

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2004

FRIDRICH MARTIN



TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU



Obor:

Strojírenská technologie

Zaměření:

Materiálové inženýrství

ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA SPOJE KOVOVÝ INSERT PLAST NA MOTOROVÉM VÍKU

THE ULTRASONIC DIAGNOSIS OF PRESSED IN-BOND OF METAL INSERT AND PLAST ON THE ENGINE COVER

Martin Fridrich

KMT – 171

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146069451

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Blahůšek – ATG Praha

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 83

Počet obrázků 36

Počet tabulek 5

Počet příloh 13

V Liberci, leden 2004



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Martin FRIDRICH

obor

Strojírenská technologie

zaměření

Materiálové inženýrství

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

Ultrazvuková diagnostika spoje kovový insert plast na motorovém víku

Zásady pro vypracování:

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

1. Seznamte se s technologií výroby motorových vík a principy ultrazvukového zkoušení manipulátory.
2. Navrhněte konfiguraci pracoviště s manipulátorem pro diagnostiku spojů.
3. Proveďte ověření diagnostického systému na referenčních a reálných vadách spojů.
4. Vytvořte korelační křivky mezi hodnotami pevnosti a velikostí vad spoje.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 30 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

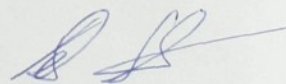
- [1] OBRAZ, J.: Ultrazvukové zkoušení materiálu. SNTL Praha 1989
- [2] NTD Welding BULETIN – výběr příspěvků k danému tématu
- [3] DEFEKTOSKOPIE : sborníky z konferencí, výběr tématických příspěvků

Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

Doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
Ing. Jiří Blahůšek – ATG Praha




doc. RNDr. Petr ŠPATENKA, CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 3. 2003

Platnost zadání magisterské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání magisterské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ KATEDRA MATERIÁLU



ANOTACE

JMÉNO:	Martin Fridrich
OBOR:	Strojírenská technologie
ZAMĚŘENÍ:	Materiálové inženýrství
ZADÁNÍ PRÁCE:	Ultrazvuková diagnostika spoje kovový insert plast na motorovém víku
ČÍSLO PRÁCE:	KMT – 171
VEDOUCÍ PROJEKTU:	Doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
KONZULTANT:	Ing. Jiří Blahůšek – ATG Praha

Tato diplomová práce se zabývá nahrazením neekonomické destruktivní kontroly plastových vík motorů vhodnou nedestruktivní metodou. Konkrétně se jedná o pevnostní kontrolu zalisovaného spoje: mosazná závitová vložka x plast (polyamid PA 66).

Začátek práce se zaměřil na potvrzení vhodných vlastností zvolené UT metody. Následovala série přípravných měření na jejichž základě byl zvolen optimální kontrolní postup. V další části této práce byla provedena konkrétní měření jejichž cílem bylo ověřit navrženou aplikaci nedestruktivní ultrazvukové metody v praxi.

Veškeré výsledky měření a získané poznatky jsou zde podrobně zpracovány, vyhodnoceny a zdokumentovány.

TECHNICAL UNIVERSITY LIBEREC
FAKULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MATERIAL SCIENCE



ANNOTATION

NAME:	Martin Fridrich
SPECIALIZATION:	Engineering technology
FOCUSING:	Material science
THEME OF WORK:	The ultrasonic diagnosis of pressed in-bond of metal insert and plast on the engine cover
NUMBER OF WORK:	KMT – 171
LEADER OF WORK:	Doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.
CONSULTER:	Ing. Jiří Blahůšek – ATG Praha

The purpose of this diploma thesis is defined as a substitution of noeconomical destructive testing of plastic engine cover by an appropriate nondestructive method. Particulary we speak about the control of pressed in-bond strength (brass thread insert x plast).

The first part of this work is specialized in confirmation of proper features of chosen ultrasonic testing. Then there were carried out a few measurings which lead to setting down an optimum control process.

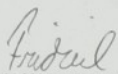
The basic part is focused on patricular measuring which led to verification of using nondestructive ultrasonic testing in praxis.

All test outcomes and results are there recounted and itemized.

Prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, leden 2004



.....

Martin Fridrich

Seznam zkratk a symbolů	9
1. Úvod	10
2. Teoretická část	12
2.1 Nedestruktivní metody zkoušení	12
2.1.1 Úvod do nedestruktivního zkoušení	12
2.1.2 Metody nedestruktivního zkoušení	13
2.2 Ultrazvuková nedestruktivní defektoskopie	16
2.2.1 Základní pojmy	17
2.2.2 Vlny	19
2.2.3 Rychlost šíření ultrazvuku	21
2.2.4 Útlum ultrazvukových vln	22
2.2.5 Odraz a lom ultrazvukových vln	22
2.2.6 Fokuse	25
2.2.7 Zdroje ultrazvuku	27
2.2.8 Akustická vazba	29
2.2.9 Metody ultrazvukové defektoskopie	29
2.3 Radiografická nedestruktivní kontrola	34
2.3.1 Zdroje záření	35
2.3.2 Vzájemné působení ionizujícího záření s hmotou	37
2.3.3 Zobrazování vad při prozařování	39
2.4 Rentgenová počítačová tomografie	39

3.	Experimentální část	42
3.1	Definice problému	42
3.2	Měření	46
3.2.1	Teoretický předpoklad	47
3.2.2	Dílčí pevnostní úkoly	52
3.2.2.1	<i>Prozvučitelnost</i>	56
3.2.2.2	<i>Interference rozhraní</i>	59
3.2.2.3	<i>Výška echa</i>	59
3.2.2.4	<i>Kalibrace</i>	61
3.2.3	Měření I.	65
3.2.4	Měření II.	66
3.2.5	Měření III.	69
3.3.	Vytrhávání	71
4.	Diskuse výsledků	74
5.	Závěr	79
6.	Použitá literatura	82
7.	Přílohová část	83

Seznam zkratek a symbolů

AE	– akustické emise
apod.	– a podobně
atd.	– a tak dále
ATG s.r.o. Praha	– Společnost Advanced technology group s.r.o. Praha
cca	– cirká
č.	– číslo
kap.	– kapitola
max.	– maximum
Ms	– mosaz
např.	– například
ndt	– nedestruktivní defektoskopie
obr.	– obrázek
PA	– polyamid
popř.	– popřípadě
RBCB	– Společnost Robert BOSCH, spol. s.r.o. České Budějovice
resp.	– respektive
RT	– Radiografická nedestruktivní kontrola
RTG	– rentgen
tab.	– tabulka
tj.	– to jest
TUL, TU LB	– Technická univerzita Liberec
tzv.	– tak zvaný
UT	– ultrazvuková technologie, ultrazvuk
UZ	– ultrazvukový svazek paprsků
zk.	– zkouška
ZKH	– Zylinderkopfhaube (víko hlavy válců)

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je přispět k částečné automatizaci kontroly zalisování mosazných závitových vložek do víka hlavy válců, vyráběných společností Robert Bosch, s.r.o v Českých Budějovicích. Hlavním úkolem je navrhnout a ověřit vhodný ukazatel pevnosti spoje kovový insert x plast a zvolit optimální způsob jeho detekce nedestruktivní měřicí metodou.

1. Předmět kontroly

Předmětem kontroly je zalisovaná závitová vložka. Přesněji zápich závitové vložky a míra jeho zaplnění plastem při zalisování.

2. Dosavadní průběh zkoušek

V současné době jsou namátkově vybrané výrobky podrobeny destruktivní zkoušce, při které jsou zalisované inserty zatěžovány kontrolní silou tak dlouho dokud nedojde k jejich vytržení. Mezní síla, kterou by měl kvalitně zalisovaný spoj vydržet je přibližně 8000 N.

Výsledky měření se dále statisticky zpracovávají.

Při takto prováděné kontrole se poškodí nebo úplně zničí velké množství kvalitních výrobků, což při současném objemu výroby společnosti Robert Bosch není z finančního hlediska zanedbatelné.

Proto se objevil požadavek na vytvoření nedestruktivní defektoskopické kontroly výroby, přičemž v budoucnu by měla být prováděna kontrola každého vyrobeného kusu. Spolu s návrhem této kontroly vznikl i požadavek na zdokumentování veškerých prováděných zkoušek.

3. Stanovení úkolů

Pro splnění zadaného úkolu byl zvolen následující postup, na základě kterého by měla být vytvořena požadovaná nedestruktivní kontrola zalisovaného spoje.

• Závislost mezi pevností zalisovaného spoje a zaplněním zápichu

V první řadě bylo třeba prokázat zda existuje závislost mezi zaplněním zápichu vložky a výslednou pevností zalisovaného spoje. Teprve po ověření tohoto předpokladu by bylo možné zvolit hlavním kritériem kontroly - míru zaplnění zápichu závitové vložky.

• Návrh kontroly zalisovaného spoje

Návrh kontroly zalisovaného spoje spočívá ve zvolení vhodné zkušební defektoskopické metody a vytvoření pracovního postupu snadno použitelného v praxi.

• Volba vhodné zkušební metody

Tímto problémem se již zabýval Ing. Jaroslav Kvapil ve své diplomové práci. Z výsledků jeho práce vyplynulo, že nejvhodnější defektoskopickou metodou, kterou lze použít pro kontrolu zalisovaného spoje je odrazová ultrazvuková metoda. Tento závěr bylo třeba ověřit, provést zkušební praktická měření a porovnat je s teoretickými předpoklady.

4. Pracovní postup kontroly

Při prováděných zkouškách nás zajímá jak velké zatížení zalisovaný insert snese. Podrobný kontrolní postup je uveden v praktické části této práce.

Každý insert musí splňovat určité pevnostní podmínky, za žádných okolností nesmí dojít k jeho vytržení z plastu a proto je kontrola vyráběného víka nutná.

Při řešení daného problému je však nutné vzít v úvahu nejen technickou proveditelnost, ale také finanční hledisko. Snahou je vytvořit co možná nejlevnější a nejjednodušší řešení použitelné v běžné praxi.

2. Teoretická část

2.1 Nedestruktivní metody zkoušení

Nedestruktivní zkoušení materiálu hraje významnou roli v systému řízení jakosti výrobního procesu, protože umožňuje včasné zjištění vnitřních vad ve výrobku nebo v polotovaru. Tyto vady by mohly vést k poškození výrobků a tím podstatně ovlivnit životnost, jakož i efektivní využití, vyráběných produktů. Pro detekci a kvantitativní vyhodnocení zjištěných vad se v oboru nedestruktivního zkoušení používá celá řada metod využívajících různé fyzikální principy [3], [11].

2.1.1 Úvod do nedestruktivního zkoušení

Je více než pravděpodobné, že každý výrobek nebo polotovar obsahuje vnitřní vady (nehomogenity) nebo nežádoucí odchylky struktury. Požadavek, aby výrobek neobsahoval vůbec žádné vady, by byl zcela nereálný a proto musí být v příslušných normách nebo předpisech stanoveny hranice pro přípustnost respektive nepřípustnost vad v závislosti na jejich velikosti, typu, četnosti atd. Na základě výsledků nedestruktivních zkoušek je pak výrobek možno zařadit do příslušné třídy jakosti a následně rozhodnout o jeho dalším využití. Což znamená posoudit zda jsou vady takového charakteru, že bude nutné výrobek vyřadit jako nepoužitelný, nebo lze vady odstranit (s přijatelnými náklady), případně bude možné výrobek používat bez ohledu na přítomnost vad. *Identifikací vady* se vždy rozumí prokázání její přítomnosti, dále její kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení a popřípadě i její dokumentování.

Základní výhoda nedestruktivních metod proti metodám destruktivním je v tom, že výrobek po zkoušce zůstává nepoškozen a je možné jeho další použití. Přičemž veškeré metody nedestruktivního zkoušení jsou předepsány v příslušných normách a předpisech [11], [12].

2.1.2 Metody nedestruktivního zkoušení

Základní rozdělení nedestruktivních metod

Nedestruktivní metody zkoušení (ndt) dělíme z hlediska praktické aplikace do dvou základních skupin. V první skupině se nacházejí metody s jejichž pomocí zjišťujeme vady na povrchu nebo v blízkosti povrchu součásti, jedná se o vruby, trhliny, praskliny a podobně. Do druhé skupiny patří metody pro zjišťování vad v celém objemu, to jsou např. vměstky, bubliny, staženiny, atd.

1) Metody pro zjišťování povrchových vad:

- ❖ vizuální
- ❖ magnetické
- ❖ kapilární
- ❖ vířivých proudů

2) Metody pro zjišťování objemových vad (tj. v celém objemu):

- ❖ ultrazvukové
- ❖ radiografické
- ❖ infračervené nedestruktivní defektoskopie (termografické)
- ❖ optická holografie
- ❖ akustická emise

Charakteristika základních ndt metod pro zjišťování povrchových vad

○ Vizuální metoda

Je to základní metoda pro zjišťování povrchových vad a odchylek tvarů. Při vizuální kontrole a hodnocení například u svarů se hodnotí přípustné převýšení svaru, velikost neprůvaru, přesazení, atd. Obdobně se hodnotí povrchové vady i jiných typů polotovarů nebo výrobků. Kontrola může být prováděna buďto jen pouhým okem, nebo se k tomuto účelu využívají různé typy měřicích mechanických, optických pomůcek a podobně.

○ Magnetická metoda

Magnetická metoda využívá pro detekci povrchových vad a jejich zviditelnění změnu magnetického pole v místě trhliny nebo jiné povrchové nehomogenity. Může tedy být použita pouze na feromagnetických materiálech.

Odezva feromagnetických látek na vnější magnetické pole je silně ovlivněna materiálovou strukturou měřeného vzorku. Na tomto faktu jsou založeny v podstatě všechny magnetické způsoby detekce materiálových defektů nebo změn [4].

○ Kapilární metoda

Tato metoda může být použita i na jiných typech materiálů s výjimkou vysoce porézních. Pro detekci se využívá barevná detekční kapalina a kapilární účinky povrchových trhlin.

○ Metoda vířivých proudů

Metoda vířivých proudů vyžaduje elektricky vodivý materiál. Velmi dobře se proto uplatňuje např. při detekci povrchových trhlin v součástech z hliníkových slitin. Touto metodou je možné identifikovat jak přesné umístění vady, tak určit s jistou přesností druh vady a zároveň i její velikost (hloubku) [4], [11].

Charakteristika základních ndt metod pro zjišťování objemových vad

○ Ultrazvuková metoda

Tato metoda využívá pro detekci odrazu ultrazvukových vln, a to od vad nebo materiálových nehomogenit. Výhodou této metody je možnost jejího použití pro kontrolu kovových i nekovových materiálů a dále pak zkoušení polotovarů velkých tloušťek (u výkovků velkých až několik metrů).

○ Radiografická metoda

Radiografická metoda umožňuje zobrazit vnitřní nehomogeneity resp. vady na rentgenový film, kde se projevují vlivem snížení absorpce jako tmavší útvary. Zdrojem záření bývají rentgenové přístroje nebo některé typy izotopů. Rozsah tloušťek, které je možno touto metodou zkoušet, je však omezen [12].

○ Metoda infračervené nedestruktivní defektoskopie

Tato metoda používá zářivou energii různé spektrální oblasti kde dochází k vzájemné výrazné interakci s různými látkami. Infračervené metody zkoušení materiálů pomocí tohoto záření se bez problémů uplatňují v technické praxi.

○ Metoda optické holografie

Jedná se o optickou kontrolu, při které je holografické zkoušení založeno na využití laseru s vysokým stupněm koherence. Tato metoda má velmi širokou oblast použití. Nejvíce se holografie využívá k registraci různého kmitavého pohybu, ale velmi úspěšně se také uplatňuje při zjišťování vnitřních vad v materiálu [3].

○ Metoda akustické emise

Metoda akustické emise lokalizuje aktivní poruchy v měřeném materiálu, jako např. únavu, vznik a šíření trhlin, korozi apod. Tyto vady uvnitř materiálu vznikají v důsledku koncentrace lokálního napětí, přičemž signál akustické emise je silně nestacionární. K analýze těchto signálů se využívají různé matematické postupy jejichž cílem je klasifikace a identifikace zdrojů AE [4].

2.2 Ultrazvuková nedestruktivní defektoskopie

Mechanické vlnění „látkového“ prostředí, které vnímáme, nazýváme zvuk. Zdroji zvuku jsou tělesa ve kterých vzniká chvění, přičemž běžně vnímáme zvuk, který má frekvenci v intervalu od 16 Hz do 20 KHz. Pokud je frekvence menší než 16 Hz jedná se o infrazvuk, zvuk s frekvencí vyšší než 20 KHz potom nazýváme ultrazvuk. Pro nedestruktivní zkoušení se využívají frekvence až do 30 MHz v laboratorních podmínkách a přibližně do 15 MHz v praxi.

Ultrazvuk našel významné uplatnění v technické praxi. Podle jeho účinků rozlišujeme ultrazvuk aktivní a pasivní. Aktivní ultrazvuk pracuje s velkými intenzitami pro dosažení fyzikálních nebo chemických účinků, může obrábět a čistit součásti, lze použít při svařování, výrobě emulzí a uplatní se i v metalurgii pro zjemňování struktury zrna.

Pasivní ultrazvuk se svými malými intenzitami je vhodný pro měřicí a diagnostické účely, stal se důležitým prostředkem v měřicí technice. Využívá se například při vyhledávání skrytých vad materiálu – v defektoskopii.

Zkoušení materiálu patří tedy do ultrazvukové měřicí techniky, která pracuje s pasivním ultrazvukem. Ten nemá, díky svým poměrně nízkým intenzitám, prakticky žádné fyzikální ani chemické účinky. Impulsové výkony po dobu trvání krátkých impulsů mohou však být značné. Kromě impulsového vysílání ultrazvukových kmitů, které je v současné době při zkoušení materiálu nejběžnější, je možné vysílat i spojitě, tj. nepřetržitě [1], [2].

Ultrazvuk má tři základní informační parametry, pomocí nichž je schopen podat informaci o přítomnosti defektu, stavu vnitřní struktury materiálu, úrovni pnutí atd. Jsou to:

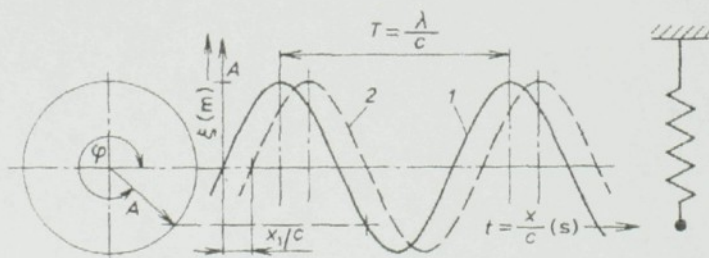
- a) rychlost šíření ultrazvukových vln
- b) útlum ultrazvukových vln
- c) frekvenční spektrum ultrazvukových vln.

2.2.1 Základní pojmy

Mezi nejdůležitější pojmy objasňující problematiku a samotnou funkci ultrazvuku patří:

• Harmonické kmitání

Každý periodický pohyb lze rozložit na harmonické složky, z nichž každá má sinusový průběh na své frekvenci. Takové kmitání lze znázornit pohybem malé hmoty připevněné na pružinu. Nebude-li se uvažovat tlumení, bude hmota po uvolnění natažené pružiny kmitat harmonickým pohybem (obr. 1).



Obr. 1. Harmonické kmitání částice. Závislost okamžité výchylky ξ na čase t nebo poloze částice x při rychlosti šíření ultrazvuku c [1].

Harmonické kmitání hmotných částic při malých amplitudách lze popsat rovnicí:

$$\xi = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (2.1)$$

A - amplituda výchylky

c - rychlost šíření vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

x - souřadnice polohy částice

f - frekvence kmitání [Hz]

ω - úhlová rychlost

ξ - okamžitá výchylka

φ - fázový úhel, $\varphi = \omega x / c$

t - čas [s]

Částice kmitá kolem rovnovážné polohy úhlovou rychlostí ω , kde $\omega = 2\pi f$. (2.2)

Při harmonickém kmitání se okamžitá výchylka ξ opakuje po čase $T = 1/f$ (2.3)

nazývaném perioda kmitů. Vzdálenost dvou míst, v nichž částice kmitají v téže

fázi vyjadřuje délku vlny a je dána vztahem $\lambda = cT = c/f$ [m]. (2.4)

• Akustický tlak

Tlak který vzniká při šíření ultrazvukové vlny nazýváme akustický tlak. Jeho hodnota je úměrná akustické rychlosti v , s konstantou úměrnosti z , což je tzv. akustická rezistivita (měrná akustická impedance).

$$p = z \cdot v \quad (2.5)$$

p - akustický tlak,

$$p = P \sin \omega t \quad (2.6)$$

v - akustická rychlost,

$$v = V \sin \omega t \quad (2.7)$$

z - měrná akustická impedance

q_c - vlnový odpor, (q - hustota, c - rychlost šíření)

Prochází-li rovinná vlna (s akustickou rychlostí $v = \frac{d\xi}{dt}$) prostředím s vlnovým

odporem q_c , vznikne v něm akustický tlak.

Intenzity ultrazvuku, s nimiž se lze setkat při zkoušení materiálu, jsou velice nízké, nejvýše do $10^{-3} \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Z hlediska zkoušení materiálu je akustický tlak nejdůležitějším parametrem ultrazvukového pole, protože je mu přímo úměrné elektrické napětí, které se zpracovává pro vyhodnocení přijímaných ultrazvukových kmitů [1].

• *Ultrazvukové impulsy*

Ultrazvukové vlny mohou být do prostředí vysílány spojitě, nebo ve tvaru impulsů. V měřicí technice se převážně používají ultrazvukové impulsy, které dávají informace o amplitudě i o době průchodu ultrazvukové vlny prostředím.

Ultrazvukový impuls se zobrazí jako vysokofrekvenční napěťový impuls. Spojením všech vrcholů kmitů impulsu, dostaneme tzv. obálku. Podle ní se rozlišují tvary impulsů. Obdélníkový impuls se liší trváním přechodného jevu - časový interval, po jeho skončení dochází k ustálenému kmitání, kdy amplituda kmitů je konstantní. V ultrazvukové měřicí technice se však lze setkat i s impulsy, v nichž nedochází k vytvoření ustáleného kmitání. Obsahují jen několik málo kmitů, někdy pouze jeden nebo dva [2].

2.2.2 Vlny

• *Druhy vln*

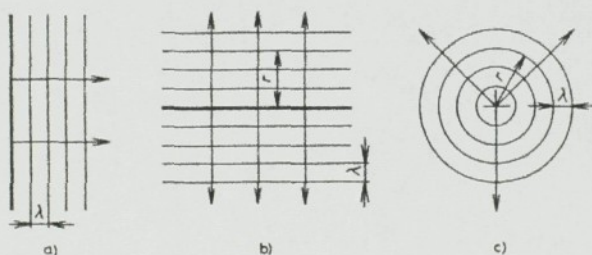
Při šíření ultrazvukové vlny prostředím se jeho částice rozkmitávají v různém směru vzhledem ke směru postupu vlny. Podle toho rozlišujeme druhy ultrazvukových vln:

- podélné vlny (L – longitudinální)
- příčné vlny (T – transverzální)
- povrchové vlny (R – Rayleighovy)
- deskové vlny (D – Lambovy) - ohybové (asymetrické)
- dilatační (symetrické)
- Loveovy vlny – zvláštní případ deskových vln

V plynných látkách a kapalinách se šíří pouze vlnění podélné, zatímco v pevných látkách se šíří všechny druhy uvedených vlnění, a to v závislosti na různých kritériích [1].

• Tvary vln

Všechny sousední částice kmitající v téže fázi tvoří vlnoplochu. Podle jejího tvaru označujeme typy vln (obr.2). Tvoří-li vlnoplocha rovinu kolmou na směr šíření, jde o vlnu rovinnou (obr.2a). Amplituda výchylky kmitajících částí nezávisí v bezdrátovém prostředí na poloze, tj. na vzdálenosti od zdroje. Rovinnou vlnu lze popsat vztahem (2.1). Jejím zdrojem je harmonicky kmitající nekonečná rovina.



Obr. 2. Tvary ultrazvukových vln. a) rovinná, b) válcová, c) kulová [2]

Kmitá-li nekonečně dlouhý válec se zanedbatelně malým průměrem, vytvoří se kolem něho válcové vlny (obr.2b). Při kmitání bodového zdroje vzniká kolem něho všesměrová kulová vlna (obr.2c).

2.2.3 Rychlost šíření ultrazvuku

Závisí na elastických vlastnostech prostředí, na druhu vlnění a rozměrových poměrech prostředí vzhledem k vlnové délce.

• *Tuhá látka*

Tuhé látky se vyznačují mnohem vyššími meziatomárními vazebními silami, a proto snášejí i smykové namáhání. V důsledku toho jsou tyto látky jediné, které mohou přenášet všechny druhy ultrazvukových vln. Některé tuhé látky jsou anizotropické, což způsobuje, že rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na orientaci. Izotropické látky mohou být buď amorfní, kde je struktura mřížky podobná kapalině, nebo polykrystalické, u nichž je velký počet krystalických zrn orientován náhodně. Rychlost šíření v tuhých izotropických látkách se proto nemění se směrem [2].

Rychlost šíření ultrazvukových vln v tuhých látkách tedy závisí na modulu pružnosti v tahu E , případně ve smyku G , dále pak na hustotě ρ a Poissonově čísle μ , které je pro všechna tuhá prostředí 0 až 0,5.

• *Kapalina*

Rychlost šíření v čistých kapalinách závisí na tlaku (i když jen nepatrně) a hustotě prostředí. Až na malé výjimky při velké viskozitě nekladou kapaliny žádný odpor smykovému namáhání, a proto se v nich šíří pouze podélné vlny.

Dále je třeba poznamenat, že rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách se také mění s teplotou. U roztoků pak hraje důležitou roli koncentrace jednotlivých složek [2].

2.2.4 Útlum ultrazvukových vln

Jestliže prochází ultrazvuková rovinná vlna prostředím, klesá její energie, a tím i její akustický tlak v závislosti na vlastnostech prostředí.

