

# STANOVENÍ POREZITY KLUZNÝCH VRSTEV ULTRAZVUKEM

Břetislav SKRBEK, Martin ŠVEC

Katedra materiálu Fakulta strojní, Univerzita technická v Liberci, Studentská č. 2, 461 17 Liberec, CZ, e-mail: bretislav.skrbek@tul.cz

## Abstrakt

*Práce se zabývá zkoumáním porózity a tloušťky naspékané bronzové vrstvy na ložiskových pánvích nedestruktivní ultrazvukovou odrazovou metodou testování s využitím přímých dvojité sond. Náhlý výskyt provozních havárií kluzných ložisek klikových hřídel velkých vznětových motorů. Nerovnoměrná kvalita dodávek polotvarů bronzem naspékaných ocelových pásů. Nutnost vyvinout nedestruktivní diagnostiku nosnosti kluzných vrstev. Ocelový hlubokotažný plech 2,12 mm. Naspékaná vrstva 0,2 – 0,6mm tlustá. Práce vyhodnocuje vhodnost a spolehlivost použitých nedestruktivních metod k odhalování míry porózity. Příklad materiálového testu na pěti vzorcích. Měření akustického útlumu a podélné rychlosti šíření ultrazvukových vln o frekvenci 10MHz. Metalografické vyhodnocování porezity s podporou programu NIS- Elements 2.30. Měření přímou ultrazvukovou sondou na vydutých plochách kontaktní kapalinovou vazbou vyžaduje geometrickou korekci výsledků. Shrnutí výsledků a výhled pro další aplikace.*

## Úvod

Většina pístových spalovacích motorů využívá pro uložení klikové hřídele a ojníc kluzná ložiska [1]. Kvality naspékané bronzové kluzné vrstvy na ložiskových pánvích zaznamenaly při užívání tohoto typu ložisek asi před pěti lety problémy s životností. Během provozu docházelo na ložiskách k defektům, které přímo ohrožovaly provozuschopnost klikového mechanismu. 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 rozsypání naspékané vrstvy [2]. Mezní hodnota porózity dohodnutá v dodacích technických podmínkách činí 3,5% z plochy výbrusu.

Příčiny těchto havárií je třeba hledat v původu dodávaných polotvarů, z nichž se ložiska zhotovují. Trh zaplavovaly výrobky z asijských zemí, které sice drtí evropské výrobce objemem své produkce a nízkou cenou, ale kvalitou se jim vyrovnat nemůžou.

Jelikož i velká část pouzder a pánví, které se vyrábí na východ od České republiky, pochází z polotvarů z asijských zemí, je nutná u finálních výrobků nedestruktivní diagnostika vnitřní stavby kluzné vrstvy, aby byla zajištěna požadovaná jakost výroby.

Cílem příspěvku je, prostřednictvím proměření vzorků 1-5 odebraných z ložiskových pánví vyráběných komerčními firmami na Slovensku a v Německu, navrhnout vhodné ultrazvukové diagnostické metody, které by pomáhaly odhalit výrobky s nadměrnou pórovitostí, která způsobuje malou životnost ložisek.

## Předpis

Pouzdro ojnice (odpovídá výkresu dodavatele 5058 B10-04 ) tvoří zakružovaný bimetalický pás B10 z oceli 11 423 (Rm <418;510> MPa, tj. <125;151>HV) a naspékaného bronzového prášku Cu Pb10Sn10. Technické podmínky TP 421V/96 specifikují pouze chemická složení. Mezní hodnota porózity

dohodnutá v dodacích technických podmínkách činí 3,5% z plochy výbrusu Jmenovitá tloušťka ocelové podložky vychází 2,1 mm a kluzné vrstvy 0,2-0,6mm (z výkresu to jednoznačně není zřejmé).

### Poróznost spékanych materiálů

Doprovodným jevem u spékanych 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 [5] se celková pórovitost stanoví ze vztahu:

