  $s = x \cdot \frac{\lambda}{2}$ .

Dojde-li ke vzniku stojatého vlnění, získá předmět vlastní rezonance (1., 2., 3. nebo i vyšší harmonickou frekvence) a díky tomu musí sonda dodávat jen minimální energii.

Tato metoda slouží k indikaci vhodně orientovaných vnitřních vad (rovnoběžných s povrchem) a k měření tloušťky výrobku. Kontrolovaná součást nemusí být přístupná z obou stran, protože se pracuje pouze s jednou sondou. Použitelnost rezonanční metody je ovlivněna tloušťkou materiálu (od 1 do 100 mm).<sup>6 7</sup>

Při zkoumání materiálu ultrazvukem se musí počítat s útlumem, který je zapříčiněn pohlcováním a rozptylem ultrazvukových vln během jejich průchodu materiálem.

Pohlcování ultrazvuku je způsobeno v důsledku vnitřního tření oscilujících částic, tepelných jevů a dalších faktorů (mechanická energie kmitajících částic se mění na tepelnou energii). Velikost ztrát pohlcováním je závislá na teplotě prostředí a na zkušební frekvenci ultrazvuku (s vyšší frekvencí rostou i ztráty).

<sup>6</sup> PTÁČEK, L., MÍŠEK, B. *Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení*. 1. vydání. SNTL: Praha 1968.

<sup>7</sup> DUBENSKÝ, R., MINAŘÍK, V., ČERMÁK, F. *Defektoskopie*. 1. vydání. Ediční středisko ČVUT: Praha 1987.



K rozptylu ultrazvuku dochází v nehomogenních látkách, kdy se vlnění při dopadu na nehomogenitu (např. pór) láme, odráží či ohýbá. Ultrazvuková vlna se tak rozptyluje do všech směrů. Přitom se však její energie netransformuje v jiný druh, ale ztrácí se z ultrazvukového pole.

Výsledný útlum  $\alpha_s$  je pak dán součtem rozptylového útlumu  $\alpha_R$  a pohlcovacího útlumu  $\alpha_p$ . Při vyšších testovacích frekvencích a v materiálu s většími zrny je výsledný útlum větší (materiál s menšími zrny má větší hutnost, póry se uzavírají a jejich objem se zmenšuje, což vede ke snížení ztrát rozptylem). Je proto lepší volit nižší frekvence, ale musí se brát v potaz, že pokud je ultrazvuková frekvence příliš nízká, jsou malé vady ve struktuře hůře detekovatelné.<sup>8</sup>

### 3.2. Radiografická metoda defektoskopie

Druhou možností, jak zjistit nedestruktivní defektoskopií přítomnost pórovitosti ve spékaném materiálu, je použití elektromagnetického vlnění (tj. rentgenového nebo gama záření). Princip zkoumání výrobku je u obou druhů záření v podstatě stejný, neboť rentgenové i gama záření je z fyzikálního hlediska shodné. Liší se jen způsobem vzniku a vlnovou délkou, která se u rentgenového záření pohybuje v rozmezí  $8 \cdot 10^{-8}$  až  $6 \cdot 10^{-11}$  metru, zatímco gama záření má vlnovou délku  $5 \cdot 10^{-9}$  až  $2 \cdot 10^{-12}$  metru.

Rentgenové záření vzniká v elektronkách, tzv. rentgenkách. Katoda elektronky o vysokém napětí (desítky až stovky kilovoltů) emituje elektrony, které vysokou rychlostí naráží na anodu, kde se prudce zabrzdí. (Tím dochází k deformaci elektrických a magnetických polí kovu, z něhož je anoda vyrobena- nejčastěji těžký kov.) Ztracená energie se uvolní ve formě tzv. brzdového neboli rentgenového záření. Při velmi vysokém napětí mezi katodou a anodou (okolo 400 kV) dochází k tomu, že elektron vyslaný z katody vyrazí elektron z vnitřní sféry atomu anody na některou sféru vzdálenější od jádra atomu (přičemž platí, že čím je sféra dál od jádra, tím má vyšší energetickou hladinu; získaná energie se potom vyzáří jako rentgenové záření).

Zdrojem gama záření je nestabilní rozpadající se izotop radioaktivního prvku. Gama záření nikdy nevzniká samo, ale vždy je doprovodným jevem alfa a beta záření. Jeho nevýhodou je zdraví škodlivá radioaktivita.

---

<sup>8</sup> OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00097 – 1.



Při zkoušení materiálu prozařováním elektromagnetickými vlnami je sledován rozdíl mezi hustotou toku částic, které projdou neporušeným materiálem, oproti hustotě toku částic, které projdou vadným materiálem. Po průchodu záření vzorkem jsou paprsky zachycovány na citlivý film, z něhož lze podle intenzity zčernání určit rozsah vnitřních vad (dopadne-li na film více paprsků, zasažené místo více zčerná). K určování hloubky vady se pak používá tzv. defektometr, což je měrka, z níž se podle míry zčernání odečte, v jaké vzdálenosti od povrchu se vada nachází.

Před samotným prozařováním materiálu se musí vzorek upravit- musí se odstranit všechny povrchové vady, které by zkreslovaly výsledný snímek, a dále se musí odstranit povrchové nátěry, které by mohly ovlivnit intenzitu průchodu rentgenových paprsků.

Mezi důležité faktory rentgenologie, které zeslabují intenzitu rentgenova záření, patří absorpce, rozptyl a tvorba párů elektron- pozitron. Při absorpci rentgenových paprsků dochází k předávání energie fotonů rentgenova záření atomům absorbující látky, a tedy k útlumu záření. Tento děj je závislý na druhu prvku, z kterého je absorbující látka vyrobena (lépe absorbují paprsky látky s vyšší atomovou hmotností), a na vlnové délce záření. U prvků s nižší atomovou hmotností se naopak projevuje rozptyl záření. Tvorba párů elektron- pozitron se musí brát v úvahu pouze u radioaktivních izotopů.<sup>9 10</sup>

### 3.3. Nedestruktivní zkoušení vířivými proudy

Nedestruktivní zkoušení vířivými proudy se zaměřuje na sledování změn fyzikálních vlastností v daném vzorku. Při defektoskopii vířivými proudy se zkoušený materiál umístí do magnetického pole, které je vytvářeno cívkou, jíž protéká střídavý proud. Vzorek se v poli zmagnetuje a vznikají vířivé proudy- tzn. těleso začne indukovat své vlastní magnetické pole, které má podle Lentzova zákona opačný směr, a zeslabuje tudíž magnetické pole cívky. Velikost výsledného pole, která se měří na sekundární cívce, je závislá nejen na hodnotě frekvence střídavého proudu, procházejícího primární budicí cívkou, ale také na rozměrech, struktuře a elektricko- magnetických vlastnostech vzorku. (Pozn. Největší magnetická indukce je na povrchu vzorku, směrem k jeho středu se postupně zmenšuje a uprostřed je nejmenší, což souvisí s tím, že střed materiálu obepíná větší množství siločar než jeho povrch, a tedy i zeslabení pole je zde větší.)

<sup>9</sup> DUBENSKÝ, R., MINAŘÍK, V., ČERMÁK, F. *Defektoskopie*. 1. vydání. Ediční středisko ČVUT: Praha 1987.

<sup>10</sup> VĚCHET, M., KESL, J., ŠPIKA, L. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00100 – 5.



Při zkoušení materiálu vířivými proudy se může postupovat dvěma způsoby- tzv. metodou s průchozí cívkou nebo metodou s příložnou cívkou. U **metody průchozí cívky** se kontrolovaný výrobek umístí do středu cívky (popř. středem cívky projíždí). Primárním vinutím pak protéká střídavý proud, který vytváří ve vzorku vířivé proudy. Výsledné pole (tj. vektorový součet magnetického pole primární cívky a magnetického pole indukovaného v testovaném materiálu) indukuje na sekundární cívice napětí, jehož velikost je závislá na fyzikálních a strukturních vlastnostech materiálu, a porovnává se s hodnotou napětí naměřenou na etalonu.

Vyhodnocení výstupního signálu se provádí buď přímo na stínítku, kde se zobrazuje časový průběh jedné periody střídavého napětí a porovnává se fázový posun napětí mezi zkoušeným vzorkem a etalonem, nebo tzv. bodem, kdy se výstupní signál rozdělí na dvě navzájem kolmé složky, které se protínají v jednom bodě, a na obrazovce se vyhodnocuje odchylka bodu od středu obrazovky, podle čehož lze určit druh vady.

Při použití druhého způsobu zkoušení vířivými proudy, tj. **metodou s příložnou cívkou**, se cívka, jíž prochází střídavý proud, přibližuje radiálně k povrchu kontrolovaného materiálu. Vznikají opět vířivé proudy, jež ovlivňují magnetické pole cívky. U metody s příložnou cívkou záleží kromě napájecí frekvence a fyzikálních vlastností vzorku také na míře přiblížení cívky k materiálu.