Příčinou tohoto útlumu je :

a) pohlcování ultrazvukových vln - **útlum pohlcováním** je při průchodu vln prostředím způsoben vnitřním třením kmitajících částic, při kterém se mechanická energie mění v tepelnou. Tento druh útlumu nastává v prostředí všech skupenství a bývá také často nazýván pravou absorpcí.

b) odraz, lom, ohyb a rozptyl - tento druh útlumu se nazývá **útlum rozptylem** a vyskytuje se zejména v nehomogenních a polykrystalických prostředích s nepříliš ideálními elastickými vlastnostmi. Jeho příčinou je dopad ultrazvukových vln na jednotlivá rozhraní v nehomogenní látce.

$$\alpha \dots \text{činitel útlumu prostředí [dB m}^{-1}\text{]} \qquad \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \qquad (2.8)$$

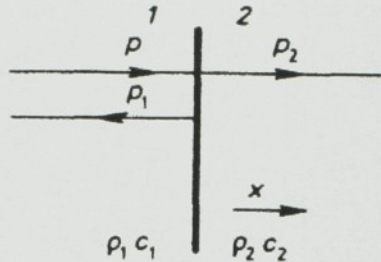
α_1 ... útlum pohlcováním

α_2 ... útlum rozptylem

2.2.5 Odraz a lom ultrazvukových vln

• *Kolmý dopad na rozhraní*

Šíření ultrazvukových vln ovlivňuje každé rozhraní, na němž vždy dochází k odrazu a při šikmém dopadu i k lomu vln. Dopadne-li ultrazvuková vlna s akustickým tlakem p kolmo na rozhraní dvou prostředí 1 a 2 s vlnovými odpory $q_1 c_1$ a $q_2 c_2$, odráží se část s akustickým tlakem p_1 zpět do prostředí 1 a část s akustickým tlakem p_2 prochází do prostředí 2 (obr. 3).



Obr. 3. Kolmý dopad ultrazvukové rovinné vlny na rozhraní prostředí 1 a 2 [2]

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{1 - m}{1 + m} \quad (2.9)$$

$$D = \frac{2}{1 + m} \Rightarrow D = 1 + R \quad (2.10)$$

$$m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \quad (2.11)$$

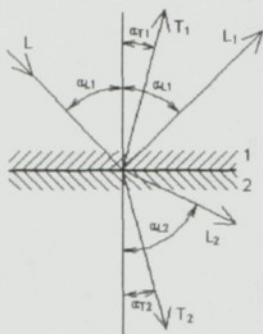
R - součinitel daný poměrem odraženého a dopadajícího akustického tlaku

D - součinitel průchodu, je dán poměrem akustického tlaku nebo rychlostí vlny procházející a dopadající

m - poměr akustického odporu prostředí 1 a 2

• Šikmý dopad na rozhraní

Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k jejímu odrazu, lomu a popřípadě i k transformaci, když jedno z prostředí je schopné přenášet příčné vlny. Dopadne-li podélná ultrazvuková vlna (obr. 4) na rozhraní dvou tuhých prostředí 1 a 2, v každém z nich mohou obecně vzniknout dvě složky, z nichž jedna je podélná a druhá příčná, která je polarizovaná v rovině procházející složkou podélnou, tj. v rovině dopadu.



Obr. 4. Lom ultrazvukové podélné vlny při šikmém dopadu na rozhraní prostředí 1 a 2

Vzájemný vztah úhlů všech složek měřených od normály k rozhraní a jejich rychlostí šíření je dán Snellovým zákonem.

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}} \quad c_{L1} / c_{L2} = n \quad (2.12)$$

c_{L1} , c_{T1} - rychlosti šíření podélné a příčné vlny v prostředí 1

c_{L2} , c_{T2} - rychlosti šíření podélné a příčné vlny v prostředí 2

n - index lomu

Ze vztahu je vidět, že může docházet k transformaci vlny jednoho druhu na jiný, pokud jde o tuhé prostředí.

Dopadá-li podélné vlnění z kapalného prostředí do tuhého, vzniká v pevném prostředí vlnění příčné. Na rozdíl od pevného prostředí v prostředí kapalném příčné vlnění nevzniká.

Pokud podélné vlnění šířící se kapalinou dopadá na rozhraní pevná látka – kapalina, dochází k odrazu pod úhlem α a část vlnění se láme do prostředí pevného pod úhlem β . Zde ovšem kromě vlnění podélného vzniká i vlnění příčné, které se láme pod menším úhlem β_T .

• Průchod ech

V ultrazvukové impulsové technice má značný význam činitel průchodu ech, který udává část akustického tlaku, která se vrátila po průchodu rozhraním z prostředí 2 zpět do prostředí 1.

2.2.6 Fokussace

Jestliže dopadne rovinná vlnoplocha na zakřivený povrch mezi prostředím 1 a 2, dojde k lomu v závislosti na úhlu dopadu, který svírá kolmice na vlnoplochu a paprsek s normálou k povrchu v místě dopadu.

Tab.1. Druhy fokusujících čoček.

Tvar rozhraní	Index lomu	Druh čočky	Obr. 6
konvexní	$c_2/c_1 > 1$	rozptylka	a
	$c_2/c_1 < 1$	spojka	b
konkávní	$c_2/c_1 > 1$	spojka	c
	$c_2/c_1 < 1$	rozptylka	d

Při dopadu na kulově zakřivené rozhraní dvou prostředí s rychlostí šíření c_1 a c_2 se všechny paprsky lámou do jednoho bodu, tzv. optického ohniska, jehož vzdálenost od rozhraní se nazývá ohniskovou vzdáleností f_0 . U válcově zakřivené plochy se vytvoří ohnisková přímka. Paprsek jdoucí středem křivosti (obr. 6) prochází z prostředí 1 do prostředí 2 s činitelem průchodu D (viz vztahy 2.9-2.11).

Jsou známy čtyři možné případy, které nastávají při dopadu rovinné vlny (tab. 1, obr. 5). Fokusovaná vlna je kulová při kulovém tvaru čočky a válcová při čočce válcové.

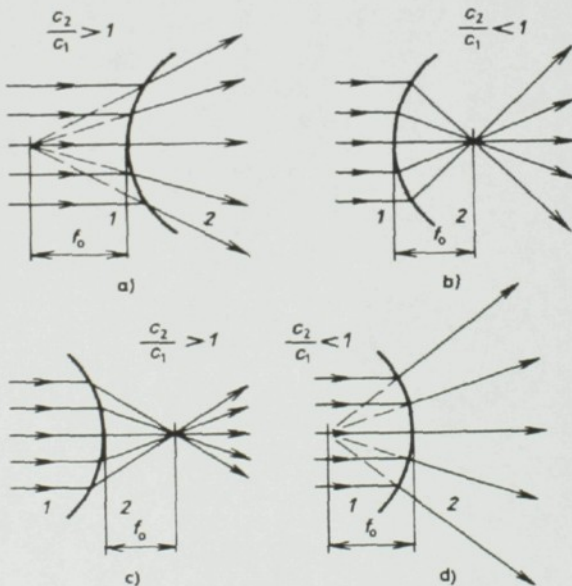
Ohnisková vzdálenost je dána výrazem :

$$f_o = \frac{r}{1 - \frac{c_2}{c_1}} \quad (2.13)$$

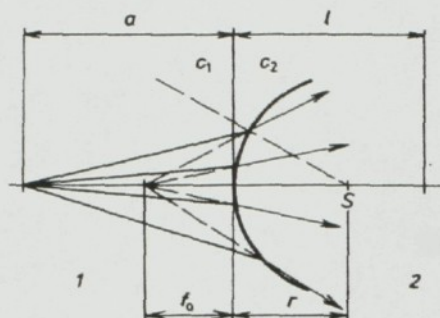
r - poloměr zakřivení

c_1, c_2 - rychlosti šíření ultrazvuku v materiálu

Tento výraz je kladný pouze v případě, kdy ohnisko je na téže straně jako střed křivosti, což platí i pro úzký svazek kulové vlny. Při svazku s větším úhlem otevření se jednotlivé paprsky neprotínají v ohnisku, nýbrž ve vzdálenosti poměrně kratší, v tzv. akustickém ohnisku F_{ak} [1], [5].



Obr. 5. Dopad rovinné vlny na zakřivenou plochu při daném indexu lomu
 a),b) konvexní, c),d) konkávní [1]



Obr. 6. Lom paprsků na rozhraní ($c_2 > c_1$)
rovinné (1) a kulové (2) vlny při
zakřivení

2.2.7 Zdroje ultrazvuku

Zdroje ultrazvuku jsou zařízení, ve kterých dochází k přeměně energie (např. kinetické, elektrické) na energii ultrazvukovou. Při nedestruktivním zkoušení materiálů se převážně používá zdroj piezoelektrický.

• Piezoelektrické měniče

Při mechanické deformaci některých krystalů vzniká na jejich povrchu elektrický náboj, jehož velikost je přímo úměrná deformaci. Tento jev se nazývá piezoelektrický. Vzniká-li elektrický náboj deformací krystalu, jedná se o přímý piezoelektrický jev. Opakem tohoto jevu je nepřímý piezoelektrický jev, kdy v elektrickém poli dochází k mechanické deformaci krystalu. Piezoelektrický jev je vázán na určitý typ krystalové stavby a krystalografickou orientaci (krystaly jsou anizotropní). Piezoelektrické vlastnosti se projevují u řady látek, avšak praktický význam mají jen některé, např. křemen, turmalín, Seignettova sůl apod. [2].

Z elektroakustického měniče, vysílajícího ultrazvukové kmity, se šíří svazek vln, který má zpočátku tvar válce (blízké pole), jehož základnu tvoří vyzářovací plocha měniče. V určité vzdálenosti od měniče se však začíná svazek vln kuželovitě zvětšovat (vzdálené pole).

Pro zkoušení materiálu ultrazvukem se převážně využívají sondy s piezokeramickými měniči, které vysílají a přijímají ultrazvukové impulsy.

Pro příjem signálů akustické emise se používá název snímač, protože vždy pracuje jako přijímač. Sondy pro zkoušení materiálu pracují jako vysílač nebo jako přijímač, případně plní obě činnosti současně.

Sondy je možno rozdělit na:

1) přímé:

- a) *jednoduché* - jsou osazeny jedním piezoelektrickým měničem, který vysílá i přijímá a to podélné popř. i příčné vlny; piezoelektrický měnič je v těsné blízkosti prostředí, od něhož ho odděluje pouze tenká ochranná vrstva
- b) *sondy s předsádkou* - elektroakustický měnič je oddělen vrstvou, jejíž tloušťka je konstantní a mnohokrát větší než délka vlny
- c) *dvojité* - jsou vhodné pro zjišťování vad v malých hloubkách a pro měření malých tloušťek, v nichž jeden měnič slouží k vysílání a druhý k příjmu; měniče jsou obvykle přilepeny na předsádky z plastu, které zpožďují průchod impulsu mezi měničem a povrchem zkoušeného materiálu
- d) *pro příčné vlny* - jedná se o sondy osazené příčně polarizovaným (piezokeramickým) měničem, určené k vysílání a příjmu příčných vln
- e) *nízkofrekvenční* - pro frekvence nižší než 0,1 MHz

2) **fokusující:** účelem je soustředit ultrazvukovou energii do menšího prostoru, aby se zvýšila citlivost, rozlišovací schopnost, přesnost stanovení polohy vad a zlepšil se poměr: signál – šum; nejjednodušším a nejběžnějším prostředkem fokusace jsou čočky, na nichž se ultrazvuk soustředí v důsledku lomu do ohniska (viz 2.2.6) [6].

3) **úhlové:** vysílají a přijímají ultrazvukové vlny pod určitým úhlem k povrchu prostředí a jsou založeny na lomu ultrazvukových vln.

2.2.8 Akustická vazba

Předpokladem zkoušení ultrazvukem je vzájemné akustické navázání sondy a zkoušeného materiálu. Mezera pod sondou s piezoelektrickým měničem se vyplňuje vazebním prostředím buď kapalným nebo tuhým. Přenosové vlastnosti sondy, tj. její citlivost i frekvenční pásmo, silně závisí na poměru tloušťky d_v vazební vrstvy a délky vlny λ_v . Podle relativní tloušťky vazební vrstvy dané poměrem d_v / λ_v se rozlišují tři druhy akustické vazby.

- ❖ kontaktní - $d_v / \lambda_v < 1$, sonda je v těsném kontaktu s povrchem materiálu, přičemž pouze nerovnosti povrchu jsou vyplněny vazebním prostředím; v praxi se akustická vazba považuje za kontaktní do relativní tloušťky $d_v / \lambda_v < 0,1$
- ❖ mezerová - mezi sondou a povrchem materiálu je mezera, jejíž tloušťka je srovnatelná s délkou vlny $d_v / \lambda_v \approx 1$
- ❖ s předsádkou (imerzní) - mezi sondou a zkoušeným materiálem je tlustá vrstva vazebního prostředí, pro níž musí platit $d_v > \lambda_v$; tato vazba je vhodná pro zkoušení materiálu s hrubým nebo tvarovaným povrchem, protože malé změny vazební vrstvy se mohou zanedbat vzhledem k její tloušťce [1].

V každém případě vazební prostředí musí být takové, aby neobsahovalo nehomogenity. Nevhodné vazební prostředí zkresluje tvar přenášených impulsů a tím kromě omezené citlivosti měřicího systému se současně snižuje i jeho rozlišovací schopnost.

2.2.9 Metody ultrazvukové defektoskopie

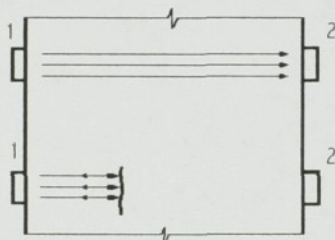
Základní defektoskopické ultrazvukové metody:

- metoda průchodová
- metoda odrazová
- speciální metody
 - ultrazvuková spektrometrie
 - ultrazvuková holografie
 - akustická emise
 - impedanční metoda

• Metoda průchodová

Průchodová metoda zkoušení je nejjednodušší metodou zkoušení materiálu ultrazvukem. Necelistvost v materiálu je překážkou, za níž se vytvoří ultrazvukový stín, tj. akustický tlak procházející ultrazvukové vlny se sníží. Na dvou protilehlých stranách vyšetřovaného materiálu se souose umístí vysílací a přijímací sonda (obr. 7). Pokud mezi vysílačem (1) a přijímačem (2) není žádná necelistvost, prochází do přijímače určitý akustický tlak. Při přítomnosti necelistvosti přijímaný akustický tlak poklesne. Proto průchodová metoda je porovnávací způsob měření v místech bez a s necelistvosti.

Nevýhodou této metody je nemožnost odlišit, zda je pokles akustického tlaku způsoben špatným akustickým navázáním, přítomností necelistvosti nebo změnou struktury materiálu. Další nevýhodou je nutnost použít dvě oddělené ultrazvukové sondy.



Obr. 7. Průchodová metoda
zkoušení

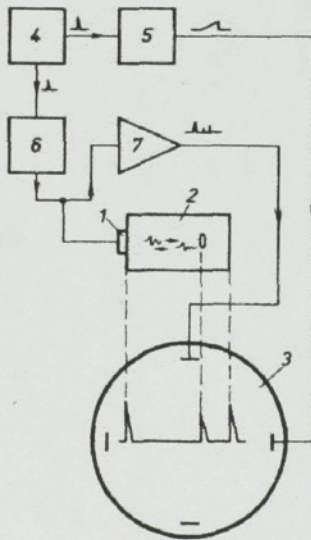
Výhodou je, že se u průchodové metody neobjevuje mrtvé pásmo sondy, které někdy může omezit použití metody odrazové.

Průchodovou metodou se ve velké většině kontrolují tenké předměty s rovnoběžnými povrchy. V současnosti se převážně používá při 100%-ní kontrole tenkých plechů s před-vstřikovací akustickou vazbou.

• Metoda odrazová

Tato metoda se dále dělí na metodu - impulsovou a rezonanční.

Impulsová odrazová metoda je nejrozšířenější metodou při nedestruktivním zkoušení materiálu ultrazvukem. Je všestranně použitelná a poskytuje nejvíce informací o vyšetřovaném předmětu, a to jak o jeho necelistvostech, tak i o struktuře materiálu, rozměrech apod. Způsob a zařízení pro odrazové impulsové zkoušení materiálu jsou uvedeny na obr. 8.



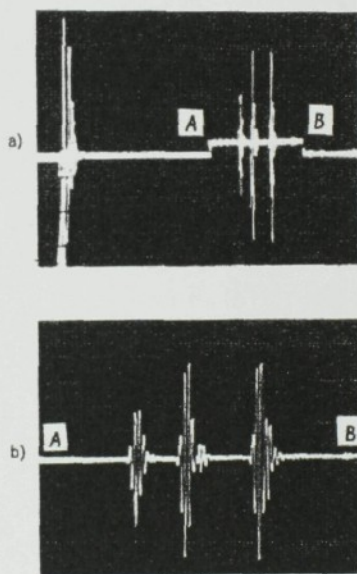
Obr. 8. Zařízení pro impulsové zkoušení materiálů [1]

Generátor (6) vybudí ultrazvukovou sondu (1), která vysílá a přijímá ultrazvukové impulsy a je akusticky navázána na zkoušené prostředí. Impulsy se odrážejí od necelistvostí a od povrchu materiálu a vracejí se zpět do sondy. Generátor je periodicky spouštěn synchronizátorem (4) současně se zdrojem časové základny (5), která se přivádí na horizontální vychylovací destičky obrazovky (3). Na její vertikální vychylovací systém je připojen výstup zesilovače (7). Tento způsob zobrazení se nazývá zobrazení A [1].

Impulsová odrazová metoda dává informaci o velikosti odrazové plochy, a to podle výšky odraženého impulsu. Kromě toho podle doby průchodu echa lze stanovit hloubku odrazové plochy nebo rychlost šíření ultrazvukových vln a podle tvaru přijímaného echa lze usuzovat na charakter odrazové plochy [2].

Zobrazení A

V tomto zobrazení je pouze jedna souřadnice délková, na vodorovné ose se obvykle odčítá doba průchodu impulsu a na svislé ose je vidět výška přijímaného signálu. Na horizontální vychylovací systém se přivádí pilový kmit, jehož trvání a poloha se nastaví tak, aby se zobrazily žádané impulsy. V některých případech je lepší roztáhnout určitou část *AB* časové základny na celou šířku stínítka obrazovky (obr. 9). Tento způsob zobrazení A se nazývá hloubková lupa a docílí se zpožděným vybavením pilového kmitu časové základny o dvojnásobnou dobu.

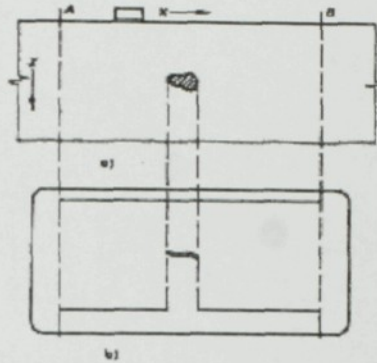


Obr.9. Vysokofrekvenční zobrazení průchodu impulsu ze sondy do místa *A*.

Celkové trvání pilového kmitu lupy odpovídá rozdílu vzdáleností míst *A* a *B*. Rozsvěcovací impuls má vždy tutéž délku jako příslušný pilový kmit.

Zobrazení B

Při tomto zobrazení jsou obě souřadnice délkové, přičemž první z nich (z), obvykle vertikální, udává hloubku vady a druhá její projekci na povrch předmětu (souřadnice x nebo y). Ultrazvuková sonda se pohybuje po povrchu předmětu z místa A do B např. ve směru osy x (obr. 10) [1].

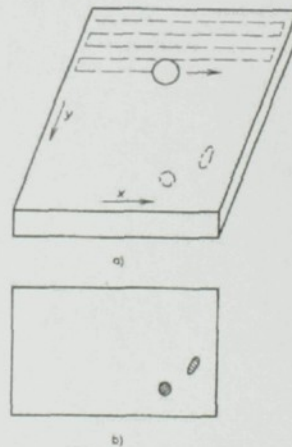


Obr. 10. Zobrazení B

- a) pohyb ultrazvuk. sondy
- b) zobrazení na stínítku

Zobrazení C

V zobrazení C se zaznamenávají vady v plošné projekci na povrch předmětu v souřadnicích x , y , v nichž se pohybuje i ultrazvuková sonda. Zaznamená se plošné rozložení vad (obr. 11) a to na stínítku nebo častěji na souřadnicovém zapisovači analogovém nebo číslicovém [1].



Obr. 11. Zobrazení C

- a) pohyb ultrazvuk. sondy
- b) plošné zobrazení vad

• **Metoda rezonanční**

Rezonanční metoda je metoda při které se do zkoušeného materiálu vysílají ultrazvukové vlny, jejichž frekvence se mění. Když se tloušťka předmětu rovná celistvému násobku poloviční délky vlny vysílaného ultrazvuku, vznikne ve zkoušené součásti stojaté vlnění. Při stojaté vlně dodává vysílač minimální energii do kontrolovaného předmětu, který se při stojaté vlně dostane do vlastní rezonance buď na základní, nebo některé vyšší harmonické frekvenci [3].

Stojatých vln lze využít k měření tloušťky prostředí. Dále lze tuto metodu také využít pro zjišťování dvojitosti materiálu. Rezonance se nastaví na místě bez necelistvosti. Poruší-li se podmínky rezonance, lze usuzovat na přítomnost necelistvosti [1].

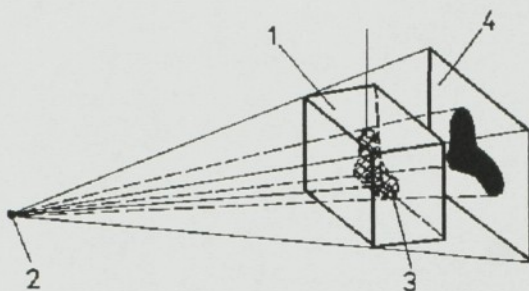
V současné době se však rezonanční metoda používá už jen zřídka, protože byla nahrazena metodou impulsovou.

2.3 Radiografická nedestruktivní kontrola

Jedná se o zkoušení materiálu prozařováním, tato metoda nabývá v současné době v technické praxi stále větší důležitost. Radiografické zkoušky využívají k testování materiálu lokální změny intenzity pronikavého záření, prošlého zkoušeným předmětem. Změna intenzity záření se pak registruje a výsledek se vyhodnocuje buď graficky nebo vizuálně [7].

Za prozařováním předmětem (obr. 12) vzniká při výskytu vady plošný intenzitní reliéf záření, jehož průběh může být výsledně detekován buď :

- radiometricky - postupné místní vyhodnocení intenzity záření
- radioskopicky - sumární zápis požadované plošné informace formou černobílého obrazu (nejčastější použití)



Obr. 12. Princip radiografie [4]

Radioskopická kontrola ve své podstatě využívá zobrazovací techniku založenou na zásadách centrální, kolmé nebo šikmé projekce kontrolované oblasti do roviny vhodně polohovaného detektoru záření. Zviditelněnou výslednou obrazovou informací o výskytu a rozložení hledaných útvarů (strukturních vad) potom vyhodnocujeme vizuálně za použití vhodného doplňkového zařízení.

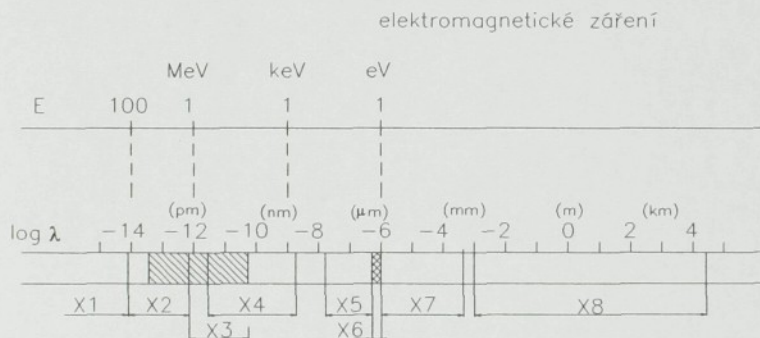
Usměrněný, prostorově homogenní svazek ionizujícího záření vycházejícího ze zdroje záření, prochází zkoušeným objektem, kde dochází k vzájemnému působení záření s materiálem objektu, a tím tedy i k prostorové modulaci svazku v závislosti na vnitřní struktuře objektu, rozměrech a složení objektu, druhu a energii interagujícího záření. Takto modulovaný svazek ionizujícího záření se stává nositelem požadované informace o objektu, kde mírou informace je lokální změna hustoty toku částic ve svazku, resp. změna energie částic. Charakter odezvy má vždy monotónní průběh, aby byla zaručena jednoznačnost vyhodnocovaných výsledků.

2.3.1 Zdroje záření

Jako zdroje ionizujícího záření se v praxi používá rentgenové nebo gama složky umělých radioaktivních izotopů, tzv. radionuklidů. Je třeba vhodně zvolit vlnové délky pronikavého elektromagnetického záření a to vždy ve vztahu k tloušťce a druhu prozařovaného materiálu.

V radiografické nedestruktivní defektoskopii se výhradně uplatňuje použití heterogenního rentgenového záření se spojitým spektrem. Gama záření se skládá z jednotlivých vlnových délek tzv. diskrétního spektra, jehož emise závisí na použitém radionuklidu. Pronikavost hmotou obou záření roste s přibývajícím energií, která je nepřímo úměrná vlnové délce. Záření označujeme jako **tvrdé** (pronikavé) je-li jeho vlnová délka relativně krátká, a **měkké**, jde-li o záření dlouhovlnné.

Používané rentgenové a gama záření je stejné fyzikální podstaty. Jde o příčné elektromagnetické vlnění o velmi krátkých vlnových délkách v rozmezí 10^{-9} až 10^{-13} m, které se liší pouze způsobem vzniku (rentgenka, radioizotop, urychlovač).



Obr. 13. Elektromagnetické vlnové spektrum

X1 ... kosmické záření

X2 ... rtg. záření urychlovačů

X3 ... gama záření

X4 ... rtg. záření technického rentgenu

X5 ... ultrafialové záření

X6 ... oblast viditelného záření

X7 ... infračervené záření

X8 ... rádiové vlny

λ ... vlnová délka

E ... energie záření



... oblast záření používaného v defektoskopii (radiografie) [3]

Zdrojem rentgenového záření je elektronová oblast atomů prvků nejčastěji těžkého kovu, ve kterém po brzdném nárazu ve vakuu předem urychlených, tepelně emitovaných elektronů, dochází buď k deformaci magnetických a elektrických polí elektronové oblasti kovu brzdné elektrody. Nebo může dojít k přímému vyražení a následným přeskokům elektronů kovu brzdné elektrody na jejich energetických hladinách. Deformační jevy těchto elektronových hladin a jejich opětné energetické vyrovnání je provázeno emisí nárazového (bílého) rentgenového záření spojitého spektra. Přeskoky elektronů z energeticky vyšších elektronových hladin na uprázdněná místa vyražených elektronů na hladinách o nižší energii, způsobí vyzáření fotonů (kvant zářivé energie) tzv. *charakteristického rentgenového záření*.

Zdrojem radioaktivního záření gama je nestabilní rozpadající se jádro radioaktivního izotopu, při přeměně (transmutaci) jednoho prvku na druhý.

2.3.2 Vzájemné působení ionizujícího záření s hmotou

Celkové zeslabení energie záření procházejícího materiálem je výsledkem několika dějů, zejména *absorpce a rozptylu* záření a při vyšších energiích *tvorby párů elektron – pozitron*. Hodnota lineárního součinitele zeslabení je výsledně dána součtem příslušných dílčích zeslabovacích koeficientů [4].