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

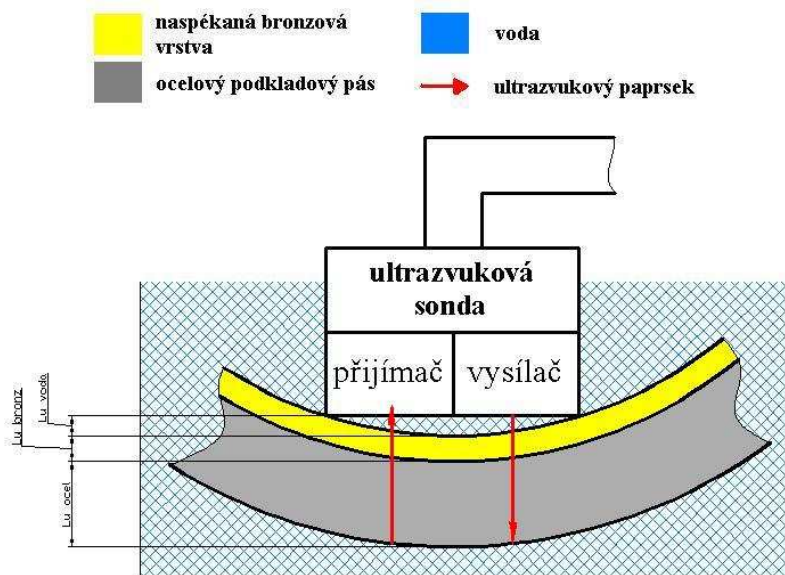
kde  $\gamma$  je hustota slinutého výrobku a  $\gamma_{kompaktní}$  je hustota zcela nepórovitého materiálu o stejném chemickém složení.

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  $V = m_{na\_vzduchu} - m_{ve\_vodě} \cdot 1$

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.

### Ultrazvukové testování

Nedestruktivní zkoumání materiálu ultrazvukem patří mezi nejrozšířenější způsoby nedestruktivní defektoskopie. Umožňuje spolehlivě odhalit dutiny a nespojitosti ve vnitřní struktuře materiálu, jejich rozsah a hloubku pod povrchem. Fyzikální princip ultrazvukového testování uvádí [4]. Šíření akustické (ultrazvukové) vlny specifikuje rychlost (m/s) a koeficient útlumu (dB/mm). Jejich hodnoty závisí na vnitřní morfoloii materiálu.



**Obr. 1:** Princip měření ultrazvukovou sondou typu SM1 344, 10MHz, d=8,5mm.



$$L_{H_2O} = R \cdot \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \text{ [mm]} \quad (5)$$

Výška vodního sloupce  $L_{H_2O}$  tedy činí **0,367 mm**.

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

$$L_{U\_oceli} = 2,1; L_{U\_vody} = 0,367; L_{U\_bronzu\_vzorek1} = 0,4656; L_{U\_bronzu\_vzorek2} = 0,1524$$

$$L_{U\_bronzu\_vzorek3} = 0,8061; L_{U\_bronzu\_vzorek4} = 0,7992; L_{U\_bronzu\_vzorek5} = 0,7980$$

$$L_{U\_vzorek1} = 3,250; L_{U\_vzorek2} = 3,151; L_{U\_vzorek3} = 3,719; L_{U\_vzorek4} = 3,604$$

$$L_{U\_vzorek5} = 3,604; v_{L\_oceli} = 5920 \frac{m}{s}; v_{L\_vody} = 1500 \frac{m}{s}$$

Ze vztahu (2) se může vyjádřit hledaná rychlost pronikání ultrazvukových vln bronzovou vrstvou:

$$v_{L\_bronzu} = \frac{v_{L\_oceli} \cdot L_{U\_bronzu}}{L_U - L_{U\_oceli} - \frac{v_{L\_oceli}}{v_{L\_vody}} \cdot L_{U\_vody}} \quad (6)$$

**Tab. 2:** Výsledné podélné rychlosti ultrazvukových vln bronzovou vrstvou pánví.

Vzorek	1	2	3	4	5
$v_L \left[ \frac{m}{s} \right]$	<b>3923</b>	<b>3558</b>	<b>5377</b>	<b>5954</b>	<b>4405</b>

Velikost útlumu ultrazvuku se stanoví z rozdílu citlivostí prvního a druhého koncového echa KE. Při měření se zvolí nejdříve taková citlivost ultrazvuku (defektoskop DIO 1000), 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):

$$\alpha_s = \frac{2KE - 1KE}{2 \cdot L_{U\_materiálu}} \text{ [dB/m]} \quad (7)$$

kde  $2KE$  je citlivost druhého koncového echa v decibelech,  $1KE$  je citlivost prvního koncového echa v decibelech a  $L$  je tloušťka zkoušeného materiálu v metrech.