Mezi výhody nedestruktivního zkoušení vířivými proudy lze bezpochyby zařadit možnost automatizace procesu a vysokou rychlost plynulého zkoušení, což je umožněno díky tomu, že se jedná o bezdotykovou metodu. Vysoká rychlost procesu je pro správnou diagnostiku vad přímo nutností, neboť k vyvolání vadového echa je potřeba, aby sonda a zkoušený materiál byly navzájem v pohybu. Čím je tento pohyb rychlejší, tím vyšší (a tedy snadněji registrovatelný) impulz se objeví na stínítku obrazovky.<sup>11</sup>

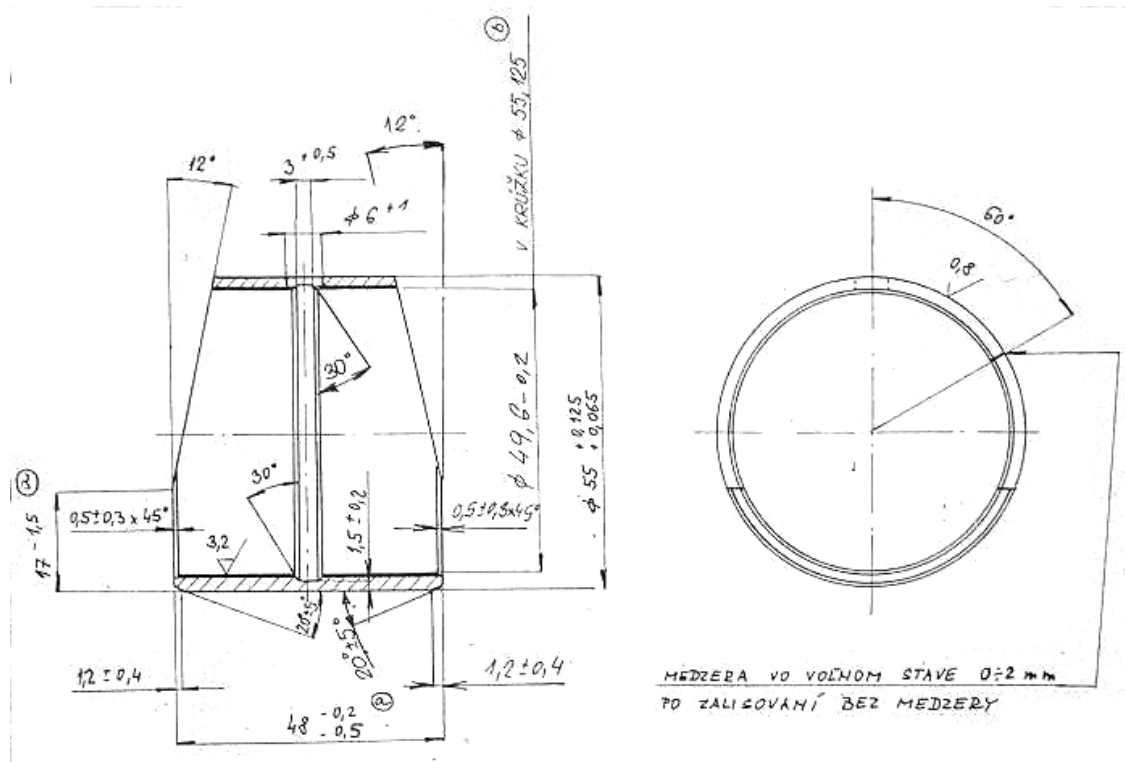
---

<sup>11</sup> PTÁČEK, L., MÍŠEK, B. *Defektoskopie a provozní diagnostika*. 1. vydání. Nakladatelství VUT: Brno 1992. ISBN 80 – 214 – 0425 – 6.



#### 4. Hodnocení tloušťky a poróznosti naspékané vrstvy

Vlastní výzkum se realizoval na ložiskových pánvích ojnic (viz obr. 8), kde se hodnotila tloušťka a poróznost naspékané vrstvy z bronzu (o chemickém složení CuPb22Sn4) na podkladovém pásu z oceli 11 423. Technické podmínky na ložiskové pánve stanovují maximální přípustnou pórovitost naspékané bronzové vrstvy 3,5% za předpokladu, že rozložení pórů v materiálu je rovnoměrné v celém objemu výrobku. Přijatelná tloušťka naspékané vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,6- 0,9 mm (podkladový pás z oceli 11 423 o mezi pevnosti 418- 510 MPa a tvrdosti 125- 151 HV má tloušťku 2,1 mm).<sup>12</sup>



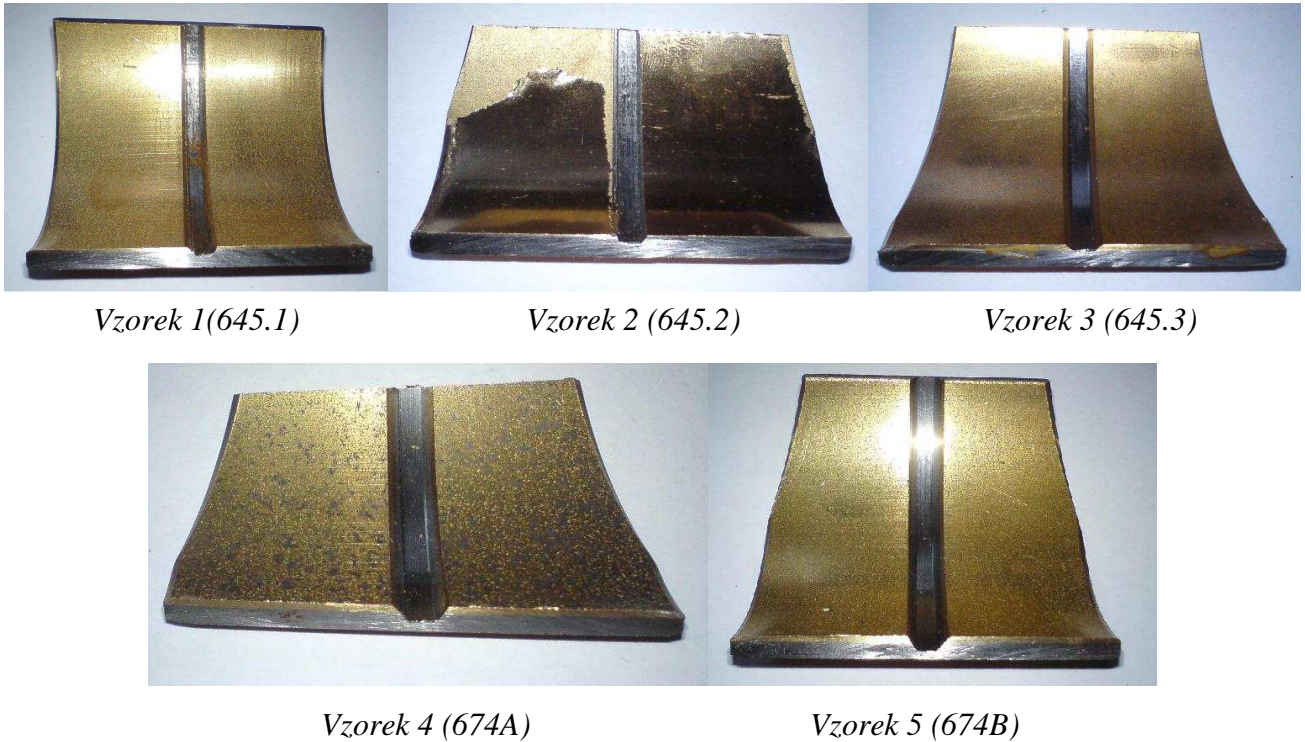
Obr. 7- Výkres zkoumané ložiskové pánve

Hodnocení naspékané bronzové vrstvy se provádělo na pěti vzorcích (viz tab. 1):

vzorek	označení vzorku
1	645.1
2	645.2
3	645.3
4	674A
5	674B

Tab. 1- Označení vzorků

<sup>12</sup> Technická dokumentace firmy TEDOM s. r. o.



Obr. 8- Vzorky zkoumaných ložiskových pánví

Již při běžné prohlídce vzorků okem bylo patrné, že vzorek 2 nebude vyhovovat technickým požadavkům na ložiska, neboť jeho naspékaná bronzová vrstva je viditelně pórovitá a velmi tenká (řádově 0,2- 0,4 mm). Taktéž vzorek 1 má oproti ostatním vzorkům téměř o polovinu zeslabenou vrstvu naspékaného bronz.

#### 4.1. Měření tloušťky naspékané bronzové vrstvy přístrojem Positector 6000

Tloušťka naspékané bronzové vrstvy na zakružovaném ocelovém pásu se měřila pomocí přístroje Positector 6000 ve variantě F, která využívá pro určování tloušťky vrstvy metodu magnetické indukce a hodí se pro zkoušení nemagnetických povlaků na feromagnetických kovech.

Měření se provádělo prostřednictvím výměnné sondy určené pro stanovování tlouštěk rovných plechů. Jelikož zkoumané vzorky ložiskových pánví mají kruhový tvar s poloměrem 27 mm, nelze sondu přesně zkalibrovat, protože ke kalibraci přístroje Positector 6000 slouží škála destičkovitých etalonů, které není možné kvůli jejich vysoké tuhosti vytvarovat tak, aby kopírovaly povrch zkoušené ložiskové pánve. Z toho důvodu tedy mohlo dojít (i přes





opakované proměrování) k určitému zkreslení výsledků. Proto se z pánví odebraly ještě vzorky (viz obr. 9), na nichž se provedl výbrus a následný mikroskopický rozbor, který měl potvrdit naměřené hodnoty tloušťek bronzových vrstev přístrojem Positector 6000.

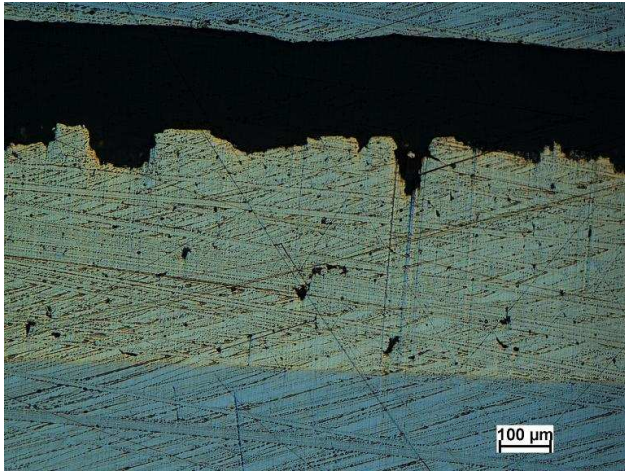
**Naměřené hodnoty tloušťek naspékané bronzové vrstvy  
(měřeno přístrojem Positector 6000)**

měření	tloušťka naspékané bronzové vrstvy [μm]				
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
1	532	210	860	870	866
2	568	208	858	878	844
3	522	202	890	840	846
4	502	206	868	810	848
5	530	230	865	888	884
6	562	148	836	836	790
7	576	231	820	856	780
8	568	232	896	862	824
9	542	216	838	812	842
10	538	172	868	838	838
průměrná tloušťka vrstvy [μm]	<b>544</b>	<b>205,5</b>	<b>859,9</b>	<b>849</b>	<b>836,2</b>
směrodatná odchylka [μm]	22,65	25,55	22,39	25,06	29,91