Poměr součinitelů se mění pro různé vlnové délky procházejícího záření a různá atomová čísla. Prochází-li dlouhovlnné záření vrstvou hmoty, která se skládá z těžkých atomů (velké atomové číslo), dochází k zeslabení záření hlavně absorpcí, naopak při průchodu krátkovlnného záření dochází k jeho rozptylu ve hmotách (malé atomové číslo).

• **Absorpce záření**

Absorpce rentgenového záření je děj, při němž se předává veškerá energie pronikavého záření fotonů atomům absorbující látky. Dochází tedy k transformaci energie fotonů na jiné formy:

- kinetickou energii fotoelektronů
- zářivou energii sekundárního rentgenového záření
- fotochemickou energii
- elektrickou energii
- teplo

Tento děj je značně závislý na atomovém čísle Z prozařované hmoty a vlnové délce λ procházejícího rentgenového záření.

Pronikavé záření působí velmi účinně, ale škodlivě na živé organismy. Proto při práci s rentgenovým zářením je třeba vždy dbát zvýšené opatrnosti, neboť jeho působení bezprostředně nepocítujeme a jeho negativní účinky na živý organismus se sčítají.

• **Rozptyl záření**

U látek lehčích, s nízkou atomovou hmotností, se oproti absorpci výrazněji projevuje další (zeslabovací) efekt – rozptyl.

V rozptýleném rentgenovém záření lze pozorovat záření dvou typů:

- a) *Klasický (koherentní) rozptyl* - záření s vlnovou délkou stejnou jako u záření dopadajícího – fotony rentgenového záření dopadají na atomy látky, které tvoří soustavu elektronů. Elektronový obal atomů je rozkmitán a stává se tak zdrojem rozptýleného pronikavého záření o stejné vlnové délce jako má záření dopadající.

- b) *Comptonův rozptyl* - vzniká v důsledku srážky fotonu s volně vázaným nebo volným elektronem. Elektron se při srážce odrazí a foton se odchýlí ze svého původního směru a tím ztrácí část své energie změnou délky vlny λ k vyšším hodnotám.

Množství rozptýlených fotonů je dáno rozptylovým činitelem σ , který je přímo úměrný určité mocnině atomového čísla Z a vlnové délky λ podle toho, zda jde o záření dlouhovlnné nebo krátkovlnné.

2.3.3 Zobrazování vad při prozařování

Obecně platným a reálným předpokladem pro zobrazení vad je skutečnost, že vady představují vždy hmotu určitých rozměrů o rozdílném atomovém čísle, ve srovnání se základním materiálem, který vadu obklopuje. Z fyzikálního zákona o zeslabení rentgenového záření vyplývá, že budou lépe (kontrastněji) zobrazeny vady sférického typu, při jejich dostatečném rozměru ve směru průchodu svazku pronikavého záření a to v přímé závislosti na velikosti atomového čísla a rozměrových hodnotách prozařované hmoty.

2.4 Rentgenová počítačová tomografie

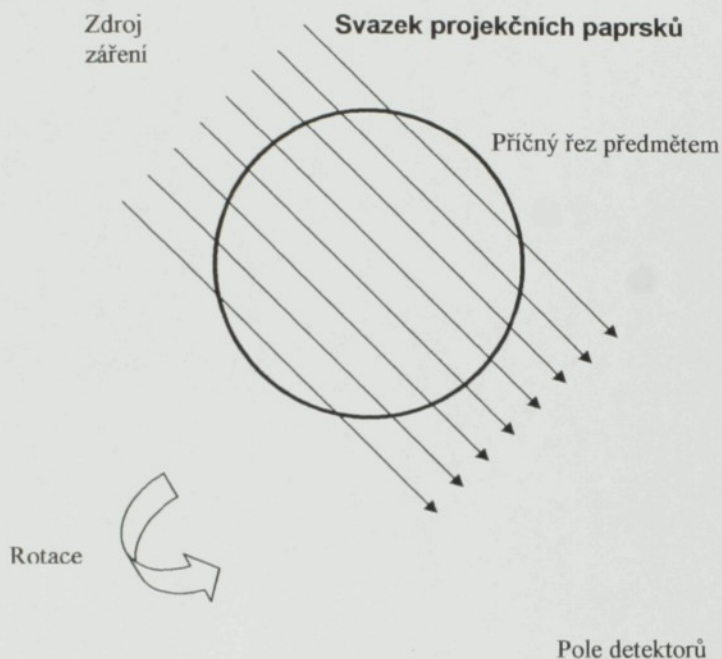
Tato metoda představuje radiografickou techniku zobrazení vrstveného řezu snímkováným předmětem. Při tomografii jde o vzájemně vázaný protisměrný kyvadlový pohyb rentgenky a filmu, který se přesouvá paralelně k ohnisku rentgenky.

Metodika tomografie zobrazuje výsledně objekt radiografickou cestou v tloušťkově určených řezech (tloušťka vyšetřované vrstvy je závislá na velikosti úhlu pohybu), které jsou polohovány dle potřeby v požadované vzdálenosti od zobrazovací roviny. Tomografie vyjadřuje postupně prostorové hodnocení celistvosti kontrolované součásti. Tato snímkovácí technika dovoluje studium jedné nebo několika simultánních vrstev objektu [4].

Záření musí být zvoleno tak, aby po průchodu daným předmětem bylo modulováno hledanou vnitřní strukturou. Ve většině případů se používá vhodného Rentgenova záření. Na výstupu je paralelní svazek záření detekován řádkovým senzorem. Pokud potom předmětem otáčíme, získáme sadu projekcí, ze kterých je možné pomocí zpětné Radonovy transformace (proces výpočtu křivkových integrálů) určit vnitřní strukturu objektu. V případě, že chceme rekonstruovat trojrozměrný předmět, opakujeme tento postup pro různé řezy, ze kterých můžeme předmět sestavit.

Modely rentgenových počítačových tomografů obsahují:

- zdroj rentgenového záření
- mnohokanálový detektor zařízení
- vysoce přesný snímací a odměřovací systém
- počítačový systém se speciální konstrukční softwarovou sadou
- kvantitativní interaktivní dekodování
- zařízení pro ukládání a dokumentování výsledků z tomografu
- seřizovací a metrologická zařízení [8]



Obr. 14. Princip tomografu

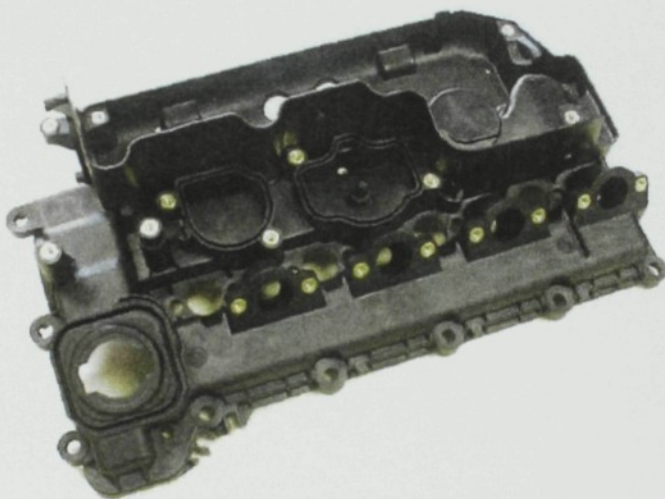
Rentgenový počítačový tomograf má o dva řády vyšší citlivost než konvenční nedestruktivní testovací zařízení. Proto lze tomograf využít i tam, kde potřebujeme získat obraz v tak velkém rozlišení a s takovou citlivostí, které jiná metoda neumožňuje.

Velkou nevýhodou počítačového rentgenového tomografu je však časově náročné nasnímkování a zrekonstruování výsledného obrazu, stejně jako jeho vysoká pořizovací cena [9].

3. Experimentální část _____

3.1 Definice problému

Tato diplomová práce je zaměřena na nedestruktivní kontrolu motorového víka, konkrétně spoje kovový insert – plast.



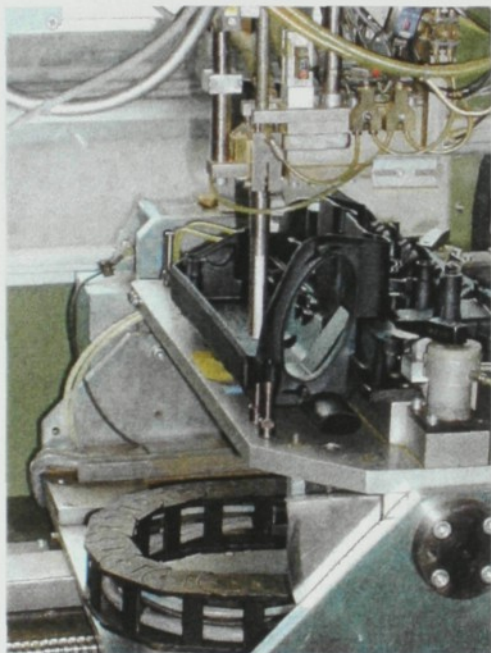
Obr. 15. Víko hlavy válců ZKH M47-D



Obr. 16. Zalisovaná závitová vložka

1. Postup výroby

Jedná se o víko hlavy válců (ZKH M47-D) vyráběné firmou Robert Bosch, s.r.o. České Budějovice, např. pro vozy BMW (obr.15). Tato víka jsou lisována z granulátu plastu PA 66 s čtyřicetiprocentní příměsí skelných vláken, a to na vstřikovacím lise firmy Engel.



Obr. 17. Pracoviště zalisovávání závitových vložek

Víko motoru je vyrobeno tlakovým vstřikem termoplastu se střední tloušťkou stěn asi 3-4 mm, v místech umístění insertu je tloušťka plastu zesílena do válce o průměru zhruba 13 ± 15 mm. Poté následuje příprava otvorů pro inserty v zesílených částech víka, tato operace musí být provedena s dostatečnou přesností (přibližně $\varnothing 10,8$ mm). Součást dále postupuje na další úsek výroby, což je zalisování mosazných závitových vložek. Na tomto pracovišti je víko upnuto na naklápěcí stůl (inserty jsou umístěny ve 4 rovinách) a do připravených otvorů je postupně každá mosazná závitová vložka zalisována (obr. 17).

Při vlastním zalisování je závitová vložka podána z vibračního zásobníku do podávacího zařízení zalisovacího stroje. Zde je tato vložka indukčně ohřátá na teplotu 320 °C a následně je zalisována do otvoru ve víku. Při této operaci insert lokálně nahřeje stěnu vyvrtaného otvoru, takže dojde k lokálnímu natavení plastu a ten nateče do zápichu insertu (vyplní zápich).

2. Cíl projektu

Úkolem této práce je nalézt a ověřit ukazatel pevnosti spoje kovový insert x plast, který by umožnil nedestruktivní určení pevnosti spoje bez nutnosti destruktivních zkoušek, s pomocí vhodné měřicí metody.

Při řešení tohoto problému se vycházelo z následující úvahy.

3. Souhrn základních faktorů ovlivňující spojení kov - plast

Na kvalitě vzniklého spojení mezi plastem a zalisovaným kovem se podílí celá řada faktorů:

- teplota ohřátí mosazné závitové vložky při zalisování
- nastavení zalisovacího stroje
- tvar děr
- vlastnosti plastu PA 66

4. Idea řešení

Spoj mosaz x plast musí být dostatečně kvalitní aby vydržel určité max. zatížení (8000N). Špatný spoj má nežádoucí vliv na vytržení insertu z víka při nižší působící síle, což může být způsobeno různými faktory. Nejpodstatnějším z nich je patrně nedostačné přilnutí plastu k povrchu insertu.

Ostatní faktory nejsou z hlediska zaměření této diplomové práce tolik podstatné. Například mechanické vlastnosti plastu můžeme sledovat a prověřit ještě před samotným zalisováním, proto lze jejich kontrolu v tomto procesu zcela zanedbat.

Naproti tomu přilnutí plastu k povrchu insertu má pravděpodobně zásadní vliv na vznik dokonalého spoje kovu a plastu. Menší plocha přilnutí se jeví jako nežádoucí a může být způsobena buďto větším průměrem vývrtu v plastu, nebo nedostatečným ohřevem insertu těsně před nalisováním. Lze předpokládat, že nedostatečné přilnutí, které představuje snížení plochy s dostatečnou adhezí, má za následek nedostatečné vyplnění zápichu plastem.

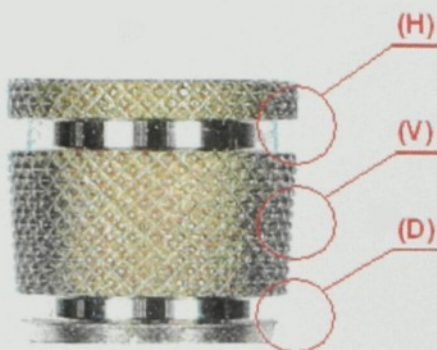
Horší přilnutí z důvodu špatného ohřevu insertu těsně před nalisováním nebylo bráno v úvahu (- záležitost výrobce).

5. Předmět kontroly

Rozhodující roli hraje kvalitní spojení mezi kovem (mosazná vložka) a plastem (termoplast PA 66). Z (obr.18) je zřejmé, které části insertu mají hlavní vliv na kvalitu testovaného spoje. Jedná se o horní zápich (**H**), dolní zápich (**D**) a vruby (**V**) na povrchu insertu.

Z hlediska kontroly se jeví jako nejvýhodnější a nejjednodušší zaměřit se pouze na horní zápich (**H**). Sledovat dolní zápich (**D**) není nutné, neboť z praktických výsledků vyplývá, že zaplnění tohoto zápichu je vždy úplné. Zde hraje svou roli kónický tvar insertu (pokud se potvrdí zaplnění (**H**), je více než pravděpodobné že (**D**) je také zaplněn). Od zkoumání přilnutí plastu po celé délce závitové vložky (**V**) se upustilo, protože je to z technického hlediska velice složité, ekonomicky nevýhodné a platí zde stejná úvaha jako pro (**D**).

Kontrola se tedy zaměří pouze na horní zápich (**H**), konkrétně na zaplnění tohoto zápichu.



Obr. 18. Mosazná závitová vložka

3.2 Měření

* Vliv velikosti vývrtu na zaplnění zápichu

Úkol: Zjistit do jaké míry ovlivní různá velikost vývrtů zaplnění zápichů.

Metoda: Zkoušení bylo prováděno radiografickou metodou.

Přístroj: Rentgenový přístroj Philips MG 161 L

Vzorky: Měření bylo prováděno na modelových vzorcích nasimulovaných ve firmě RBCB. Simulace nedokonalého zaplnění drážky byla provedena zvětšováním průměru vývrtu pro zalisování insertů ($\varnothing 10,8$ až $\varnothing 11,2$).
(vývrtý = připravené díry pro zalisování insertů)

Tab. 2. Přehled dodaných vzorků.

Skupina č.	Vzorky č.									
$\varnothing 10,8$	1	2	4	5	7	8	10	16	17	18
$\varnothing 10,9$	19	21	22	23	24	25	26	31	33	34
$\varnothing 11,0$	37	39	42	44	46	47	51	52	53	54
$\varnothing 11,1$	56	57	58	60	64	65	69	70	71	72
$\varnothing 11,2$	73	76	77	78	80	81	82	83	87	90

Postup: Vzorky byly odstupňovány a rozděleny do pěti skupin podle velikosti průměru vývrtu od $\varnothing 10,8$ do $\varnothing 11,2$. Poté byly všechny vzorky zrentgenovány a ze získaných výsledků bylo patrné, že skupiny označené nejnižším číslem ($\varnothing 10,8$) měly jednoznačně nejvíce zaplněnou drážku vložky. Naopak vzorky ze skupiny označené nejvyšším číslem ($\varnothing 11,2$) měly drážku zaplněnou nejméně (viz příloha 9.). Ověření bylo provedeno ve firmě ATG s.r.o. v Praze.

Závěr: Zásadní vliv velikosti vývrtu na zaplnění zápichu při zalisování insertů byl potvrzen. Dále tyto zkoušky prokázaly že sledovaný problém lze omezit pouze na zjištění, zda zápich je vyplněn plastem nebo ne, případně do jaké míry je zápich zaplněn.

Získané snímky byly také určeny ke kontrole prováděných UT měření.

3.2.1 Teoretický předpoklad

Při návrhu zkušebního postupu kontroly bylo třeba nejprve pochopit, jak funguje zkouška ultrazvukem ve spojení Ms x PA. Přičemž byla využívána detekce založená na principu odlišné polohy získaných odrazových ech.

Při zobrazení odrazového echa od spodní plochy zápichu lze vytvořit podmínky pro získání 1 bitové informace z pohledu pevnosti spoje.

- a) pokud není zápich zaplněn, nebude detekován odraz od spodní plochy zápichu
- b) pokud je zápich zaplněn, dojde k odrazu od spodní plochy zápichu

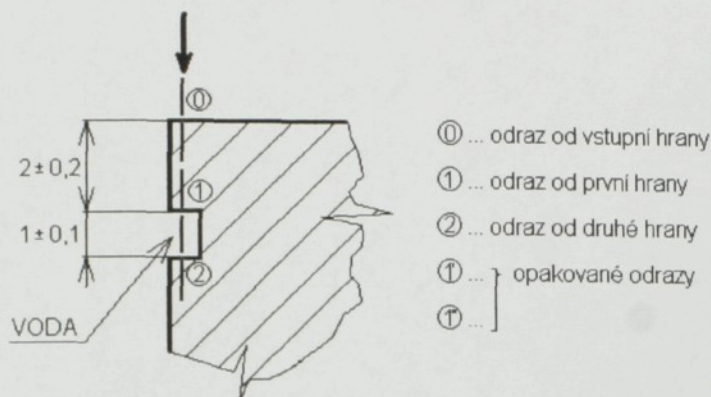
❖ Detekce zaplnění drážky

Při zalisování insertů mohou nastat dva extrémy:

a) Nezaplněná drážka

- v tomto případě je drážka vyplněna vazebním prostředím – vodou
- rychlost ultrazvuku: $c_{Ms} = 4500 \text{ m.s}^{-1}$

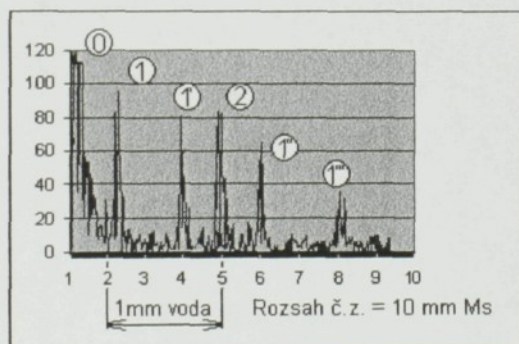
$$c_{Voda} = 1500 \text{ m.s}^{-1}$$



Obr. 19. Drážka není zaplněna plastem

$$\frac{c_{Ms}}{c_{VODA}} = \frac{4500}{1500} = 3 \quad \dots \quad 1\text{mm_voda} = 3\text{ mm_Ms} \quad (3.1)$$

Předchozí vztah představuje vzdálenost, kterou urazí ultrazvuk v různém prostředí. Vyplývá z něho, že vzdálenost 1 mm ve vodě odpovídá 3 mm v mosazi.



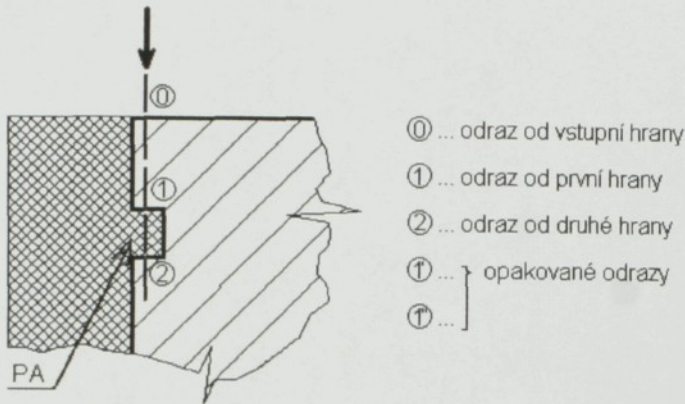
Obr. 20. Teoretický průběh ultrazvukových impulsů

b) Zaplněná drážka

- drážka je zcela vyplněna PA

- rychlost ultrazvuku: $c_{Ms} = 4500 \text{ m.s}^{-1}$

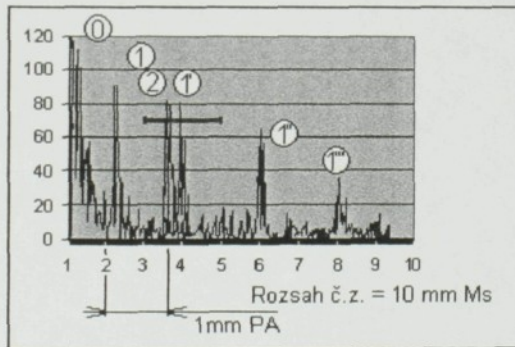
$c_{PA} = 2800 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 21. Drážka je zcela zaplněna plastem

$$\frac{c_{Ms}}{c_{PA}} = \frac{4500}{2800} = 1,6 \quad \dots \quad 1\text{mm}_{PA} = 1,6 \text{ mm}_{Ms} \quad (3.2)$$

Z teoretického výpočtu vyplývá, že rychlost šíření ultrazvuku v různém prostředí je následující: 1mm v PA odpovídá 1,6 mm v mosazi.



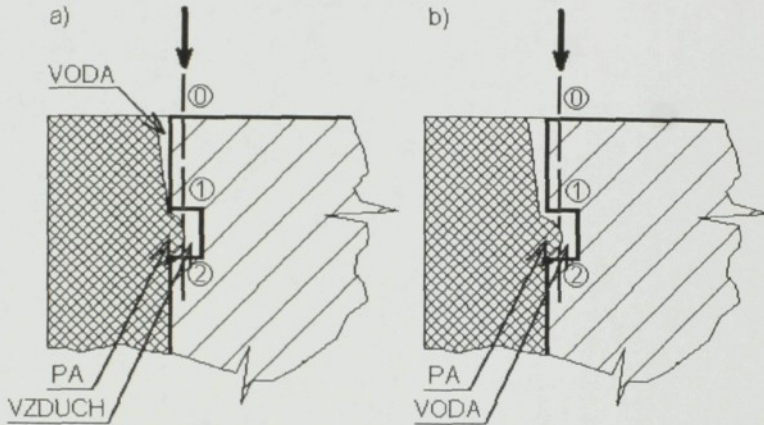
Obr. 22. Teoretický průběh ultrazukových impulsů

— ... sledovaná oblast

Při dokonale zaplněné drážce se zobrazí echo ve vzdálenosti přibližně 3,6 dílků obrazovky při rozsahu č.z. 10 mm Ms.

Hrozí zde nebezpečí splnutí ech, v takovém případě by se vyhodnocování výsledků značně zkomplikovalo.

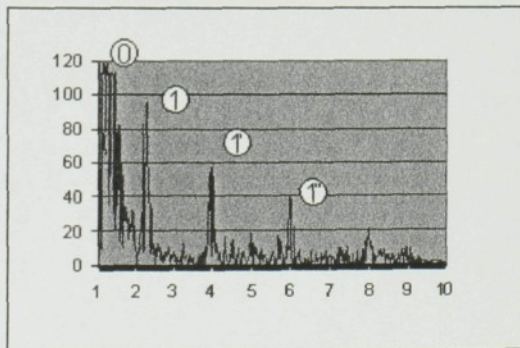
Kromě těchto dvou extrémních případů mohou samozřejmě nastat i případy neúplného zaplnění drážky (obr. 23). To je velice reálné a z hlediska vyhodnocení výstupních ech také značně komplikovanější.



Obr. 23. Drážka je částečně zaplněna a) vzduchem b) vodou

c) Vlivem nedokonalého zaplnění insertu plastem může nastat stav, kdy je uvnitř drážky vzduch, jak je patrné z obr. 23a.

V takovém případě ultrazvuk neprojde, žádné echo se nevrátí a vzorek může být jednoznačně vyřazen. Hrozí tím však také vyřazení kvalitně zaplněné drážky a to v případě výskytu tzv. studeného spoje.

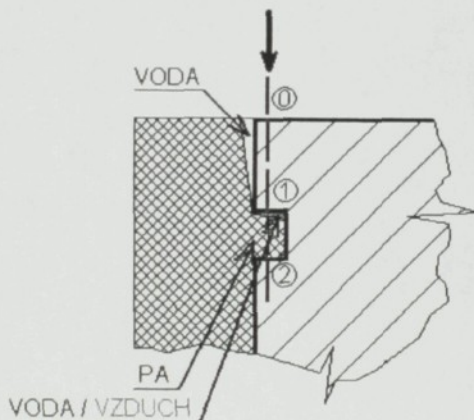


Obr. 24. Průběh ultrazvukových impulsů v případě zaplnění drážky vzduchem

❖ Studený spoj

Jedním z možných problémů může být studený spoj, jedná se o nedokonalé přilnutí polyamidu k mosazi v drážce (k horní hraně). Mezi plastem a mosazí tak vzniká tenká štěrbin (obr.25), která může být zaplněna vodou nebo vzduchem (jako na obr. 23).

V případě zatečení vody do štěrbin vzniká tenká vrstvička plnící pouze funkci imerzního prostředí. Ultrazvuk v takovém případě projde spojem bez problémů a zápich se jeví jako zaplněný. Pevnostně by měl také vyhovovat, protože v drážce je dostatečné množství plastu.



Obr. 25. Studený spoj

Problém nastává v okamžiku, kdy se do takového štěrbin voda nedostane, zůstane v ní vzduch a vzniká tzv. studený spoj. V takovém případě ultrazvuk vzduchem neprochází a není možné zjistit zaplnění drážky, echo od spodní hrany se neobjeví vůbec (obr.24). Touto metodou pak není detekce takového spoje možná.

3.2.2 Dílčí pevnostní úkoly

Na základě předcházejících zjištění byly stanoveny některé dílčí úkoly, které bylo třeba provést a prověřit. Jejich případné potvrzení by mohlo do značné míry usnadnit a zjednodušit navrhovaný kontrolní proces.

❖ Základní úkoly

- Ověřit zda zaplnění drážky je symetrická funkce, což znamená zjistit zda mohou existovat na jednom zápichu místa současně zaplněná i nezaplněná.
- Zjistit zda existuje skutečně těsná korelace mezi zaplněním zápichu a naměřenou vytrhávací silou.
- Zjistit zda existuje korelace mezi daným víkem a vytrhávací silou na insertech daného víka, případně korelace po plochách insertů.