Pro zkoumání naspékané bronzové vrstvy ložiskových pánví byl místo reálného útlumu  $\alpha_s$  (který se u pórovitých materiálů pohybuje okolo 1000  $\left(\frac{dB}{m}\right)$ ) zjištěn útlum fiktivní  $\alpha_f$ , protože z ultrazvukového obrazu se nedalo spolehlivě odečíst druhé koncové echo a pracovalo se tedy pouze s prvním koncových echem dle vztahu (7):

$$\alpha_f = \frac{1KE}{2 \cdot L_{U\_bronzu}} \quad (8)$$

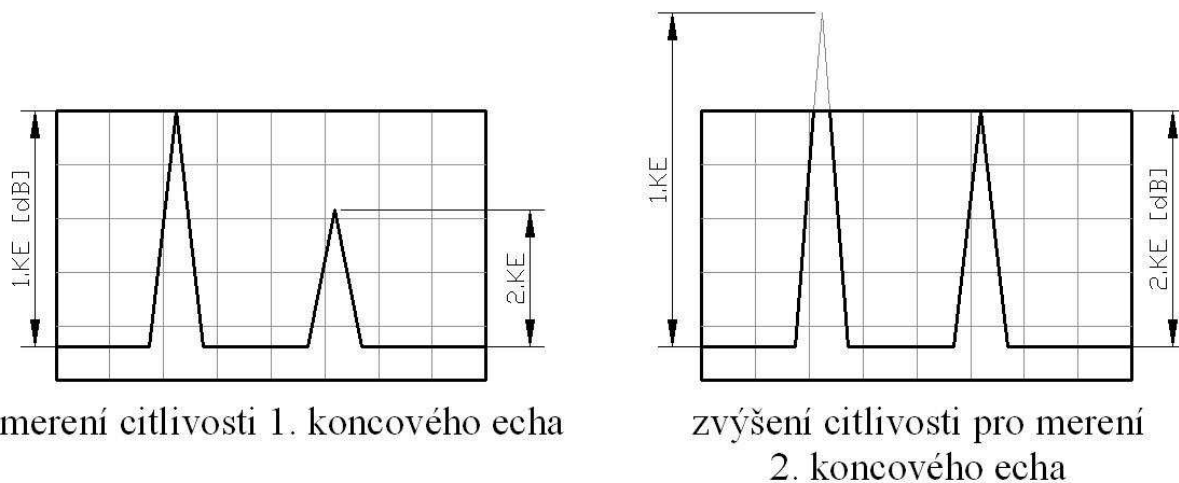
Takto vypočtené hodnoty útlumů umožňují porovnat jednotlivé vzorky mezi sebou.

U bronzové vrstvy ložiskových pánví byly změřeny citlivosti ultrazvuku dle tab. 3

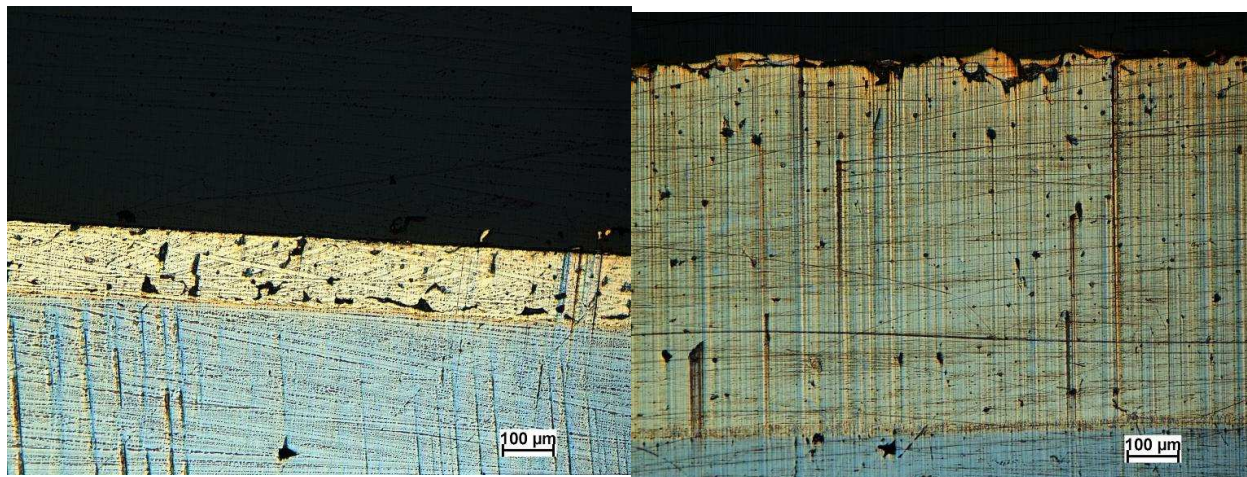
**Tab. 3:** Změřené parametry útlumu porézní bronzové vrstvy při 10MHz

Vzorek	1	2	3	4	5
citlivost 1KE [dB]	45	39	37	45	48
fiktivní útlum $\alpha_f$ [ $\frac{dB}{m}$ ]	483,2	1279,5	229,5	281,5	300,8

Z naměřených hodnot citlivostí prvního koncového echa byly dle vztahu (8) stanoveny fiktivní útlumy bronzových vrstev (viz tab. 3):



**Obr. 3:** Určení citlivostí prvního a druhého koncového echa



**Obr. 4:** Neleptaný výbrus 2. a 4. vzorkem - pánví.

### Pórovitost metalograficky

Neobjektivnější metalografickou 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. 4.).