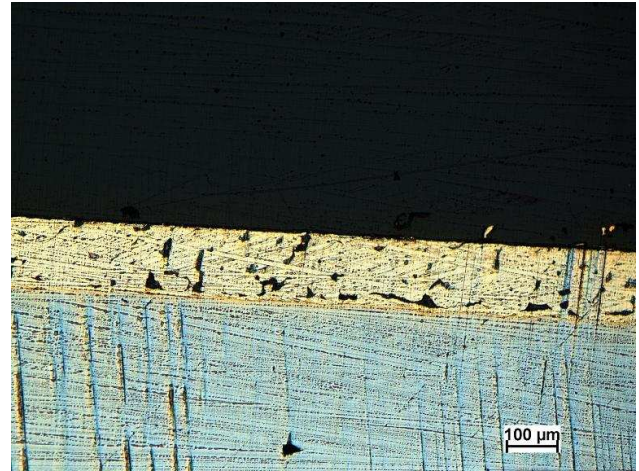
**Naměřené hodnoty tloušťek naspékané bronzové vrstvy  
(měřeno z metalografického rozboru)**

měření	tloušťka naspékané bronzové vrstvy [μm]				
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5
1	463	150	804	804	808
2	508	154	808	758	792
3	413	154	808	825	800
4	513	154	808	821	788
5	450	150	804	792	796
6	371	154	800	775	800
7	517	154	813	800	800
8	488	150	800	804	800
9	479	150	808	821	804
10	454	154	808	792	792
průměrná tloušťka vrstvy [μm]	<b>465,6</b>	<b>152,4</b>	<b>806,1</b>	<b>799,2</b>	<b>798</b>
směrodatná odchylka [μm]	44,12	1,96	3,86	20,12	5,73

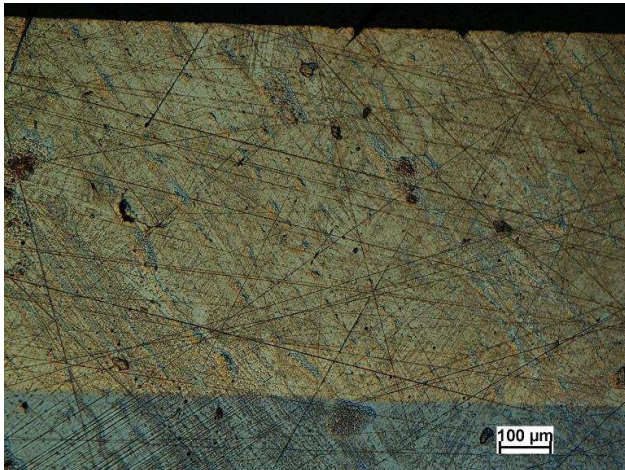
Tab. 2 a 3- Tloušťky naspékaných bronzových vrstev



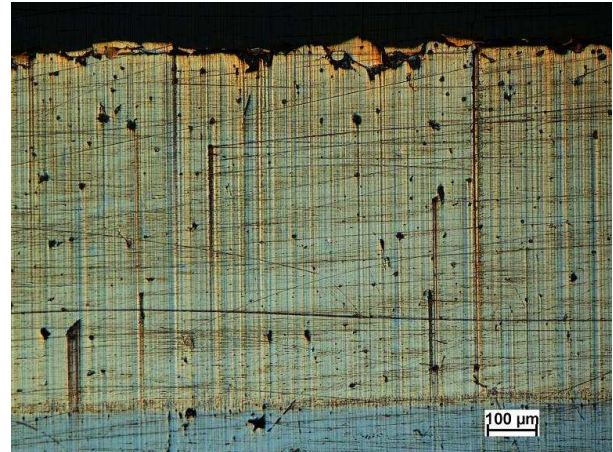
Vzorek 1 (645.1)



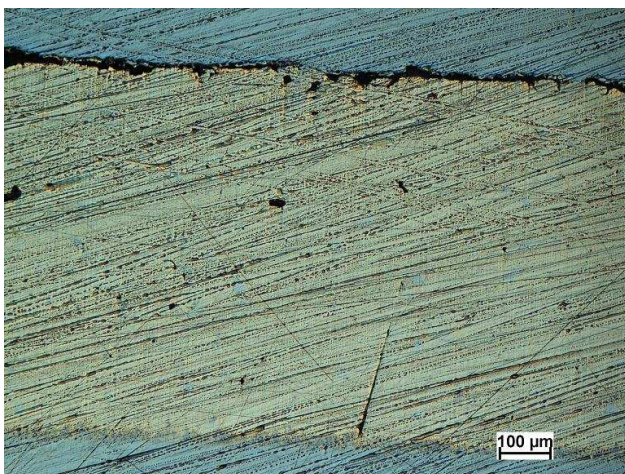
Vzorek 2 (645.2)



Vzorek 3 (645.3)



Vzorek 4 (674A)



Vzorek 5 (674B)

Obr. 9- Tloušťky vzorků zkoumaných ložiskových pánví (mikroskopický rozbor)



Díky metalografickému rozboru bylo zjištěno, že vzorek 1 má na svém povrchu výrazné trhliny a prohlubně, a tloušťka naspékaného bronzu proto značně kolísá (od 371 do 517  $\mu\text{m}$ ). Přílišné rozdíly mezi tloušťkami vrstvy v jednotlivých místech potvrzuje i vysoká hodnota směrodatné odchylky ( $s = 44,12 \mu\text{m}$ ). Při střední hodnotě 466  $\mu\text{m}$  ložisko nevyhovuje technickým požadavkům.

Vzorek 2 má tloušťku bronzové vrstvy téměř konstantní (směrodatná odchylka činí pouze 1,96  $\mu\text{m}$ ), ale tato tloušťka je bohužel nedostatečná a metalografický rozbor také potvrdil příliš vysoké procento pórovitosti vzorku.

Vzorky 3, 4 a 5 byly z hlediska tloušťky naspékané vrstvy vyhovující (pouze vzorek 4 vykazoval mírně zvrásněný povrch; toto zvrásnění se však pohybovalo v akceptovatelných mezích).

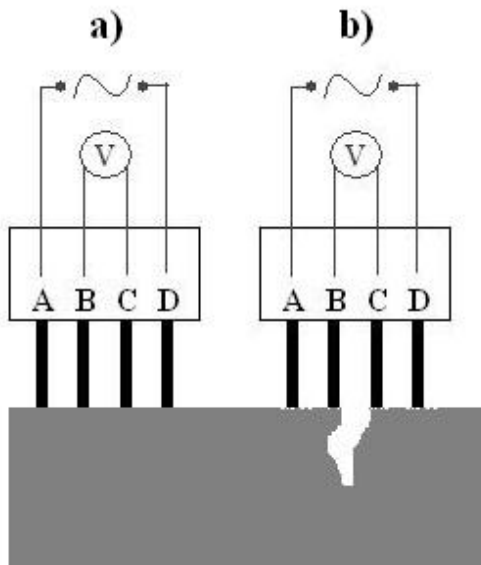
Při srovnání výsledků dosažených metalografickým rozbohem (viz tab. 3) a pomocí přístroje Positector 6000 (viz tab. 2) jsem dospěl k závěru, že u vzorků 3, 4 a 5 (tedy u vyhovujících vzorků s dostatečnou tloušťkou a kvalitou naspékané vrstvy) se obě metody liší o 4,5- 6,5%, přičemž skutečná tloušťka odpovídá hodnotám zjištěným při metalografickém rozboru. Výsledky naměřené přístrojem Positector 6000 jsou zvětšeny o nepřesnosti způsobené nemožností kalibrace sondy na zakřiveném povrchu a musely by se korigovat koeficientem  $k = 0,9475$ , který by zohledňoval právě míru zakřivení zkoušeného vzorku. Skutečná hodnota  $H$  by se pak spočetla ze vztahu  $H = x.k$ , kde  $x$  je tloušťka vrstvy zjištěná přístrojem Positector 6000 a  $k$  je konstanta 0,9475.

U vzorků 1 a 2 (nevyhovujících vzorků s nedostatečnou tloušťkou bronzové vrstvy) se díky nekvalitnímu povrchu lišily hodnoty tloušťky získané přístrojem Positector 6000 od metalografického rozboru o 14,4% (vzorek 1) a v případě vzorku 2 dokonce o 26%.

## 4.2. Měření hloubky trhlin přístrojem Crack Depth Meter JK-1

Přístroj Crack Depth Meter JK-1 slouží k měření hloubky trhlin a jiných necelistvostí. Princip přístroje je založen na měření vodivosti (elektrického odporu) materiálu- čím je trhlina hlubší (delší), tím větší úbytek napětí, jenž přístroj přepočítává a následně zobrazuje přímo v milimetrech délky trhliny, je zaznamenán.

Měřicí sondou je čtyřhrotá elektroda, která snímá úbytek napětí mezi jednotlivými hroty (viz obr. 10). Výsledky získané pomocí přístroje JK-1 tak v sobě zahrnují nejen vliv pórovitosti



Obr. 10

V poloze a) by nejdříve měla proběhnout kalibrace sondy na nulovou hodnotu. V poloze b) je pak měřen úbytek napětí způsobený trhlinou. Do hrotů A a D je přiváděno střídané napětí definované velikosti a mezi hroty B a C se měří úbytek přivedeného napětí.

a trhlin vzorku, ale mohou být také ovlivněny druhem podkladového materiálu (v případě ložiskových pánví je jím feromagnetická ocelová podložka), který má jinou elektrickou vodivost než naspěkaná bronzová vrstva. Další nepřesnosti mohly vzniknout v důsledku konstrukce přístroje, který nemá digitální výstup, ale analogovou ručičkovou stupnici.