❖ Provedená měření

a)

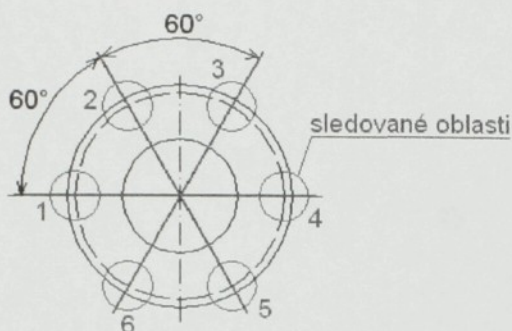
Úkol: Určit zda zaplnění drážky je symetrická funkce?

Metoda: Zkoušení bylo prováděno radiografickou metodou.

Přístroj: Rentgen Philips MG 161 L

Vzorky: Sada zalitých insertů dodaných firmou RBCB, konkrétně se jednalo o skupiny 10,8 a 11,2.

Postup: Zkoušky byly prováděny radiograficky ve firmě ATG, a to následujícím způsobem. Z již jednou testovaných vzorků byly vybrány skupiny 10,8; 11,2, na kterých bylo provedeno kontrolní měření (příloha 9.). Každý insert byl zrentgenován ve třech rovinách, vždy pootočených o úhel 60° (obr.26). K dispozici tak bylo šest kontrolních míst na každém měřeném insertu, jejichž vzájemným porovnáním bylo zjišťováno symetrické či nesymetrické zaplnění drážky (po celém obvodu).



Obr. 26. Zkouška symetrie zaplnění (RTG)

Výsledek: Při tomto měření bylo testováno celkem 20 insertů (120 sledovaných oblastí), z nichž ani jeden nejevil známky výraznější nesymetričnosti v zaplnění kontrolované drážky.

Provedené měření dokázalo, že zaplnění drážky je symetrická funkce.

b)

Úkol: Dalším a zřejmě nejdůležitějším úkolem bylo, zjistit existenci těsné korelace mezi zaplněním zápichu a naměřenou vytrhávací silou. Před řešením tohoto úkolu však bylo nejprve třeba zvolit vhodnou měřicí metodu.

b1)

Úkol: Volba vhodné měřicí metody.

Postup: Po technické stránce lze principiálně určit zaplnění zápichu třemi nedestruktivními metodami. Jedná se o radiografickou, tomografickou a ultrazvukovou metodu. Z těchto tří metod bylo třeba vybrat jednu, jejíž použití by přicházelo v úvahu, a to z hlediska technického, konstrukčního, finančního i použitelnosti v praxi.

▮ Radiografická metoda

Tato metoda se jevila jako neoptimálnější. Už výsledky prvního kontrolního měření popisovaného v úvodu kapitoly 3.2 jasně ukázaly na možnosti radiografické metody.

➤ výhody:

- lze snadno měřit míru zaplnění zápichu
- výsledky lze jednoduše interpretovat
- metoda je dostatečně produktivní (za určitých podmínek by bylo možné provádět i 100%-ní kontrolu)
- z finančního hlediska je metoda akceptovatelná

➤ nevýhody:

Konstrukce víka motoru a umístění většiny zalisovaných insertů však zcela znemožňuje jejich přesné rentgenování, aniž by došlo k poškození víka. Metoda by tedy byla omezena pouze na inserty na výstupcích.

(viz obr.15)

Proto by bylo použití RT metody v praxi, za stávajících podmínek, poměrně obtížné a nevyhovující.

▮ Tomografická metoda

Tato metoda splňovala všechny požadavky. S její pomocí by bylo možné bez větších problémů zajistit 100%-ní kontrolu, tj. na všech insertech víka. Z finančního hlediska by však tato metoda byla velice náročná, a proto nevhodná (špatná produktivita).

Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda rovněž splňovala všechny kritéria požadované kontrolní metody.

➤ **výhody:**

- dle prvního odhadu se jevila cenově přijatelná
- umožňovala 100%-ní kontrolu insertů na víku
- vhodná z hlediska použitelnosti a aplikovatelnosti v podmínkách sériové montáže
- zdá se být dostatečně produktivní

➤ **nevýhody:**

Při prvním pohledu tato metoda nevykazovala žádné výraznější nevýhody.

Výsledek: Na základě předchozích poznatků a zjištění, stejně jako výsledků experimentálních zk. (viz DP Kvapil, J. [3]), byla zvolena impulsová odrazová ultrazvuková metoda jako nejvhodnější pro kontrolu zalisovaných insertů.

b2)

Úkol: Zjistit existenci těsné korelace mezi zaplněním zápichu a naměřenou vytrhávací silou.

Metoda: Zkoušení bylo prováděno impulsní odrazovou ultrazvukovou metodou – imersní technika.

Přístroj: Ultrazvuková PC deska USPC 3100 od firmy SOCOMATE
Ultrazvukový přístroj firmy KRAUTKRÄMER typ USIP 11

Vzorky: Sada zalitých insertů dodaných firmou RBCB, skupiny $\varnothing 10,8$ až $\varnothing 11,2$.
Speciálně upravené vzorky firmy Robert Bosch – s rozšířenou drážkou.

Postup: Veškeré tyto zkoušky byly provedeny ve firmě ATG s.r.o. v Praze a jsou podrobně popsány v kap.: Měření I., Měření II. a Měření III.

Před samotným měřením bylo třeba, v rámci přípravy, provést ještě několik ověřovacích zkoušek.

3.2.2.1 Prozvučitelnost

Úkol: Provedení zkoušek prozvučitelnosti.

Metoda: Zkoušení bylo prováděno UT metodou.

Přístroj: Ultrazvukový přístroj firmy KRAUTKRÄMER typ USIP 11

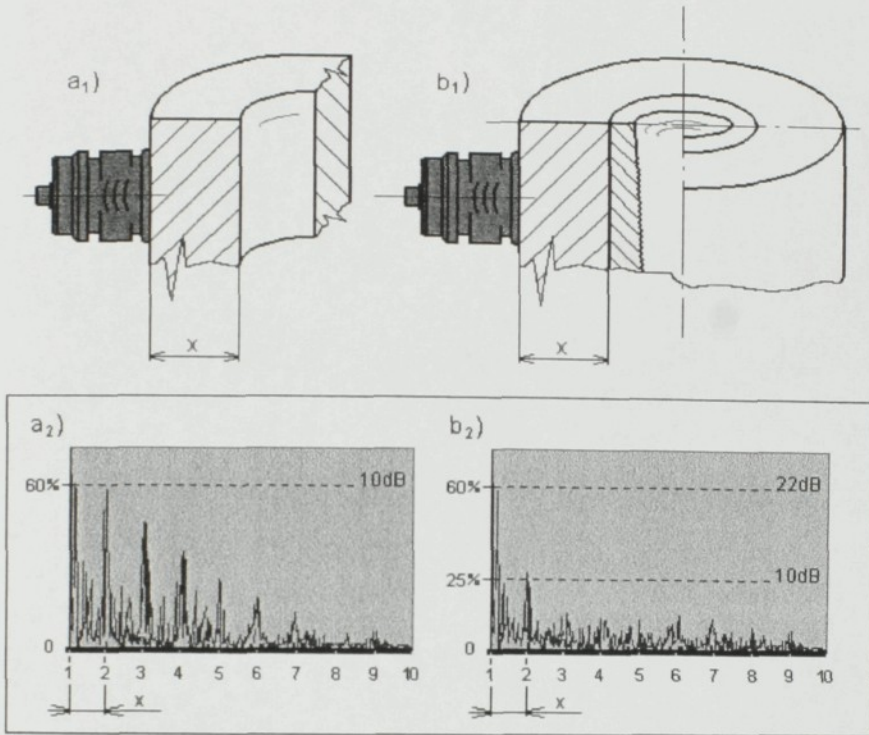
Sonda: Přímá sonda Z10M

Vzorky: - motorové víko ZKH M47-D
- speciálně upravený vzorek (viz obr.28)

Pro použití impulsní odrazové ultrazvukové metody bylo podstatné ověřit, zda ultrazvukové vlny vůbec projdou zkoušenými materiály. Před každým měřením bylo třeba zajistit dobrou akustickou vazbu a to pomocí mazacího tuku, v daném případě byl použit ultrazvukový gel SONATEST.

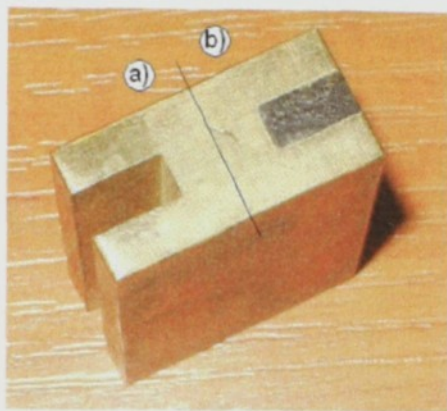
Zkouška první: Zkoušky byly prováděny přímo na motorovém víku, ale již první měření prokázalo, že velkým problémem bude příliš malý rozměr zkoumané drážky insertu (přesné rozměry – viz příloha 11). Vzhledem k vlastnostem použité sondy pak nebylo možné provést kontrolu prozvučitelnosti dle původního záměru, tj. přímo na insertech zalitých v motorovém víku. Proto byla provedena pouze zkouška přechodu ultrazvuku v prostředí plast x mosaz.

Postup: Při průchodu ultrazvuku plastem o tloušťce t dosáhla výška echa 60% obrazovky a to při 10 dB. Stejný pokus se opakoval na plastu totožné tloušťky t , ovšem s přilehlou, zalisovanou mosaznou vložkou (viz obr.27b). Také zde bylo dosaženo 60%-ní výšky echa, ovšem až při 22 dB. Získaný rozdíl 12 dB, které prošly do mosaze dokazuje, že prostředí plast x Ms je prozvučitelné.



Obr. 27. Zkouška prozvučitelnosti a_1 , b_1 ; průběh ultrazvukových impulsů a_2 , b_2

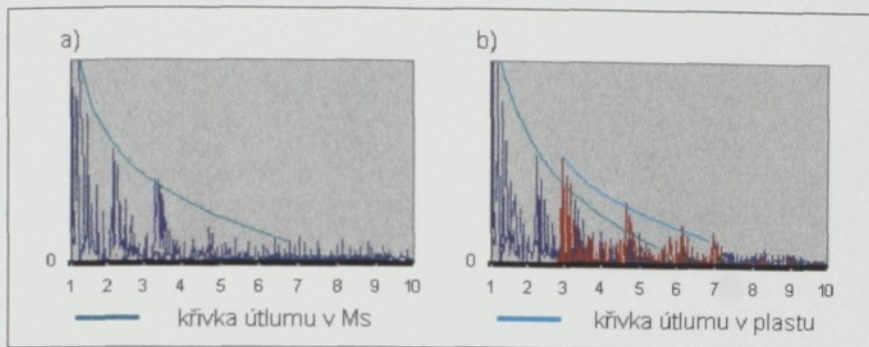
Zkouška druhá: Pro důkaz prozvučitelnosti multipřechodu Ms x plast x Ms pak byl vytvořen speciální vzorek větších rozměrů, který měl tvar shodný s drážkou mosazné závitové vložky a který plně imitoval vlastnosti spojení kovový insert – plast. Z jedné strany byla drážka zalita plastem – polyamidem PA 66 G 40. Z druhé strany zůstal vzorek volný (volná drážka). Tento vzorek simuluje dva mezní stavy, které mohou vzniknout při zalisování mosazné závitové vložky do plastu. Prázdňá drážka simuluje nezaplnění (v tomto případě na vzduchu), zatímco zalitá drážka dokonalé přilnutí plastu k povrchu mosazné vložky.



Obr. 28.(a,b) Speciálně upravený vzorek

Postup: Na vzorku byla provedena dvě měření, a to na prázdné a zaplněné straně.

- a) Drážka mosazné závitové vložky je zcela nezaplněna (obr. 28a, 29a): Ultrazvukový impuls projde zkušebním vzorkem a na rozhraní dvou prostředí – zkoušený materiál a okolní prostředí (vzduch) – se odrazí a vrátí zpět. Dále se odrazí od povrchu sondy a opět projde zkušebním vzorkem, znovu se odráží na rozhraní a vrací se zpět, ale již s částečným úbytkem akustické energie (útlum ultrazvuku).
- b) Drážka mosazné závitové vložky je zcela zaplněna (obr. 28b, 29b): Ultrazvukový impuls projde zkušebním vzorkem a jeho část se na prvním rozhraní dvou prostředí – mosaz x plast – odrazí a vrátí zpět. Zbytek ultrazvukového impulsu projde plastem a odrazí se od druhého rozhraní plast x mosaz a vrací se zpět, ale již s částečným úbytkem akustické energie (útlum ultrazvuku). Nutné značné zesílení 68 až 75 dB.



Obr.29. Průběh ultrazvukových impulsů a) nezaplněná drážka, b) zaplněná drážka

- Závěr:**
- ověření prozvučitelnosti přechodu plast x mosaz
 - ověření prozvučitelnosti přechodu mosaz x plast x mosaz
 - echa se objevují dle teoretického předpokladu

3.2.2.2 Interference rozhraní

Kombinace tloušťky mosaze a plastu na zkoušených vzorcích nesmí být taková, aby docházelo k interferenci indikací jednotlivých rozhraní.

Tato podmínka se z teoretického hlediska jevila jako splnitelná (viz kap. 3.2.1). První praktická měření pak tento předpoklad potvrdily (viz obr. 29).

3.2.2.3 Výška echa

Předpokladem bylo, že rozdíl mezi vyhovujícím a nevyhovujícím zaplněním drážky insertu se projeví mimo jiné také změnou výšky echa. Tato veličina se mohla stát dalším kritériem využitelným při detekci zaplnění drážky.

Předmětem zkoumání by byly amplitudy echa od horní stěny drážky, při nevyhovujícím zaplnění by amplituda měla vzrůst, protože vzroste součinitel odrazu. Rozdíl součinitele odrazu by měl činit přibližně 2 dB, to je však pro případnou detekci málo, tolerovaná odchylka se totiž také pohybuje kolem cca 2 dB.

Při praktickém měření bylo zjištěno, že amplituda echa od horní hrany drážky se pohybovala v rozmezí $\pm 15\%$ výšky obrazovky na jednom vzorku. U vzorků ze stejné skupiny se pak amplituda pohybovala v rozmezí $\pm 25\%$ obrazovky. Proto lze jednoznačně konstatovat, že toto kritérium je nevhodné a nespolehlivé pro hodnocení zaplnění drážky.

Výpočty:

$$Z_{plast} = \rho \cdot c_{plast} = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2800 = 3,1 \text{ Nsm}^{-1} \quad (3.3)$$

$$Z_{Ms} = \rho \cdot c_{Ms} = 8,1 \cdot 10^{-3} \cdot 4500 = 36,45 \text{ Nsm}^{-1} \quad (3.4)$$

$$Z_{voda} = \rho \cdot c_{voda} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 = 1,5 \text{ Nsm}^{-1} \quad (3.5)$$

$$R_{Ms-plast} = \frac{Z_{plast} - Z_{Ms}}{Z_{plast} + Z_{Ms}} = -0,84 \dots -84\% \quad D = 1 + R = 0,16 \dots 16\% \quad (3.6)$$

$$R_{Ms-voda} = \frac{Z_{voda} - Z_{Ms}}{Z_{voda} + Z_{Ms}} = -0,92 \dots -92\% \quad D = 1 + R = 0,08 \dots 8\% \quad (3.7)$$

$$20 \cdot \log R_{Ms-plast} = -1,51 \text{ dB} \quad (3.8)$$

$$20 \cdot \log R_{Ms-voda} = -0,75 \text{ dB} \quad (3.9)$$

$c_{plast} = 2800 \text{ m/s}$... rychlost podélných vln v plastu

$c_{Ms} = 4500 \text{ m/s}$... rychlost podélných vln v mosazi

$c_{voda} = 1500 \text{ m/s}$... rychlost podélných vln ve vodě

Z ... měrná akustická impedance

R ... součinitel odrazu

D ... součinitel průchodu

Výpočet dokázal, že rozdíl součinitele odrazu nedosahuje ani předpokládaných dvou decibel, tato metoda je proto v tomto případě zcela nepoužitelná.

3.2.2.4 Kalibrace

Před měřením bylo nutné přístroj zkalibrovat, sladit nastavení přístroje a sondy SLIH10-5 SF25 s polohou manipulátoru.

Úkol: Hlavním úkolem kalibrace v daném případě bylo, nastavit přístroj tak, aby svazek ultrazvuku začínal přesně na hraně insertu.

Výsledky byly nejednoznačné, ukázalo se že bude nutné brát v úvahu šířku dopadajícího svazku.

Při nájezdu sondy na vzorek se echa na obrazovce zpočátku neobjevují dle původních předpokladů. Dochází zde ke zpoždění, které je způsobeno právě šířkou dopadajícího svazku. Nepřehlednost objevujících se ech měla skončit v okamžiku, kdy na vzorek najede svazek v ohnisku polovinou své plochy (příloha 5. - obr. 5.1b). Tento stav však nastal teprve až po najetí celého svazku (příloha 5. - obr. 5.1c). Vzhledem k velice malým rozměrům detekované oblasti na testovaných insertech je nutné brát tento fakt v úvahu.

Šířka svazku v ohnisku

Šířka svazku fokusační sondy SLIH10-5 SF25 v ohnisku měla být, dle původního záměru, ověřena několika způsoby:

- údaje výrobce
- teoretický výpočet
- praktická měření

- údaje výrobce

Tato veličina nebyla k dispozici, výrobce tento parametr sondy neudává!

- teoretický výpočet

Přesný teoretický výpočet šířky ohniska fokusační sondy není možný. Proto bylo nutné vycházet z obdobných výpočtů klasické sondy Z10M, jejíž základní parametry jsou srovnatelné s fokusační sondou SLIH10-5 SF25.

Z10M:

$$s = \frac{\lambda \cdot l}{D} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 40}{5} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \lambda = \frac{c_{\text{voda}}}{f} = \frac{1500}{10} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (3.10)$$

s ... šířka svazku v ohnisku

λ ... vlnová délka ve vodě [m]

l ... délka ohniska ve vodě [mm]

D ... velikost měniče (průměr) [mm]

c_{voda} ... rychlost podélných vln ve vodě [m/s]

f ... frekvence [MHz]

Zjištěná hodnota je pouze orientační, v praxi platí, že šířka svazku v ohnisku fokusační sondy by měla být menší než šířka ohniska přímé sondy (stejných parametrů).

- praktická měření

- o Délka ohniska

Přesné nastavení ohniska fokusované sondy bylo provedeno pomocí přesného polohování se sondou ve směru osy z a maximalizováním echa od spodní hrany. Teoretická vzdálenost sondy od povrchu vložky se vypočte z poměru rychlostí šíření podélných vln ve vodě a mosazi.

Délka ohniska l ve vodě, udávaná výrobcem je 25 mm. Při měření však bylo třeba brát v úvahu zkrácení délky ohniska vlivem změny prostředí voda x plast (přibližně o 2 mm). Konečná vzdálenost sondy od ohniska v ose

z tedy činí přibližně 22 mm, vzdálenost sondy od povrchu inzeru odpovídá cca 20 mm (viz příloha 5. - obr. 5.2).

Kolmost sondy vůči vzorku se nastavila pomocí ručního naklápění držáku sondy a maximalizace echa od horní hrany drážky.

○ Šířka ohniska

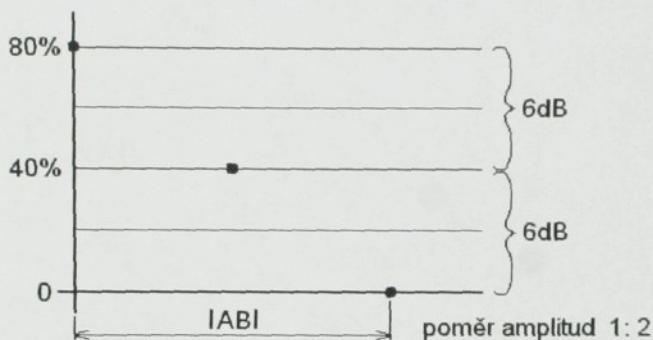
Šířka svazku v ohnisku hraje svou roli vzhledem k velmi malým rozměrům drážky insertu.

Experimentální měření šířky ohniska lze provést pomocí drátku, jehož průměr je menší než předpokládaná šířka svazku v ohnisku. Z teoretického výpočtu vyplývá, že $s \approx 1 \div 1,2$ mm. Proto byl při měření použit drátek $\varnothing 0,8$ mm, což zajišťuje jak pohlcení celého drátku svazkem, tak i dosažení zanedbatelně malého akustického tlaku na okrajích svazku, v daném okamžiku.

Postup: Po njetí svazku (sondy) na okraj drátku začíná vstupní echo růst. V okamžiku jeho maxima je drátek z poloviny pohlcen svazkem a na posuvce je zaznamenán rozměr A . Zesílení je třeba v tomto okamžiku snížit o 6 dB (amplituda se sníží na 40%). Při dalším posuvu svazku (sondy) echo opět stoupá až dosáhne maxima (80%), poté dochází k jeho pozvolnému poklesu, přičemž druhý rozměr B je odečten při dosažení 40%-ní amplitudy. Výsledná vzdálenost AB pak odpovídá šířce měřeného svazku (obr. 30).

Vzájemný poměr amplitud 1 : 2

$$20 \cdot \log \frac{A_2}{A_1} = 6 \text{ dB} \quad (3.11)$$



Obr. 30. Experimentální měření šířky ohniska

Výsledky: Pro měření šířky svazku byly použity dva drátky o průměrech 0,8 a 0,25 mm. Při použití kontrolního drátku $\varnothing 0,8$ mm činil rozdíl vzdáleností AB na posuvce 1 mm. Při použití drátku $\varnothing 0,25$ mm pak činil rozdíl těchto vzdáleností 1,5 mm. Druhá naměřená hodnota neodpovídá původním předpokladům. Důvodem vzniklé odchylky může být příliš veliký rozdíl rozměrů mezi skutečnou šířkou svazku a použitým kontrolním drátkem, což může nežádoucím způsobem ovlivnit zpětný odraz (viz příloha 5. - obr. 5.3).

Závěr: Závěrem lze říci, že tato metoda v podstatě potvrdila původní teoretický předpoklad o šířce svazku v ohnisku. Teoreticky měla šířka svazku činit $s \approx 1 \div 1,2$ mm, praktické měření pak prokázalo, že $s \approx 1 \div 1,5$ mm (přičemž hodnotu 1,5 mm je třeba brát s určitou rezervou, vzhledem k možnosti nejasného zpětného odrazu).

S využitím stejného principu pak může být tato metoda použita i k relativně přesnému měření vzdáleností a rozměrů. Tato rozměrová metoda se dá efektivně využít i při kontrole zkoumané drážky.

3.2.3 Měření I.

Metoda: Zkoušení bylo prováděno impulsní odrazovou ultrazvukovou metodou – imersní technika.

Prostředí: Akustická vazba mezi sondou a vzorky byla zajištěna vodou.

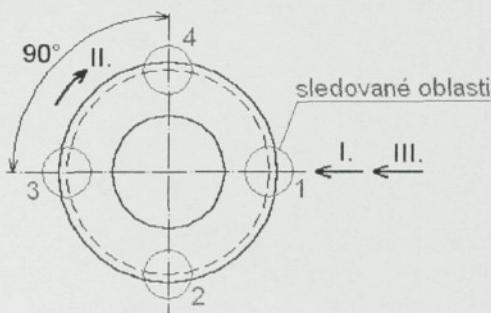
Přístroj: Ultrazvuková PC deska USPC 3100 od firmy SOCOMATE

Sonda: Imersní sonda SLIH10-5 SF25 od firmy SONATEST (viz příloha 2.).

Vzorky: Sada zalitých insertů dodaných firmou RBCB, skupiny 10,8 až 11,2.

Postup: Měření se provádělo na každém vzorku z celkového množství 50 ks.

- 1) A-zobrazení: Na každém vzorku se postupně zaznamenávalo A-zobrazení signálů při pohybu sondy přes vzorek v příčném směru (I.). Následovalo pootočení vzorku o 90° (II.) a měření se opakovalo (III.). Takto získané signály se poté podrobily analýze a následnému vyhodnocení (porovnání se snímky RTG). U každého vzorku tak byly provedeny čtyři kontrolní měření (viz obr. 31).



Obr. 31. Zvolený postup při měření I.

- 2) B-zobrazení: Vzhledem k možnostem použitého zařízení byly vzorky při této zkoušce podrobeny také B-zobrazení signálů, a to stejným postupem jako v případě prvního měření.

Získané výsledky byly natolik neprůkazné, že se pro jakékoli vyhodnocení nedaly použít (viz příloha 6.). Proto byly počítačově upraveny, v místě drážky byl každý graf rozřezán, čímž byly opět získány

A-zobrazení sledované oblasti (příloha 7.). Výsledky však jen potvrdily závěry prvního měření.

Výsledky: Rozbor A-zobrazení signálů (1); (2) u jednotlivých vzorků byl zaměřen na sledování polohy echa od spodní hrany drážky. Výsledky měření ukázaly, že velkým problémem bude velice malý rozměr odrazné plochy drážky (0,6 mm).

Získaná echa měla velice malý odstup od šumu a v některých případech v šumu zcela zanikala. Vzorky ze stejné skupiny nevykazovaly na rozdíl od předpokladů stejná A-zobrazení. Rozdíl byl dokonce i u vzorků téže skupiny, u nichž RTG snímky prokázaly stejné zaplnění drážky (výsledky RTG - příloha 9.).

U některých vzorků částečně zaplněných, se zobrazovalo větší množství ech s nižšími amplitudami. To mohlo být způsobeno větším průměrem svazku UZ v ohnisku, než byla šířka drážky. Svazek v takovém případě prozvučoval současně zaplněnou i nezaplněnou část. Bohužel ani toto nebylo vždy pravidlem, u některých vzorků s částečným zaplněním (dle RTG) se tyto echa neobjevily.

V některých případech se dokonce zaplněná drážka (RTG snímky) jevila při UT jako nezaplněná, zde se mohl projevit tzv. studený spoj (viz kap. 3.2.1).

Závěr: V daném případě se praktickým ultrazvukovým měřením nepodařilo spolehlivě určit rozdíly mezi vzorky z jednotlivých skupin a to ani v extrémních případech, kde RTG snímky jednoznačně prokázaly nulové a stoprocentní zaplnění drážky.

3.2.4 Měření II.

Vzhledem k překvapivě špatným a nejasným výsledkům měření I. byly vzorky podrobeny dalšímu, opakovanému zkoušení.

Metoda: Impulsní odrazová ultrazvuková metoda – imersní technika.

Prostředí: Stejně jako při předchozím měření - voda.