Vyhodnocení pórovitosti vzorků 1- 5 programem NIS- Elements 2.30 je shrnuto v tabulce 4:

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.

**Tab. 4:** Pórovitost vzorků stanovená programem NIS- Elements 2.30

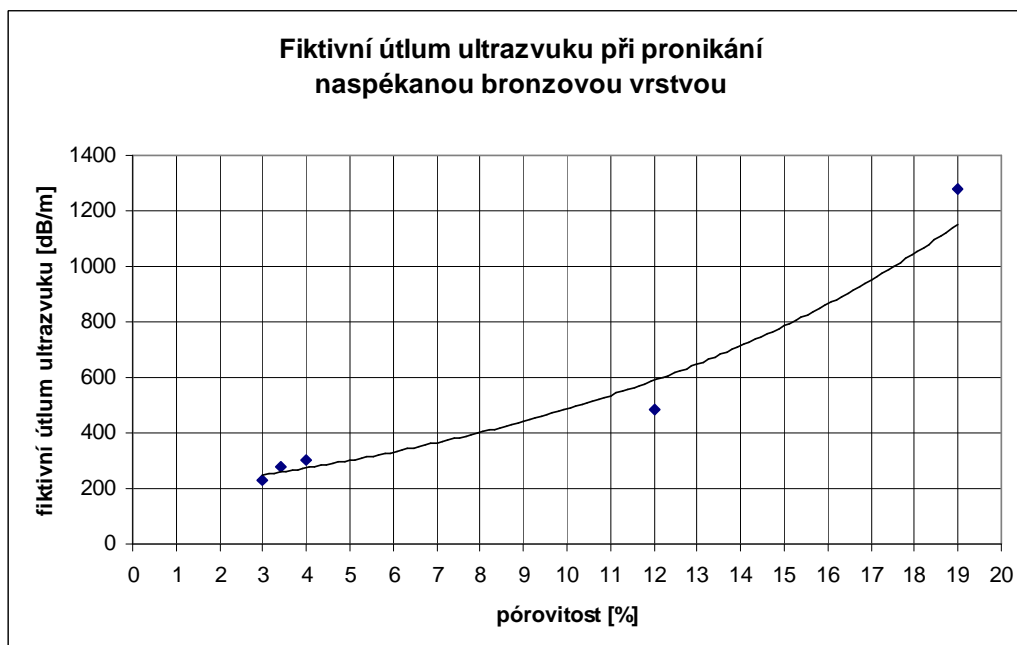
Vzorek	1	2	3	4	5
<b>Pórovitost [%]</b>	12	19	4	3	2,4

### Shrnutí

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. Tato rovnice lze transformovat do tvaru

$$x = \frac{\ln\left(\frac{y}{186,88}\right)}{0,0958} [\%] \quad (9)$$

za proměnnou  $y$  se dosadí hodnota fiktivního útlumu a  $x$  vyjde hledaná procentuální pórovitost. Po dosazení hodnot útlumů ultrazvuku do upravené regresní rovnice byla střední chyba odhadu pórovitosti 1,5%.