Při měření trhlin byl za kalibr zvolen vzorek 3, který vykazoval nejmenší hloubku trhlin, a na strukturu jeho povrchu byla nastavena nula přístroje JK-1. Na ostatních vzorcích poté bylo změřeno, o kolik mají větší necelistvosti povrchu než vzorek 3 (viz tab. 4):

vzorek	přírůstek velikosti trhlin oproti kalibru [mm]
1	1,0
2	1,5
3	0,0 (kalibr)
4	0,2
5	0,5

Tab. 4- Výsledky měření přístrojem Crack Depth Meter JK-1

Výsledky trhlínotestu odpovídají poznatkům získaným při metalografickém rozboru. Vzorek 3 měl nejcelistvější strukturu, oproti tomu na povrchu vzorku 1 byly patrné hluboké trhliny a vzorek 2 byl zase vysoce porézní.





### 4.3. Zjišťování vad materiálu přístrojem Nortec 1000

Přístroj Nortec 1000 (viz obr. 11) slouží k nedestruktivnímu zkoumání materiálů prostřednictvím vířivých proudů. Díky vyměnitelným sondám se může tento přístroj používat ke zjišťování celé řady vad a charakteristik materiálu- od určování vodivosti a tloušťky výrobků, přes detekci koroze a zkoušení celistvostí svarů, až po detekci povrchových a těsně podpovrchových trhlin, a to jak na feromagnetických, tak i neferomagnetických materiálech.



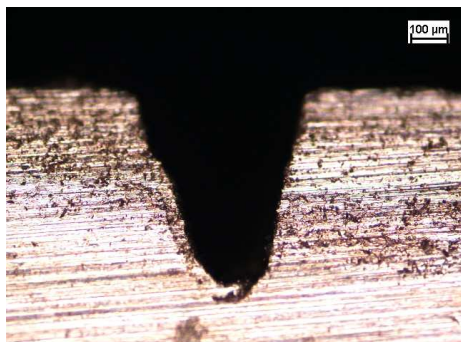
Obr. 11- Přístroj Nortec 1000

Při detekci trhlin je důležité zajistit vzájemný pohyb sondy a zkoušeného vzorku, protože trhliny se pomocí vířivých proudů dají odhalit jen tehdy, přejíždí-li sonda přes vadu v materiálu. Přiloží-li se pouze sonda volně nad trhlínu, poruchový signál se na stínítku obrazovky přístroje nezobrazí.

#### 4.3.1. Zjišťování povrchových a těsně podpovrchových necelistvostí a trhlin

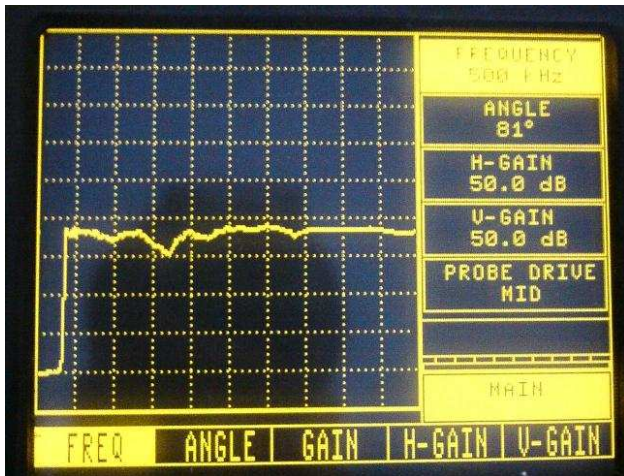
K testování naspěkané bronzové vrstvy ložiskových pánví byla použita sonda typu  $PL / 500 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz} / A$ , jež slouží k odhalování povrchových a těsně podpovrchových trhlin a necelistvostí. Pro měření byly zvoleny následující technické parametry přístroje Nortec 1000:

Frequency (frekvence)	: 500 k Hz
H Gain (horizontální zesílení)	: 50 dB
V Gain (vertikální zesílení)	: 50 dB
Angle (fázový úhel)	: 81°
H Position (horizontální poloha)	: 95%
V Position (vertikální poloha)	: 10%

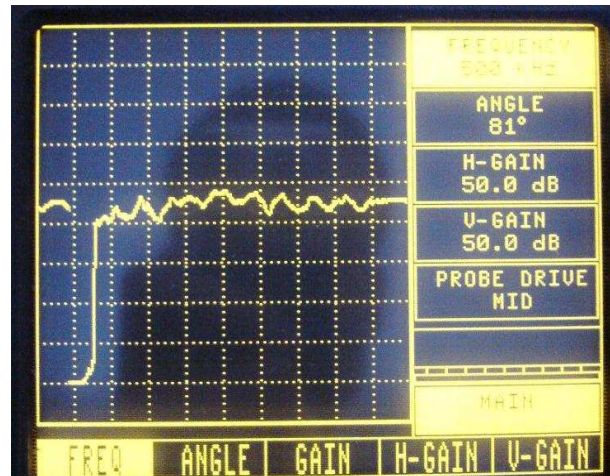


Obr. 12- Hloubka trhliny vyrobeného měděného kalibru (mikroskopický rozbor)





Vzorek 1 (645.1)



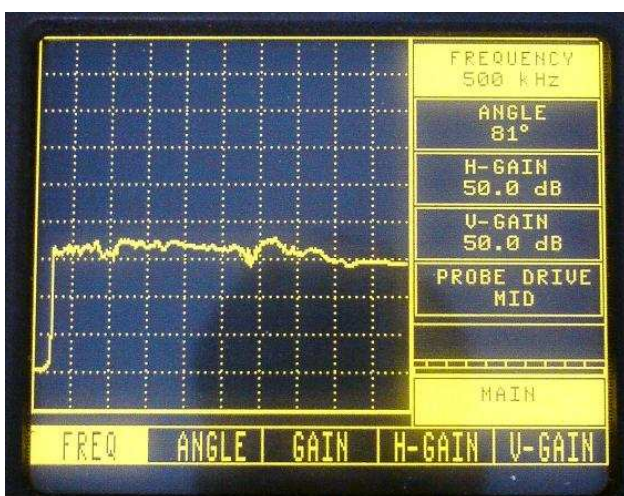
Vzorek 2 (645.2)



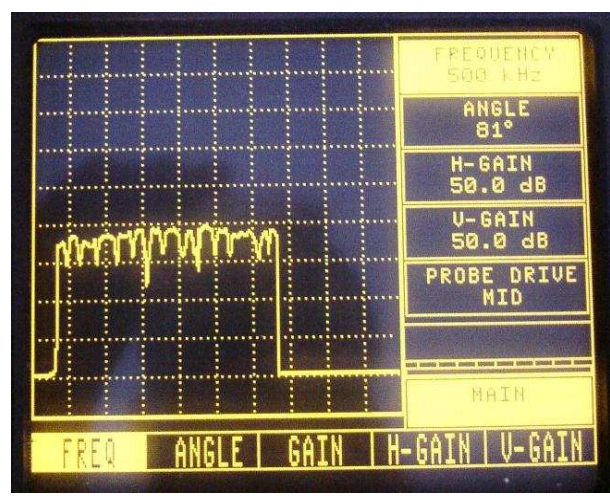
Vzorek 3 (645.3)



Vzorek 4 (674A)



Vzorek 5 (674B)



Kalibr

Obr. 13- Odezva zaznamenaná přístrojem Nortec 1000 při měření trhlin



Po nastavení parametrů přístroje byla změřena odezva na vyrobeném měděném kalibru, na němž byla zhotovena trhlina definované hloubky (hloubka trhliny se změřila při mikroskopickém rozboru kalibru a činila 577  $\mu\text{m}$ )- viz obr. 12. Tato odezva byla porovnána s odezvami získanými proměřováním vzorků ložiskových pánví (viz obr. 13) a podle velikosti signálu bylo určeno, do jaké hloubky pronikaly vířivé proudy (viz tab. 5):

vzorek	hloubka pronikání vířivých proudů [ $\mu\text{m}$ ]
1	346
2	490
3	87
4	173
5	202

Tab. 5- Hloubka pronikání vířivých proudů

Výsledky dosažené měřením vířivoproudým přístrojem Nortec 1000 se shodují s předchozími šetřeními. Bylo potvrzeno, že nejvíce necelistvá povrchová a těsně podpovrchová vrstva se vyskytuje u vzorku 2 (vířivé proudy pronikaly až do hloubky 490  $\mu\text{m}$ ). Taktéž vzorek 1 vykazoval oproti vzorkům 3, 4 a 5 značnou necelistvost povrchu. Rozsah trhlin vzorků 3, 4 a 5 se pohyboval v přijatelných mezích.

#### 4.3.2. Zjišťování vnitřních vad materiálu přístrojem Nortec 1000

Pro detekci vnitřních vad pomocí přístroje Nortec 1000 byla zvolena sonda typu *ML / 100 kHz- 500 kHz / A / 90,5 / 6* určená k odhalování vnitřních vad v materiálu. Pro testování ložiskových pánví byly stanoveny následující parametry přístroje Nortec 1000:

Frequency (frekvence)	: dle tabulky 6
H Gain (horizontální zesílení)	: 51 dB
V Gain (vertikální zesílení)	: 51 dB
Angle (fázový úhel)	: 105°
H Position (horizontální poloha)	: 85%
V Position (vertikální poloha)	: 10%

Z měření vyplývá (viz tab. 6), že s rostoucí frekvencí se snižuje velikost výstupního signálu. Při všech zvolených frekvencích se však zachovává vzájemný poměr velikostí signálů jednotlivých vzorků. Naměřené výsledky poukazují, že vnitřní struktura vzorků 1, 3, 4



a 5 bude oproti vzorku 2 značně celistvější. Vzorek 2 bude ve svém objemu obsahovat značné procento pórovitosti (což potvrzují i výsledky metalografického rozboru). Naopak vzorky 3 a 5 budou mít pórovitost nejmenší (totéž vyplývá též z metalografického rozboru i z měření přístrojem Crack Depth Meter JK-1).

vzorek	f= 300 kHz	f= 350 kHz	f= 400 kHz	f= 450 kHz
	počet dílků na stínítku obrazovky přístroje Nortec 1000 [-]			
1	3,0	2,0	1,0	0,2
2	7,0	6,0	5,7	5,0
3	2,5	1,7	0,8	0,1
4	2,7	1,8	0,9	0,1
5	2,4	1,6	0,8	0,1

Tab. 6- Výsledky měření vnitřních vad ložiskových pánví

#### 4.3.3. Zjišťování vnitřních vad materiálu prostřednictvím úbytku vodivosti

Stanovení vodivosti ložiskových pánví bylo provedeno sondou typu *SL / 1 kHz- 50 kHz / .31*. Tato sonda pracuje na principu měření změny vodivosti materiálu, v jehož objemu se vyskytují dutiny, póry nebo jiné necelistvosti. Každý pór je totiž vyplněn izolantem- vzduchem, který zvyšuje elektrický odpor zkoušeného materiálu- tzn. čím více pórů vzorek obsahuje, tím je sondou zaznamenána menší vodivost. Podle velikosti úbytku vodivosti ve srovnání s kalibrem lze pak odhadnout rozsah pórovitosti testovaného materiálu.