Přístroj: Ultrazvukový přístroj firmy KRAUTKRÄMER typ USIP 11

Sonda: Imersní sonda SLIH10-5 SF25 od firmy SONATEST

Vzorky: -mosazné etalony s nasimulovanou reálnou drážkou

-upravený, nezalitý insert

-klasicky zalitý insert (použit vzorek 1 ze skupiny 10,8)

Postup: Toto měření bylo jednoznačně zaměřeno na prokázání rozlišitelnosti dvou extrémních případů, což je zcela nezaplněná a úplně zaplněná drážka insertu. Princip měření byl stejný jako v případě měření I., změnilo se však měřicí zařízení, tj. ultrazvukový přístroj a manipulátor (viz příloha 1., příloha 3.). Pomocí přidavného stínění byl také do značné míry odstraněn šum, který komplikoval a v některých případech zcela znemožňoval vyhodnocování signálů.

Výsledky:

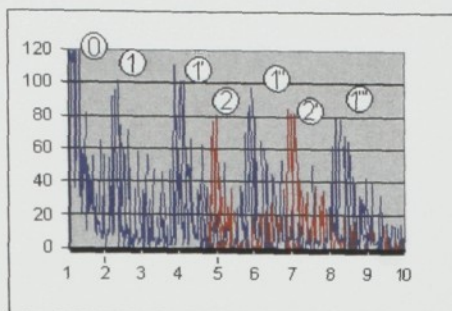
1) Mosazné etalony

První měření bylo provedeno na speciálních vzorcích s vyříznutou drážkou. Rozměry této drážky částečně odpovídaly rozměrům proříznuté drážky na insertu (viz obr. 32).

Získané výsledky potvrdily předpokládaný výskyt ech, to však až při max. zesílení 60 dB (obr. 33). Toto zesílení bylo nutné zejména kvůli jasné identifikovatelnému zobrazení echa od druhé hrany drážky. Výsledky měření také ověřily závěr rozměrové metody popsané při kontrole šířky svazku v ohnisku, zjištěná hodnota se však spíše blížila hranici 1,5 mm.



Obr. 32. Mosazné etalony

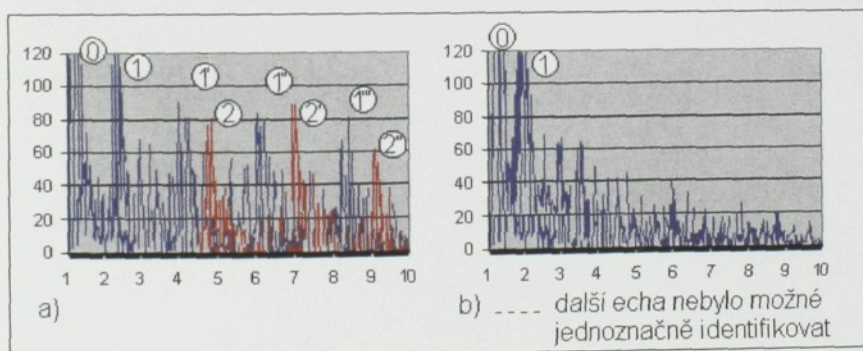


Obr. 33. Průběh ultrazvukových impulsů
při velkém zesilení

2) Nezalitý insert

Druhé měření bylo provedeno na klasickém nezalitém insertu, jehož drážka byla z jedné strany proříznutá do poloviny.

Z obrázku 34. je patrné, že jednoznačně se echa zobrazila pouze na proříznuté straně vzorku (obr.34a). Zobrazení ech na druhé (standardní) straně vzorku je pouze nejasné, zejména echo od spodní hrany drážky (obr.34b).



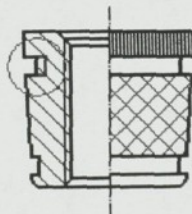
Obr. 34. Průběh ultrazvukových impulsů na nezalitém insertu a) proříznutá drážka,
b) klasická drážka

3) Zalitý insert

Na klasicky zalitých inzertech pak opět nešlo zcela jednoznačně cokoli definovat.

Závěr: V daném případě se praktickým ultrazvukovým měřením podařilo prokázat předpokládané zobrazení ech pouze u nezalitých insertů a to ještě pouze v případě rozšířené drážky. U zalitých insertů se zobrazená echa nepodařilo spolehlivě rozlišit a vyhodnotit.

Zásadním problémem zůstává malý rozměr plochy drážky. Z výsledků vyplívá, že pro jasné zobrazení ech by bylo třeba speciální sondy s co možná nejmenším průměrem svazku v ohnisku (0,3 mm). Z důvodů nedostupnosti takové sondy byl vznesen požadavek na dodání zvlášť upravených insertů zalisovaných s použitím běžné výrobní technologie. Tyto vzorky by měly mít částečně rozšířenou drážku, dle obr. 35.



Obr. 35. Drážka insertu

3.2.5 Měření III.

Toto měření proběhlo za naprosto stejných podmínek a s pomocí stejného zařízení jako měření II., rozdíl byl pouze v použitých vzorcích. Firma Robert Bosch dodala speciálně upravené vzorky. Jedná se opět o mosazné vložky zalisované v polyamidu PA 66 G 40, vzniklý spoj byl vyroben stejnou výrobní technologií jako v případě předešlých vzorků. Inserty se však liší větší hloubkou horní drážky, ta se z původních 0,6 mm zvětšila na 0,825; 1 a 1,2 mm. V každé z těchto tří skupin bylo po dvou vzorcích (skupina 0,825 obsahovala vzorky tři).

Nastavení výchozích parametrů bylo ověřeno na etalonech z mosazi obsahující referenční zářez, simulující reálnou drážku (viz měření II).

Výsledky: Na rozdíl od předcházejících měření, kdy vzhledem k rozměrům drážky nebylo možné na zalitých insertech cokoli detekovat, při těchto zkouškách se echa objevovala zřetelněji a jejich rozlišitelnost byla celkově jasnější (zejména problematický odraz od spodní hrany drážky). I když bylo nutné značné zesílení, až přes 60 dB (výsledná echa jsou uvedena v příloze 8.).

Nejen kvůli vzorkům jejichž výsledky nebyly natolik jasné (?), ale pro celkovou kontrolu bylo třeba provést srovnání se snímky RTG (viz tab. 3., přílohy 8. ; 10.).

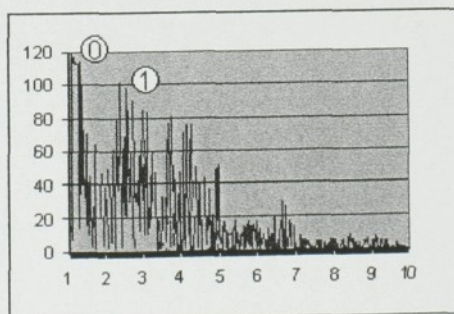
Tab. 3. Porovnání výsledků RTG a UT měření.

Skupina	Vzorek	Výsledek měření UT	Výsledek měření RTG
0,825	1	zaplnění	zaplnění
	2	nezaplnění (?)	zaplnění neúplné
	3	zaplnění	zaplnění
1	1	zaplnění	zaplnění
	2	nezaplnění (?)	zaplnění neúplné
1,2	1	nezaplnění	zaplnění neúplné
	2	nezaplnění	zaplnění neúplné

Poznámka: (?)... složitější vyhodnocení (nepříliš průkazné)

Vyhodnocení: Toto porovnání prokázalo funkčnost a realizovatelnost použité ultrazvukové metody.

U nejasných vzorků 0,825-2 a 1-2 byl zjištěn možný důvod v „pouze“ částečném zaplnění drážky plastem. Zejména u vzorku 1-2 lze výrazné roztržení echa (1) vysvětlit možným rozbitím signálu v prostoru mezi mosazí a plastem (obr. 36).



Obr. 36. Průběh ultrazvukových impulsů
u vzorku 1-2

Závěr: Závěrem je třeba říci, že získané výsledky a zejména jejich srovnání se snímky RTG, prokázaly využitelnost UT metody při kontrole zalitých insertů. Přičemž větší hloubka drážky celkovou vyhodnotitelnost zlepšila. Vzájemné srovnání konkrétně ukázalo bezproblémovost UT metody v případě zcela zaplněné (popř. zcela nezaplněné) drážky. Problém může nastat pokud plast nevyplňuje drážku dokonale, v takovém případě je detekce zaplnění komplikovanější, což znamenalo zejména vyhodnocení skupiny 1,2.

Z měření je dále jasné, že ani vzorky z jedné skupiny nemusí vykazovat stejné zaplnění, i když v tomto případě sehrál jasnou roli malý počet vzorků. Získané výsledky je proto třeba brát jako předběžné a orientační.

3.3. Vytrhávání

Vytrhávací zkoušky byly provedeny firmou Robert Bosch s.r.o. České Budějovice pomocí speciálního vytrhávacího zařízení na vzorcích skupin 10,8 až 11,2.

Princip: Tato zkouška je založena na stejném principu jako zkoušky tahové. Na insert zalisovaný ve víku je našroubován trn, dochází k jeho zatěžování tahovou silou až do okamžiku vytržení. Následuje odečtení síly při které k vytržení insertu došlo. Parametry této destruktivní zkoušky jsou uvedeny v příloze 12.

Tab. 4. Mezní síla vytrhávací zkoušky.

	Vytrhávací síla [N]
Mezní síla v praxi	8000

Výsledky měření:

Tab. 5. Výsledky prováděných vytrhávacích zkoušek.

Skupina	Číslo dílu	Vytrhávací síla [N]	Skupina	Číslo dílu	Vytrhávací síla [N]
10,8	1	6380,20	11,1	56	4304,76
	2	7016,84		57	4578,74
	4	5789,02		58	4235,46
	5	5638,30		60	3850,78
	7	5581,60		64	4376,74
	8	6253,32		65	3418,42
	10	6709,08		69	3263,20
	16	6312,26		70	2281,04
	17	5124,44		71	2297,70
	18	6561,06		72	2988,30
10,9	19	5307,60	11,2	73	2013,34
	21	5463,72		76	558,34
	22	5227,08		77	2676,52
	23	5368,80		78	3343,28
	24	5347,20		80	1250,30
	25	5445,28		81	3328,00
	26	5316,16		82	1174,26
	31	6696,48		83	2528,06
	33	5413,34		87	1034,34
	34	5348,10		90	1791,10
11	37	5137,98			
	39	4832,04			
	42	5524,46			
	44	4800,10			
	46	5075,90			
	47	5153,74			
	51	3535,40			
	52	4207,58			
	53	4841,50			
	54	5256,18			

Poznámka: všechny díly byly sušeny při teplotě 70°C po dobu 48 hodin.

Vyhodnocení: Požadovaná trhací síla, kterou by měl kvalitně zalisovaný insert vydržet je 8000 N. Výsledky této zkoušky měly být porovnány s výsledky UT (RTG) měření. Přičemž inserty, které dle nedestruktivních zkoušek splňovaly podmínku kvalitního spojení, měly také vydržet žádanou vytrhávací zátěž.

Ukázalo se, že přímé srovnání v tomto případě není možné vzhledem k tomu, že UT metodou se u použitých vzorků nedosáhlo uspokojivých výsledků. K ilustračnímu srovnání se však daly použít snímky RTG, které byly dostatečně průkazné.

Z tab. 5. je však patrné, že naměřené hodnoty vzorků ani jedné ze skupin nepřekročily požadovanou hranici 8000 N. To se týkalo i vzorků, které byly podle rentgenových snímků jednoznačně v pořádku.

Všechny naměřené hodnoty byly přibližně o 2000 ÷ 3000 N menší než ve skutečnosti měly být. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno výrobním postupem. Zatímco inserty zalisované do víka jsou vystaveny tlaku okolní hmoty (plast víka), vzorky použité při těchto testech byly zalisovány do předem připravených plastových válečků. Důsledkem nízkého vnějšího tlaku ze strany okolního materiálu se na všech takto vyrobených vzorcích snížila přitlačná ⇒ vytrhávací síla.

Závěr: Měřením bylo ověřeno, že s rostoucím průměrem díry pro insert klesá velikost vytrhávací síly, kterou vzniklý spoj snese (potvrzen závěr z kap. 3.2). A to i na úkor snížených – naměřených hodnot. Pro získání přesných (reálných) výsledků vytrhávacích zkoušek by potom bylo třeba použít, jako vzorky, inserty přímo z plastového víka motoru.

4. Diskuse výsledků

Tato práce byla zaměřena na posouzení kvality spoje mosaz x plast, vhodně zvolenou nedestruktivní metodou zkoušení. Cílem bylo navržení úspěšné kontroly vyráběných vík motorů takovým způsobem, který by umožnil určení pevnosti spoje bez nutnosti destruktivních zkoušek. V úvahu přicházelo několik zkušebních metod s jejichž pomocí bylo možné daný úkol splnit.

Základní částí této diplomové práce byla proto volba vhodné zkušební metody. Jako nejvhodnější k tomuto účelu se jevíly metody: radiografická, tomografická a ultrazvuková. Z těchto tří metod pak byla vybrána jedna, která splňovala všechna technická, konstrukční, ale i finanční kritéria a zejména pak reálnou použitelnost v praxi - jednalo se o impulsní odrazovou ultrazvukovou metodu. Z hlediska dalšího ověření snadné aplikovatelnosti této metody byla provedena řada testů, na základě nichž bylo zjištěno:

- cenová přijatelnost
- možnost 100%-ní kontroly insertů na víku
- vhodná použitelnost a aplikovatelnost
v podmínkách sériové montáže
- dostatečná produktivita

Použití této metody bylo spojeno s vyřešením několika základních principiálních problémů. Prvním úkolem bylo prověřit, zda je sledované prostředí přechodu Ms x plast, případně Ms x plast x Ms prozvučitelné, tj. zda ultrazvukové impulsy projdou oběma materiály, stejně jako rozhraním sledovaných prostředí. Prozvučitelnost spoje byla bez jakýchkoliv pochyb prokázána, i když při prvním testování reálných vzorků se zde poprvé objevil možný problém příliš *malé velikosti insertů* (sledovaná drážka o hloubce **0,6 mm**).

Druhým úkolem bylo nalézt a ověřit ukazatel pevnosti spoje kovový insert x plast. Při měření bylo zjištěno, že míra kvality zmiňovaného lisovaného spoje do velké míry souvisí s mírou zaplnění horního zápichu insertu. Zkoušky se

proto soustředily zejména na horní zápich (**H**). Z tvaru insertu je jasné že v případě uspokojivého zaplnění tohoto zápichu je i celkové přilnutí plastu k povrchu mosazné vložky dostatečné, tento předpoklad se měřením potvrdil (viz obr. 18). Předmětem kontroly se tak stal pouze horní zápich (**H**).

Dalším úkolem bylo navrhnout vhodný způsob detekce zaplnění drážky insertu. V úvahu přicházely dva způsoby UT měření, buďto s využitím výšky echa rozhraní **Ms x Plast** a nebo polohy odrazového echa po průchodu plastem (tj. **Plast x Ms**).

Jako jednodušší se jevila detekce odrazového echa, na rozhraní **Ms** a plastu, vycházející z jeho dosažené výšky. Předpokladem bylo, že rozdíl mezi zaplněnou a nezaplněnou drážkou insertu se projeví (mimo jiné) změnou výšky získaného echa. První teoretické výpočty však ukázaly, že v tomto případě patrně nebude možné tento způsob použít. Rozdíl součinitele odrazu v obou případech byl totiž tak malý, že se velikost amplitud prakticky nelišila a pokud ano, bylo to v rámci tolerované odchylky. Zjištěné závěry potvrdily i výsledky praktických měření, a proto lze konstatovat, že toto kritérium je pro hodnocení zaplnění drážky *nevhodné*.

Druhý způsob detekce využívá vytvoření odrazového echa, konkrétně echa od spodní hrany drážky. Lze tak vytvořit podmínky pro získání 1 bitové informace z pohledu pevnosti spoje. Pokud se echo objeví v žádané poloze, je zápich zaplněn, v opačném případě nikoliv, nezaplněný zápich neumožní průchod UZ k hraně drážky, takže se odrazové echo nevytvoří (viz kap. 3.2.1). Zde může nastat jediný závažnější problém, a to je interference indikací jednotlivých rozhraní. Z výsledků prvních zkoušek, stejně jako z teoretických propočtů však jasně vyplynulo, že z hlediska tloušťky kontrolovaných ploch by měla být podmínka zamezení nežádoucí interference splněna (kap. 3.2.2.1-2).

Z hlediska postupu při kontrole drážky bylo vhodné prověřit symetrii zaplnění, ta mohla celý postup značně usnadnit, stačilo by měřit pouze několik radiálních řezů. Při tomto měření bylo s pomocí RTG metody zjištěno, že drážky jsou zaplněny (případně nezaplněny) rovnoměrně a to po celém svém obvodu.

Provedené měření dokázalo, že *zaplnění drážky je symetrická funkce* a proto bylo možné celý postup navrhované kontroly zjednodušit. Na místo plánované kontroly drážky v každém bodě (po obvodu), stačí zkontrolovat jen několik vybraných bodů-řezů (nejlépe do kříže - obr. 31, kap. 3.2.2).

Po předešlých testech se tedy mohlo přejít přímo k měření zalisovaných insertů.

Bylo navrženo a zkonstruováno vhodné měřicí zařízení v podobě pětiosého manipulátoru, imersní vany, držáku sondy a řídicího počítače. Dále následoval výběr vhodné sondy, vzhledem k velikosti drážky byla zvolena imersní sonda s bodovou fokusací SLIH10-5 SF25 (viz kap. 3.2.2.4).

Veškeré toto zařízení si však v průběhu praktických měření vyžádalo ještě celou řadu větších či menších úprav.

Samotné měření se dá rozdělit do několika částí, dle původního záměru měly být dodané vzorky podrobeny UT zkouškám. Získané výsledky pak měly být porovnány s výsledky trhacích zkoušek (dosavadní destruktivní zkoušení) a pro kontrolu ještě se snímkem RTG.

Při počátečním měření I. prokázal rozbor A- i B-zobrazení, že jasná detekce signálů bude vzhledem k velmi malým rozměrům odrazné plochy drážky značně ztížená. V této fázi se nepodařilo spolehlivě určit ani rozdíly mezi vzorky v extrémních případech (ať už stoprocentního nebo nulového) zaplnění. Dalšími problémy byly značný šum, poměrně velká šířka svazku v ohnisku a také tzv. studený spoj, tj. případ, kdy se zaplněná drážka jeví při UT měření jako nezaplněná (kontrola - RTG snímky).

Po shrnutí prvních měření bylo zřejmé, že výsledky nejsou příliš průkazné a že si vyřešení vzniklých problémů vyžádá ještě další podrobnější zkoušení. Nejasnost získaných výsledků je patrná z počítačového vyhodnocení v příloze 6.

Proto byly vzorky podrobeny opakovanému přezkoušení, tentokrát s pomocí přístroje firmy KRAUTKRÄMER - USIP11 (měření II., kap. 3.2.4). V tomto případě byl z velké části odstraněn šum, který komplikoval a v některých případech zcela znemožňoval vyhodnocování signálů, a to s pomocí přídavného stínění.

U klasických insertů z původních skupin $10,8 \div 11,2$ se zobrazená echa ani v tomto případě nepodařilo spolehlivě rozlišit, proto se měření II. soustředilo pouze na jednoznačné identifikování obou extrémů, tj. jak úplně zaplněné tak zcela nezaplněné drážky. K tomuto účelu bylo připraveno několik speciálních (nezalitých) insertů se širokou drážkou, na kterých se podařilo UT měřeními potvrdit předpokládaná zobrazení ech dle teoretického předpokladu.

Zásadním problémem zůstal malý rozměr měřené drážky. Pro jasné zobrazení ech u běžného insertu by bylo třeba speciální sondy s co možná nejmenším průměrem svazku v ohnisku (0,3 mm). Konstrukce takové sondy by byla po finanční stránce velice náročná, ne však nereálná. Nejdříve však bylo třeba ověřit, že tato investice nebude zbytečná. Proto byla provedena následující simulace.

Jednalo se o měření III. (kap. 3.2.5), které bylo provedeno na sérii insertů zvláště upravených a zalisovaných s použitím klasické výrobní technologie (jejich drážka byla rozšířena až o 100%).

Na rozdíl od předchozích měření, kdy superponovaná echa nebylo možno správně interpretovat a proto nebylo možné na zalitých insertech cokoli detekovat, při těchto zkouškách se echa objevovala zřetelněji a jejich rozlišitelnost byla snadnější. Jasněji se jevil i doposud problematický odraz od rozhodující, spodní hrany. To vše ovšem pouze za podmínky značně velkého zesílení (~ 60 dB).

Další fází těchto zkoušek mělo být porovnání výsledků destruktivního a nedestruktivního zkoušení. Ukázalo se však, že přesné srovnání nebude možné vzhledem k povaze dodaných vzorků. Výsledky získané vytrháváním insertů *neodpovídaly reálným hodnotám.*

Měření bylo patrně zkresleno výrobním postupem testovaných vzorků. Ty nebyly vyráběny standardním způsobem, nýbrž byly zalisovány do předem připravených plastových válečků. Nepůsobil zde tak tlak okolní hmoty, a proto byly naměřené hodnoty výrazně nižší (o více než 50% - tab. 5). Pro průběh dalších zkoušek bude vhodné použít inserty přímo z motorového víka, aby byly zachovány všechny podmínky, které se podílí na vlastnostech zalitých vzorků. Nicméně *bylo prokázáno že míra zaplnění horního zápichu je funkcí pevnosti.*

Pro celkovou kontrolu a pro ověření funkčnosti UT metody bylo provedeno srovnání získaných výsledků se snímky RTG.

První měření nebyla příliš průkazná (viz příloha 7., 9.), proto bylo možné vzájemnou kontrolu provést až při měření III. (viz příloha 8., 10.). Zde výsledné *porovnání prokázalo realizovatelnost testované ultrazvukové metody* v praxi, tj. při kontrole zalitých insertů.

Při řešení zadaného problému navrhovanou UT metodou se vyskytla celá řada komplikací. Nejpodstatnější z nich je **malý rozměr sledované drážky**, přičemž to by měla vyřešit vhodná fokusovaná sonda. Bylo totiž prokázáno, že pokud je šířka svazku menší než velikost drážky, detekce se výrazně zlepší, to znamená lepší interpretovatelnost. Dalším závažným problémem je omezující vliv vzduchové mezery v drážce na využitelné výsledky měření, při výskytu tohoto jevu se totiž UT metoda nedá použít (přičemž tento stav nelze předvídat). Takové vzorky by musely být podrobeny dalšímu a to destruktivnímu zkoušení. Některé nejasné výsledky jsou patrně způsobeny neúplným zaplněním drážky plastem. Vzorky s výrazně roztřepenými echy pak mohou vzniknout možným rozbitím signálu v prostoru mezi mosazí a plastem. Tyto problémy bude třeba ještě dořešit.

Získané výsledky je třeba brát zatím jako předběžné. Bude zapotřebí ještě dalších zkoušek a měření s pomocí speciální sondy a s větším počtem vzorků na kterých by bylo vhodné aplikovat postupy navržené a uvedené v této práci.

5. Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo navrhnout nedestruktivní kontrolu vytrhávací síly upevňovacích insertů vyráběných vík motorů, takový způsobem, aby se nahradily jejich destruktivní zkoušky. Což znamenalo nalézt a ověřit ukazatel pevnosti spojení kovový insert x plast, který by umožňoval nedestruktivní určení pevnosti spoje (bez nutnosti dalších destruktivních zkoušek), a to s pomocí vhodné měřící metody.

Veškeré dosavadní práce a prováděné zkoušky zatím prokázaly:

1. Nejvhodnější měřící metoda pro řešení daného problému je impulsní odrazová ultrazvuková metoda.
2. Prostředí přechodu Ms x plast x Ms umožňuje dostatečný přenos ultrazvukové energie, proto lze jednoznačně prohlásit, že prostředí je prozvučitelné (kap. 3.2.2.1).
3. a) Z technického řešení vyplývá, že je třeba měřit kvalitu, resp. kvalitativní znak každého insertu, tzv. ukazatel pevnosti spoje a tím byl zvolen horní zápich (**H**) (obr. 18).
b) Provedené zkoušky prokázaly, že sledovaný problém lze omezit pouze na zjištění, zda horní zápich je vyplněn plastem nebo ne, případně do jaké míry je zápich zaplněn - čímž se celá kontrola značně zjednoduší.
4. Detekce zaplnění zápichu byla prováděna nejvhodnějším možným způsobem, a to na základě polohy odrazového echa.
5. Zaplnění drážky je z větší části symetrické (neobjevují se nehomogenity typu vícečetná bublina apod.), proto bylo místo kontroly celé drážky navrženo, měřit míru zaplnění pouze v několika sečnách (3x přes celý průměr - tj 6 měřených míst, obr. 26).
6. Byl potvrzen původní teoretický předpoklad měření při použití UT metody (lze identifikovat rozhodující odraz od spodní plochy drážky).
7. Zaplnění insertu je vždy orientováno zespodu nahoru, to znamená, že nenaplnění drážky je ze strany vnějšího povrchu víka.

8. Zvětšováním průměru otvoru pro zalisování insertu klesá vytrhávací síla a zároveň se snižuje míra zaplnění drážky insertu (snižuje se celková pevnost spoje, kap. 3.2), tento jev může být také způsoben nedostatečným ohřevem insertu před nalisováním.
9. První vzorky dodané firmou Robert Bosch s.r.o. byly uměle vyrobeny a vykazovaly pouze cca 50% hodnoty standardní vytrhávací síly, což mohlo být způsobeno okrajovými podmínkami (menší objem natavovaného plastu během imitace procesu vkládání insertu, způsob imitace otvoru pro insert apod.).
10. Podle vyjádření pracovníků zkušebny neexistuje prozatím sledovaná závislost mezi kvalitou jednoho insertu a kvalitou ostatních insertů na víku, každý insert se „chová“ (opotřebovává) separátním, individuálním způsobem - tento fakt byl dosavadním měřením potvrzen, neboť i vzorky ze stejných skupin vykazovaly rozdílné výsledky.

Problémy řešení:

1. Provedené experimenty ukazují vysoké požadavky na:
 - a) mechaniku posuvu sondy při měření (vyhovující typ manipulátoru-se zvýšenou tuhostí)
 - b) fokusaci sondy - lze předpokládat zlepšení interpretace výsledků po použití ještě vyššího stupně fokusace
 - c) vyšší frekvence, resp. vyšší tlumení měniče (užší signál)
2. Kritérium přípustnosti - pokud se neidentifikuje vzduchová mezera, je spolehlivost měřicí metody vyhovující.
3. Ultrazvukem nelze při prezenci vzduchové mezery měřit míru zaplnění drážky pod vzduchovou mezerou, což znamená, že při nálezu (indikaci) vzduchové mezery by muselo dojít k destruktivnímu odzkoušení víka - ověření velikosti vytrhávací síly.
4. Existuje předpoklad, že po nastavení prahu bude metodika zaručovat pouze ověření, zda vytrhávací síla je větší nebo menší než předem stanovená hodnota.