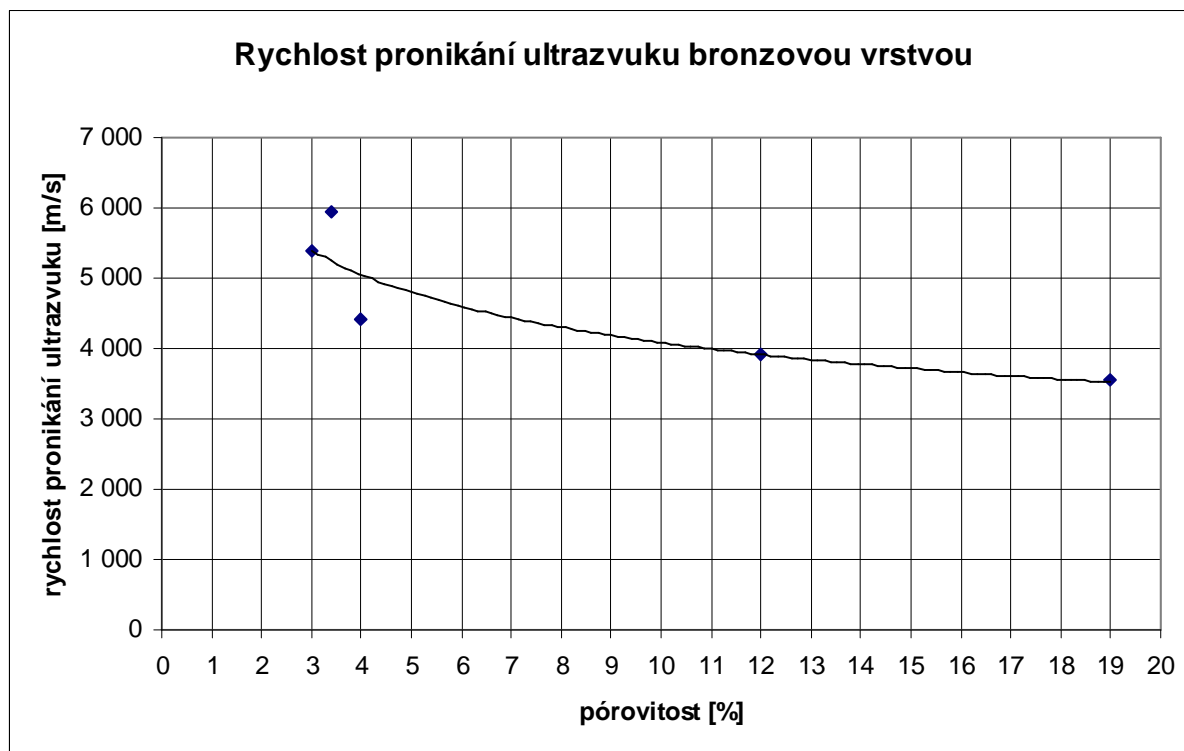


**Obr. 5:** Graf 1.

Graf 2 na obr.6 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. Tuto rovnici lze taktéž transformovat do tvaru:

$$x = -0,2317 \sqrt{\frac{y}{6962,4}} \quad [\%] \quad (10)$$

Vlivem nepřesnosti regresní funkce se hodnoty předpokládané (spočítané) pórovitosti od skutečné liší u tohoto matematického modelu o  $\pm 3 \%$ .



**Obr. 6: Graf 2**

Akustický útlum při 10MHz a rychlost zvuku poměrně spolehlivě koreluje s plošným (tedy i objemovým) podílem pórů (velikých desítky  $\mu\text{m}$ ) Pb bronzu. Vztahy (9, 10) nutno brát jako provizorní. Zvětšením souboru výsledků z vhodných pouzder (obr. 7) a pávních a optimalizací modelu se docílí ještě menší odchylky odhadu pórovitosti.

Měření útlumu bude provozně výkonnější, ale nezbytný ultrazvukový defektoskop je 10x dražší než ultrazvukový tloušťkoměr pro měření rychlosti zvuku.

Popsanou metodiku lze aplikovat i pro jiné soustavy produktů práškové metalurgie a kompozitů, kde póry může nahrazovat disperzní plnivo o výrazně odlišné akustické impedanci jak matrice.

PŘÍSPĚVEK PODPOŘIL VÝZKUMNÝ ZÁMĚR MSM 4674788501.

## LITERATURA

- [1] BENEŠ, L. - KALOČ, R. - MINÁŘ, L.: *Contact deformation - generation and properties of mechanically loaded surfaces*. Journal of Machine Manufacturing, 2009, XLIX, pp.68-75. ISSN 0016-8580.
- [2] Skrbek, B.: Pouzdra ojnic – nespojitá vrstva bronzu, Interní zpráva 77-68-82, 2007, ŠKODA-MOTORY.

- [3] ŠVEC, M.: VÝZKUM PORÓZITY KOVOVÝCH SOUSTAV V PRÁŠKOVÉ METALURGII METODAMI NEDESTRUKTIVNÍHO TESTOVÁNÍ. Bakalářská práce KMT – B – 141, TU v Liberci, 2009.
- [4] OBRAZ, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. 1. vydání. SNTL: Praha 1989. ISBN 80 – 03 – 00097 – 1.
- [5] *Česká státní norma ČSN 42 0891: Část 1- Prášková metalurgia*. 1995.



**Obr. 7:** Příklad provedení ojničního pouzdra