Při zkoumání naspékané bronzové vrstvy ložiskových pánví byl za kalibr vzat měděný plátek o čistotě 99% s elektrickou vodivostí  $59,6 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$ . Bronzová ložisková pánev bude ovšem vykazovat menší hodnotu vodivosti, protože přísady přidané k mědi (22% Pb, 4% Sn) značně snižují elektrickou vodivost slitiny. Měření bylo provedeno při následujících technických parametrech přístroje Nortec 1000:

Frequency (frekvence)	: 9,8 kHz
H Gain (horizontální zesílení)	: 49 dB
V Gain (vertikální zesílení)	: 49 dB
Angle (fázový úhel)	: 95°
H Position (horizontální poloha)	: 95%
V Position (vertikální poloha)	: 5%





vzorek	počet dílků na stínítku obrazovky [-]	přepočítání dílků na elektrickou vodivost [ $\frac{S}{m}$ ]
1	3,5	<b>23,977.10<sup>6</sup></b>
2	0,4	<b>2,740.10<sup>6</sup></b>
3	5,3	<b>36,308.10<sup>6</sup></b>
4	4,7	<b>32,198.10<sup>6</sup></b>
5	4,6	<b>31,513.10<sup>6</sup></b>
kalibr (měď)	8,7	<b>59,600.10<sup>6</sup></b>

Tab. 7- Výsledky měření vodivosti ložiskových pánví

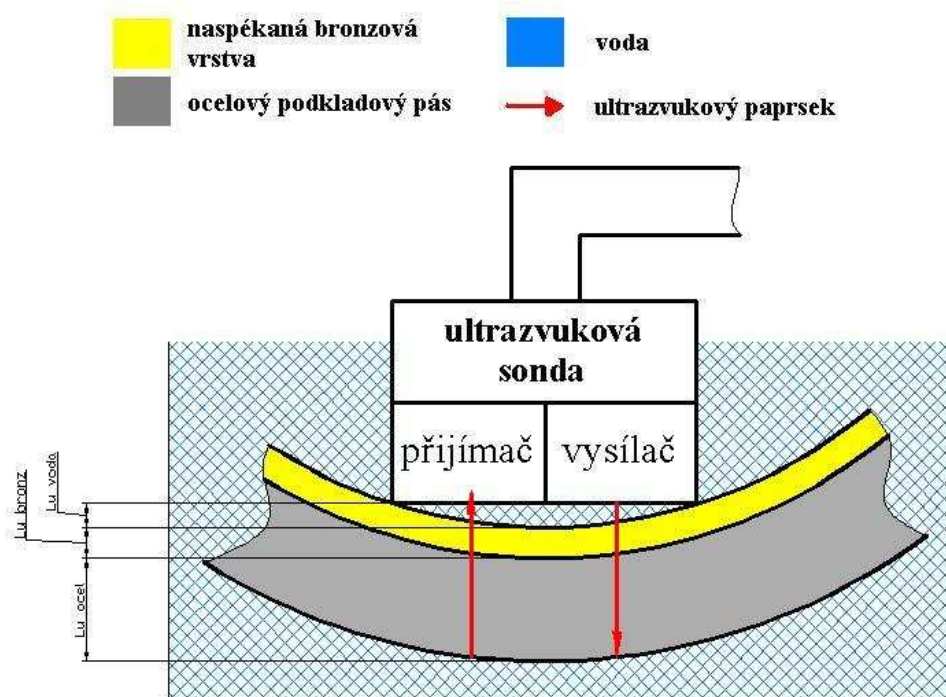
Z tabulky 7 je možné vyčíst, že vzorek 1 a především vzorek 2 mají v porovnání se vzorky 3, 4 a 5 podstatně nižší vodivost. Snížení vodivosti se projevilo jednak v důsledku vnitřní pórovitosti vzorků 1 a 2 a také díky zeslabené vrstvě naspěkaného bronzu- vířivé proudy pronikaly skrz bronzovou vrstvu až do podkladového materiálu z oceli, který negativně ovlivňoval výslednou vodivost (elektrická vodivost oceli se pohybuje pouze okolo  $6,66 \cdot 10^6 \frac{S}{m}$ ).

Šetření vzorků prostřednictvím sondy *SL / 1 kHz- 50 kHz / .31* opět potvrdilo předchozí závěry- vzorek 1 a 2 má vysoké procento pórovitosti a nedostatečnou tloušťku naspěkané vrstvy, vzorky 3, 4 a 5 jsou vyhovující.

#### 4.4. Zjišťování pórovitosti materiálu pomocí ultrazvuku

Pro zkoumání pórovitosti naspěkané bronzové vrstvy pomocí ultrazvuku byla zvolena odrazová metoda. Pracovalo se tedy s jednou dvojitou sondou typu SM1 344 o frekvenci 10 MHz, která sloužila současně jako vysílač i přijímač ultrazvukových vln. Sonda měla průměr 8,5 mm a jako kontaktní médium mezi sondou a vzorkem byla použita voda. Cílem měření bylo zjistit rychlost a útlum ultrazvukových paprsků v bronzové vrstvě a z naměřených hodnot posoudit míru pórovitosti. Princip experimentu je znázorněn na *obrázku 14*.

Měřením ultrazvukovou sondou SM1 344 byly naměřeny tloušťky ložiskových pánví dle *tabulky 8*.



Obr. 14- Princip měření ultrazvukovou sondou typu SM1 344

vzorek	tloušťka materiálu změřená ultrazvukem
	$L_U$ [mm]
1	4,251
2	3,802
3	4,436
4	4,343
5	4,621

Tab. 8- Tloušťky ložiskových pánví změřené ultrazvukem

Pozn.: Ultrazvuková sonda je seřízena na rychlost pronikání ultrazvuku ocelí, při průchodu vlnění jiným materiálem se musí změřená tloušťka korigovat příslušným koeficientem, který bere v potaz nižší či vyšší rychlost průchodu ultrazvuku daným materiálem oproti oceli.

Výsledná tloušťka materiálu  $L_U$  je vyjádřena vztahem (1):

$$L_U = L_{U\_oceli} + \frac{v_{L\_oceli}}{v_{L\_bronzu}} \cdot L_{U\_bronzu} + \frac{v_{L\_oceli}}{v_{L\_vody}} \cdot L_{U\_vody} \quad (1)$$



kde  $L_{U\_oceli}$  je tloušťka podkladového ocelového pásu,  $L_{U\_bronzu}$  je tloušťka naspěkané bronzové vrstvy,  $L_{U\_vody}$  je tloušťka vodního sloupce mezi sondou a zakřivenou plochou ložiskové pánve,  $v_{L\_oceli}$  je rychlost ultrazvuku v oceli,  $v_{L\_vody}$  je rychlost ultrazvuku ve vodě a  $v_{L\_bronzu}$  je rychlost ultrazvuku v bronzu.

Výška vodního sloupce mezi sondou a zakřivenou plochou ložiskové pánve ( $L_{U\_vody}$ ) se určí z obrázku 15 a vztahu (2):

$$L_{U\_vody} = R - x \quad (2)$$

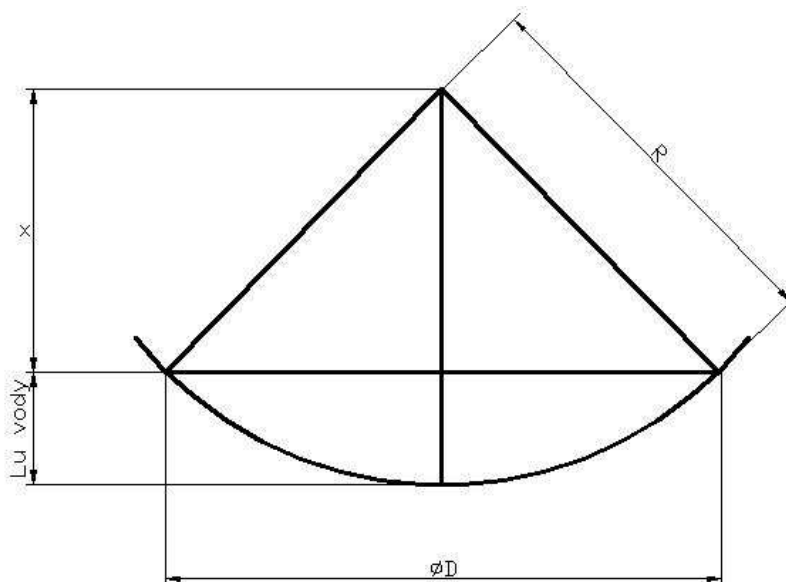
kde hodnota  $x$  se spočítá ze vztahu (3)- viz obr. 15:

$$x = \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (3)$$

po dosazení vztahu (3) do vztahu (2) se dostane výraz:

$$L_{U\_vody} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Výška vodního sloupce  $L_{U\_vody}$  tedy činí **0,367 mm**.