5. Finanční náročnost realizace zkušebního standu pro zkoušení 10 vík denně - cca 1,5 ÷ 2 mil. Kč (celkové ekonomické hodnocení - příloha 13.).

Nutné práce pro další postup:

1. Zvýšit počet kusů zkoušených vzorků a ověřit závislost: síla x zaplnění (potvrdit zda je dostatečná vytrhávací síla jednoznačně určena zaplněním drážky insertu)
 - a) ověření RT na umělých insertech a následné vizuální hodnocení
 - b) dlouhodobé ověřování na vytrhávaných insertech z reálných vík - zjišťovat vytrhávací sílu ihned po výrobě a potom i v různém časovém odstupu (závislost pevnosti spoje versus čas-řádově měsíce)
2. Nutnost zlepšit interpretaci UT indikací s pomocí speciální fokusované sondy.
3. Ověřit na dostatečném množství insertů detekci drážky (použít vzorky dle bodu 1.).
4. Zahájit ověřování v laboratorních podmínkách - UT detekce versus vytrhávací síla na reálných kusech víka.

Na závěr je třeba říci, že i přes zmiňované komplikace se zvolená impulsní odrazová ultrazvuková metoda jeví jako vhodná k detekci zaplnění drážky mosazné závitové vložky plastem a tím i k určení pevnosti sledovaného spoje. Její využití v praxi je reálné a z finančního hlediska přijatelné (maximální profit při nahrazení destruktivního ověřování nedestruktivním).

Navrhované řešení lze na základě dosud provedených operací pokládat za realizovatelné, jsou však nutné ještě další vývojové a ověřovací práce.

6. Použitá literatura

- [1] OBRAZ, J. Zkoušení materiálu ultrazvukem. Praha : SNTL 1989.
- [2] OBRAZ, J. Ultrazvuk v měřicí technice. Praha : SNTL 1984.
- [3] KVAPIL, J. Diplomová práce, Vývoj nedestruktivních zkoušek kontroly kvality montážního spojení mosazných závitových vložek v plastu (PA). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA v Plzni, Fakulta strojní, 2000.
- [4] DUBENSKÝ, R., MINAŘÍK, V., ČERMÁK, F. Defektoskopie – nedestruktivní zkoušení. Praha : ČVUT, 1992.
- [5] KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H. Ultrasonic trsting of materials. Berlin, Springer Verlag 1977.
- [6] KRONAWETTEROVÁ, P. Diplomová práce, Nedestruktivní a destruktivní zkoušení lepených spojů kompozitních materiálů. TU v Liberci, Fakulta strojní, 2002.
- [7] MÍŠEK, B., PTÁČEK, L. Zkoušení materiálů a výrobků bez porušení. Praha: SNTL 1973.
- [8] KLÍMA, M., a kol. Zpracování obrazové informace. Praha : ČVUT 1996.
- [9] VAINBERG, E. I. Industrial x-ray tomographs of the bt-series. In NDT Bulletin, 4/1996.
- [10] VĚCHET, M., KESL, J., SPIKA, L., EDER, V. Defektoskopie v otázkách a odpovědích. Praha : SNTL 1989.
- [11] www.atg.cz
- [12] prezentační materiály firmy ATG s.r.o. Praha

7. Přílohová část

- Příloha 1** - Ultrazvukové přístroje
- Příloha 2** - Sonda SLIH 10
- Příloha 3** - Manipulátory
- Příloha 4** - Rentgenový přístroj
- Příloha 5** - Kalibrace
- Příloha 6** - Výsledky B-zobrazení
- Příloha 7** - Výsledky A-zobrazení
- Příloha 8** - Výsledky měření III.
- Příloha 9** - Výsledky prvních RTG měření
- Příloha 10** - Výsledky druhých RTG měření
- Příloha 11** - Výkres mosazné závitové vložky
- Příloha 12** - Destruktivní zkoušky
- Příloha 13** - Ekonomické hodnocení



Příloha 1.

○ Ultrazvukový přístroj firmy KRAUTKRÄMER typ USIP 11

Měřicí zařízení: ultrazvukový přístroj firmy KRAUTKRÄMER typ USIP 11. Je to odrazový impulsový přístroj (tzv. impulsový defektoskop), používající zobrazení A.

- Frekvenční rozsah – 0,5 až 25 MHz
- Citlivost – při zkušební frekvenci 2 MHz sahá echo od náhradní vady 2 mm v hloubce 100 mm v měrce z jemnozrnné oceli do ½ stínítka.
- Rozlišovací schopnost – 0,1 mm
- Mrtvé pásmo – zjistitelná vada velikosti 1 mm v hloubce 5 mm v oceli při frekvenci 4 MHz
- Dynamický rozsah – 60 dB
- Zkušební rozsah – 5 mm až 15 000 mm oceli
- Opakovací frekvence – 100 až 1000 Hz
- Přesnost atenuátoru (zeslabovače) – < 5 % (< 0,1 dB)
- Nastavení rychlosti šíření UT – 1000 až 6500 m·s⁻¹ (po 10 m·s⁻¹)

○ Ultrazvuková PC deska USPC 3100 od firmy SOCOMATE

Měřicí zařízení: ultrazvuková PC deska USPC 3100 od firmy SOCOMATE

- Dráha měření – 22 mm
- Pulser: frequency – 10,00 MHz
- Amplitude – 125V
- Offset (us-mikrosec) – 1,28
- PRF(us) – 300
- Global freq – 3,33 kHz
- Reciever: gain1 – 34,9dB
- A-Scan velocity – 4200m/s ; range 15,00

Příloha 2.

TRANSDUCER



- Sound Solutions -

CERTIFICATE

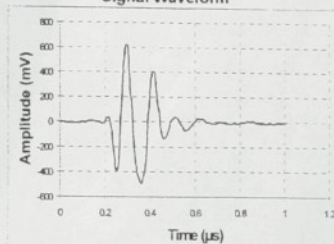
Date stamp

12 JUL 2002

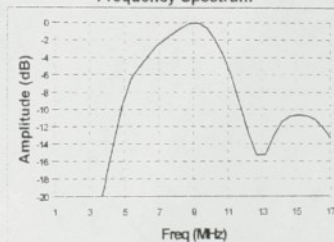
SLIH10-5 SF25

Type of probe Immersion Probe
 Serial number 228/01
 Frequency $\pm 10\%$ (MHz) 10
 Crystal shape Circular
 Crystal size (mm) 5
 Crystal material Lead Metaniobate
 Probe dimensions (mm) $\varnothing 16 \times 39$
 Probe weight (g) 40
 Connector type UHF
 Connector position Top
 Focal type Spherical
 Focal length (mm) 25

Signal Waveform



Frequency Spectrum



Test Results

Peak frequency	9.28 MHz	Pulse duration	0.34 μ s	-6dB upper	11.20 MHz
Centre frequency	7.90 MHz	Peak to peak voltage	1.1 V	-6dB lower	5.57 MHz
				Bandwidth	5.62 MHz

Test Conditions

Instrument used Masterscan 330
 Pulse width 50 ns
 Pulse impedance 50 Ohms
 Inspector name David Waller



INVESTOR IN PEOPLE

Dickens Road, Old Wolverton, Milton Keynes, MK12 5QQ, England.

Registered in England No. 1961000

Tel: + 44 (0) 1908 316345

Web: www.sonatest-plc.com

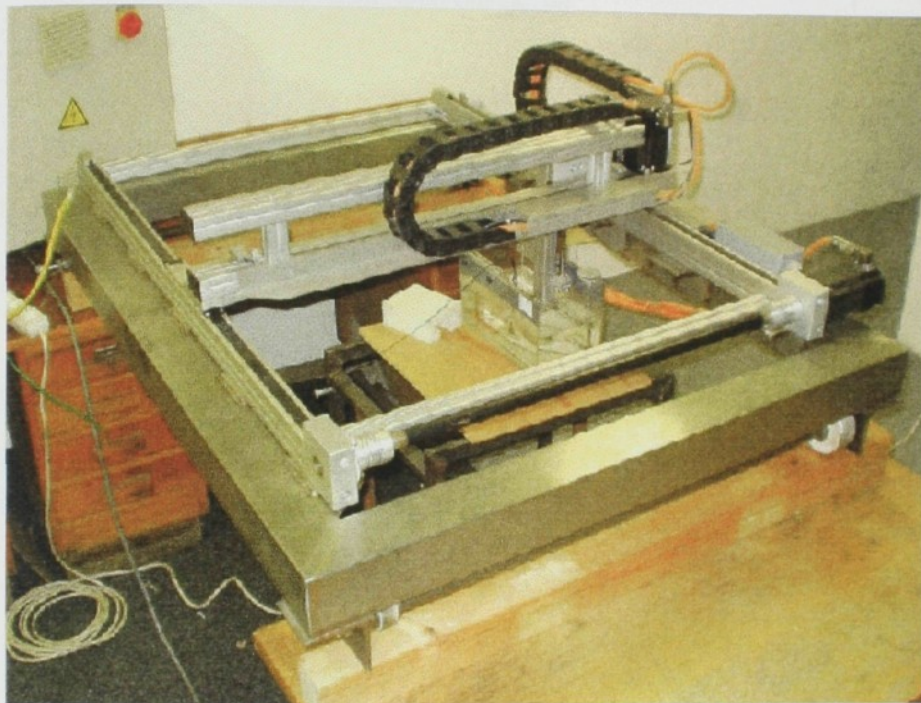
Fax: + 44 (0) 1908 321323

ISO Registered

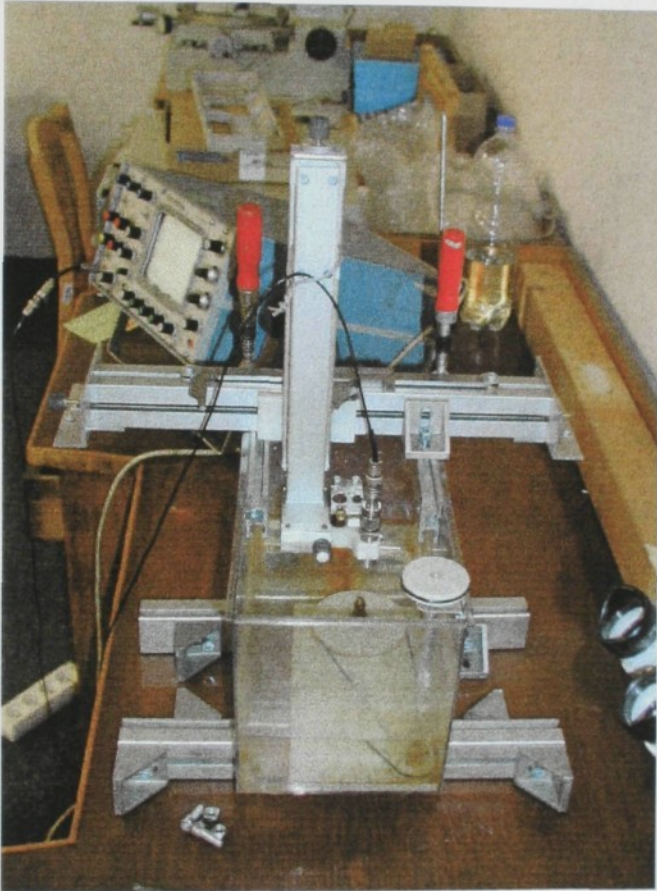
Certificate
No. Q5056

Příloha 3.

○ Použité manipulátory



Obr. 3.1. Použitý manipulátor prvního typu, připojený k ultrazvukové PC desce USPC 3100



Obr. 3.2. Manipulátor druhého typu, připojený k ultrazvukovému přístroji USIP 11

Příloha 4.

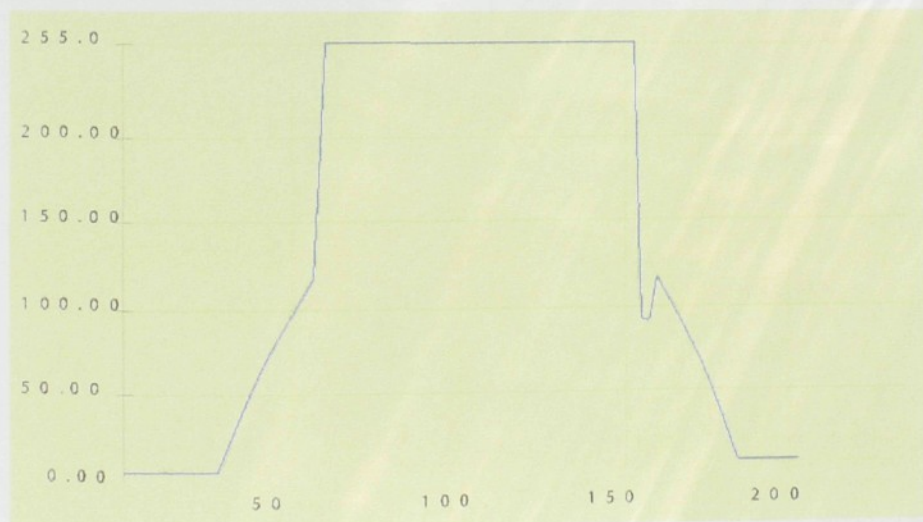
○ Rentgenový přístroj Philips MG 161 L

Parametry přístroje:

- Typ – Philips MG 161 L
- Napětí – 40 KV
- Expozice – 1,5 min
- Vzdálenost ohniska – 700 mm
- Film – D7 AGFA
- Rozměr – 5x40

○ Rentgenogram

Zkušebně byl také vyhotoven rentgenogram insertu 1 ze skupiny 10,8 :

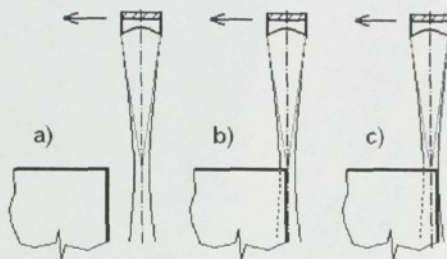


Obr. 4.1. Hustotní řez rentgenogramem v místě zápichu, levá strana bez mezery (zaplněný zápich), pravá strana s mezerou (nezaplněný zápich).

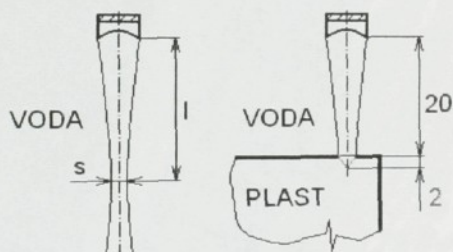
Příloha 5.

○ Kalibrace

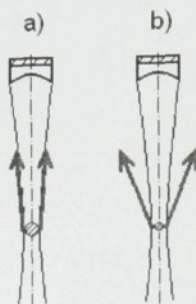
Cílem bylo, sladit nastavení UT přístroje a sondy SLIH10-5 SF25 s polohou manipulátoru tak, aby svazek ultrazvuku začínal přesně na hraně insertu.



Obr. 5.1. Nájezd sondy na vzorek.



Obr. 5.2. Délka ohniska v různém prostředí.



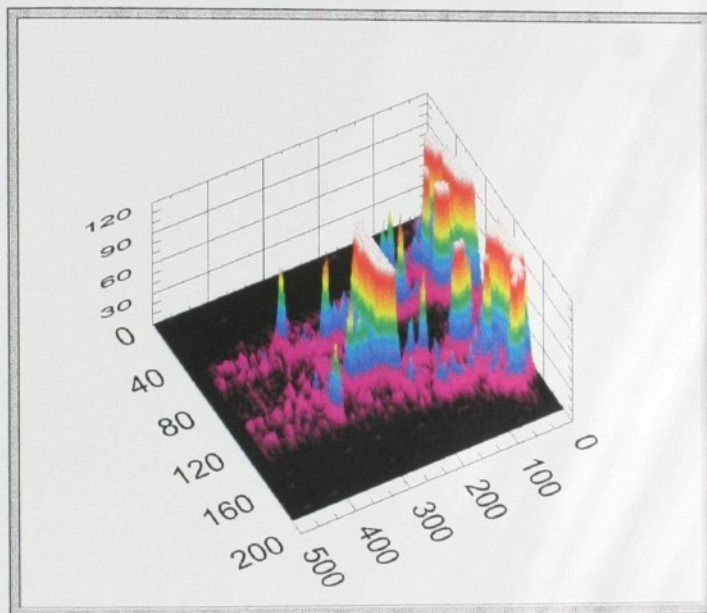
Obr. 5.3. Měření šířky svazku
v ohnisku

Příloha 6.

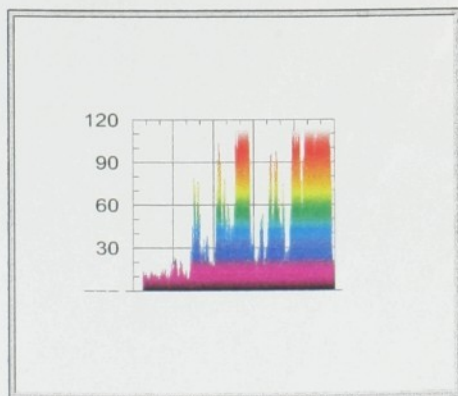
- **Výsledky UT měření**, konkrétně měření I. (kap. 3.2.3)

B-zobrazení: (při standardním zesílení 34,9 dB)

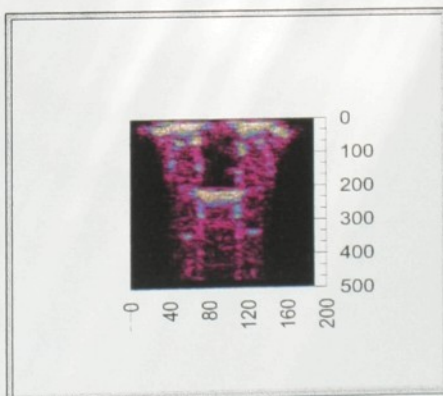
Skupina 10,8



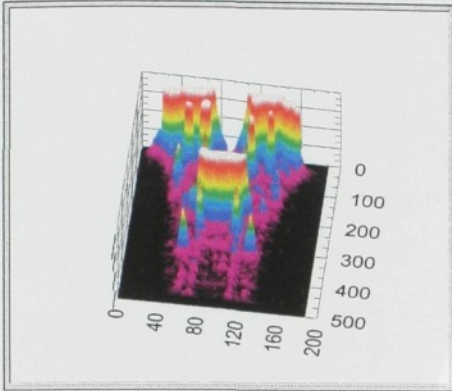
Obr. 6.1. Vzorek 1, pohled 1, natočení 0°



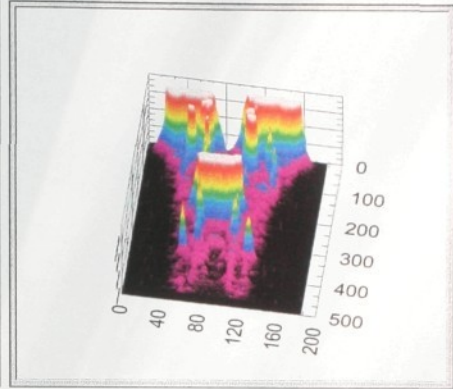
Obr. 6.2. Vzorek 1, pohled 2, (0°)



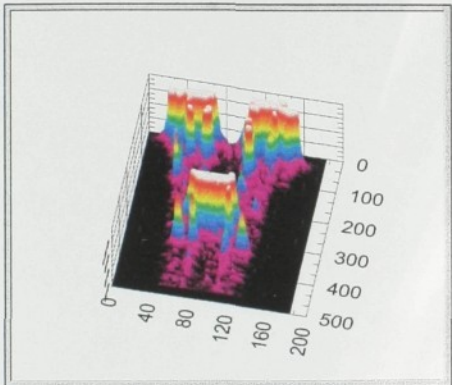
Obr. 6.3. Vzorek 1, pohled 3, (0°)



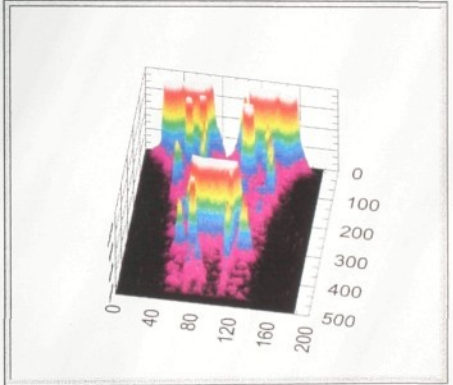
Obr. 6.4. Vzorek 1, pohled 4, natočení 0°



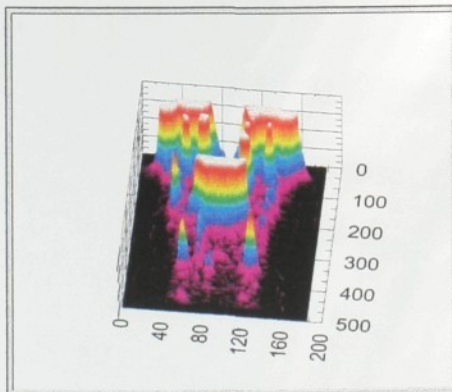
Obr. 6.5. Vzorek 1, pohled 5, natočení 90°



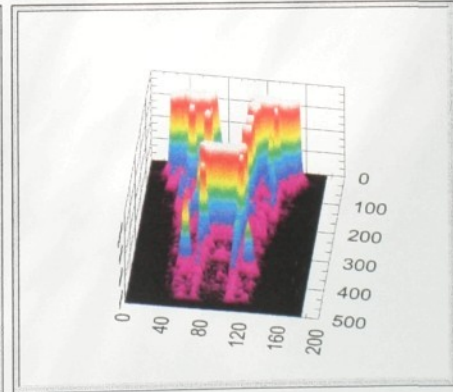
Obr. 6.6. Vzorek 2, natočení 0°



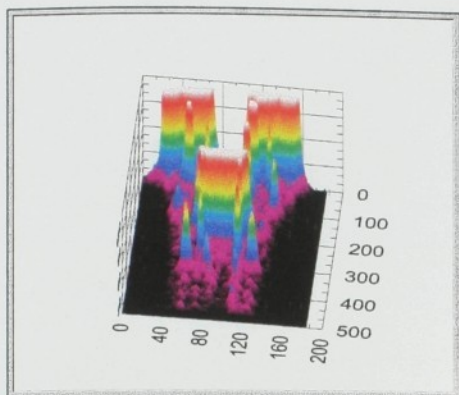
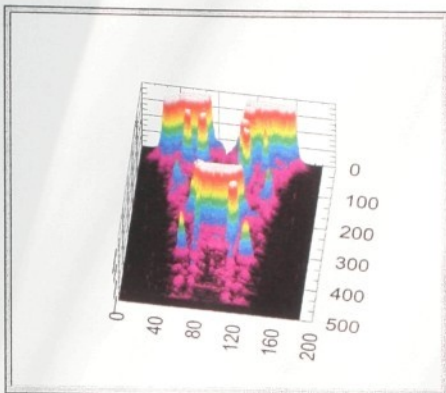
Obr. 6.7. Vzorek 2, natočení 90°



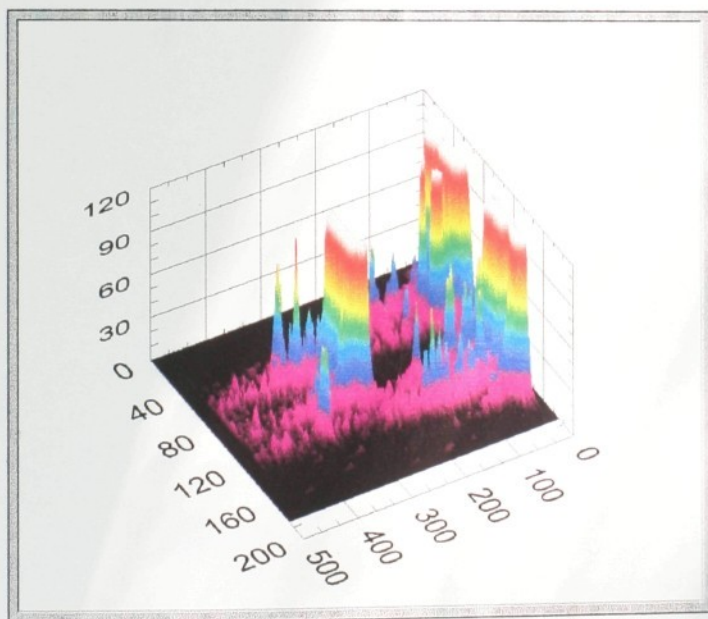
Obr. 6.8. Vzorek 4, natočení 0°

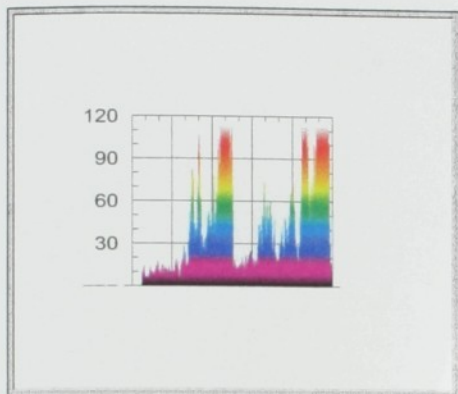
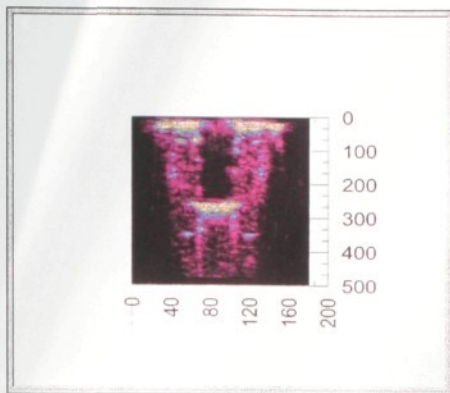
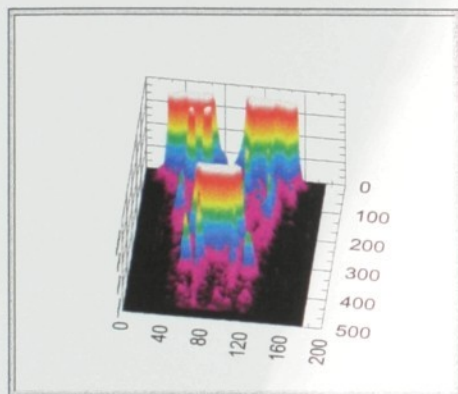
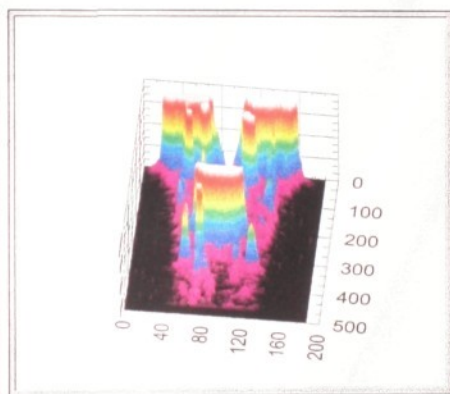
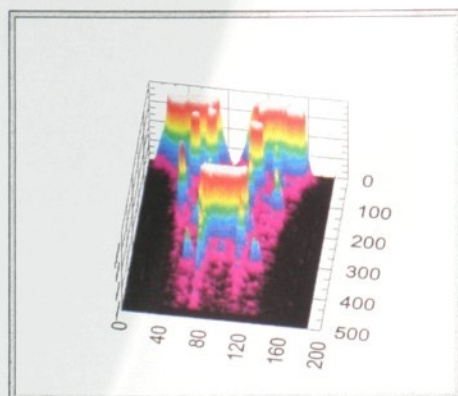
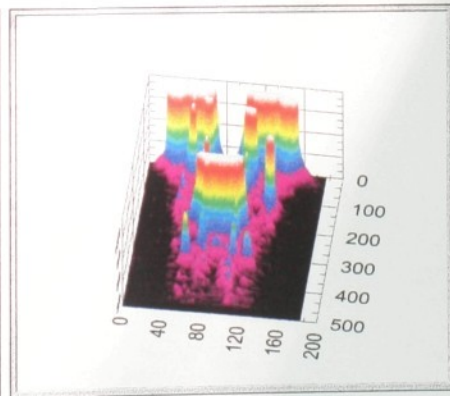


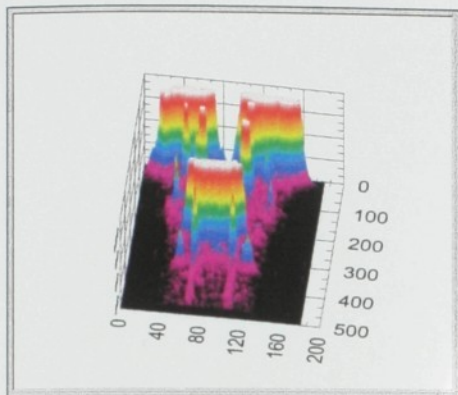
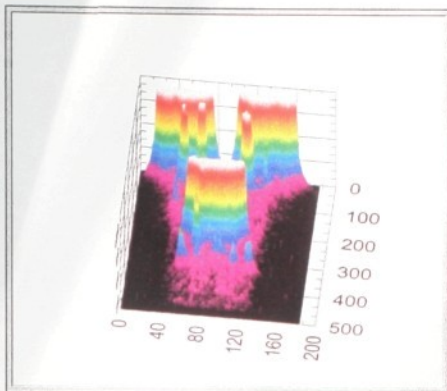
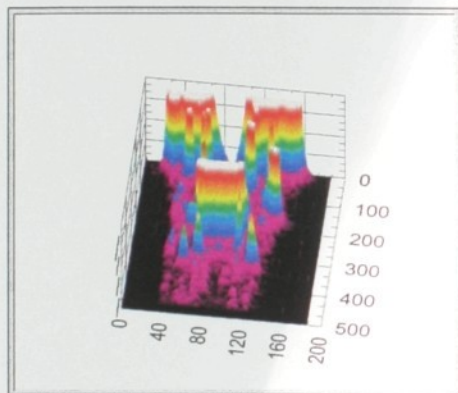
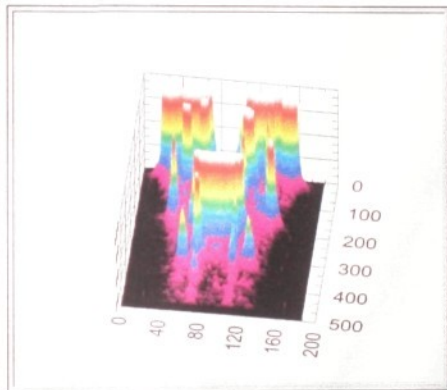
Obr. 6.9. Vzorek 4, natočení 90°

Obr. 6.10. Vzorek 5, natočení 0° Obr. 6.11. Vzorek 5, natočení 90°

Skupina 11,2

Obr. 6.12. Vzorek 73, pohled 1, natočení 0°

Obr. 6.13. Vzorek 73, pohled 2, (0°)Obr. 6.14. Vzorek 73, pohled 3, (0°)Obr. 6.15. Vzorek 73, pohled 4, (0°)Obr. 6.16. Vzorek 73, pohled 5, (90°)Obr. 6.17. Vzorek 76, natočení 0° Obr. 6.18. Vzorek 76, natočení 90°

Obr. 6.19. Vzorek 77, natočení 0° Obr. 6.20. Vzorek 77, natočení 90° Obr. 6.21. Vzorek 78, natočení 0° Obr. 6.22. Vzorek 78, natočení 90°

Tyto grafy byly počítačově upraveny (rozřezány), čímž vznikly A-zobrazení v místě sledované oblasti – tj. v místě drážky. Takto získané výsledky bylo možné dále zpracovat a vyhodnotit (viz. příloha 7.).

Příloha 7.

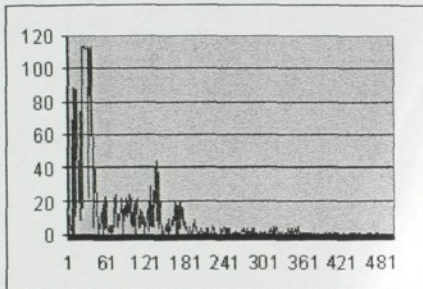
Každé B-zobrazení příslušného vzorku bylo počítačově upraveno, čímž vznikly vždy tři řezy (po 0,2 mm) v předpokládaném místě výskytu detekované drážky {1}. Každý z těchto řezů je doplněn zrcadlovým, osově souměrným řezem {3} - kontrola drážky v další sledované oblasti (dle obr.31 se jedná o sledované oblasti {1; 3}).

Skupina 10,8

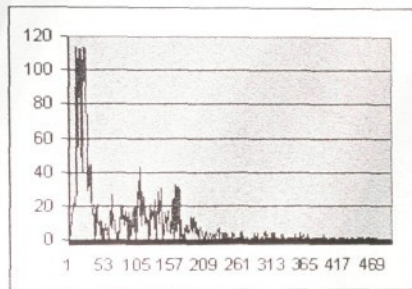
{1}

{3}

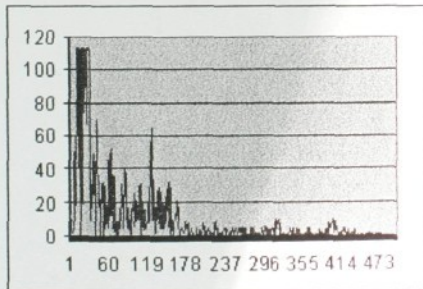
Vzorek 1 (natočení - 0°)



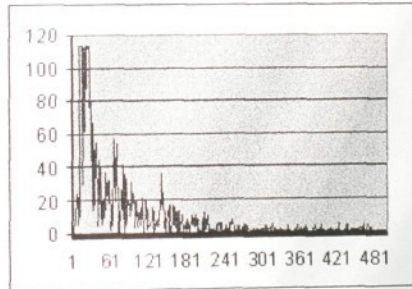
Obr. 7.1. Řez 1-1



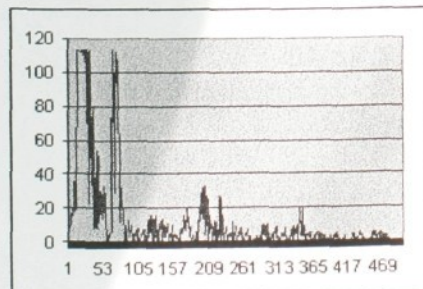
Obr. 7.2. Řez 1-4



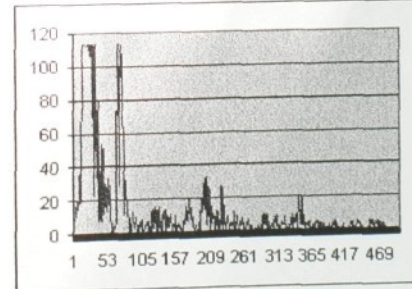
Obr. 7.3. Řez 1-2



Obr. 7.4. Řez 1-5

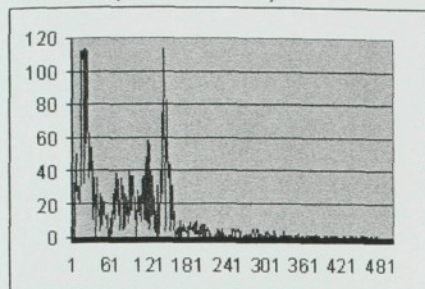


Obr. 7.5. Řez 1-3



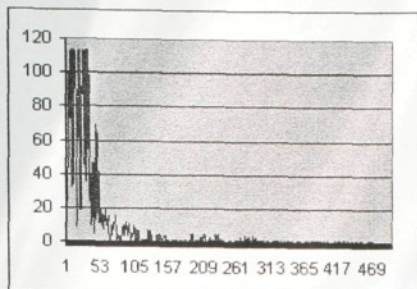
Obr. 7.6. Řez 1-6

Vzorek 2 (natočení - 0°) {1}

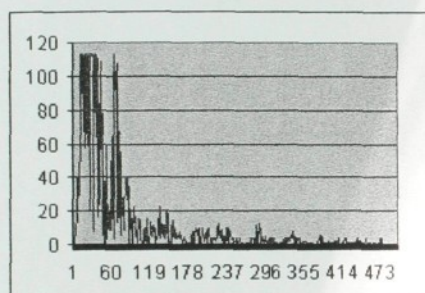


Obr. 7.7. Řez 2-1

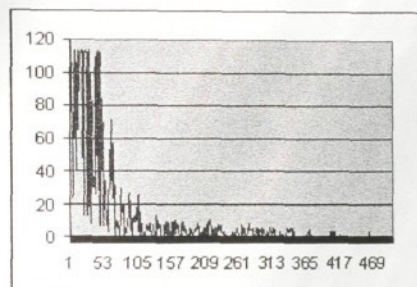
{3}



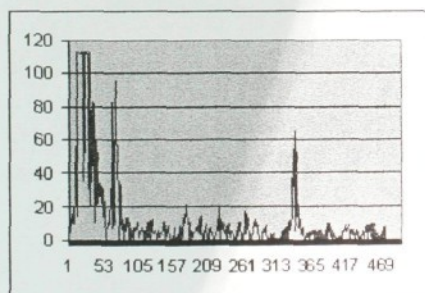
Obr. 7.8. Řez 2-4



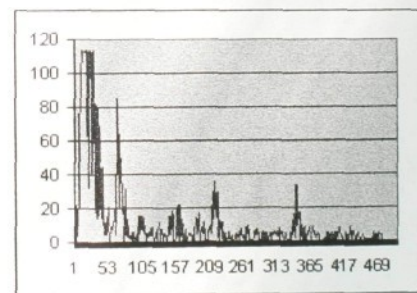
Obr. 7.9. Řez 2-2



Obr. 7.10. Řez 2-5

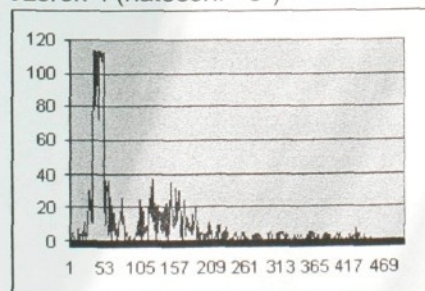


Obr. 7.11. Řez 2-3

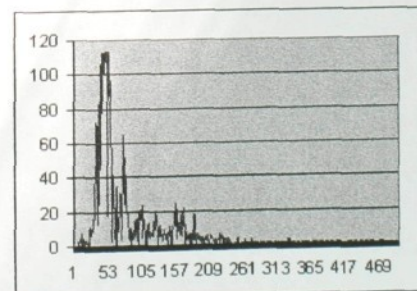


Obr. 7.12. Řez 2-6

Vzorek 4 (natočení - 0°)



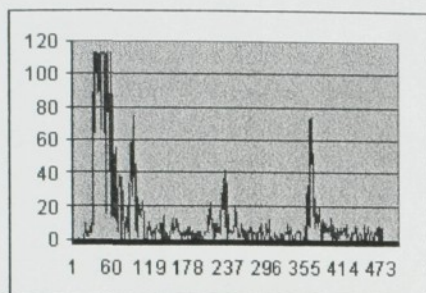
Obr. 7.13. Řez 4-1



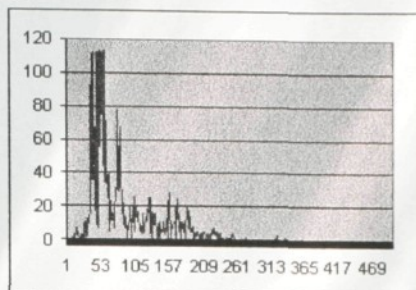
Obr. 7.14. Řez 4-4

{1}

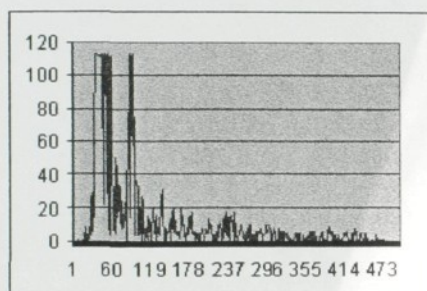
{3}



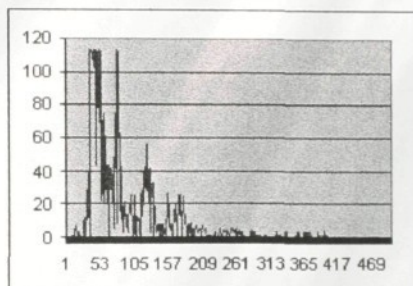
Obr. 7.15. Řez 4-2



Obr. 7.16. Řez 4-5

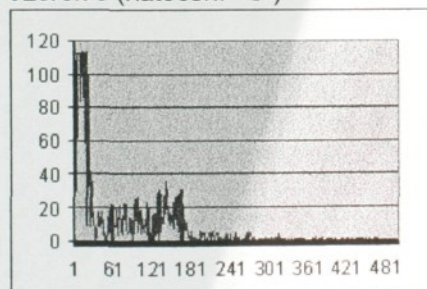


Obr. 7.17. Řez 4-3

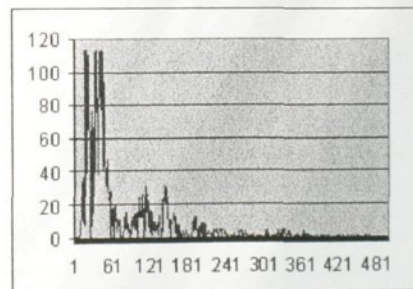


Obr. 7.18. Řez 4-6

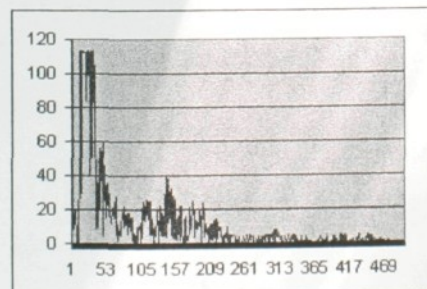
Vzorek 5 (natočení - 0°)



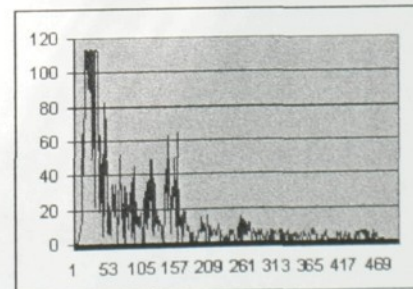
Obr. 7.19. Řez 5-1



Obr. 7.20. Řez 5-4



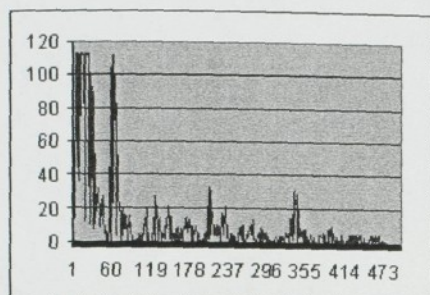
Obr. 7.21. Řez 5-2



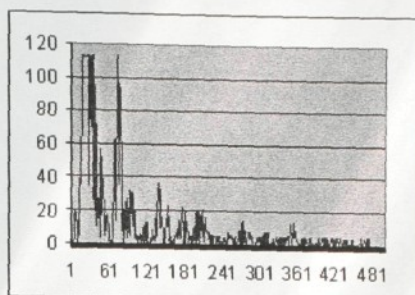
Obr. 7.22. Řez 5-5

{1}

{3}



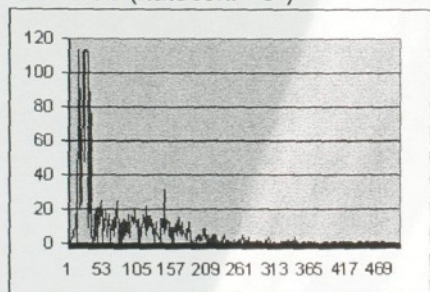
Obr. 7.23. Řez 5-3



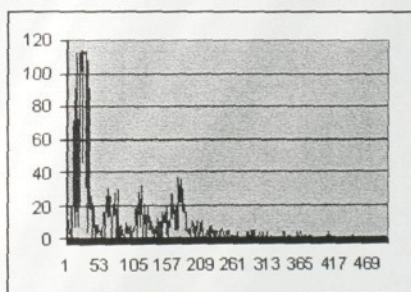
Obr. 7.24. Řez 5-6

Skupina 11,2

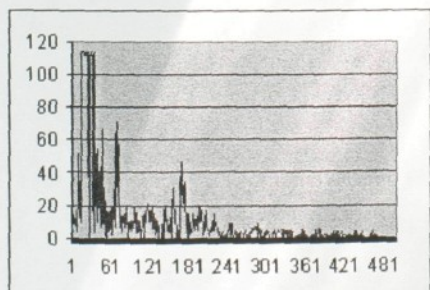
Vzorek 73 (natočení - 0°)



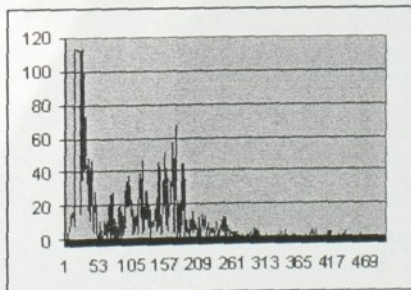
Obr. 7.25. Řez 73-1



Obr. 7.26. Řez 73-4



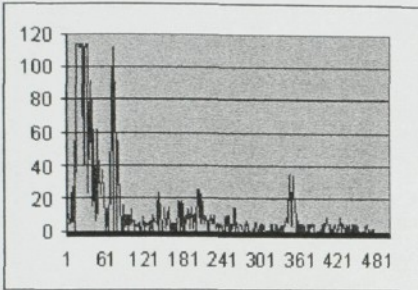
Obr. 7.27. Řez 73-2



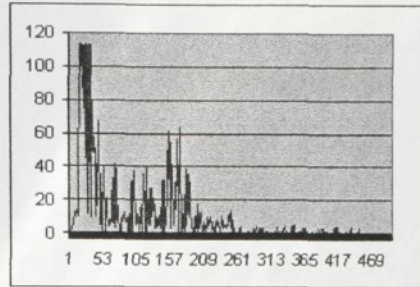
Obr. 7.28. Řez 73-5

{1}

{3}

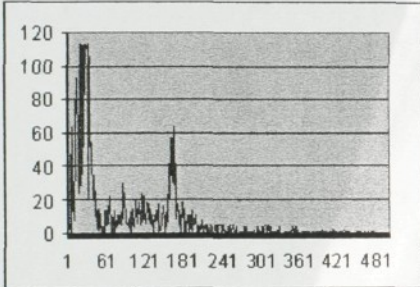


Obr. 7.29. Řez 73-3

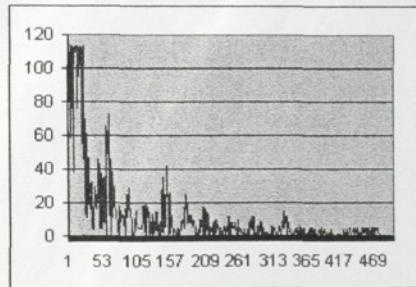


Obr. 7.30. Řez 73-6

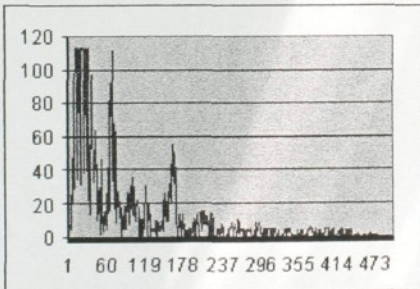
Vzorek 76 (natočení - 0°)



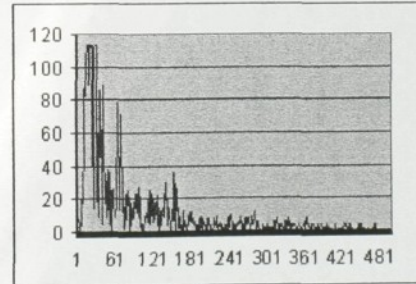
Obr. 7.31. Řez 76-1



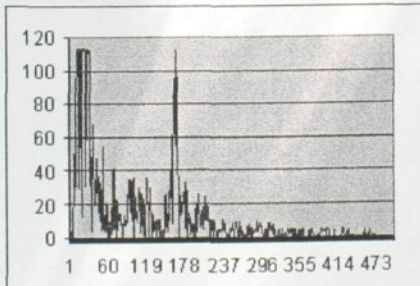
Obr. 7.32. Řez 76-4



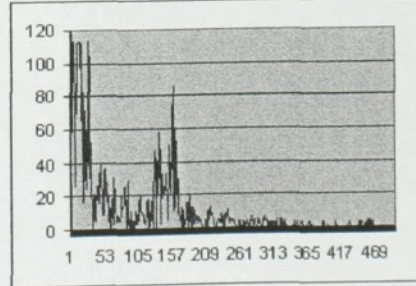
Obr. 7.33. Řez 76-2



Obr. 7.34. Řez 76-5



Obr. 7.35. Řez 76-3

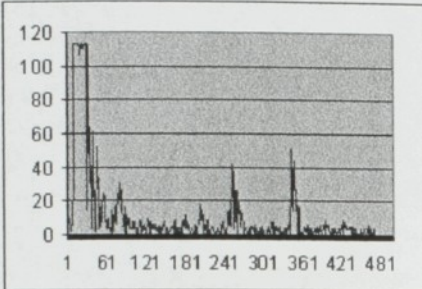


Obr. 7.36. Řez 76-6

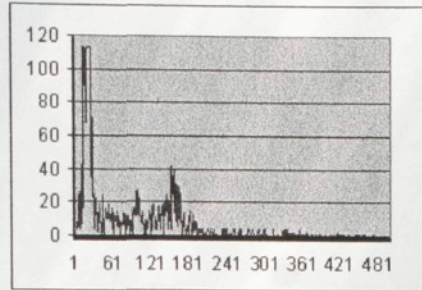
{1}

{3}

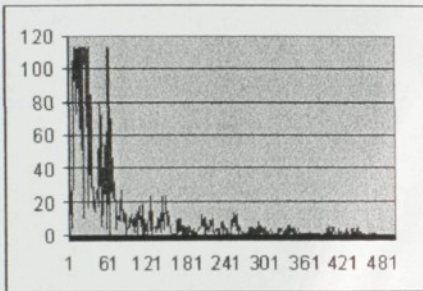
Vzorek 77 (natočení - 0°)



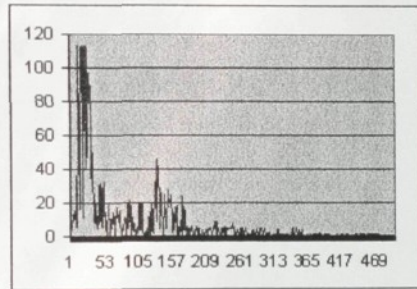
Obr. 7.37. Řez 77-1



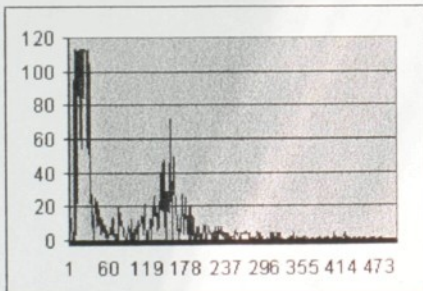
Obr. 7.38. Řez 77-4



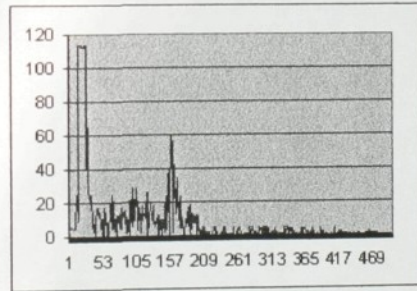
Obr. 7.39. Řez 77-2



Obr. 7.40. Řez 77-5

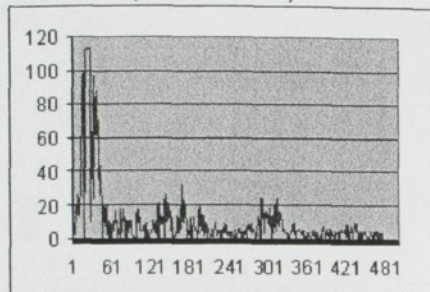


Obr. 7.41. Řez 77-3



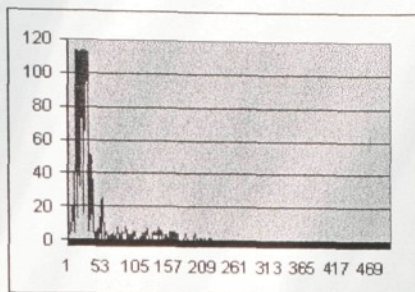
Obr. 7.42. Řez 77-6

Vzorek 78 (natočení - 0°) {1}

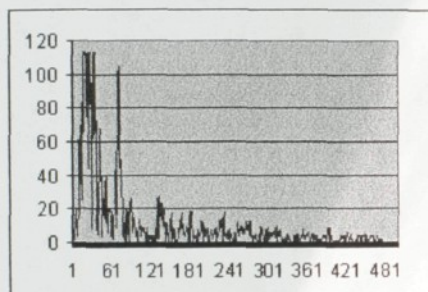


Obr. 7.43. Řez 78-1

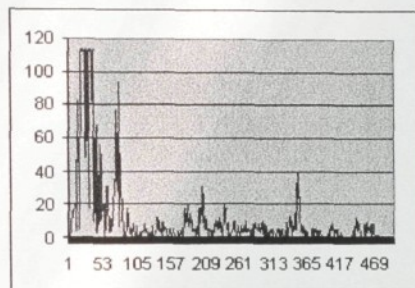
{3}



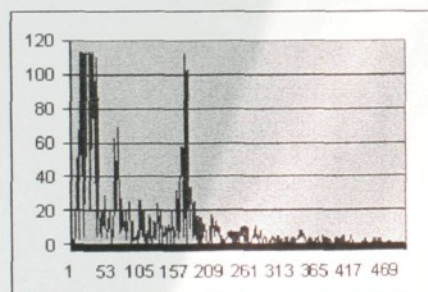
Obr. 7.44. Řez 78-4



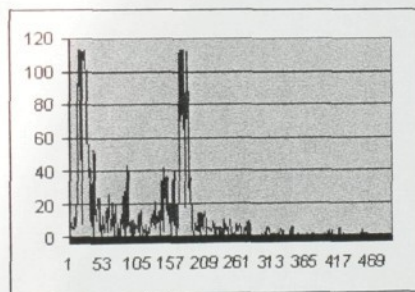
Obr. 7.45. Řez 78-2



Obr. 7.46. Řez 78-5



Obr. 7.47. Řez 78-3

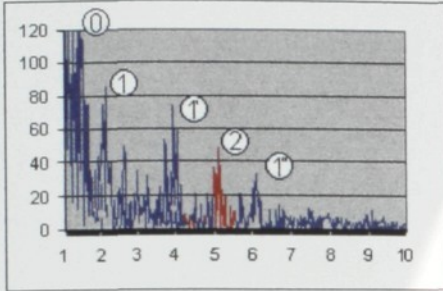


Obr. 7.48. Řez 78-6

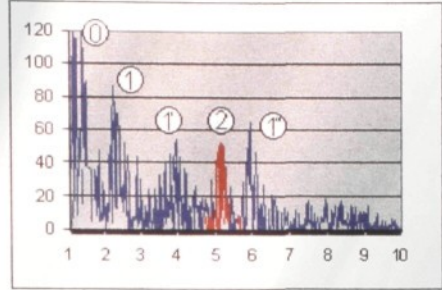
{1}; {3} označení sloupců grafů na stránce
(zobrazení sledovaných oblastí dle obr.31)



... řezy byly provedeny na ose y



Obr. 8.6. Vzorek 1,2 - 1

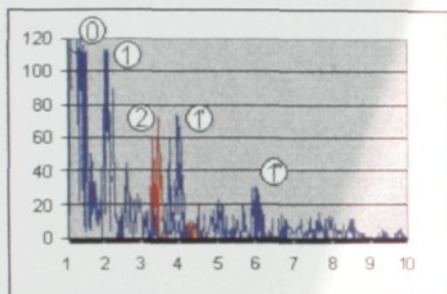


Obr. 8.7. Vzorek 1,2 - 2

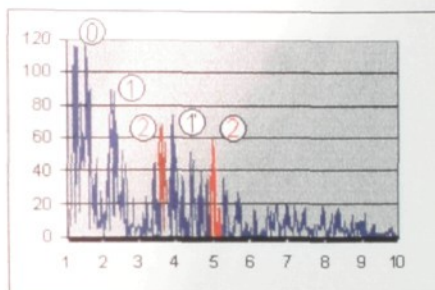
Získané výsledky mimo jiné ukázaly, že pro finální detekci by stačilo sledovat na ose x pouze interval $\langle 2,4 \rangle$. Pokud by se zde mezi echy (1), (1') objevil odraz od spodní hrany (2), drážka je zaplněná plastem. V případě zaplnění drážky vodou se v tomto intervalu žádné echo neobjeví.