Obr. 15

$R = 24,8 \text{ mm}$ - vnitřní poloměr ložiskové pánve

$\Phi D = 8,5 \text{ mm}$ - průměr ultrazvukové sondy

$L_{U\_vody}$  - výška vodního sloupce mezi sondou a zakřivenou plochou ložiskové pánve



Z předchozích měření a výpočtů, technických podmínek pro ložiskové pánve a z parametrů ultrazvukové sondy jsou známy rozměry:

$$L_{U\_oceli} = 2,1 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vody} = 0,367 \text{ mm}$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek1} = 0,4656 \text{ mm}$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek2} = 0,1524 \text{ mm}$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek3} = 0,8061 \text{ mm}$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek4} = 0,7992 \text{ mm}$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek5} = 0,7980 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vzorek1} = 3,250 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vzorek2} = 3,151 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vzorek3} = 3,719 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vzorek4} = 3,604 \text{ mm}$$

$$L_{U\_vzorek5} = 3,604 \text{ mm}$$

$$v_{L\_oceli} = 5920 \frac{m}{s}$$

$$v_{L\_vody} = 1500 \frac{m}{s}$$

Ze vztahu (1) se může vyjádřit hledaná rychlost pronikání ultrazvukových vln bronzovou vrstvou:

$$v_{L\_bronzu} = \frac{v_{L\_oceli} \cdot L_{U\_bronzu}}{L_U - L_{U\_oceli} - \frac{v_{L\_oceli}}{v_{L\_vody}} \cdot L_{U\_vody}} \quad (5)$$



Vypočtené výsledky rychlostí jsou shrnuty v *tabulce 9*:

vzorek	$v_{L\_bronzu} \left[ \frac{m}{s} \right]$
1	3 923
2	3 558
3	5 377
4	5 954
5	4 405

Tab. 9- Výsledky rychlostí pronikání ultrazvukových vln bronzovou vrstvou

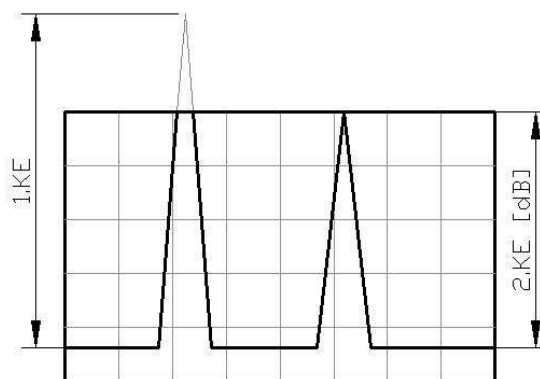
Velikost útlumu ultrazvuku se stanoví z rozdílu citlivostí prvního a druhého koncového echa. Při měření se zvolí nejdříve taková citlivost ultrazvuku, aby první koncové echo vyplnilo celý rastr obrazovky přístroje (2. koncové echo bude nižší). Poté se citlivost zvýší natolik, aby i druhé koncové echo dosáhlo 100% rastru obrazovky (*viz obr. 16*). Výsledný útlum ultrazvuku v materiálu se pak určí ze vztahu (6):

$$\alpha_s = \frac{2KE - 1KE}{2 \cdot L_{U\_materiálu}} \quad (6)$$

kde  $2KE$  je citlivost druhého koncového echa v decibelech,  $1KE$  je citlivost prvního koncového echa v decibelech a  $L_{U\_materiálu}$  je tloušťka zkoušeného materiálu v metrech.



měření citlivosti 1. koncového echa



zvýšení citlivosti pro měření  
2. koncového echa

Obr. 16- Určení citlivostí prvního a druhého koncového echa



Pro zkoumání naspékané bronzové vrstvy ložiskových pánví byl místo reálného útlumu  $\alpha_s$  (který se u pórovitých materiálů pohybuje okolo  $1 \frac{dB}{m}$ ) zjištěn útlum fiktivní  $\alpha_f$ , protože z ultrazvukového obrazu se nedalo spolehlivě odečíst druhé koncové echo a pracovalo se tedy pouze s prvním koncovým echem dle vztahu (7):

$$\alpha_f = \frac{1KE}{2 \cdot L_{U\_bronzu}} \quad (7)$$

Takto vypočtené hodnoty útlumů umožňují porovnat jednotlivé vzorky mezi sebou.

U bronzové vrstvy ložiskových pánví byly změřeny citlivosti ultrazvuku dle *tabulky 10*:

vzorek	citlivost prvního koncového echa [dB]
1	45
2	39
3	37
4	45
5	48

Tab. 10- Změřené citlivosti prvního koncového echa

Z naměřených hodnot citlivostí prvního koncového echa byly dle vztahu (7) stanoveny fiktivní útlumy bronzových vrstev (viz *tab. 11*):

vzorek	fiktivní útlum $\alpha_f$ [ $\frac{dB}{m}$ ]
1	483,2
2	1279,5
3	229,5
4	281,5
5	300,8

Tab. 11- Hodnoty fiktivních útlumů bronzových vrstev

Nejmenší rychlost pronikání a zároveň největší útlum ultrazvuku byl zaznamenán u vzorku 2. Vzhledem k jeho nejmenší tloušťce se dá předpokládat, že ve svém objemu obsahuje vysoké procento pórovitosti. Naopak s až téměř pětkrát menším útlumem procházel ultrazvuk vzorky 3, 4 a 5, které již při předchozích měřeních vykazovaly menší pórovitost.



#### 4.5. Zjišťování pórovitosti materiálu pomocí programu NIS- Elements 2.30

Nejobjektivnější metodou pro posouzení pórovitosti je elektronické hodnocení pomocí programu NIS- Elements 2.30, přestože tato metoda vyhodnotí pouze lokální pórovitost (tj. v místě řezu výbrusu). Lze však předpokládat, že tato lokální hodnota platí s drobnými odchylkami pro celý objem vzorku.

Při metalografickém rozboru vzorku se póry projevují jako tmavé plochy, zatímco celistvý materiál má světlejší barvu. Program NIS- Elements 2.30 tedy při hodnocení pórovitosti vychází ze vzájemného poměru velikostí tmavých a světlých ploch. Sečtením obsahů tmavých ploch je pak získána výsledná hodnota lokální pórovitosti (viz obr. 17.1, 17.2 a 17.3).

Vyhodnocení pórovitosti vzorků 1- 5 prostřednictvím programu NIS- Elements 2.30 je shrnuto v tabulce 12:

vzorek	pórovitost
1	12%
2	19%
3	3%
4	3,4%
5	4%

Tab. 12- Pórovitost vzorků stanovená programem NIS- Elements 2.30

Výsledky elektronického sčítání pórovitosti prokázaly správnost výsledků dosažených předchozími metodami. Vzorek 2 obsahuje nejvyšší procento pórů, rovněž vzorek 1 je nadměrně pórovitý. U vzorků 3, 4 a 5 se pórovitost pohybuje v akceptovatelných mezích.



Obr. 17.1- Struktura vzorku 1 při měření programem NIS- Elements (vzorek obsahuje nadměrné procento pórovitosti- 12%)



Obr. 17.2- Struktura vzorku 2 při měření programem NIS- Elements (vzorek obsahuje nadměrné procento pórovitosti- 19%)

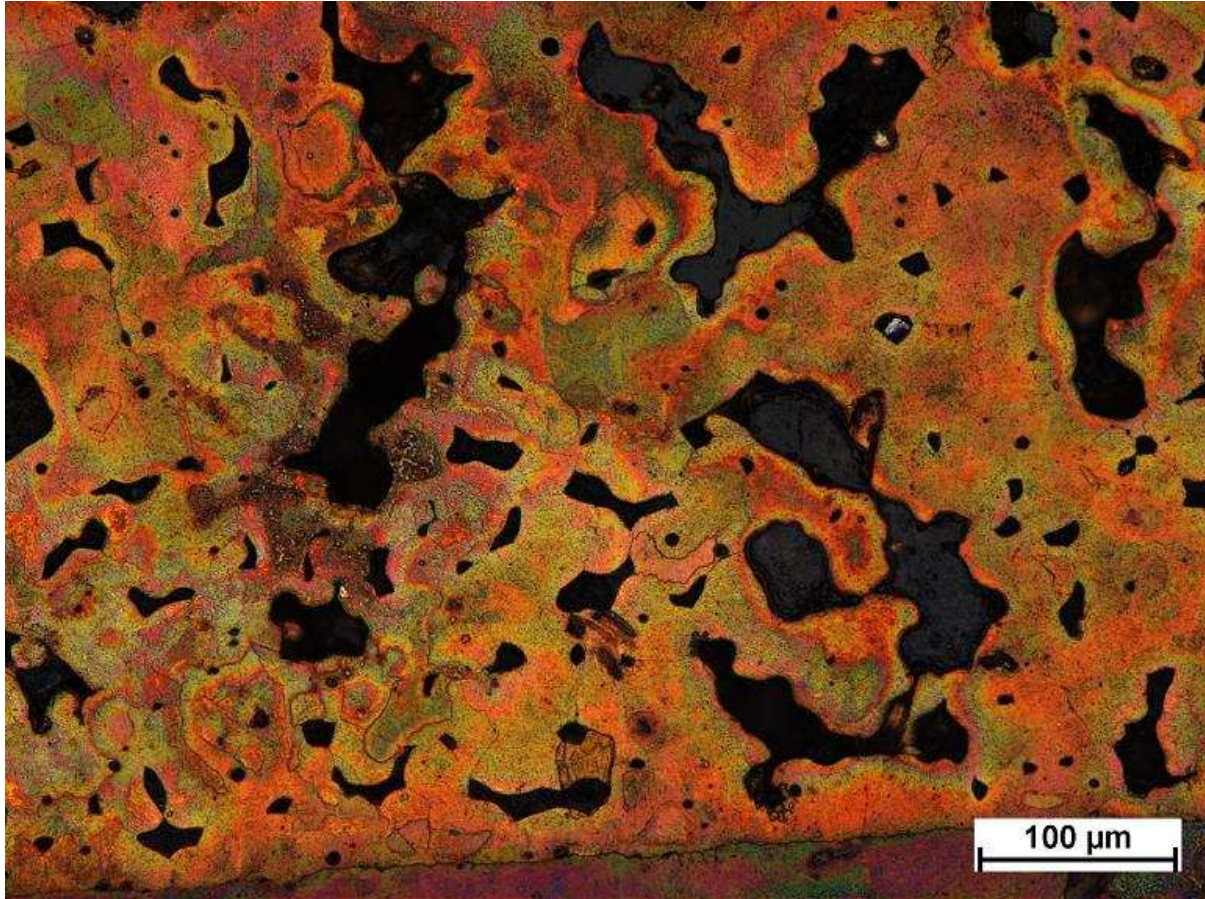


Obr. 17.3- Struktura charakteristická pro vzorky 3, 4 a 5 při měření programem NIS- Elements (vzorky obsahují přípustné procento pórovitosti- do 3,5%)





*Obrázek 18* znázorňuje strukturu naspékané bronzové vrstvy  $\text{CuPb22Sn4}$  zkoumaných ložiskových pánví při stonásobném zvětšení a použití leptadla KLEMM II.