Příloha 8.

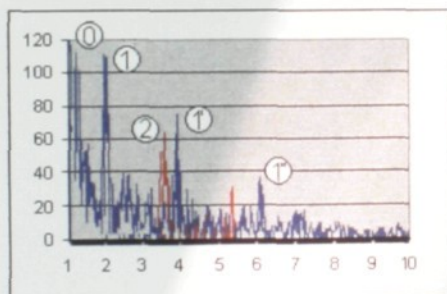
○ Výsledky měření III.



Obr. 8.1. Vzorek 0,825 - 1

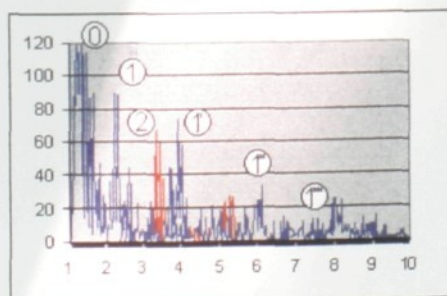


Obr. 8.2. Vzorek 0,825 - 2

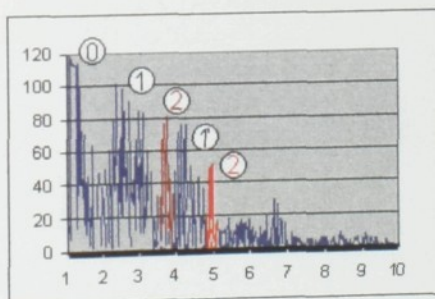


Obr. 8.3. Vzorek 0,825 - 3

Na obrázcích 8.2. a 8.5. nebylo vyhodnocení jednoznačné, předpokládána echa od spodní hrany drážky (2) se objevovala pouze slabě a jejich přesné určení bylo komplikované. Další zkoušky ukázaly, že problém spočíval v neúplném zaplnění drážky.



Obr. 8.4. Vzorek 1 - 1



Obr. 8.5. Vzorek 1 - 2

Příloha 9.

○ První RTG měření

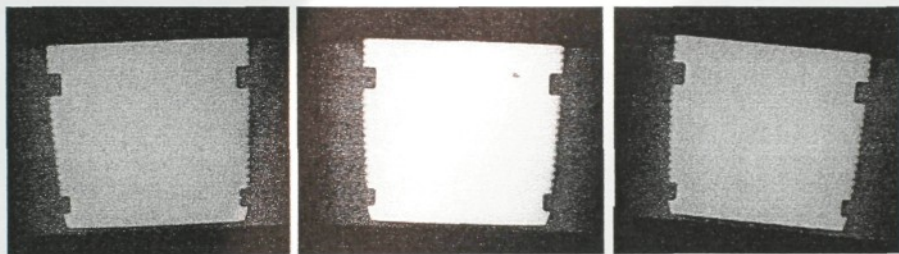
Výsledky prvních RTG zkoušek, prováděných na vzorcích skupin 10,8 + 11,2 (dle kap. 3.2). V této příloze jsou zobrazeny vybrané výsledky dvou okrajových skupin: 10,8 a 11,2. Každý insert byl zrentgenován ve třech rovinách A, B, C, vždy pootočených o úhel 60° (viz experimentální část - obr.26).

Skupina 10,8

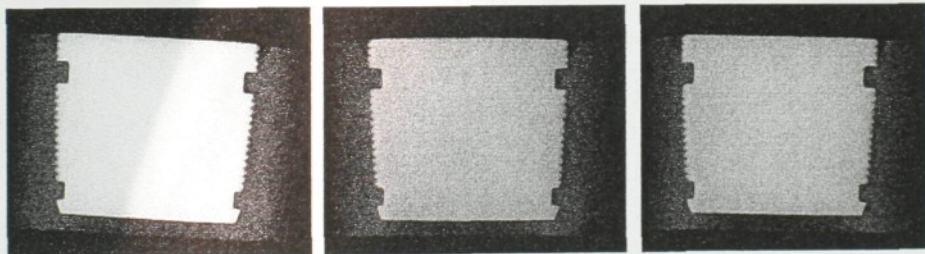
A

B

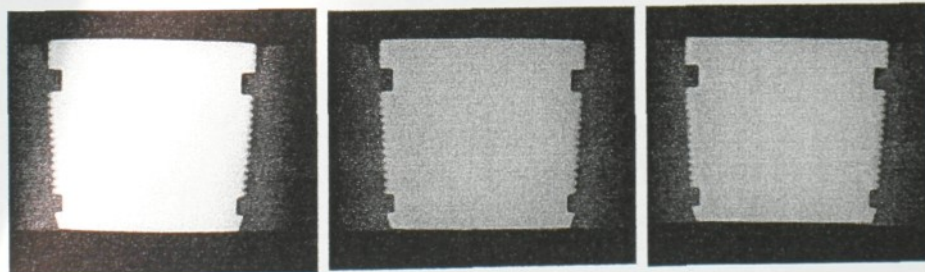
C



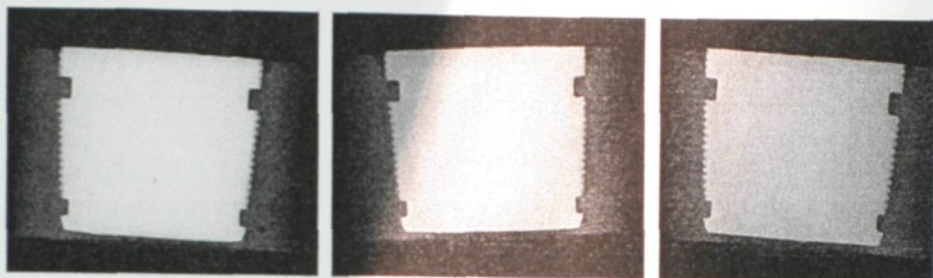
Obr. 9.1. Snímky RTG vzorku 1



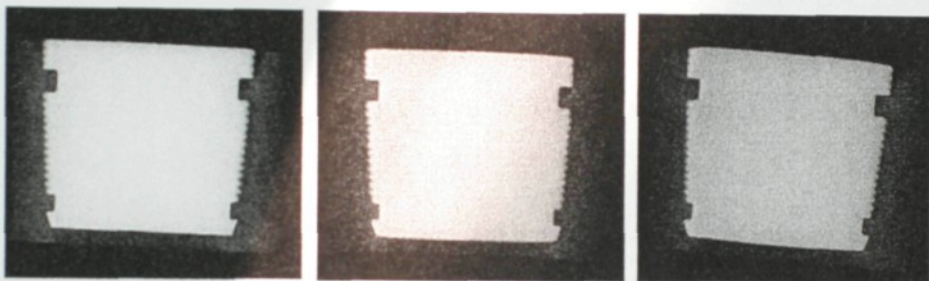
Obr. 9.2. Snímky RTG vzorku 2



Obr. 9.3. Snímky RTG vzorku 4



Obr. 9.4. Snímky RTG vzorku 5



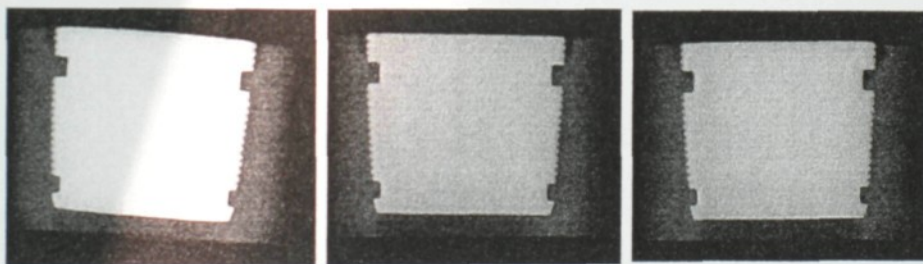
Obr. 9.5. Snímky RTG vzorku 7

Skupina 11,2

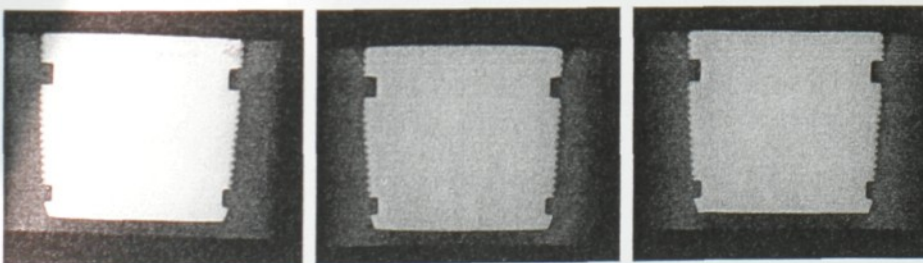
A

B

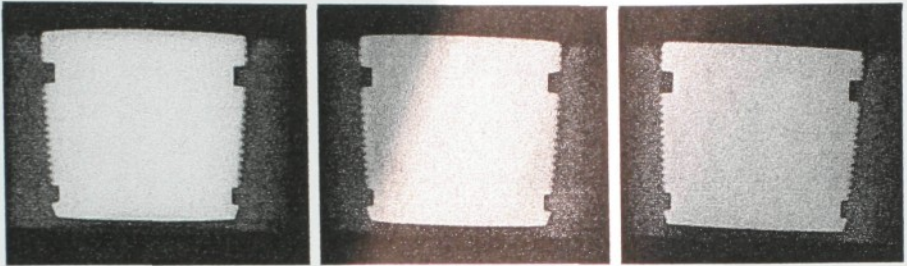
C



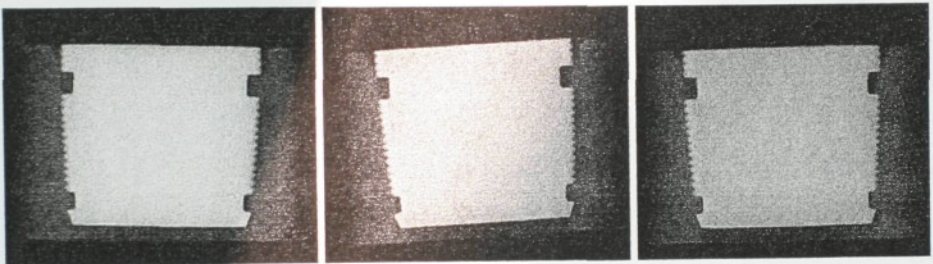
Obr. 9.6 Snímky RTG vzorku 42



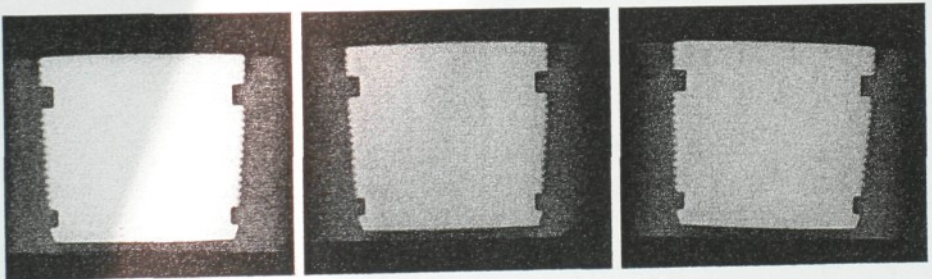
Obr. 9.7. Snímky RTG vzorku 73



Obr. 9.8. Snímky RTG vzorku 76



Obr. 9.9. Snímky RTG vzorku 77



Obr. 9.10. Snímky RTG vzorku 78

Příloha 10.

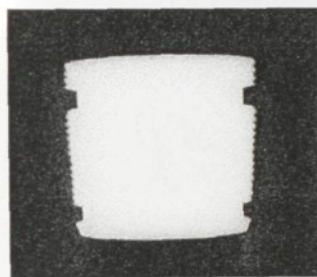
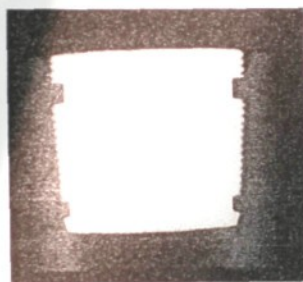
○ Druhé RTG měření

Výsledky RTG zkoušek, prováděných na speciálně upravených vzorcích (dle kap. 3.2.5). V této příloze jsou zobrazeny snímky pořízené na všech insertech skupin: 0,825; 1 a 1,2. Každý insert byl zrentgenován ve dvou rovinách A, B, pootočených přibližně o úhel 90° (viz experimentální část).

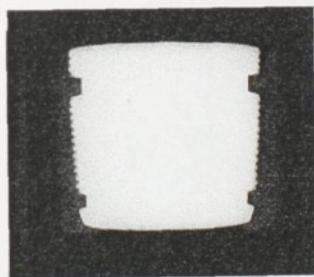
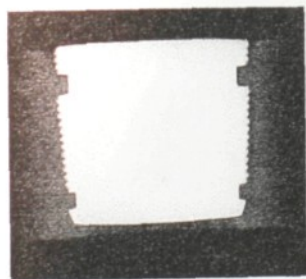
Skupiny 0,825; 1; 1,2

A

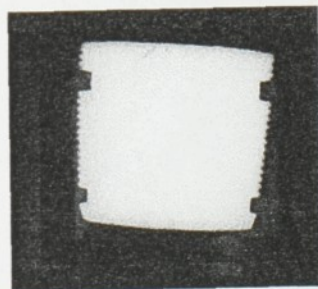
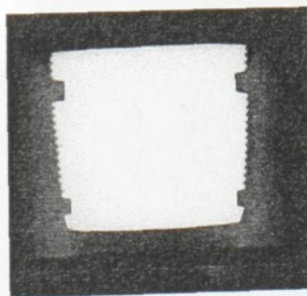
B



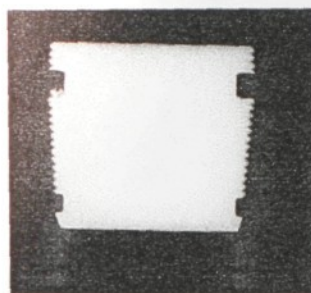
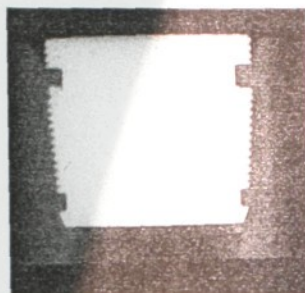
Obr. 10.1. Snímky RTG, vzorek 0,825 - 1



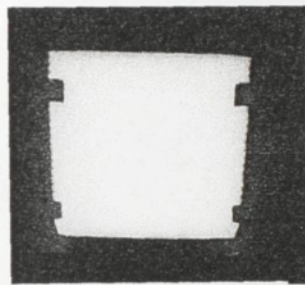
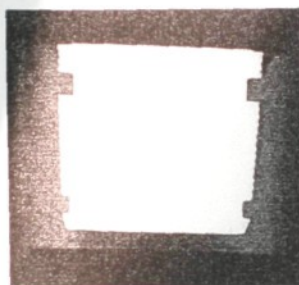
Obr. 10.2. Snímky RTG, vzorek 0,825 - 2



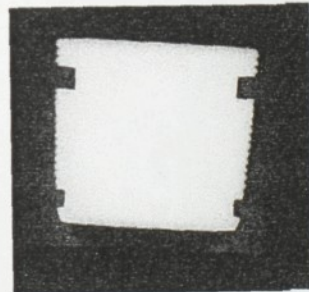
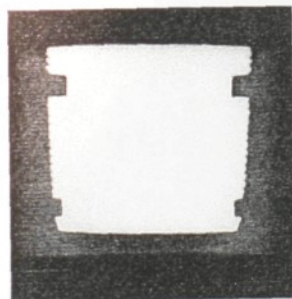
Obr. 10.3. Snímky RTG, vzorek 0,825 - 3



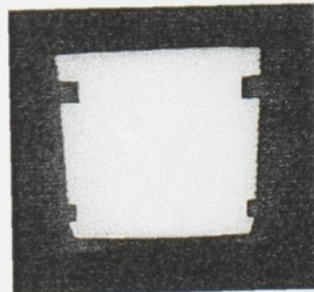
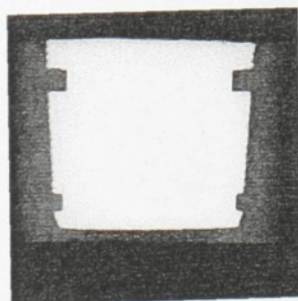
Obr. 10.4. Snímky RTG, vzorek 1 – 1



Obr. 10.5. Snímky RTG, vzorek 1 – 2



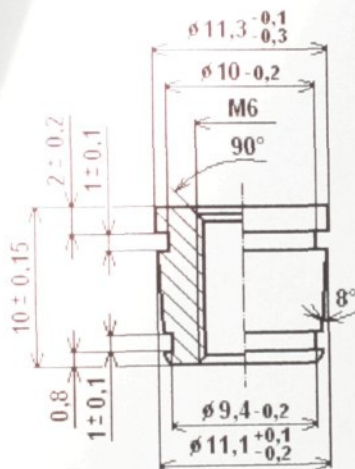
Obr. 10.6. Snímky RTG, vzorek 1,2 – 1



Obr. 10.7. Snímky RTG, vzorek 1,2 – 2

Příloha 11.

- Přesné rozměry mosazné závitové vložky



Obr. 11.1. Kótovaná závitová vložka

Příloha 12.

o Parametry destruktivních zkoušek

a) Zjišťování vytrhávací síly

1) Stroj

Typ stroje	: TICA test 2720, JMP 100/20000 CB
Stručná charakteristika	: stroj pro zjištění max. vytrhávací síly
Pracuje	: samostatně
Řízení stroje	: inkrementální, odměřování po 0,001mm
Způsob upnutí výrobku	: zašroubování výměnného trnu (závit M6) do závitové vložky
Důležité technické parametry	: Tabulka 12.1.

2) Technologie

Kontrolní postup	: zašroubování zkušebního výměnného trnu do mosazné závitové vložky, spuštění vytrhávacího stroje, provedení vytrhávací zkoušky, odečtení a zapsání velikosti vytrhávací síly
Přípravky	: zkušební výměnný trn se závitem M6
Počet zkušebních vzorků	: 1 ZKH M47-D za 3 směny

3) Dělník

Druh práce	: kontrola
Kvalifikační požadavky	: proškolení v rámci vnitropodnikových směrnic
Popis činnosti	: přinést zkušební vzorky, upevnit na stroj, odečíst a zapsat výsledek

Tab. 12.1. Technické parametry TIRAtest 2720

Zkušební síla, max.	20 kN
Zatěžovací stojan	2-vřetenový
Pracovní prostor	
➤ Šířka	450 mm
➤ Výška	1200 mm
Zdvih příčniku, max.	1100 mm
Tuhost	$4 \cdot 10^{-5}$ mm/N
Měření síly	Pomocí výměnného snímače síly
Měřicí rozsah síly	Od 1 % do 100 % jmenovitého zatížení vsazených snímačů
Dovolená odchylka	Třída 1 odpovídající normě DIN 51221, část 1 a ASTM E4 mezi 1 % a 100 % snímače síly jmenovitého zatížení
Měřitelný přírůstek	< 40 ms
Rozsah zkušební rychlosti	0,02 ... 1000 mm/min
Dovolená odchylka rozsahu zkušební rychlosti	< ± 1 % z příslušné hodnoty
Připojené elektrické napětí	1 ~ 230 V / 50 Hz
Jmenovitý příkon stroje	700 VA
Rozměry stroje	Výška × šířka × hloubka 1980 × 900 × 500
Hmotnost stroje	210 kg

b) Zjišťování krouticího momentu**1) Nástroj**

Typ nástroje	: momentový klíč JMN 1/50 CB
Důležité technické parametry	: měřicí rozsah 0-50 Nm
Způsob upnutí výrobku	: do svěráku

2) Technologie

Kontrolní postup	: zkoušený výrobek se upne do svěráku a momentovým klíčem se zjistí maximální krouticí moment
Nářadí	: výměnný trn se závitem M6
Počet zkušebních vzorků	: 1 ZKH M47-D za 3 směny

3) Dělník

Druh práce	: kontrola
Kvalifikační požadavky	: proškolení v rámci vnitropodnikových směrníc
Popis činnosti	: přinést zkušební vzorky, zašroubovat výměnný trn (ocelový šroub se zvýšenou pevností) do mosazné závitové vložky, nasadit momentový klíč, provést zkoušku, odečíst a zapsat výsledek

Příloha 13.

o Ekonomické hodnocení navrhovaného řešení

Ekonomické hodnocení navrhovaného řešení daného problému bylo zpracováno firmou ATG Praha.

Finanční rozsah prací, které by měly předcházet dalšímu postupu:

1. RT (200 ks, 3-4 expozice po 10 ks)	20.000,-
2. VT po RT (na získaných snímcích)	5.000,-
3. VT po vytržení (zpracování)	10.000,-
4. Ověření spolehlivosti UT detekce (cca 200 vzorků)	80.000,-
5. Ověření detekce na vybraných kusech vík v laboratorních podmínkách s použitím manipulátoru č.3 (120 hod)	60.000,-
6. Návrh UZ manipulátoru – technické zadání (dle tohoto zadání bude již vyroben manipulátor pro standardní kontrolu)	40.000,-
7. Zpracování studie pro RT (feasibility study)	40.000,-

CELKEM

255.000,- Kč

(RT- radiografická kontrola, VT- vizuální kontrola, UT- ultrazvuková kontrola)

Tab. 13.1. Efektivita zvolené nedestruktivní kontroly.

počet vík	cena víka [Kč,-]	úspora za rok [Kč,-]	čas na jeden insert [sek]
1	3000	900.000	960
5	3000	4.500.000	192
10	3000	9.000.000	96
20	3000	18.000.000	48
25	3000	22.500.000	38,4

Z uvedené tabulky je patrné, že kontrola i při velmi nízké míře automatizace je dostatečně efektivní.

Předpokládaná finanční náročnost realizace zkušebního standu:

Předpokládaná finanční náročnost realizace zkušebního standu pro namátkovou kontrolu, jak je prováděno doposud (v případě plného ověření metodiky).

1. USPC 3100 jednokanál	300.000,-
2. Držák sondy (3x justace)	250.000,-
3. Digitalizace polohy, 3x pohyb x,y,z	450.000,-
4. Řídící počítač (průmyslová verze)	100.000,-
5. Sondy	80.000,-
6. Přípravky na uchycení vika – pro jednotlivé typy vik	400.000,-
7. Konstrukce manipulátoru	200.000,-
8. Software	300.000,-

CELKEM**2.080.000,- Kč**

Poděkování

Vyjadřuji poděkování vedoucímu své diplomové práce, panu Doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. a konzultantovi panu Ing. Jiřímu Blahuškovi za odborné vedení v dané problematice a za poskytnutí veškerých informací. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zbyňku Zavadilovi, jakož i všem ostatním pracovníkům firmy ATG s.r.o., a katedry materiálu, kteří mi byli nápomocni při řešení daných úkolů.

V Liberci, leden 2004

Martin Fridrich

Prohlášení k využívání výsledků DP _____

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou (bakalářskou, doktorskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

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

- ✓ Jméno a příjmení: Martin Fridrich
- ✓ Adresa: Mileny Hážové 1243, Mladá Boleslav, 293 01
- ✓ Datum: 5. 1. 2004
- ✓ Podpis: 