*Obr. 18- Struktura naspékané bronzové vrstvy  $\text{CuPb22Sn4}$  (zv. 100x, leptadlo KLEMM II)*





## 5. Diskuze

Cílem bakalářské práce bylo ověřit vhodnost vybraných nedestruktivních metod zkoušení materiálu k odhalování pórovitosti a tloušťky naspékané bronzové vrstvy ložiskových pánví.

Měření tloušťky bronzové vrstvy bylo prováděno prostřednictvím přístroje Positector 6000F (verze F slouží k testování nemagnetických povlaků), který spolehlivě určuje tloušťku vrstvy na rovných vzorcích, ale u výrobků s určitým rádiusem dochází v měření k nepřesnostem způsobeným v důsledku konstrukce sondy, kdy sonda dosedne na zkoumaný vzorek pouze na svém obvodu a mezi středem čela sondy a povrchem zkoušeného materiálu zůstane mezera, která se negativně promítne do výsledné hodnoty tloušťky. Tato nepřesnost je tím větší, čím je rádius menší. U testovaných ložiskových pánví s vnitřním poloměrem 24,8 mm činí odchylka naměřené hodnoty od skutečné tloušťky zhruba 50  $\mu\text{m}$ . Pro odstranění této nepřesnosti by bylo třeba zhotovit kalibrační etalon definované tloušťky o poloměru 24,8 mm nebo vypracovat počítačový program pro přepočet nezkalibrovaných hodnot.

Hodnocení pórovitosti materiálu se provádělo pomocí vířivých proudů a ultrazvukem. Při měření ultrazvukem se zjišťovala rychlost pronikání ultrazvuku naspékanou vrstvou a velikost útlumu ultrazvuku v této vrstvě. V obou případech byly bezpečně odhaleny vzorky s nadměrnou pórovitostí, neboť zjišťované parametry těchto vzorků se několikanásobně lišily od parametrů bronzových vrstev s akceptovatelným procentem pórů. Pokud by bylo k dispozici větší množství vzorků testovaných ložiskových pánví o různé pórovitosti (jejíž přesná hodnota by se stanovila prostřednictvím programu NIS- Elements), mohla by se experimentálně stanovit nejnižší přípustná hodnota rychlosti ultrazvuku a obdobně maximální hranice útlumu ultrazvuku v bronzové vrstvě, při níž by se pórovitost ještě pohybovala v přijatelných mezích (tj. do 3,5%).

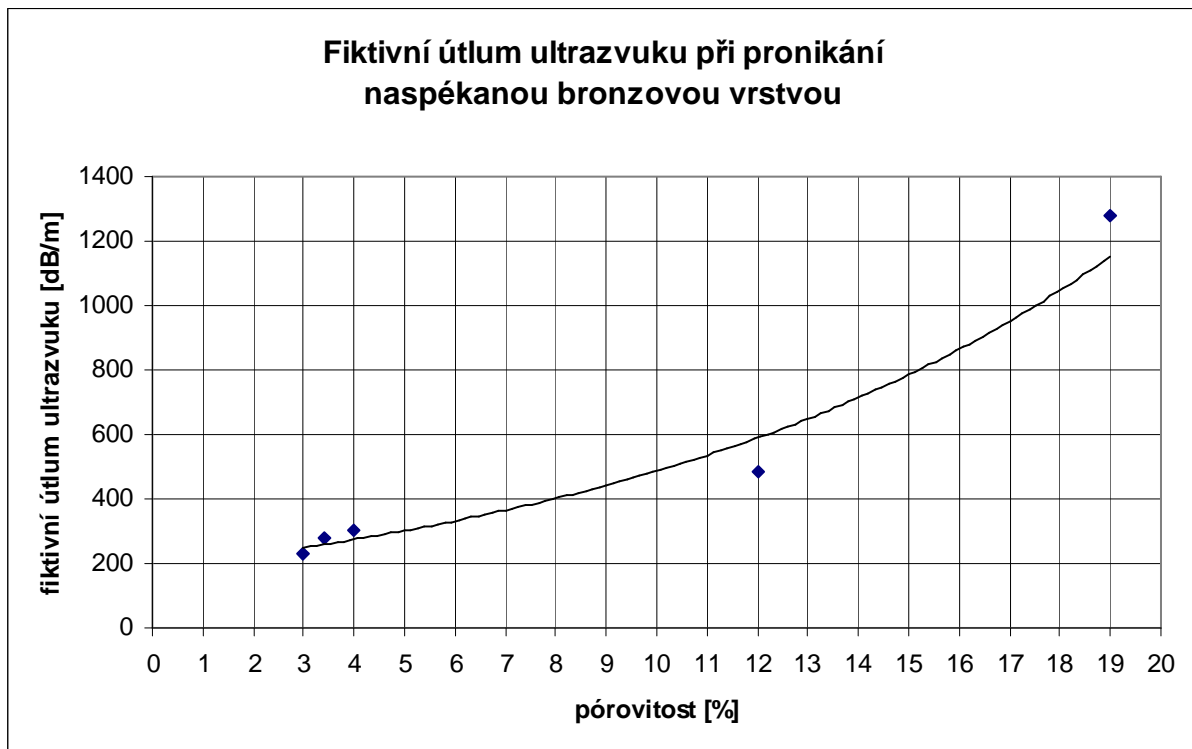
Měření pórovitosti vířivými proudy se realizovalo za použití přístroje Nortec 1000. Kvalita povrchu vzorků a jejich otevřená pórovitost se zjišťovala sondou PL/ 500 kHz- 1MHz/ A, vnitřní pórovitost se pak měřila sondou typu ML/ 100 kHz- 500 kHz/ A/ 90,5/ 6. Oběma typy sond bylo zjištěno, že do největší hloubky pronikají vířivé proudy u nadměrně pórovitých vzorků. Rovněž testování sondou SL/ 1 kHz- 50 kHz/ .31, která slouží k měření vodivosti materiálu, potvrdilo, že u vzorků se zvýšenou pórovitostí se vodivost vrstvy několikanásobně snižuje.



**Grafy zjištěných závislostí útlumu ultrazvuku, rychlosti pronikání ultrazvuku materiálem a vodivosti materiálu na procentu pórů obsažených v objemu materiálu**

<b>zjištěná pórovitost [%]</b>	<b>fiktivní útlum ultrazvuku [dB/m]</b>	<b>rychlost pronikání ultrazvuku bronzovou vrstvou [m/s]</b>	<b>elektrická vodivost bronzové vrstvy [S/m]</b>
3,0	229,5	5 377	36308000
3,4	281,5	5 954	32198000
4,0	300,8	4 405	31513000
12	483,2	3 923	23977000
19	1279,5	3 558	2740000

Tab. 13- Naměřené hodnoty útlumů a rychlostí pronikání ultrazvuku a změřená vodivost vzorků s přiřazenou odpovídající zjištěnou hodnotou pórovitosti



Graf 1- Závislost fiktivního útlumu ultrazvuku při pronikání bronzovou vrstvou na procentu pórovitosti

Danému rozložení bodů v grafu 1 nejlépe odpovídá exponenciální regresní funkce ve tvaru  $y = 186,88 \cdot e^{0,0958x}$ , kde y představuje hodnotu fiktivního útlumu ultrazvuku a x procento pórovitosti (koeficient korelace činí  $R = 0,9806$ ). Tato rovnice lze transformovat do tvaru (8):



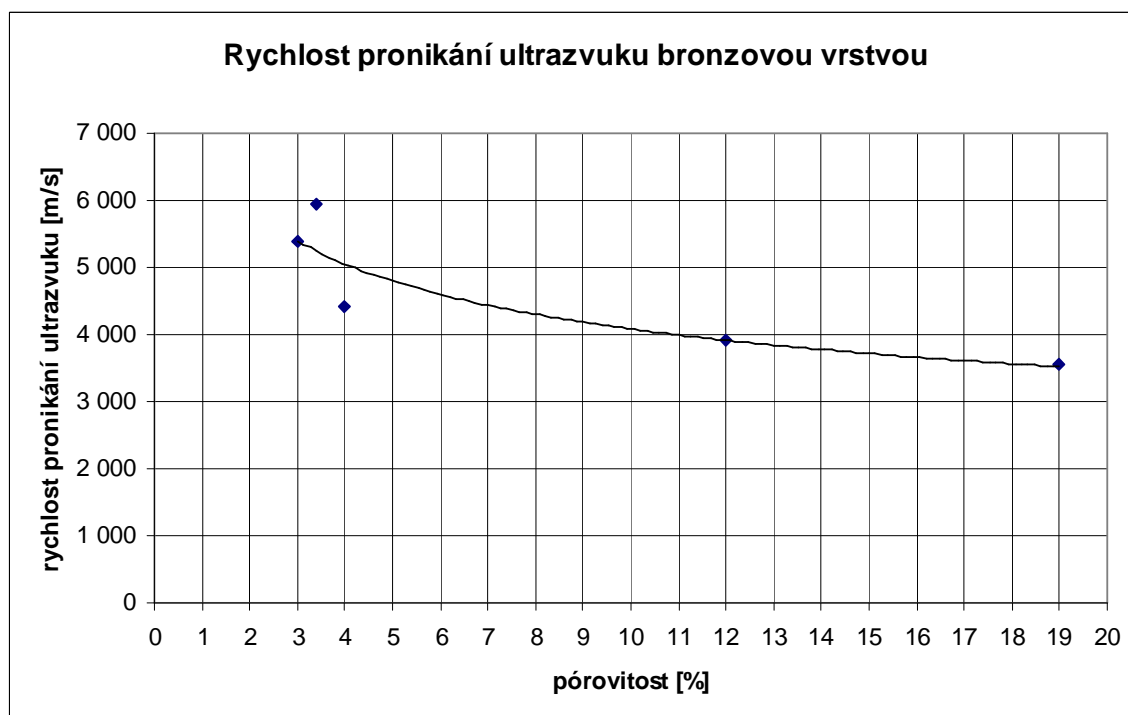
$$x = \frac{\ln\left(\frac{y}{186,88}\right)}{0,0958} \quad (8)$$

kde za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota fiktivního útlumu změřená pomocí ultrazvuku a  $x$  vyjde hledaná procentuální pórovitost. Po dosazení hodnot útlumů ultrazvuku do upravené regresní rovnice byla spočítána předpokládaná pórovitost dle *tabulky 14*:

skutečná pórovitost [%]	předpokládaná (spočítaná) pórovitost [%]	absolutní odchylka spočítané a naměřené pórovitosti [%]
3,0	2,14	0,86
3,4	4,28	0,88
4,0	4,97	0,97
12	9,92	2,08
19	20,0	1,00
		<b><math>\Phi = 1,158 \%</math></b>

Tab. 14- Porovnání hodnot skutečné pórovitosti a pórovitosti spočítané pomocí regresní funkce

Regresní funkce není zcela přesná, neboť k jejímu vykreslení bylo k dispozici pouze pět bodů, takže v matematickém modelu vznikly drobné nepřesnosti, v jejichž důsledku se hodnoty předpokládané (spočítané) pórovitosti od té skutečné liší v průměru o 1,158 %.



Graf 2- Závislost rychlosti pronikání ultrazvuku bronzovou vrstvou na procentu pórovitosti



Graf 2 nejnepřesněji popisuje mocninná funkce o rovnici  $y = 6962,4 \cdot x^{-0,2317}$ , kde  $y$  představuje hodnotu rychlosti pronikání ultrazvuku bronzovou vrstvou a  $x$  procento pórovitosti (koeficient korelace činí  $R = 0,8999$ ). Tuto rovnici lze taktéž transformovat do tvaru (9):

$$x = \sqrt[{-0,2317}]{\frac{y}{6962,4}} \quad (9)$$

kde za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota rychlosti pronikání ultrazvuku bronzovou vrstvou a  $x$  opět vyjde hledaná procentuální pórovitost, která je shrnuta v *tabulce 15*:

skutečná pórovitost [%]	předpokládaná (spočítaná) pórovitost [%]	absolutní odchylka spočítané a naměřené pórovitosti [%]
3,0	3,05	0,05
3,4	1,96	1,44
4,0	7,21	3,21
12	11,89	0,11
19	18,13	0,87
		<b><math>\Phi = 1,136 \%</math></b>

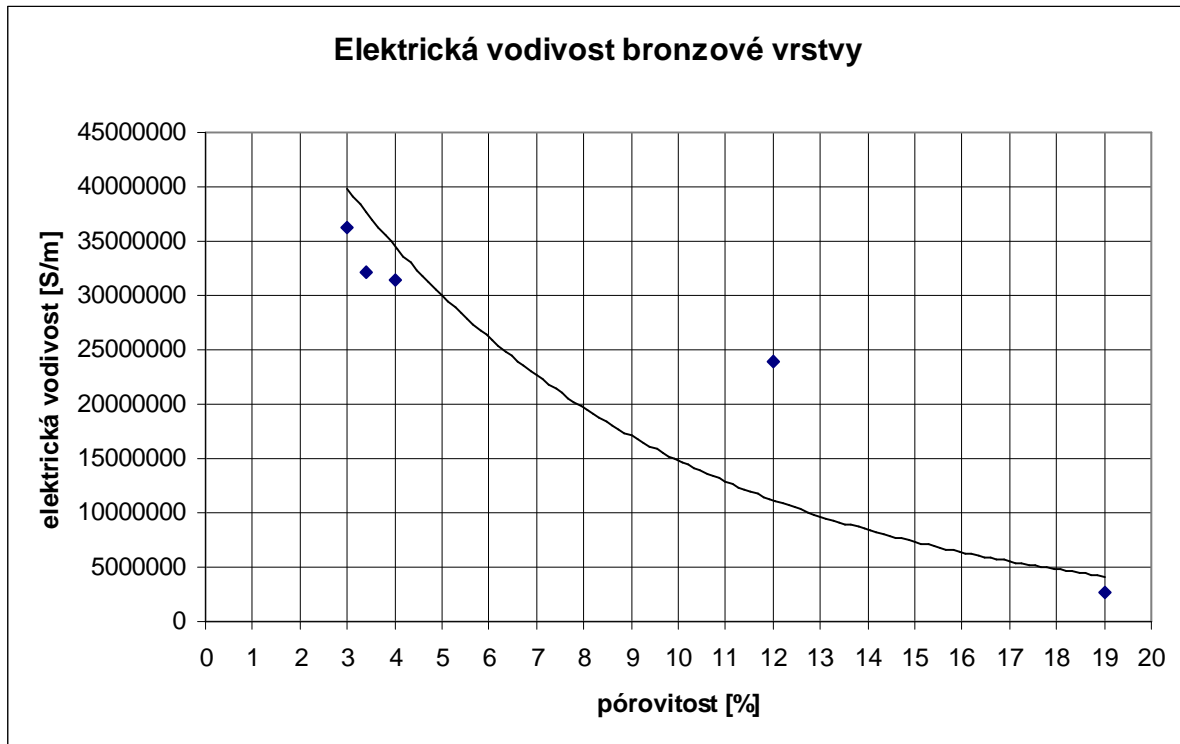
*Tab. 15- Porovnání hodnot skutečné pórovitosti a pórovitosti spočítané pomocí regresní funkce*

Vlivem nepřesnosti regresní funkce se hodnoty předpokládané (spočítané) pórovitosti od té skutečné liší u tohoto matematického modelu v průměru o 1,136 %. Pro dosažení vyššího koeficientu korelace by bylo třeba provést více experimentů, aby k vykreslení regresní funkce byl k dispozici větší počet bodů.

Naměřené body v grafu 3 lze proložit křivkou exponenciální funkce o rovnici  $y = 6 \cdot 10^7 e^{-0,1411x}$ , kde  $y$  představuje hodnotu elektrické vodivosti bronzové vrstvy a  $x$  procento pórovitosti (koeficient korelace činí  $R = 0,9122$ ). Po transformaci regresní funkce se získá tvar (10):

$$x = -\frac{\ln \frac{y}{6 \cdot 10^7}}{0,1411} \quad (10)$$

kde za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota elektrické vodivosti bronzové vrstvy a  $x$  vyjde hledaná procentuální pórovitost, která je vyjádřena v *tabulce 16*.



Graf 3- Závislost elektrické vodivosti bronzové vrstvy na procentu pórovitosti

skutečná pórovitost [%]	předpokládaná (spočítaná) pórovitost [%]	absolutní odchylka spočítané a naměřené pórovitosti [%]
3,0	3,56	0,56
3,4	4,41	1,01
4,0	4,56	0,56
12	6,50	5,50
19	21,87	2,87
		<b><math>\Phi = 2,100 \%</math></b>

Tab. 16- Porovnání hodnot skutečné pórovitosti a pórovitosti spočítané pomocí regresní funkce

V důsledku malého počtu bodů použitých pro určení regresní funkce se hodnoty předpokládané (spočítané) pórovitosti od té skutečné liší v případě tohoto matematického modelu v průměru o 2,1 %.



## 6. Závěr

V rámci bakalářské práce bylo zjištěno, že pro nedestruktivní diagnostiku pórovitosti naspékané bronzové vrstvy ložiskových pánví je vhodné použití vířivoproudého přístroje Nortec 1000 nebo ultrazvukového defektoskopu. Nejpřesnějších výsledků bylo dosaženo při použití matematického modelu (8), který vychází z útlumu ultrazvuku. Pomocí programu NIS- Elements 2.30 potom byly stanoveny konkrétní hodnoty pórovitosti dodaných vzorků 1- 5. Vzorky 1 a 2 nevyhovovaly technickým požadavkům na ložiskové pánve, vzorky 3, 4 a 5 vyhovovaly.

Předmětem dalších prací v této oblasti by mohlo být vytvoření přesnějšího matematického modelu nebo počítačového programu, který by z útlumu (případně z rychlosti) ultrazvuku v bronzové vrstvě nebo z vodivosti této vrstvy určil skutečnou procentuelní pórovitost, která by odpovídala hodnotám zjištěným z metalografických výbrusů. Pro vytvoření tohoto matematického modelu bude třeba provést větší počet měření na vzorcích o různé pórovitosti (optimální počet zkoumaných vzorků by byl 30 - 50). Také bude vhodné udělat chemický rozbor jednotlivých vzorků, protože polotovary, z nichž se zhotovují ložiskové pánve, pocházejí od různých dodavatelů, a není tedy zaručeno konstantní chemické složení u všech výrobků, takže rozdíly ve složení se také mohly při měření promítnout do přesnosti výsledků.

Práce byla realizována s podporou výzkumného záměru MSM 4674788501.



## 7. Použitá literatura

1. VĚCHET, M., KESL, J., ŠPIKA, L. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00100 – 5.
2. PTÁČEK, L., MÍŠEK, B. *Zkoušení materiálu a výrobků bez porušení*. 1. vydání. SNTL: Praha 1968.
3. DUBENSKÝ, R., MINAŘÍK, V., ČERMÁK, F. *Defektoskopie*. 1. vydání. Ediční středisko ČVUT: Praha 1987.
4. PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.
5. PTÁČEK, L., MÍŠEK, B. *Defektoskopie a provozní diagnostika*. 1. vydání. Nakladatelství VUT: Brno 1992. ISBN 80 – 214 – 0425 – 6.
6. OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00097 – 1.
7. *Česká státní norma ČSN 42 0891: Část 1- Prášková metalurgia*. 1995
8. Návod na použití přístroje Nortec 1000.
9. Návod na použití programu NIS- Elements 2.30.
10. Technická dokumentace firmy TEDOM s. r. o.